
CONSTRUCAO E CARACTERIZACAO
DE UM LASER CONTINUO
DE ND:YAG

FERNANDO A. C. TORRE

Orientador:

Prof. Dr. Antonio G. J. Balbin Villaverde

*Este exemplar corresponde à
redação final da Tese
defendida pelo aluno e
aprovada pela comissão
julgadora*

20/03/92

Balbin Villaverde

TRABALHO DE TESE APRESENTADO AO
INSTITUTO DE FÍSICA GLEB WATAGHIN
COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
CIÊNCIAS FÍSICAS

CONSTITUINTES DA BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antonio G. J. Balbin Villaverde (IFGW/UNICAMP)
(Orientador)

Prof. Dr. Jarbas Caiado de Castro Neto (IFQ-SC)

Prof. Dr. Yoshikazo Ernesto Nagai (IFGW/UNICAMP)

Profa. Dra. Elza C. C. Vasconcellos (IFGW/UNICAMP)
(Suplente)

Prof. Dr. Daniel Pereira (IFGW/UNICAMP)
(Suplente)

AOS MEUS PAIS, HEBE E LAYR

AOS MEUS FILHOS, GUSTAVO E DEBORA

AGRADECIMENTOS:

Ao Prof. Balbin, por sua compreensão, companheirismo e convivência profissional.

A Egberto Munin, amigo e companheiro, por sua ajuda na parte eletrônica e pela convivência humana e profissional.

À Carmen Beatriz Pedroso, pela amizade, pelo carinho e por estar sempre perto com sua palavra amiga.

À Vanete Dutra Santana, por sua compreensão e ajuda moral.

A João Batista Rodrigues, pelo apoio técnico.

RESUMO

Foi construída uma fonte trifásica com potência elétrica máxima de 6KW e um fator de ruído menor que 0,5% extremamente estável, a qual foi utilizada para controlar uma lâmpada de Kriptônio da EG&G, a FK-111C-3 capaz de suportar corrente elétrica máxima de 50A em 115V.

Bombeamos então um bastão de Nd:YAG de 3" de comprimento por 1/4" de diâmetro, o qual foi colocado inicialmente em um cavidade comercial da ILC e depois em uma cavidade por nós desenvolvida.

Para caracterizarmos estas duas cavidades foram utilizados espelhos circulares de 1" de diâmetro com 100%, 90% e 80% de reflectividade, bem como "pin-holes" intracavidade para garantirmos saída monomodo (TEM_{00}).

ÍNDICE

CAPÍTULO I

1- Introdução	1.1
2- Características Gerais do Laser de Nd:YAG	1.2
2.1- Nomenclatura	1.2
2.2- Propriedades Físicas	1.3
2.3- Propriedades do Laser	1.3
Bibliografia	1.8

CAPÍTULO II

2- Cavidades	
2.1- Cavidade de Bombeio	
2.1.1- Eficiência Teórica	2.1
2.1.2- Cavidade Desenvolvida	2.7
2.2- Cavidade Ressonante	
2.2.1- Alinhamento da Cavidade	2.11
Bibliografia	2.13

CAPÍTULO III

3- Sistema Hidráulico	
3.1- Considerações Iniciais	3.1
3.2- Trocador de Calor	3.4
3.3- Sistema hidráulico	3.8
Bibliografia	3.15

CAPÍTULO IV

4-Eletrônica Desenvolvida

4.1- Lâmpada	4.1
4.2- Controle de Potência	4.3
4.3- Início de Operação	4.6
4.4- Medidas de Segurança	4.10
4.5- Demais Circuitos Eletrônicos	4.14

CAPÍTULO V

5- Caracterização do Laser de Nd:YAG

Bibliografia	5.21
--------------	------

CAPÍTULO VI

6- Conclusão

Apêndice 1

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1- Diagrama esquemático do laser de Nd:YAG	1.3
Tabela 1.1- Propriedades Físicas e Ópticas do Nd:YAG	1.4
Fig. 1.2- Diagrama dos Níveis de Energia do Nd:YAG	1.5
Fig. 1.3- Espectro de Fluorescência do Nd ⁺³ em YAG à 300K na região de 1,06μm	1.6
Fig. 1.4- Espectro de Absorção do Nd:YAG à 300K	1.7
Tabela 1.2- Propriedades Térmicas do Nd:YAG	1.7
Fig. 2.1- Trajetória dos fótons emitidos pela lâmpada: a) secção transversal, b)vista de topo de uma cavidade elíptica de bombeio	2.3
Fig. 2.2- Secção transversal de uma cavidade elíptica de bombeio. Excentricidade $e=c/a$; distância focal $c=(a^2-b^2)^{1/2}$	2.4
Fig. 2.3- Dependência de eficiência de transferência num refletor elíptico sobre a quantidade r_R/r_L	2.6
Fig. 2.4- Eficiência de uma cavidade de bombeio elíptica	2.7
Fig. 2.5- Reflectividade versus comprimento de onda para os metais mais comumente utilizados como refletores no desenho de bombeio	2.9
Fig. 2.6- Desenho da cavidade elíptica de bombeio desenvolvida. Observa-se as duas camisas contendo respectivamente o bastão e a lâmpada	2.10

Fig. 2.8- Desenho esquemático das duas cavidades plano-paralelas utilizadas	2.12
Fig. 2.9- Desenho esquemático do sistema de alinhamento das duas cavidades	2.12
Fig. 3.1- Trocador de calor desenvolvido	3.7
Fig. 3.2- Desenho esquemático do sistema hidráulico	3.9
Fig. 3.3- Defletor utilizado para aumentar o contato da água gelada com as paredes dos tubos	3.10
Fig. 3.4- Corpo da carcaça do trocador	3.11
Fig. 3.5- Uma das extremidades do trocador mostrando detalhes para o retorno da água	3.12
Fig. 3.6- Detalhe da outra extremidade do trocador mostrando a entrada e saída do circuito primário de água	3.13
Fig. 3.7- Flange de fixação das extremidades ao corpo da carcaça do trocador de calor	3.14
Tabela 4.1- Características da lâmpada	4.1
Fig. 4.1- Espectro de saída da lâmpada FK-111C-3	4.2
Fig. 4.2- Gráfico tensão \times corrente da lâmpada FK-111C-3	4.2
Fig. 4.3- Formas de onda num conversor trifásico totalmente controlado; a) operação não intermitente, b) operação intermitente	4.3
Planilha 1- Diagrama do circuito de controle trifásico, mostrando o banco de SCRs e as placas de controle de fase	4.4

Fig. 4.4- Lógica de disparo para um conversor trifásico totalmente controlado	4.5
Foto 1- Mostra a tensão pico a pico no pior caso	4.7
Foto 2- Mostra a tensão pico a pico no melhor caso	4.7
Planilha 2- Diagrama eletrônico do controle de disparo de um par de SCR	4.8
Fig. 4.5- Ciclo de trabalho para o início da operação do laser, mostrando a lógica de disparo dos componentes	4.9
Planilha 3- Diagrama eletrônico da placa de início	4.11
Planilha 4- Diagrama eletrônico do controle de temperatura	4.12
Planilha 5- Fonte suplementar e controle de booster 1	4.15
Planilha 6- Multiplicador de tensão, rotator de fase e controlador do relê 3	4.16
Planilha 7- Diagrama em blocos das ligações elétricas do sistema	4.17
Fig. 5.1- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 90% de reflectância.	5.2
Fig. 5.2- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 80% de reflectância.	5.3
Fig. 5.3- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 90% de reflectância e "pin-hole" intracavidade de 1,5mm	5.4

Fig. 5.4- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 90% de reflectância com "pin-hole" intracavidade de 2,0mm	5.5
Fig. 5.5- Perfil espacial do feixe a 130cm do espelho de saída,direção vertical, cavidade 2	5.7
Fig 5.6- Perfil espacial do feixe a 130cm do espelho de saída, direção horizontal, cavidade 2	5.8
Fig. 5.7- Perfil espacial do feixe, vista tridimensional	5.9
Fig. 5.8- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 1, com espelho de 90% de reflectância.	5.10
Fig. 5.9- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 1, com espelho de 90% de reflectância e "pin-hole" intracavidade de 2,0mm	5.11
fig. 5.10- Perfil espacial do feixe, em C1, direção vertical	5.12
Fig. 5.11- Perfil espacial do feixe, em C1, direção horizontal	5.13
Fig. 5.12- Perfil espacial do feixe, visão tridimensional	5.14
Tabela 5.1- Resultados experimentais, para C1, para o cálculo dos parâmetros do feixe	5.16
Tabela 5.2- Resultados experimentais, para C2, para o cálculo dos parâmetros do feixe	5.17
Fig. 5.13- Divergência do feixe, em C1	5.19
Fig. 5.14- Divergência do feixe, em C2	5.20
Fig. 5.15- Lente térmica na cavidade C2	5.21

Fig. 5.16- Lente térmica na cavidade C1 5.21

Desenho da fonte de potência desenvolvida 6.2

CAPÍTULO I

I. INTRODUÇÃO

Para a invenção do laser em 1960 muito contribuiu o conceito de emissão estimulada, proposto por Einstein pela primeira vez, em 1916. Este conceito é fundamental para a explicação do efeito laser

O grande impacto do laser tanto na indústria como na pesquisa são consequência das propriedades de sua luz: extremamente concentrada e altamente direcional. Com desenhos apropriados, podemos construir lasers com alto grau de monocromaticidade e polarização.

Três condições básicas são necessárias para um laser funcionar. Primeiro deve existir um meio ativo, isto é, uma coleção de átomos, moléculas ou íons que emitam radiação óptica em alguma parte do espectro eletromagnético. Segundo, deve haver uma inversão de população destes átomos, conseguido através do que se chama de bombeio e finalmente em terceiro, deve acontecer alguma forma de realimentação óptica para que o sistema possa se manter.

Para o meio ativo, usamos um cristal de Nd:YAG o qual será explicado no oportunamente. Para conseguirmos a inversão da população, utilizamos uma lâmpada de Kriptônio, a FK-111C-3 da EG&G, que será discutida no capítulo 4 e para obtermos a realimentação óptica, fizemos uso de duas cavidades plano-paralela, as quais serão discutidas no capítulo 2.

Devemos lembrar que uma importante aplicação no campo científico é a implementação experimental das interações laser para predições e verificações de diversos processos, em particular, os processos ópticos não lineares na faixa do infravermelho. Também devemos considerar o dobramento da frequência e consequentemente bombeio de "dye lasers".

2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO LASER DE ND:YAG

O laser de Nd:YAG é um dos mais populares tipos de laser de estado sólido, possuindo uma combinação de qualidades que o tornam extremamente favorável para este tipo de utilização. Possui uma boa qualidade óptica e uma condutividade térmica bastante alta, além disso, a estrutura cúbica do hospedeiro YAG favorece uma linha de fluorescência bastante estreita, o que resulta em um alto ganho e um baixo limiar. No Nd:YAG, o íon trivalente de Nd substitui o ítrio, também trivalente, não requerendo portanto compensação de carga.

2.1- NOMENCLATURA.

A nomenclatura dos níveis de energia pode ser ilustrada discutindo-se o íon Nd^{+3} . Este íon possui três elétrons na subcamada 4f. No estado fundamental suas órbitas são tão alinhadas que o momento angular orbital é acrescido de $3 + 2 + 1 = 6$ unidades atômicas. O momento angular total $L = 6$ é expresso pela letra I.

Os spins destes três elétrons são alinhados paralelamente, proporcionando um acréscimo de $3/2$ unidades no momento angular, o qual, quando somado antiparalelamente ao momento angular orbital, fornece um momento angular total de $6 - 3/2 = 9/2$ unidades.

De acordo com as regras quânticas de adição do momento angular, o vetor soma do momento angular igual a 6 e do momento angular do spin igual a $3/2$ pode resultar em quatro valores para o momento angular total: $9/2$, $11/2$, $13/2$ e $15/2$.

Os níveis correspondentes a estes valores são ${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$, ${}^4I_{13/2}$ e ${}^4I_{15/2}$. O primeiro deles, que possui a menor energia, é o nível básico; os outros estão entre os primeiros níveis excitados do Nd^{+3} . Estes níveis são distinguíveis pela orientação dos spins a respeito do momento angular orbital resultante.

2.2- PROPRIEDADES FÍSICAS

Além das características do laser e do espectro favorável apresentado pelo Nd:YAG, a rede hospedeira (YAG) é notável por suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

A estrutura YAG é estável desde baixas temperaturas até perto de seu ponto de fusão. O hospedeiro $Y_3Al_5O_{12}$ é um cristal anisotrópico, incolor, com uma estrutura cúbica característica das granadas. No Nd:YAG aproximadamente 1% de Y^{+3} é substituído por Nd^{+3} .

O raio dessas duas terras raras difere em aproximadamente 3%, entretanto se aumentarmos muito a concentração de neodímio obtemos cristais extremamente tensionados, indicando que ou o limite de solubilidade de neodímio foi excedido ou que a rede YAG foi distorcida. Algumas das propriedades físicas do Nd:YAG estão listadas na tabela 1.1, com parâmetros do laser e ópticos.[1-7].

2.3- PROPRIEDADES DO LASER.

O laser de Nd:YAG é um sistema de quatro níveis, como é mostrado de uma maneira simplificada na fig.1.1 [8]. A transição laser tem um comprimento de onda de $1,06\mu m$, originada na componente R_2 do nível ${}^4F_{3/2}$ e termina em Y_3 , componente do nível ${}^4I_{11/12}$.

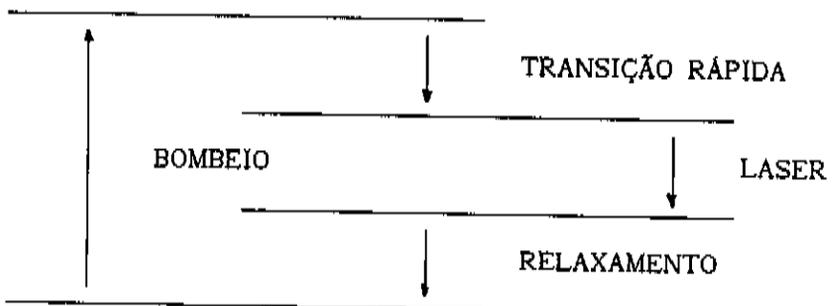


FIG. 1.1- Diagrama esquemático do laser de Nd:YAG, mostrando os quatro níveis de energia, desde o bombeio até o relaxamento.

À temperatura ambiente somente 40% da população do nível ${}^4F_{3/2}$ está em R_2 , os 60% restantes estão no sub-nível R_1 , de acordo com a lei de Boltzmann.

Tab. 1.1- Propriedades físicas e ópticas do Nd:YAG.

fórmula química	Nd:Y ₃ Al ₅ O ₁₂
peso %Nd	0,725
%atômica de Nd	1,0
átomos Nd/cm ³	$1,38 \times 10^{20}$
ponto de fusão	1970 ⁰ C
dureza	1215
densidade	4,56g/cm ³
stress de ruptura	$1,3-2,6 \times 10^3$ kg/cm ²
módulo de elasticidade	3×10^3 kg/cm ²
coeficiente de expansão térmica	
orientação [100]	$8,2 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}, 0-250^0\text{C}$
[110]	$7,7 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}, 10-250^0\text{C}$
[111]	$7,8 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}, 0-250^0\text{C}$
largura de linha	4,5Å
emissão estimulada da seção transversal	$\sigma_{21} = 2,7-8,8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
tempo de relaxação (${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$)	30ns
tempo de vida de radiação (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$)	550µs
tempo de vida da fluorescência espontânea	230µs
energia do fóton à 1,06µm	$h\nu = 1,86 \times 10^{-15} \text{ j}$
índice de refração	1,82 (à 1,0µm)
perda por difração	$\alpha_{sc} \cong 0,002 \text{ cm}^{-1}$

A transição laser ocorre somente através de R_2 logo que este sub-nível é preenchido por R_1 por transição térmica (ver fig.1.2).

O nível fundamental do Nd:YAG é o $^4I_{9/2}$. Há um certo número de níveis relativamente ligados, os quais juntos podem ser vistos como o nível 3 de bombeio. O nível terminal é o de 2111cm^{-1} acima do nível básico e portanto a população é um fator de $\exp(\Delta E/KT) \approx \exp(-10)$ da densidade do nível básico. Como o nível básico não é populado térmicamente, a condição de limiar é obtida facilmente.

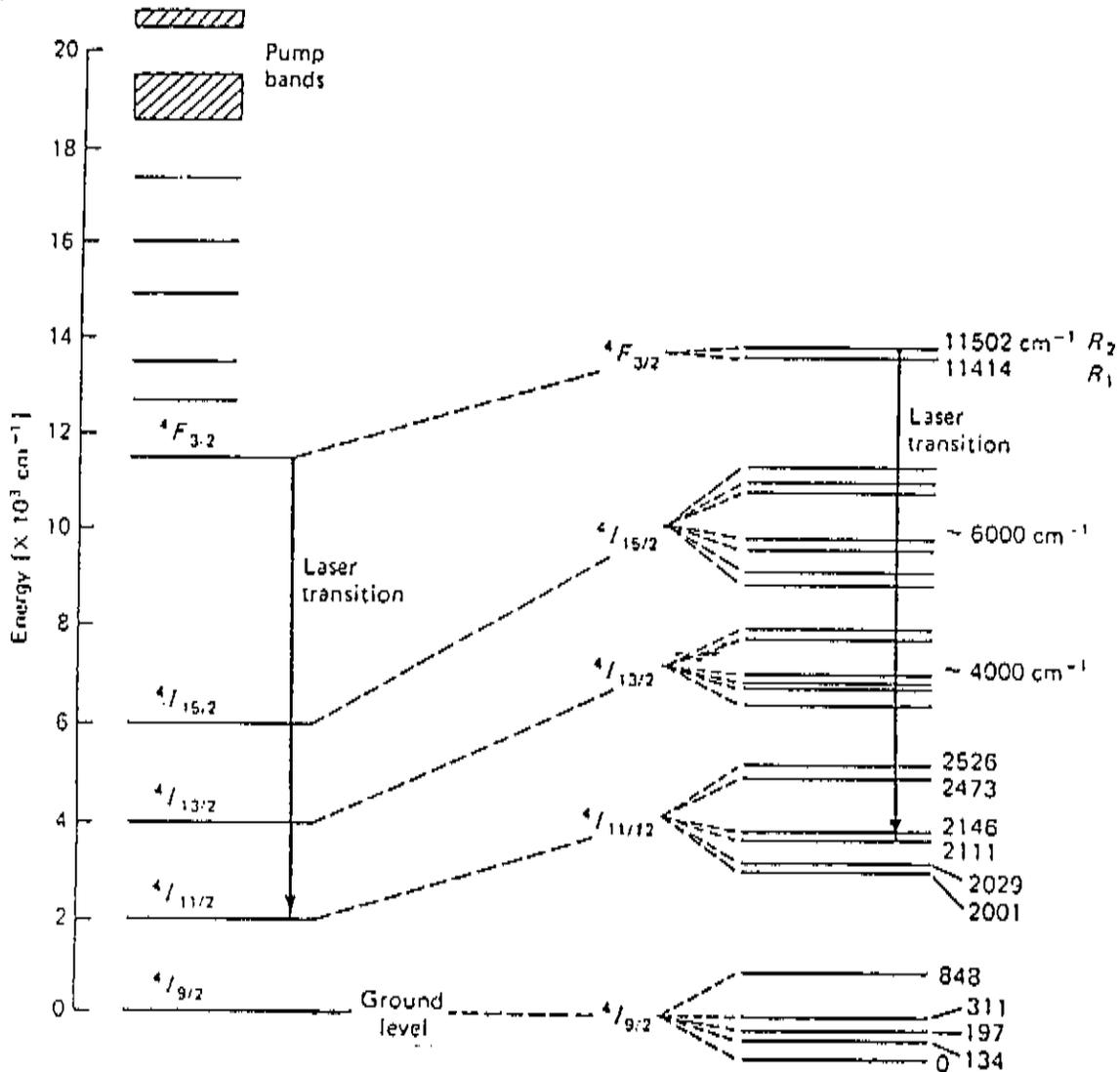


FIG.1.2- Diagrama dos níveis de energia do Nd:YAG

O nível mais alto, ${}^4F_{3/2}$, tem uma eficiência de fluorescência maior que 99,5% [1] e um tempo de vida radioativo de 230 μ s [2]. Este nível emite da seguinte maneira: ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2} = 0,25$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2} = 0,60$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2} = 0,14$ e ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2} < 0,01$. Isto significa que quase todos os íons transferidos do nível básico para as bandas de bombeio param antes do nível de laser e que 60% desses íons causam fluorescência em ${}^4I_{11/2}$.

Os valores publicados da emissão estimulada da secção transversal variam de 2,7 a 8,8.10⁻¹⁹ cm² [9, 3-6].

A fig.1.3 [8] mostra o espectro de fluorescência [7] do Nd⁺³ em YAG perto da região da saída do laser com os correspondentes níveis de energia para várias transições. A absorção do Nd:YAG entre 0,3 a 0,9 μ m é mostrado na fig.1.4 [8] e as propriedades térmicas [10] estão resumidas na tabela 1.2.

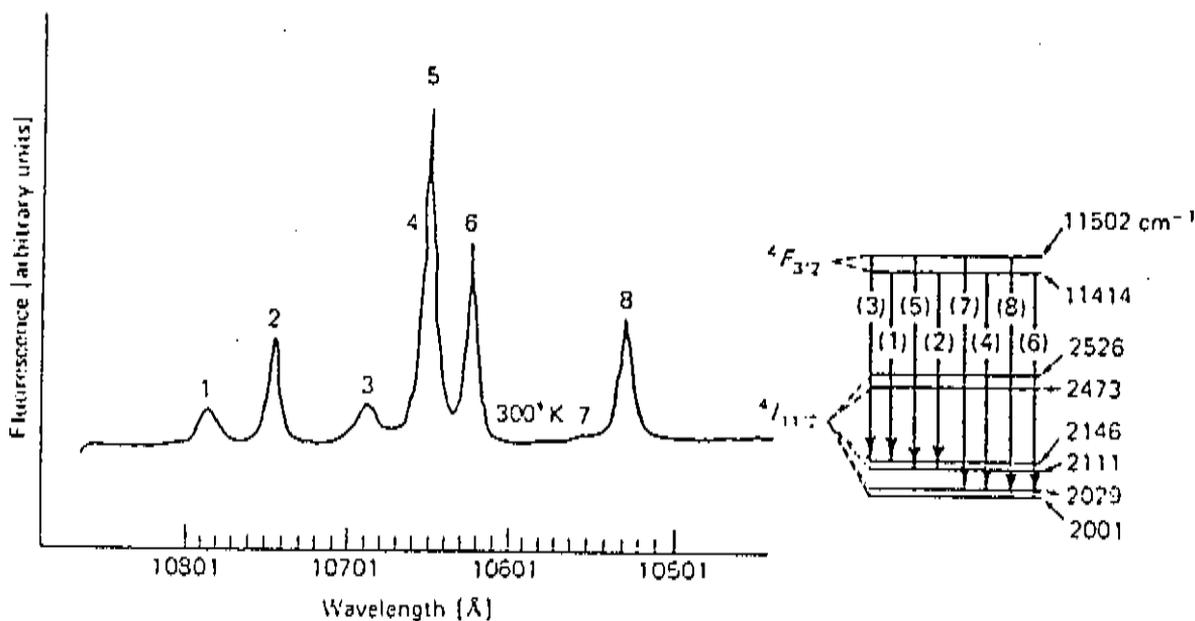


FIG. 1.3- Espectro de fluorescência do Nd⁺³ em YAG à 300K na região de 1,06 μ m

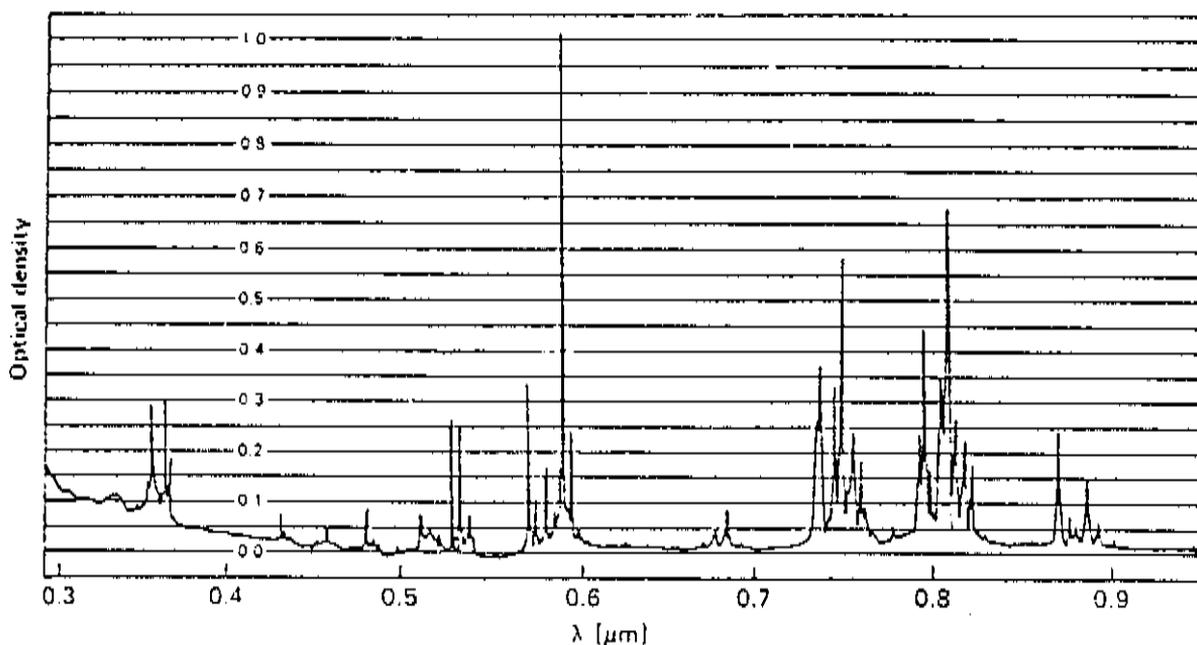


Fig.1.4- Espectro de absorção do Nd:YAG à 300k

Tabela 1.2 [8]-Propriedades térmicas do Nd:YAG

PROPRIEDADES	UNIDADES	300K	200K	100K
Cond. térmica	$\text{wcm}^{-1}\text{k}^{-1}$	0,13	0,21	0,58
calor específico	$\text{wsg}^{-1}\text{k}^{-1}$	0,59	0,43	0,13
dif. térmica	cm^2s^{-1}	0,046	0,10	0,92
exp. térmica	k^{-1}	7,5	5,8	4,25
$\partial n/\partial t$	k^{-1}	$7,3 \cdot 10^{-6}$	-	-

BIBLIOGRAFIA

1. T. Kushida, J. E. Geusic: Phys. Rev. Letters 21, 1172 (1968)
2. T. Kushida, H. M. Marcos, J. E. Geusic: Phys. Rev. 167, 289 (1968)
3. J. K. Neeland, V. Eutuhov: Phys. Rev. 156, 244 (1967)
4. M. Birnbaum, J. A. Gelbwachs: J. Appl. Phys. 43,2335 (1972)
5. M. J. Weber, T. E. Varitimos: J. Appl. Phys. 42, 4996 (1971)
6. S. Singh, R. G. Smith, L. G. VanUiert: Phys. Rev. 810, 2566 (1974)
7. J. A. Koningstein, J. E. Geusic: Phys. Rev. 136, 711 (1964)
8. Walter Koechner: Solid State Laser Engineering, Springer-Verlag
New York Heidelberg berlin 1976
9. R. V. Alves, R. A. Buchanan, K. H. Wickershein, E. A. C. Yates: J.
Appl. Phys. 42, 3043 (1971)
10. P. H. Klein, W. J. Croft: J. Appl. Phys. 38, 1603 (1967)

CAPITULO II

CAVIDADES

2.1- CAVIDADE DE BOMBEIO

2.1.1- Eficiência Teórica

A eficiência em transferir a radiação de uma fonte de bombeio para o meio laser determina a eficiência geral do sistema. Existem inúmeras geometrias para bombeamento, tais como: bombeamento lateral, bombeamento axial.

No bombeamento lateral, um bastão cilíndrico é bombeado por uma lâmpada cilíndrica ou helicoidal, cuja luz atinge o meio ativo perpendicularmente ao feixe do laser.

Sem sombra de dúvidas a configuração mais utilizada de bombeamento lateral é a cavidade elíptica, onde o bastão e a lâmpada são colocados respectivamente nos focos da elipse.

Esta configuração é baseada em que os raios originados em um dos focos, obrigatoriamente serão refletidos para o outro foco. Em um cilindro elíptico haverá transferência de energia de uma fonte linear colocada em um dos focos para o meio ativo colocado no outro foco. O cilindro elíptico é fechado por duas tampas plano-paralelas também refletoras, que o torna opticamente infinitamente longo.

A energia total de bombeio que é transferida da lâmpada ao bastão pode ser aproximada para:

$$\eta = \eta_{ge} * \eta_{op} \quad (1)$$

com:

η_{ge} : coeficiente geométrico de transferência

η_{op} : eficiência óptica da cavidade

Onde η_{ge} representa a fração calculada de raios deixando a lâmpada e que atinge o bastão tanto direta como depois de refletir nas paredes da cavidade e η_{op} inclui todas as perdas da cavidade; este parâmetro pode ser expresso por:

$$\eta_{op} = r_w (1 - r_r)(1 - a)(1 - f) \quad (2)$$

com:

r_w : reflectividade das paredes para a banda de bombeio

r_r : reflexões na superfície do bastão ou das camisas de refrigeração

a : perda por absorção no meio óptico, tal como o líquido de resfriamento

f : proporção da área não refletora da cavidade em relação à área interna, este fator refere-se a aberturas na cavidade para inserir-se o bastão e a lâmpada

Chamamos a atenção que as equações (1) e (2) são aproximações, levando-se em conta que as radiações da lâmpada atingirão o bastão após somente uma reflexão. Se quisermos levar em conta múltiplas reflexões devemos expressar as equações (1) e (2) em séries.

A cavidade elíptica foi extensivamente discutida na literatura [1-5]. A fonte de bombeio é usualmente tratada como um cilindro irradiador, o que implica em que a fonte terá um brilho constante através de seu diâmetro quando vista de qualquer ponto da cavidade.

A luz que chega ao bastão sem refletir na parede elíptica será levada em consideração, mas a luz que retorna à lâmpada, refletida pela parede, será assumida perdida.

A reflexão na parede elíptica é assumida perfeita. Na prática isto não ocorre, pois haverá uma pequena perda em cada reflexão, mas como a maior parte da luz irá até o bastão na primeira reflexão, isto não afetara muito as relações a serem obtidas.

Assumiremos que a cavidade elíptica possui em cada extremidade, superfícies perfeitamente polidas perpendiculares ao eixo do cilindro elíptico.

Na fig.2.1 [8] as trajetórias dos fótons são mostradas como originadas de um elemento de volume dv da fonte. Na fig.2a, deixam a superfície de fonte normalmente e permanecem num plano seccional. Figura 2b mostra fótons que deixam a fonte em trajetórias que formam ângulos com o plano seccional da elipse. Neste caso, estes fótons podem ser refletidos pelas "tampas" do cilindro elíptico.

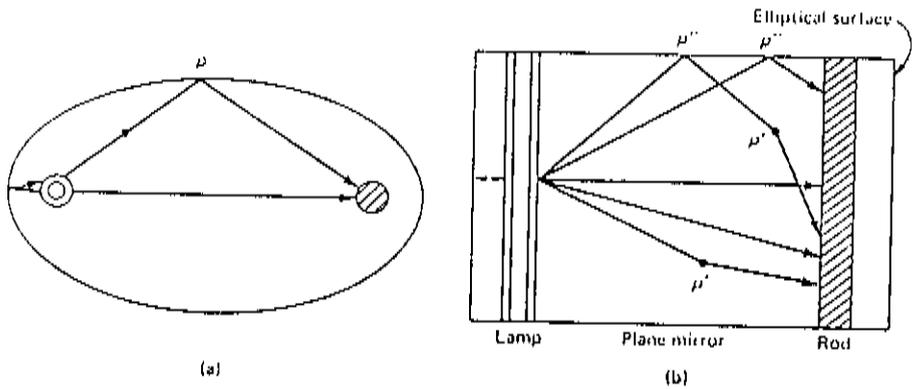


Fig. 2.1- trajetória dos fótons emitidos pela lâmpada: a) seção transversal, b) vista de topo de uma cavidade elíptica de bombeio.

Nas expressões teóricas obtidas para a eficiência da configuração elíptica, o sistema de bombeio é usualmente caracterizado pelo raio do bastão e pelo raio da lâmpada r_R/r_L , pelo raio da lâmpada e pelo semi-eixo maior r_L/a e pela excentricidade $e = c/a$, onde $2c$ é a separação confocal.

Considere um ponto qualquer P na superfície da cavidade com uma distância I_R do cristal e I_L da lâmpada como mostrado na fig.2.2 [8].

Suponha a lâmpada com um raio r_L , então como consequência da conservação dos ângulos, depois da reflexão a imagem terá um raio $r'_L = r_L I_R / I_L$. Isto significa que a porção do refletor elíptico perto da lâmpada formará uma imagem aumentada do bastão enquanto que o porção perto deste formará uma imagem reduzida da lâmpada.

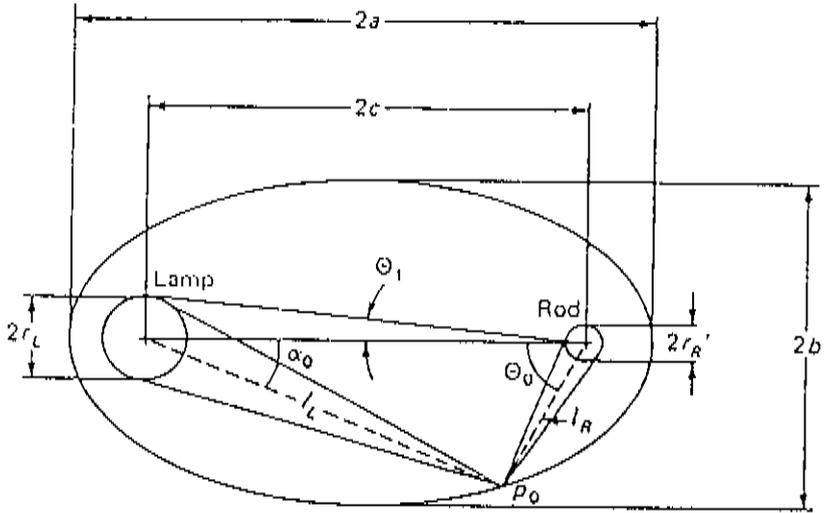


Fig. 2.2- seção transversal de uma cavidade elíptica de bombeio. Excentricidade $e = c/a$; distância focal $c = (a^2 - b^2)^{1/2}$

Um ponto P_0 , com ângulos α_0 e θ_0 , medidos em relação à lâmpada e ao bastão respectivamente, pode ser definido dividindo-se estas duas regiões.

Neste ponto, a elipse gera uma imagem da lâmpada que preenche exatamente o diâmetro do bastão. Da propriedade da elipse e notando que em $P_0 I_R / I_L = r'_L / r_L$, obtemos:

$$\cos\alpha_0 = \frac{1}{e} \left[1 - \frac{1 - e^2}{2} \left(1 + \frac{r_r}{r_l} \right) \right] \quad (3)$$

$$e \quad \text{sen}\theta_0 = \left(\frac{r_l}{r_r} \right) \times \text{sen}\alpha_0 \quad (4)$$

O coeficiente geométrico de transferência da cavidade pode ser calculado considerando-se qual fração de energia irradiada pela lâmpada em um ângulo α_0 é absorvida pelo bastão.

Integrando-se sobre todos os ângulos chegamos a:

$$\eta_{ge} = \frac{1}{\pi} \left[\alpha_0 + \left(\frac{r_r}{r_l} \right) \times \theta_0 \right] \quad (5)$$

Esta expressão está plotada na fig.2.3 [9]. Uma certa porção da superfície refletora atrás da lâmpada é encoberta por esta. Em lâmpadas contínuas, o plasma é relativamente fino e a radiação de bombeio refletida é absorvida por ele. Se nós assumimos que esta radiação refletida de volta à lâmpada é perdida, precisamos reduzir o ângulo θ_0 por θ_1 , onde:

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{r_l}{4ae} \quad (6)$$

e finalmente obtemos o coeficiente de transferência :

$$\eta'_{ge} = \frac{1}{\pi} \left[\alpha_0 + \left(\frac{r_r}{r_l} \right) (\theta_0 - \theta_1) \right] \quad (7)$$

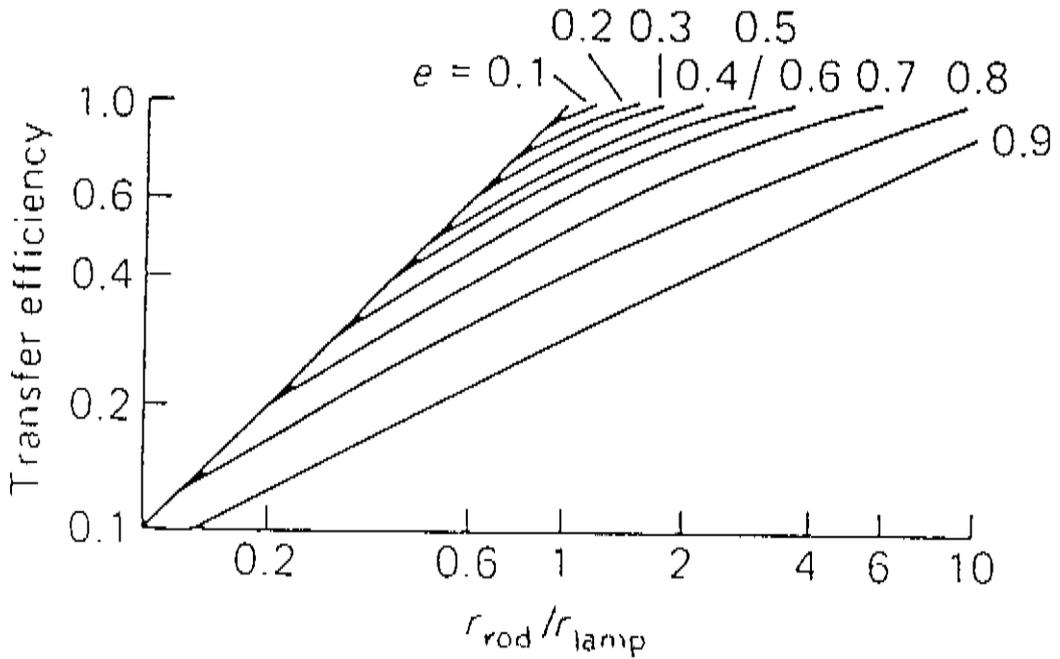


Fig. 2.3- Dependência da eficiência de transferência num refletor elíptico sobre a quantidade r_R / r_L

Percebe-se pelas figuras 2.3 e 2.4 que a eficiência aumenta com o aumento da relação r_R/r_L e com a diminuição da excentricidade "e".

Isto decorre do fato que a magnificação da fonte de bombeio aumenta com a excentricidade da elipse. Uma eficiência superior é obtida portanto para uma cavidade quase circular.

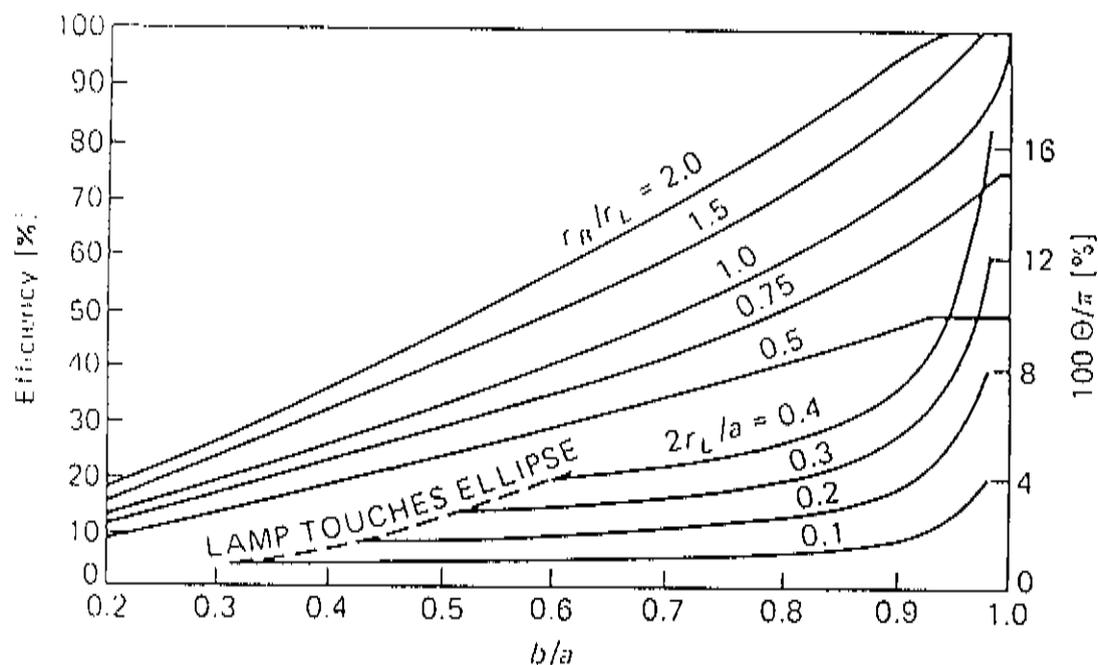


Fig.2.4- Eficiência de uma cavidade de bombeio elíptica simples. As curvas superiores são para $2r_L/a=0$, enquanto o inferior fornece a perda devido ao tamanho finito da lâmpada. Multiplica-se a perda por r_r/r_l e subtrai-se da eficiência fornecida pela curva superior. Escala à esquerda é para o conjunto superior somente e o da direita para o inferior.

2.1.2- Cavidade Desenvolvida

No desenvolvimento da cavidade dois parâmetros foram considerados: eficiência de bombeio e fácil manutenção.

A refrigeração da cavidade requer muito cuidado. A potência elétrica máxima que a lâmpada consegue agüentar é de 6 Kw (ver tab. 4.1, pg.4.1), isto em uma área muito pequena, fornecendo portanto uma alta densidade de energia.

Decidiu-se então pelo desenho de uma cavidade onde tanto o bastão quanto a lâmpada estão envoltos por tubos de vidros (camisas) por onde a água de refrigeração passa, mantendo com isto o

interior desta totalmente seco, prolongando desta forma a vida útil da camada refletora.

Não somente a lâmpada e o bastão necessitam de refrigeração, também a superfície elíptica precisa ser refrigerada, pois como ela não é 100% refletora para todos os comprimentos de onda emitidos pela lâmpada, há um grande aquecimento de suas paredes, precisando este calor ser drenado.

Mostramos na fig. 2.5 a cavidade desenvolvida por nós. Pode-se notar a cavidade refletora elíptica, composta por dois semi-cilindros elípticos simétricos, tendo cada um entrada e saída da água de refrigeração. As duas laterais do cilindro elíptico, perpendiculares ao seu eixo, também são simétricas, possuindo dois orifícios para a lâmpada e bastão, que são posicionados nos focos da elipse.

A água de refrigeração da lâmpada entra e sai axialmente pela extremidade desta e a do bastão, pelos dois tubos perpendiculares ao eixo deste (ver fig. 2.5).

O material utilizado para o corpo cilíndrico foi uma bucha de bronze, torneada nas dimensões requeridas e as superfícies planas são de latão, tendo sido depois de pronta, totalmente niquelada, recebendo posteriormente um banho de prata eletrolítica. Conforme podemos observar na fig. 2.5, para o comprimento de onda de absonção do Nd:YAG, que fica próximo de $800\mu\text{m}$, a prata seria o material mais indicado, tendo sido escolhido principalmente por ter a cavidade seu interior totalmente seco, ao contrario de outras cavidades usuais que são imersas em água, que rapidamente oxidaria esta camada.

As dimensões desta cavidade, que chamaremos de C1 são as seguintes:

comprimento : $L = 76,66\text{mm}$

eixo maior : $2a = 70,50\text{mm}$

eixo menor : $2b = 66,66\text{mm}$

Também utilizamos uma cavidade comercial (C2) recoberta por um banho de ouro, inserida em um corpo de acrílico, da marca X, com as seguintes dimensões:

comprimento : $L = 76,66\text{mm}$

eixo maior : $2a = 38,12\text{mm}$

eixo menor : $2b = 31,00\text{mm}$

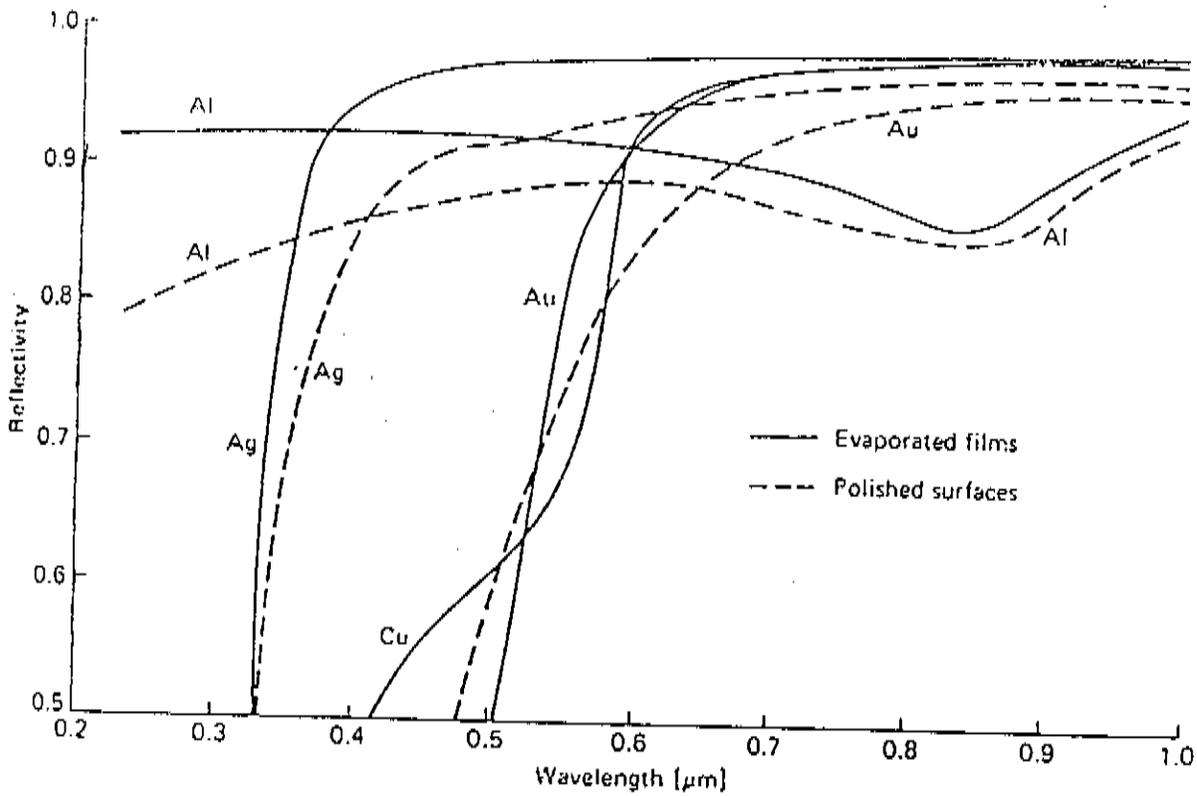


Fig. 2.5- Reflektividade versus comprimento de onda para os metais mais comumente utilizados no revestimento de cavidades de bombeio

Laser Nd:YAG

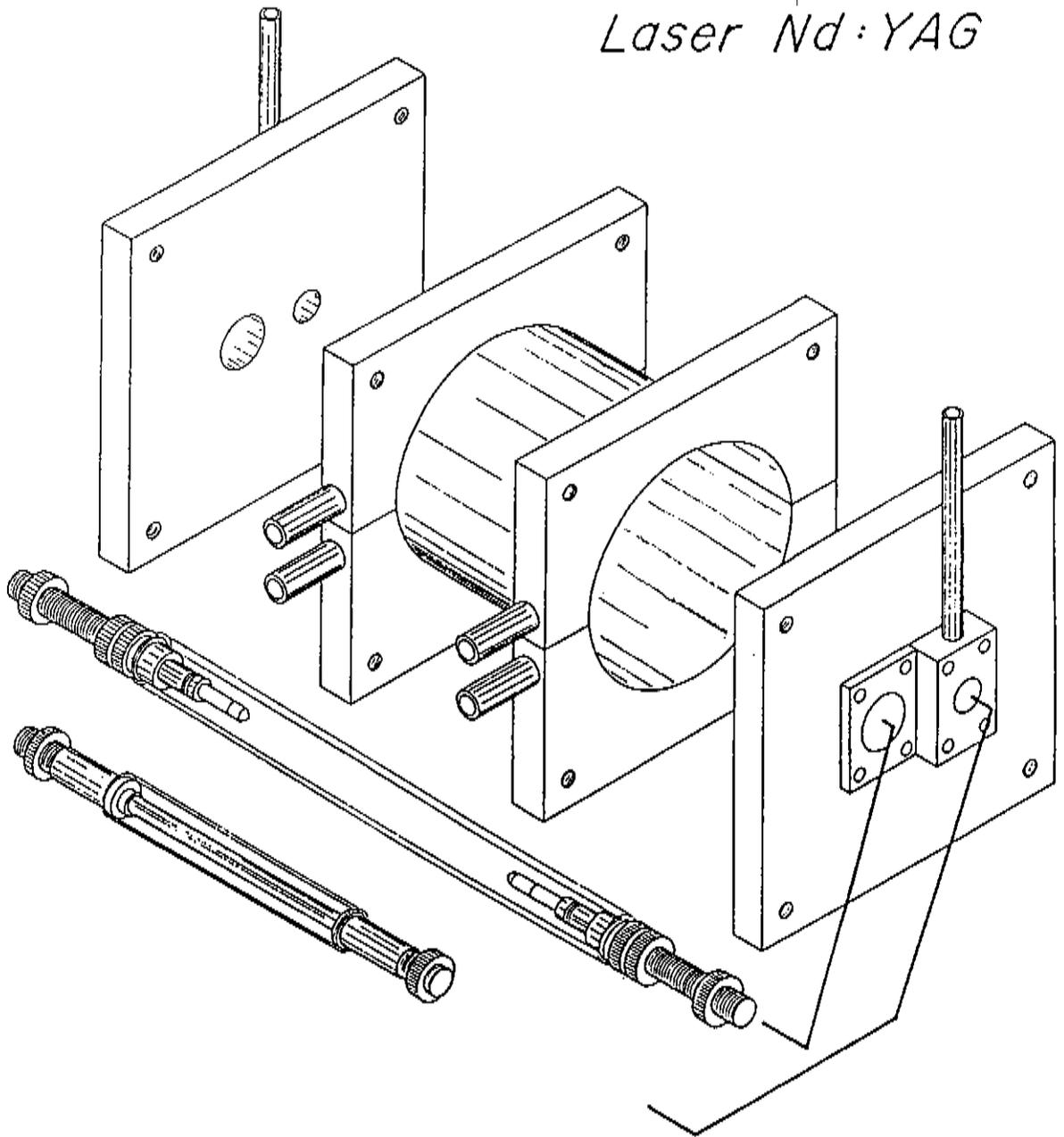


Fig. 2.6- Desenho da cavidade elíptica de bombeio desenvolvida. Obser-
va-se as duas camisas contendo respectivamente o bastão e a lâmpada.

2.2.1- Alinhamento da Cavidade

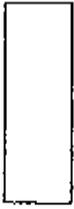
Tanto a cavidade C1 como C2 são plano-paralelas. A cavidade C1 foi montada sobre uma base de alumínio de 3cm de espessura, com os espelhos fixados em placas também de alumínio com a mesma espessura e fixados nas extremidades desta base, distanciados de 57,62cm. Sobre esta base vai uma tampa em "U" de galvanizado, formando o conjunto uma caixa bastante compacta e de fácil manuseio sobre a bancada óptica onde esta localizada.

A cavidade C2 está localizada sobre trilho e possui o mesmo distanciamento dos espelhos que C1, ficando este trilho fixo sobre a bancada.

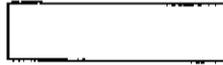
O espelho de ressonância possui uma reflectividade de 100% (R1) e o de saída 90% (R2). Podemos observar o desenho esquemático da cavidade com os espelhos e bastão de Nd:YAG na fig.2.7.

Para o alinhamento das duas cavidades utilizamos o mesmo método, esquematizado na fig.2.8, e que consiste no seguinte: alinhamos o feixe do laser de He-Ne paralelo à bancada e o fazemos incidir nos espelhos auxiliares Esp.1 e Esp.2. Através do correto ajuste destes espelhos, fazemos com que o feixe incida perpendicularmente à face do bastão, passando pelo seu eixo. Isto é feito utilizando-se dois "pin-holes" colocados na cavidade de bombeio, junto ao bastão, mantendo-os fixos durante todo o processo. O Esp.1 é responsável pelo feixe indidente na face 1 do bastão e o Esp.2 pelo que sai da face 2 do mesmo. Através de ajustes cuidadosos, ora em Esp.1 ora em Esp.2 vai se fazendo com que o feixe passe pelos dois "pin-holes" ao mesmo tempo. Quando se consegue o máximo de intensidade do feixe na face 2 do bastão, a cavidade estará devidamente alinhada.

ESPELHO
RESONANTE
R1=100%



BARBAO



ESPELHO
DE SAÍDA
R2= 90%



18,00

7,62

32,00

DISTANCIA EM CM

Fig. 2.7- Desenho esquemático das duas cavidades plano-paralelas utilizadas.

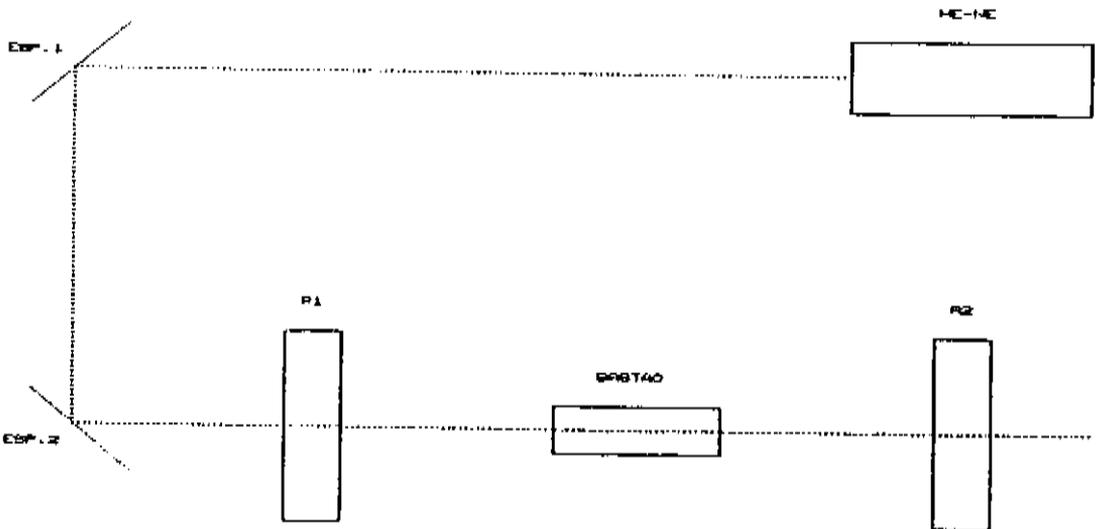


Fig. 2.8- Desenho esquemático do sistema de alinhamento das duas cavidades.

BIBLIOGRAFIA

1. S. B. Schuldt, R. L. Aagard: Appl. Opt. 2, 509 (1963)
2. V. Eutuhov, J. K. Neeland: Appl. Opt 6, 437 (1967)
3. J. G. Edwards: Appl. Opt.6, 837 (1967)
4. D. Fekete: Appl. Opt. 5, 643 (1966)
5. C. Bowness: Appl. Opt. 4, 103 (1965)
6. G. E. Devlin, J. MacKenna, A. D. May e A. L. Schawlow: Appl. Opt. 1, 11 (1962)
7. J. MacKenna: Appl. Opt. 2, 303 (1963)
8. Yu. A. Kalinin, A. A. Mark: Opt. Tech. 37, 129 (1970)
9. Walter Koechner: Solid State Engineering, Springer Verlag New York Berlin 1976

SITEMA HIDRAULICO

3.1- Considerações Iniciais

Qualquer tipo de laser de estado sólido precisa dissipar uma grande quantidade de calor, que aparece porque:

- a diferença de energia entre as bandas de bombeio e os níveis de energia de fluorescência é cedida à rede hospedeira através de radiação de transição.

- a eficiência quântica dos processos de fluorescência envolvidos na transição laser é menor que a unidade, portando alguns dos fótons perdem totalmente sua energia para a rede hospedeira.

- o espectro de distribuição da luz de bombeio é tal que há uma considerável absorção pela rede hospedeira, principalmente na região ultra-violeta e infra-vermelho, e nestes casos toda esta radiação é transformada em calor.

Os efeitos térmicos no bastão são uma combinação do calor gerado pela absorção decorrente da radiação de bombeio e do calor que flui através dos processos de resfriamento.

Aquecimento e resfriamento do bastão levam a uma distribuição não uniforme da temperatura no mesmo, o que resulta numa distorção do feixe devido a uma dependência que o índice de refração possui com a temperatura e do "stress" da rede hospedeira.

As distorções típicas que ocorrem em um laser de estado sólido, como resultado de uma distribuição não uniforme de calor são: lente térmica e bi-refringência.

A mudança no índice de refração pode ser separada numa variação da temperatura e do "stress" do material, o que nos leva a:

$$n(r) = n_0 + \Delta n(r)_r + \Delta n(r)_\epsilon$$

Onde $n(r)$ é a variação radial do índice de refração, n_0 é o índice de refração no centro do bastão e $\Delta n(r)_r$ e $\Delta n(r)_\epsilon$ são as mudanças decorrentes da variação da temperatura.

A mudança no índice de refração decorrente da temperatura pode ser expressada por:

$$\Delta n(r)_r = [T(r) - T(0)] \left(\frac{dn}{dT} \right) \quad [1]$$

com:

$$T(r) = T(r_0) + \left(\frac{Q}{4K} \right) (r_0^2 - r^2) \quad [2]$$

$$T(0) - T(r_0) = \frac{P_a}{4\pi KL} \quad [3]$$

Onde $T(r)$ fornece a variação de calor radial no bastão; $T(r_0)$ nos dá a temperatura na superfície do bastão e r_0 é o raio do bastão; P_a é o calor total dissipado no bastão; L o comprimento dele e K sua condutividade térmica.

Substituindo estas duas equações [2 e 3] em [1] chegamos a:

$$\Delta n(r)_r = - \frac{Q}{4K} \frac{dn}{dT} r^2 \quad [4]$$

A contribuição devido ao stress num bastão cilíndrico, nas direções r e ϕ , é dado por [1]:

$$\Delta n_r = - \frac{1}{2} n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_r r^2 \quad [5]$$

$$\Delta n_\phi = - \frac{1}{2} n_0^3 \frac{\alpha Q}{K} C_\phi r^2 \quad [6]$$

Como pode ser visto nas equações [4, 5 e 6] o índice de refração é uma variação quadrática com o raio, sendo que um feixe ao longo do bastão sofrerá uma variação quadrática em sua fase e isto é equivalente a uma lente esférica. O comprimento focal de tal meio, onde o índice de refração varia de acordo com [7] é dado por [8].

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{2r^2}{b^2} \right) \quad [7]$$

$$f \approx \frac{b^2}{4n_0 L} \quad [8]$$

Colocando-se agora as equações [4, 5 e 6] na primeira equação, obtemos:

$$n(r) = n_0 \left[1 - \frac{Q}{2K} \left(\frac{1}{2n} \frac{dn}{dT_0} + n_0^2 \alpha C_{r,\phi} \right) r^2 \right] \quad [9]$$

Comparando [7] e [9] chegamos a:

$$f' = \frac{K}{QL} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 \right)^{-1} \quad [10]$$

Para chegarmos à expressão final do comprimento focal para o bastão de Nd:YAG, vamos incluir a contribuição causada pelas extremidades do bastão, que sofrem uma variação na planicidade devido a distorções devido ao "stress" do material.

A variação da planicidade é dada por:

$$l(r) = \alpha_0 l_0 [T(r) - T(0)] \quad [11]$$

Onde l_0 é o comprimento da seção final do bastão ocorre, fazendo $l_0 = r_0$ e usando a equação [2], com $R = -(d^2l/dr^2)^{-1}$ temos:

$$f'' = \frac{R}{2 (n_0 - 1)} = K [\alpha Q r_0 (n_0 - 1)] \quad [12]$$

E finalmente, combinando-se os efeitos da dependência da temperatura e do "stress", chegamos a:

$$f = \frac{KA}{P_a} \left[\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right] \quad [13]$$

Com A sendo a seção transversal do bastão e P_a é o calor total dissipado nele.

Colocando-se os parâmetros apropriados na equação [13], obtemos uma variação de cerca de 20% no comprimento focal do bastão devido à dependência com a temperatura e somente 6% devido ao "stress".

Os gráficos das figuras 5.15 e 5.16, pag.5.20, mostram o efeito desta dependência.

O calor gerado pela lâmpada ($\approx 1400\text{cal}$) é absorvido pelo bastão e pela cavidade, precisando ser removido do sistema para evitar danos e diminuir os efeitos de lente térmica e bi-refringência.

O sistema de resfriamento escolhido para o projeto foi trocar calor entre dois fluidos, no caso água-água. Este fluido é forçado sob pressão nas camisas que envolvem tanto a lâmpada quanto o bastão (ver cap 2, fig.2.5, pág.2-10).

A diferença de temperatura entre a lâmpada e fluido de resfriamento é função tanto da velocidade de escoamento como das propriedades de resfriamento do líquido utilizado. À baixas velocidades o escoamento será laminar e a troca térmica será predominantemente por condução entre a camada estacionária de fluido e o líquido circundante. Para aumentarmos então a eficiência, forçamos um escoamento turbulento e conseqüentemente melhoramos a troca térmica entre lâmpada e fluido.

O aumento de temperatura do líquido de resfriamento quando passa através da cavidade é dado por:

$$\Delta T = \frac{Q}{C_p \times m} \quad (1)$$

Onde Q é o calor extraído, C_p o calor específico do líquido de resfriamento e m é o fluxo de massa.

Como citado anteriormente, utilizamos para a troca térmica água, que possui inúmeras vantagens sobre outros fluidos: não se decompõe e é quimicamente estável à intensa radiação ultra-violeta emitida pela lâmpada.

A fim de que o sistema possua uma eficiente troca térmica, todo o cuidado deve ser tomado no desenvolvimento do trocador de calor, o qual irá fazer a troca de calor entre o circuito primário (água em contato com o bastão e a lâmpada) e a água secundária (sistema de água gelada do prédio).

Como já sabemos, o fluxo de calor entre dois fluidos separados por uma parede é dado por:

$$Q = U.S.\Delta t \quad (2)$$

Onde Q é o fluxo de calor trocado (Kcal/hr) e é uma imposição do processo, ou seja, é a quantidade de calor que precisamos retirar de um fluido para que este se apresente a uma temperatura conveniente. U é o coeficiente global de transmissão de calor (Kcal/m²hr), o qual terá um valor intrínscico ao trocador de calor, às propriedades dos fluidos que trocam calor entre si e às velocidades e regimes dos fluidos. Δt é o diferencial de temperatura entre os dois fluidos, o qual propicia a existência do fluxo de calor (°C) e finalmente S , a superfície de transmissão de calor do trocador (m²).

No nosso caso, em que as imposições do processo eram manter a temperatura do fluido em contato com o bastão e lâmpada entre 20° C e 22° e sem uma queda apreciável de pressão, nos levaram a escolher um tubo de aço inoxidável de diâmetro externo de 3/8" (0,95cm) e diâmetro interno de 0,217" (0,55cm) que foi cortado em pedaços de 30cm de comprimento, fornecendo um total de 76 pequenos tubos que foram agrupados conforme podemos observar na figura 4.1. O material escolhido foi o aço inoxidável por este material não soltar íons na água do circuito primário, já que esta não deve conduzir a corrente elétrica com a qual estará em contato dentro da cavidade.

Estes tubos foram acondicionados dentro de uma carcaça de PVC fechada por duas extremidades do mesmo material e confeccionadas de tal forma que a água a ser refrigerada passa quatro vezes dentro do corpo deste trocador.

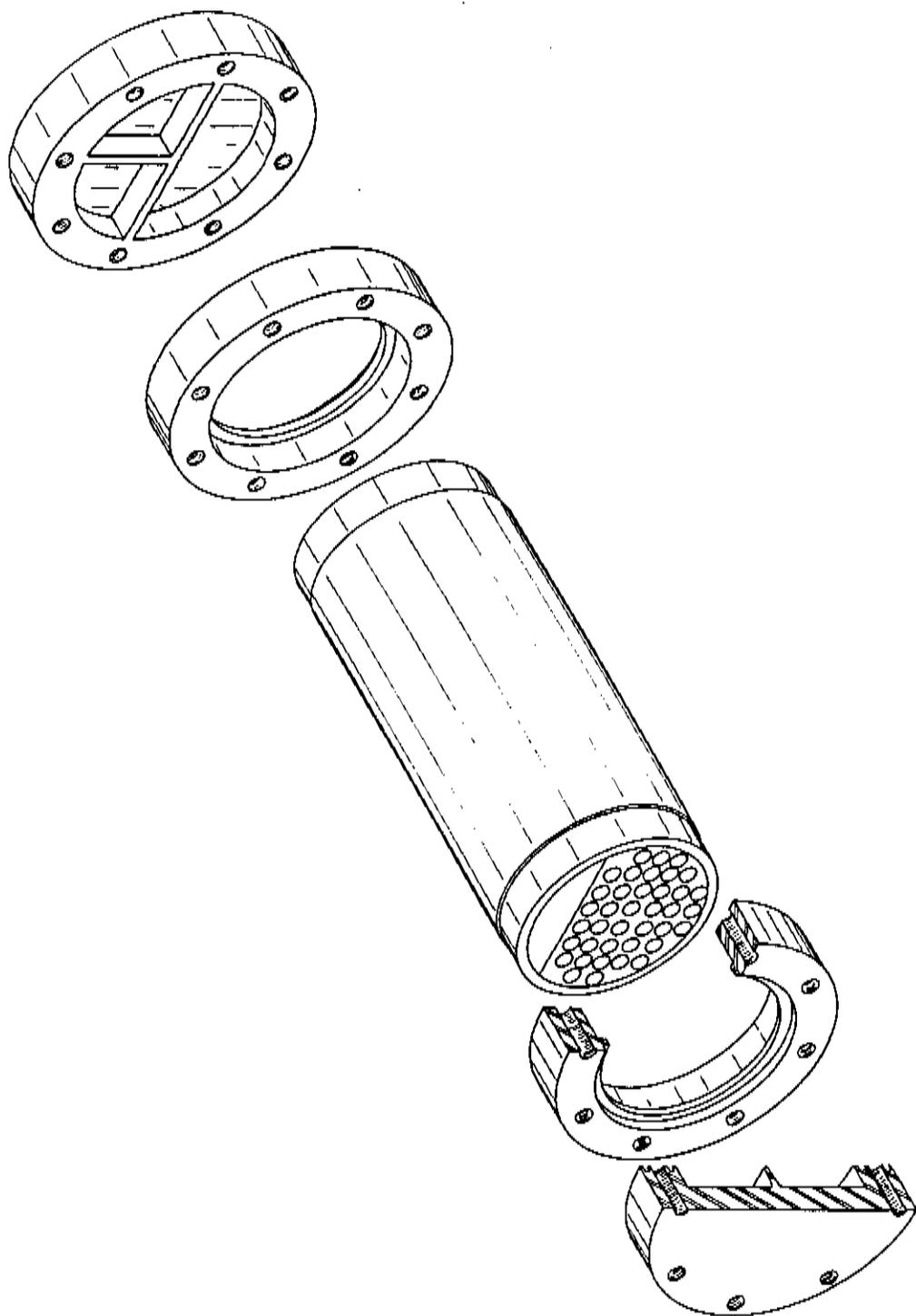


Fig. 3.1 - Trocador de calor desenvolvido para uma eficiente troca térmica entre o fluido a ser refrigerado e o refrigerante.

Para que houvesse ainda uma eficiência maior nesta troca térmica foram colocados internamente ao corpo da carcaça defletores para que a água gelada aumentasse seu contato com as paredes dos tubos de aço (fig. 3.3). Na fig. 3.4 vemos o corpo da carcaça por onde os tubos passam por dentro. Na fig. 3.5 e 3.6 podemos observar as duas tampas, mostrando detalhes da construção destas para que a água do circuito primário faça quatro vezes o caminho dentro do trocador e finalmente a fig. 3.7 nos mostra a flange que rosqueada no corpo da carcaça prende as duas tampas.

3.3- Sistema Hidráulico

Na fig.3.2 podemos observar o desenho esquemático do sistema hidráulico. A água é sugada do reservatório, com capacidade para 12l por uma bomba de aço inox à razão de 12l/min com uma pressão de 20psi. Esta água antes de chegar à cabeça do laser passa por um fluxostato que mede esta vazão. Caso ela caia, este fluxostato desligará o sistema responsável pelo acendimento da lâmpada, evitando qualquer dano a esta e ao bastão.

Após passar pela cabeça do laser e trocar calor com os três elementos desta (lâmpada, bastão e superfície elíptica) há um sensor que monitora a temperatura da água (ver cap. 5). Em seguida a água passa por um filtro de partículas que irá retirar qualquer material maior que 5 μ m que por alguma razão apareça no sistema e na saída deste está o trocador de calor que mantém a temperatura em valores pré-escolhidos (ver cap. 5). Antes da água voltar ao reservatório há uma ligação em paralelo que leva uma pequena parcela desta a um delonizador, que irá retirando todos os íons, deixando-a totalmente demineralizada, fechando desta forma o ciclo.

Cabe salientar que a água que é colocada no reservatório é destilada.

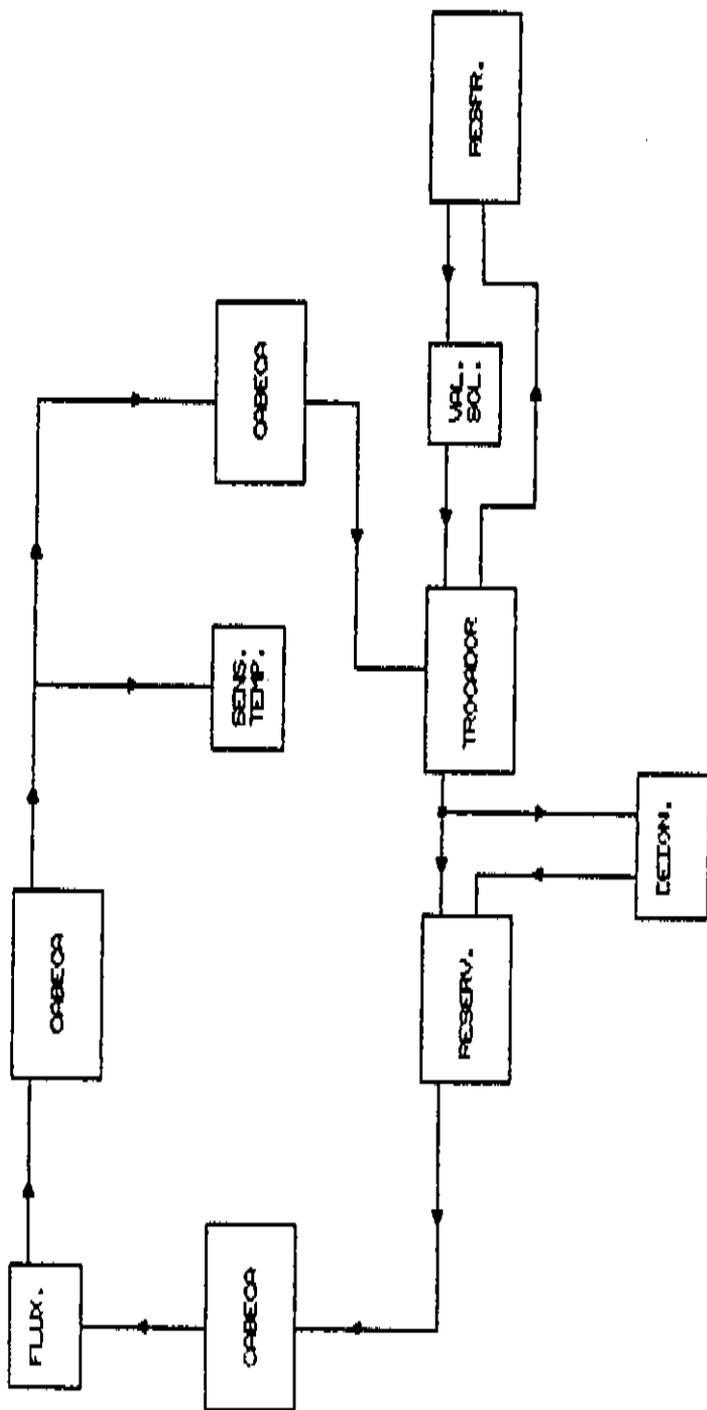


Fig. 3.2- Desenho esquemático do sistema hidráulico

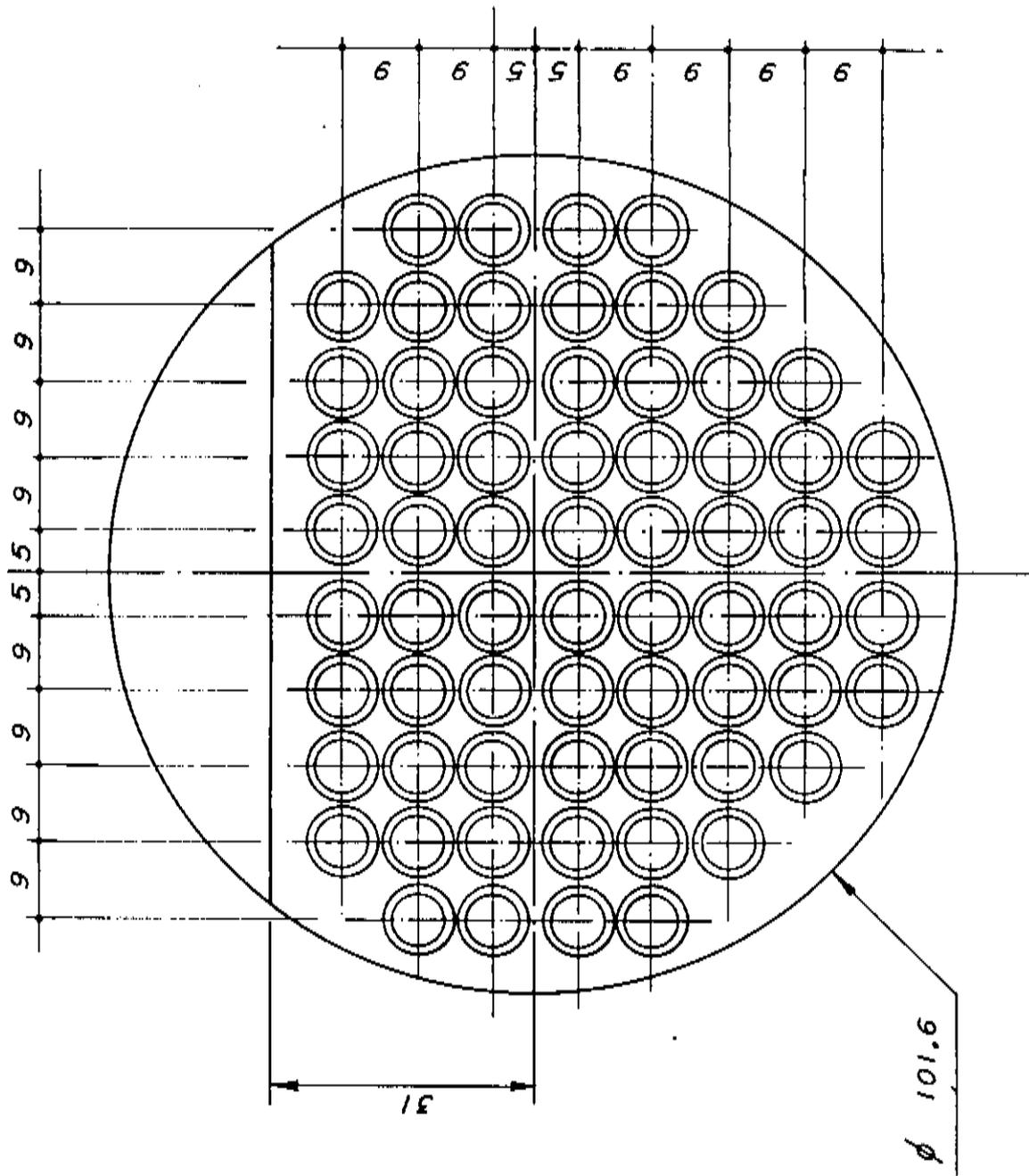


Fig.3.3- Defletor utilizado para aumentar o contato da água gelada com as paredes do tubos de aço inoxidável.

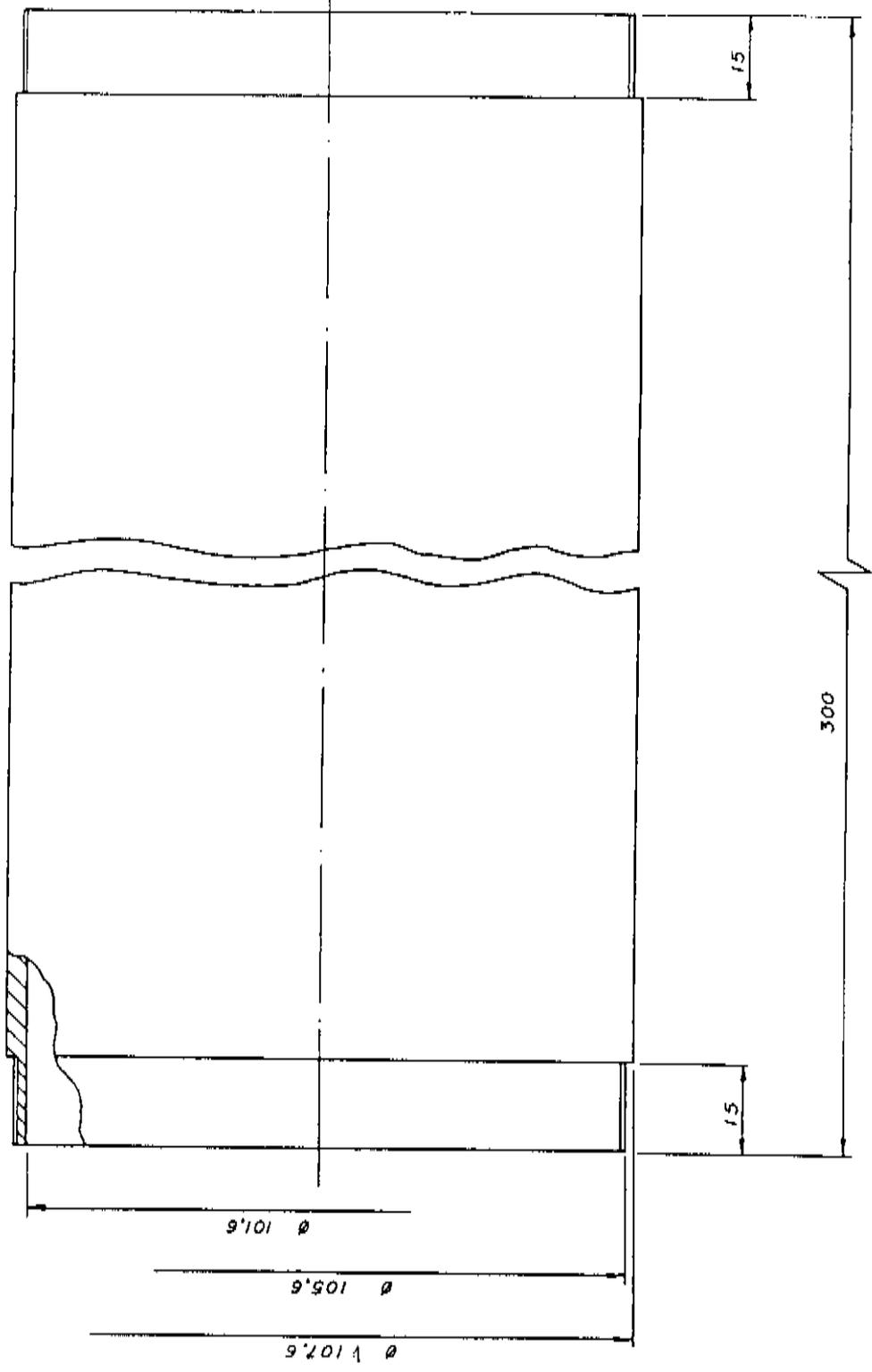


Fig 3.4- Corpo da carcaça do trocador de calor

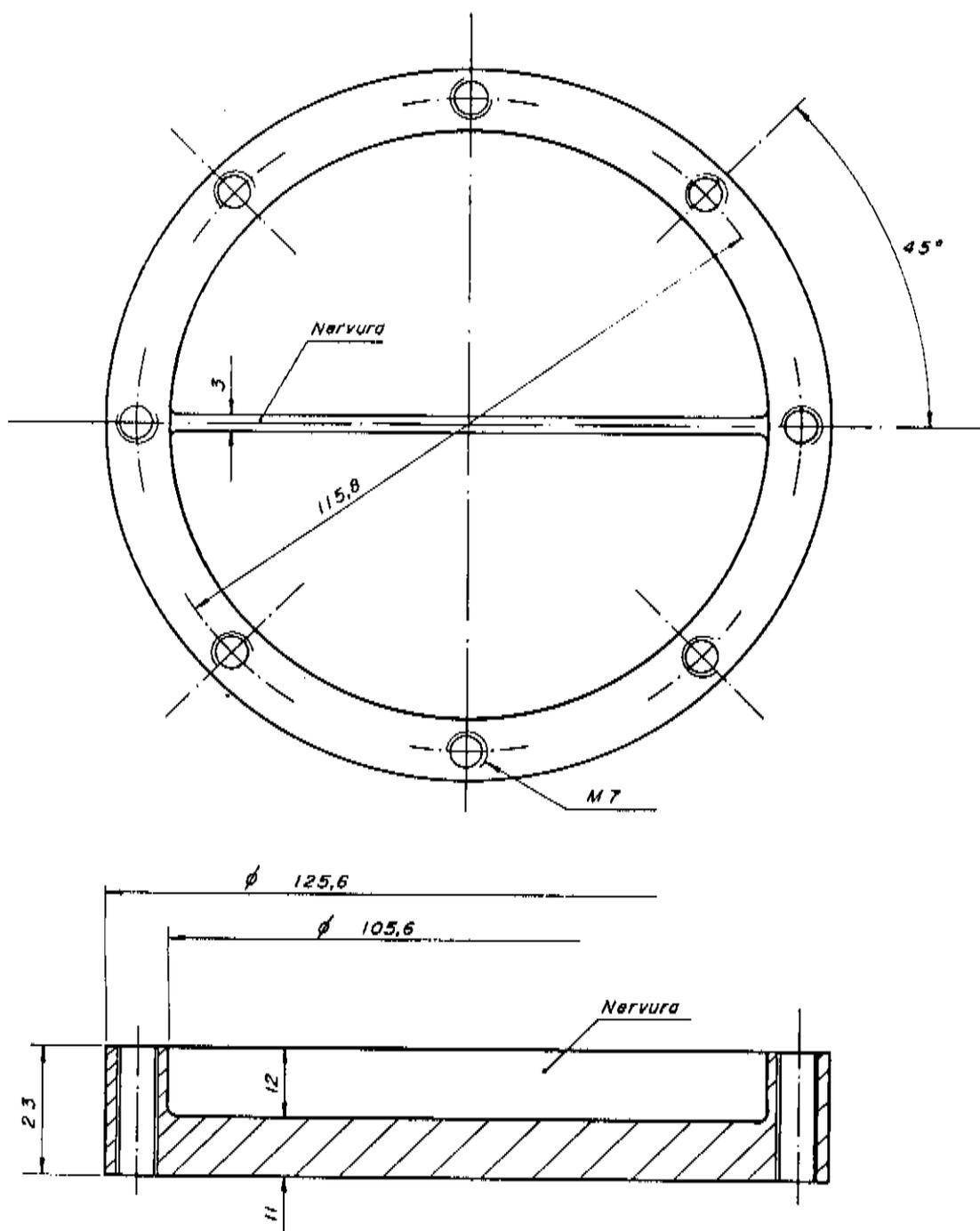


Fig. 3.5- Uma das extremidades do trocador mostrando detalhe para forçar o retorno da água.

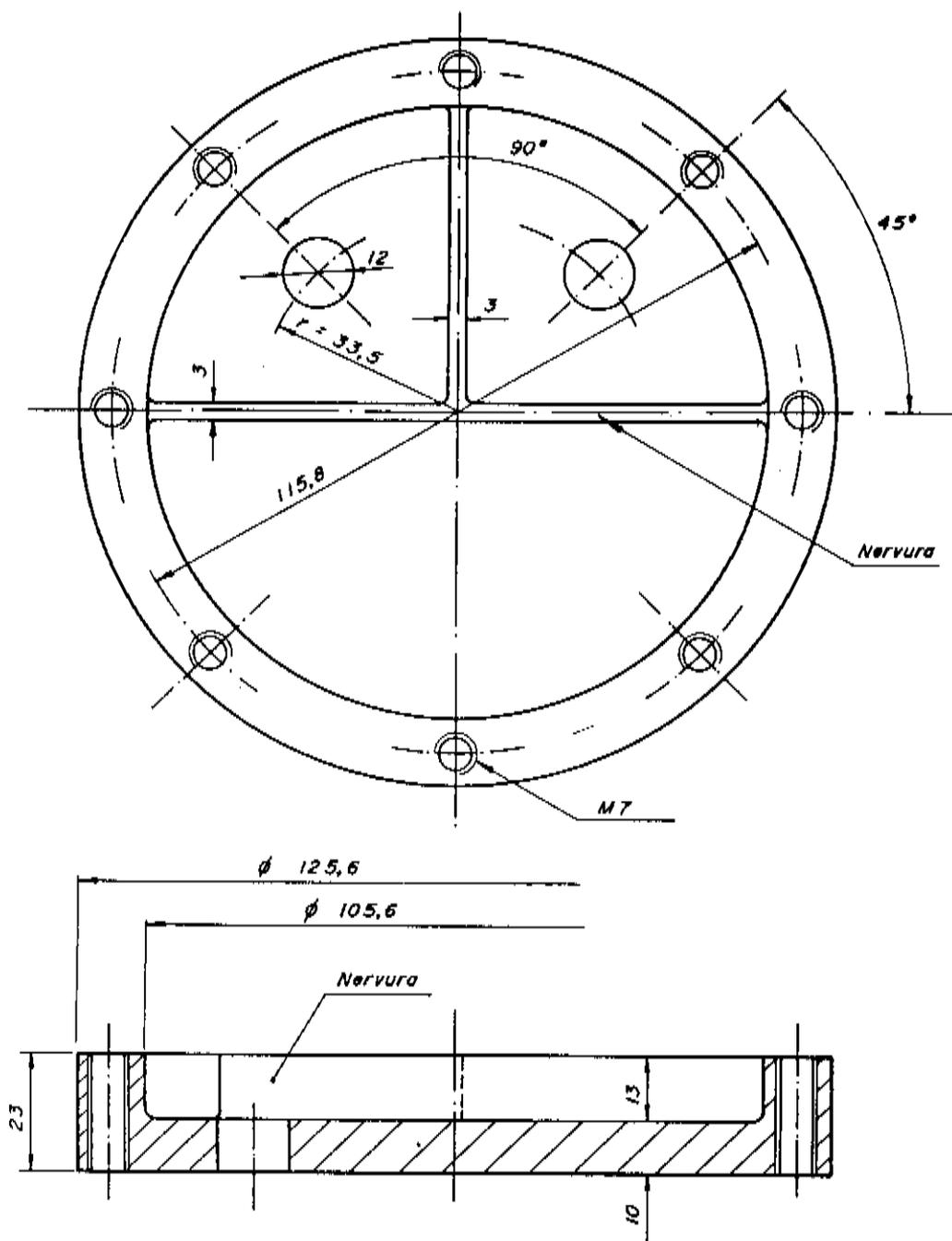


Fig. 3.6- Detalhe da outra extremidade do trocador mostrando a entrada e saída da água do circuito primário de água

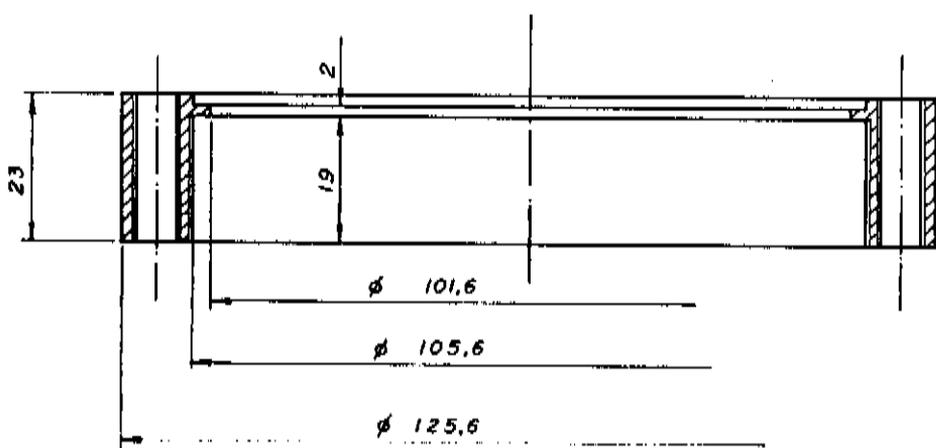
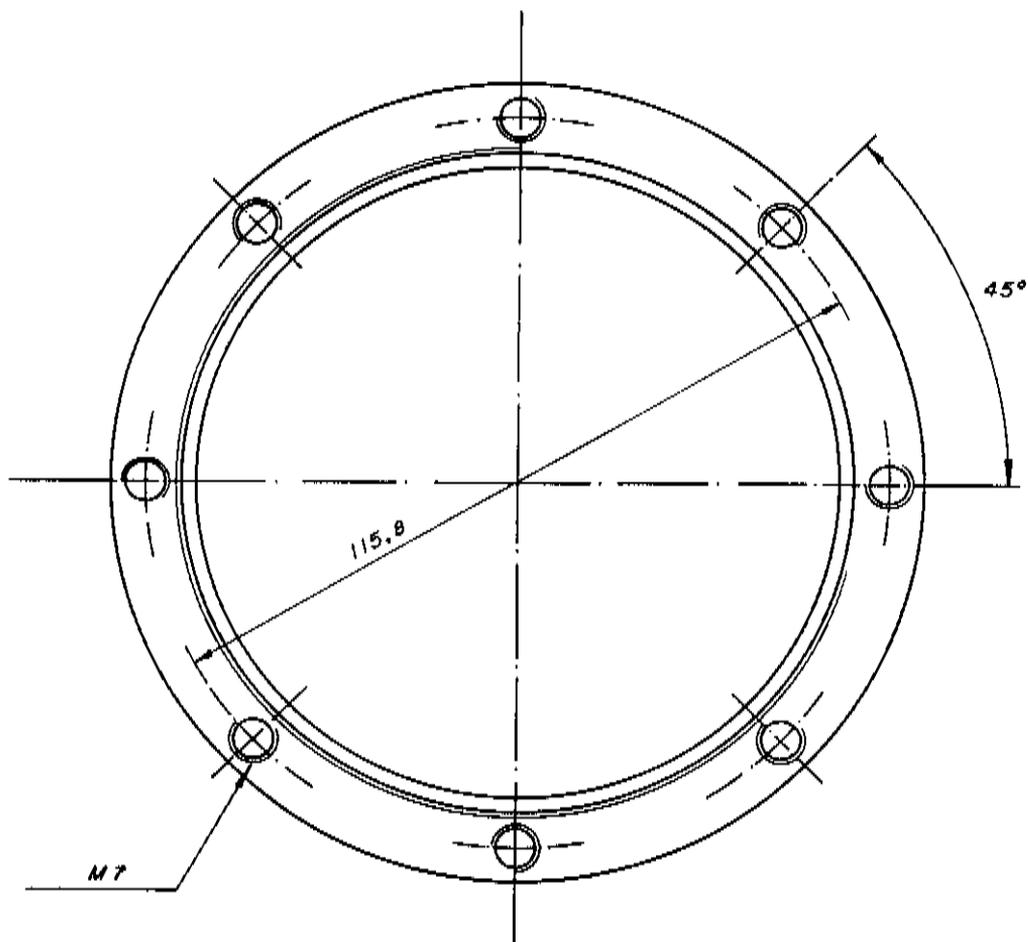


Fig. 3.7- Flange de fixação das extremidades ao corpo da carcaça do trocador de calor.

BIBLIOGRAFIA

1. Solid-State Laser Engineering, Walter Koechner, Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin 1976
2. Process Heat Transfer, Donald Q. Kern

ELETRONICA DESENVOLVIDA

4.1- Lâmpada

Para uma boa estabilidade no laser, é necessário um perfeito controle da lâmpada empregada. Usamos uma lâmpada de criptônio FK-111C-3 da EG&E, cujas características gerais estão na tabela 4.1 [1]. Observa-se pela figura 4.1 que o espectro de emissão desta lâmpada possui linhas que estão no espectro de absorção do bastão de Nd:YAG (ver fig.2.3, pág.6, cap.1). A figura 4.2 mostra o gráfico da tensão x corrente da lâmpada considerada.

 Tab.4.1.Características da lâmpada

potência máxima	6000W
tensão máxima	115V
corrente máxima	52A
impedância estática	2,2 Ω
vida útil	200 horas
voltagem mínima de trigger	15-20KV
comprimento do arco	7,62mm
diâmetro	7mm
fluxo de água	12 l/min

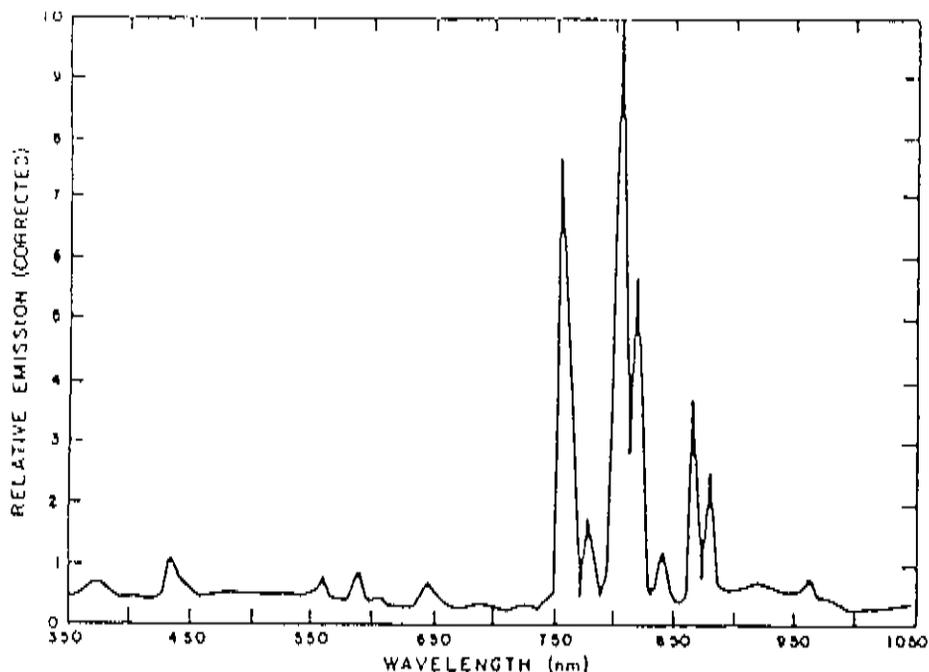


Fig.4.1- Espectro de saída da lâmpada FK-111C-3, notando-se as várias linhas de emissão próximas ao espectro de absorção do Nd:YAG (ver fig. 2.3, pág. 2.6)

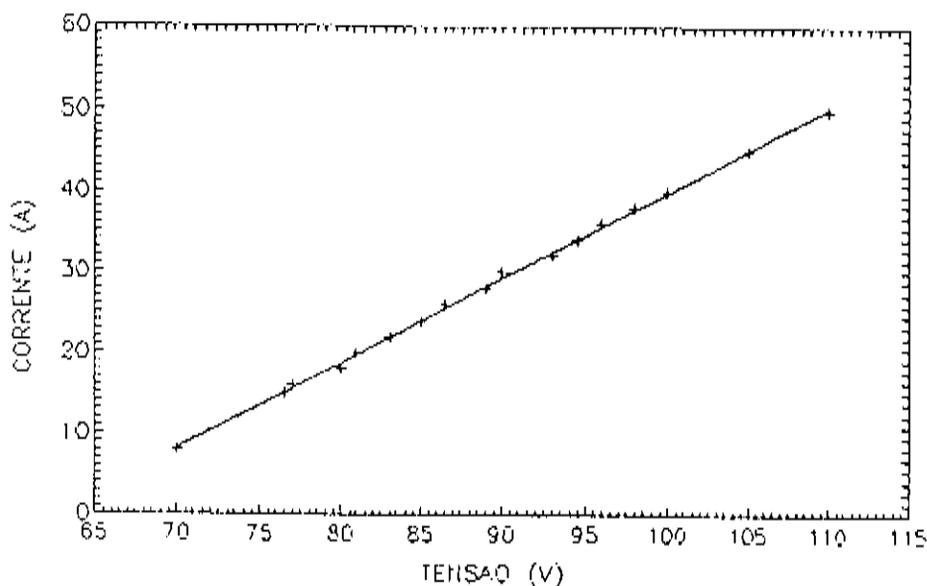


Fig.4.2-Gráfico tensão x corrente de algumas lâmpadas fabricadas pela EG&G, entre elas a FK-111C-3.

Tanto pela análise da tabela 4.1 como pela figura 4.2 é possível notar que necessitamos controlar uma carga de no máximo 6000W de potência, com uma corrente elétrica da ordem de 52A em 115V.

Sistemas de altas potências operam de uma maneira mais eficiente com redes trifásicas, obtendo-se assim várias vantagens como: menor fator de ripple, melhor fator de potência, amplitude menor das harmônicas tanto em AC como em DC, menor pulsação de potência, etc.

Utilizamos para este fim um conversor trifásico totalmente controlado, composto por 6 SCRs (ver planilha 1) SKT-40/800 da Semikron, que são capazes de controlar de 50 a 80 amperes, dependendo do dissipador utilizado e com fluxo de ar de 6m/s.

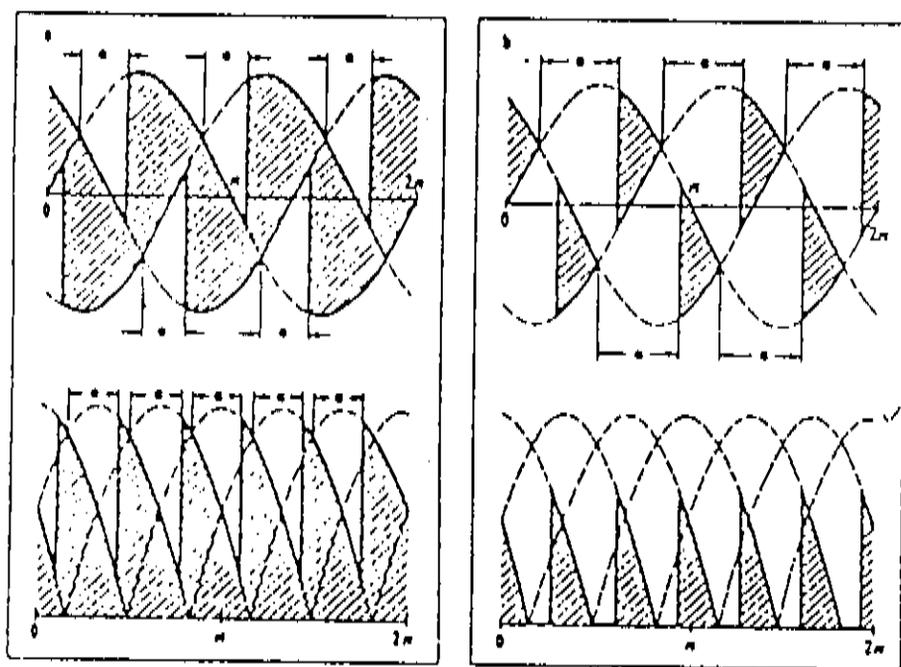
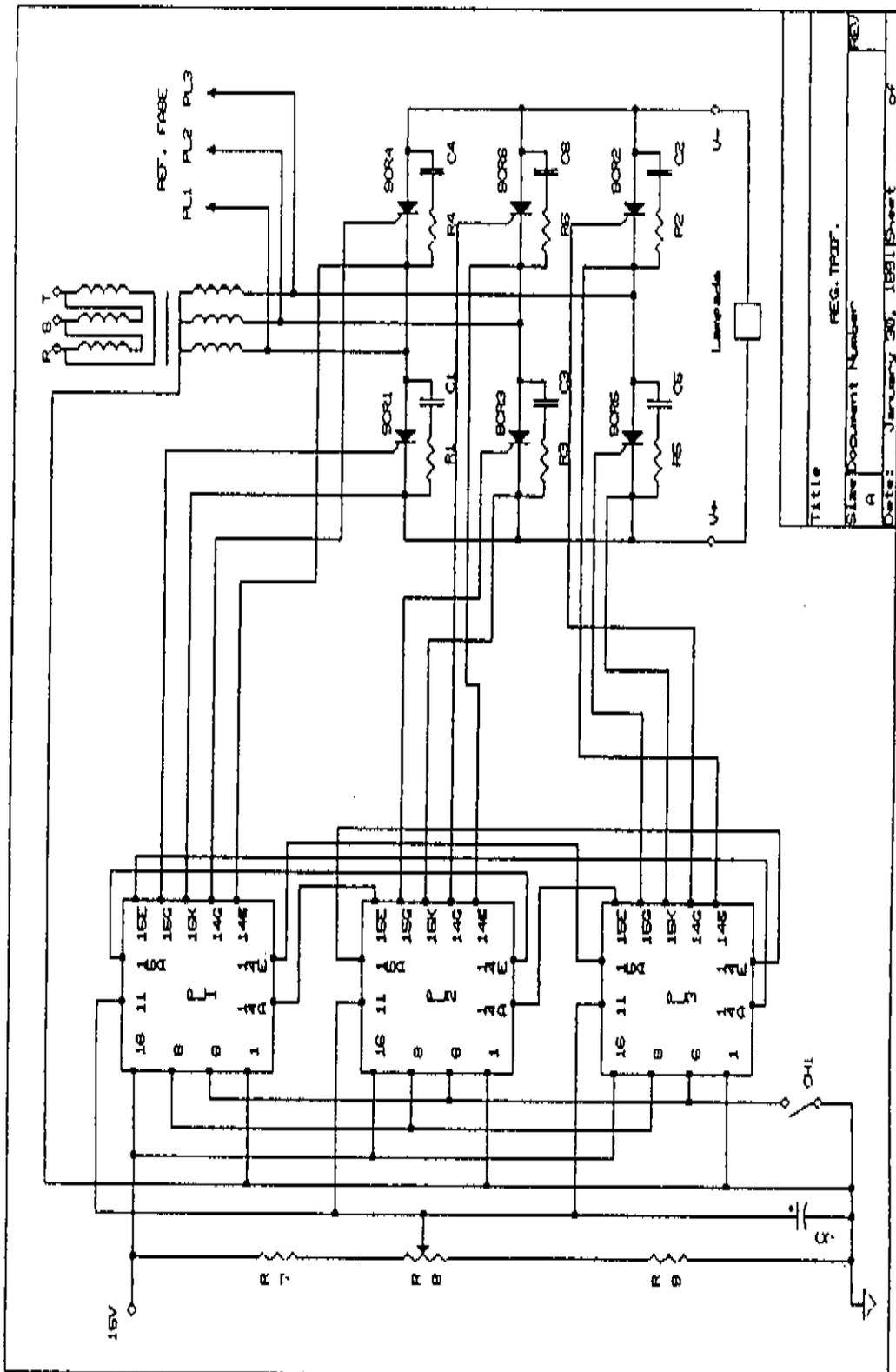


Fig.4.3- Formas de onda de um conversor trifásico totalmente controlado; 4.3a) operação não intermitente, 4.3b) operação intermitente



TITLE	REG. TRIF.
Sheet Document Number	A
Date:	January 30, 1981
Sheet	07

Planilha 1- Diagrama do circuito de controle trifásico, mostrando o banco de SCRs e as placas de controle de fase.

As figuras 4.3a e 4.3b mostram as curvas de tensão de saída para uma carga resistiva. A figura 4.3a mostra a situação de uma operação não intermitente e a figura 4.3b mostra a operação intermitente, isto é, $\alpha > 60^\circ$ elétricos, fazendo com que haja um período de interrupção no fornecimento de energia para a saída. As figuras superiores mostram seções da tensão da rede, ilustrando qual SCR deve conduzir, tanto no lado positivo, como no lado negativo. As figuras inferiores mostram as curvas de tensão que aparecem efetivamente na carga.

Como a ponte é constituída de 6 tiristores, é necessário um circuito que forneça seis pulsos de controle que tenha uma lógica ou seqüência de disparo compatível com o sistema.

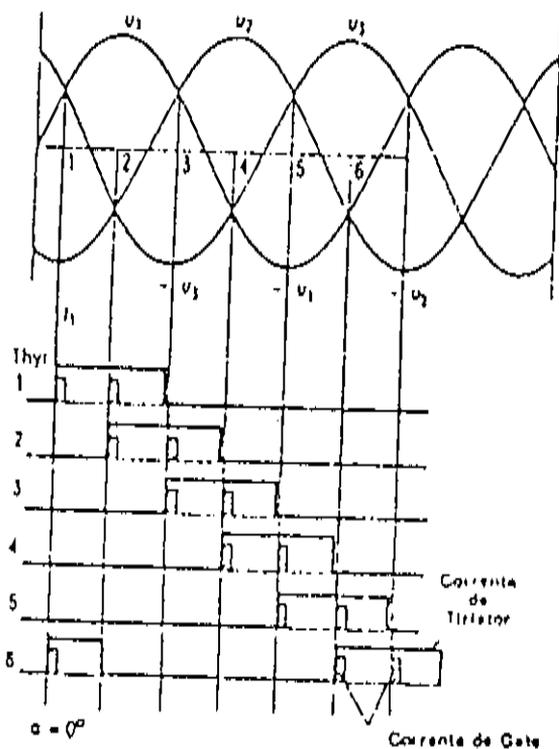


Fig.4.4- Lógica de disparo para um conversor trifásico totalmente controlado.

A seqüência necessária dos pulsos de controle está ilustrada na figura 4.4. Podemos perceber que é necessário o disparo simultâneo de dois tiristores para que haja efetivamente a circulação de corrente pelo circuito.

Os pulsos de "gate" devem ter uma largura mínima de $400\mu\text{s}$, assegurando o disparo eficaz do SCR. A distância entre os pulsos é de 60° elétricos, e é sempre mantida essa posição relativa entre eles.

A planilha 1, como já citado anteriormente, mostra a maneira de interligar os 6 SCRs e os três circuitos de lógica de disparo para cada dupla de SCR. Já a planilha 2 fornece o esquema eletrônico de cada placa de controle. Nota-se que pelo emprego de circuitos integrados dedicados ao controle de corrente, o número de componentes é extremamente reduzido. (descrição dos componentes no Apêndice 1)

Para uma filtragem suplementar, utilizamos um filtro em configuração LC ($CF = 3000\mu\text{F}/350\text{V}$ e $LF > 20\text{mH}$) e obtivemos um fator de ripple da ordem de 0,3% (700mV em 110V a 40A), com uma carga puramente resistiva e 0,4% (800mV em 100V a 40A) com a lâmpada (as fotos a seguir referem-se à lâmpada).

4.3- Início de Operação

A lâmpada inicialmente apresenta uma resistência muito alta (da ordem de $M\Omega$) e portanto não conduzindo a corrente fornecida pelo controlador trifásico.

Para que a corrente elétrica possa fluir pela lâmpada, alguns requisitos devem ser preenchidos. Inicialmente estabelecemos uma tensão de $\approx 300\text{V}$ no capacitor de filtro CF, deixando-o carregado com 135j de energia, isto é feito através da fonte de "booster 1".

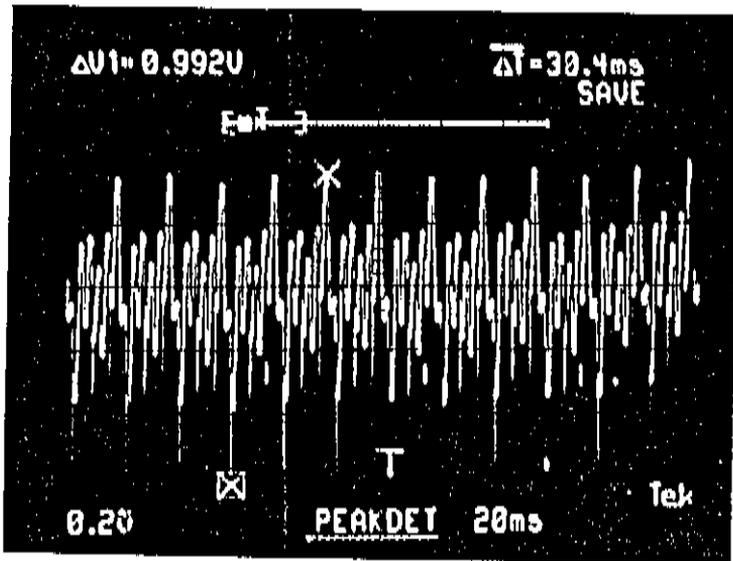


foto 1 - Mostra a tensão de pico a pico no pior caso, o que nos fornece uma tensão de 0,992V em 100V a 40A, apresentando um fator de ruído da ordem de 0,45%

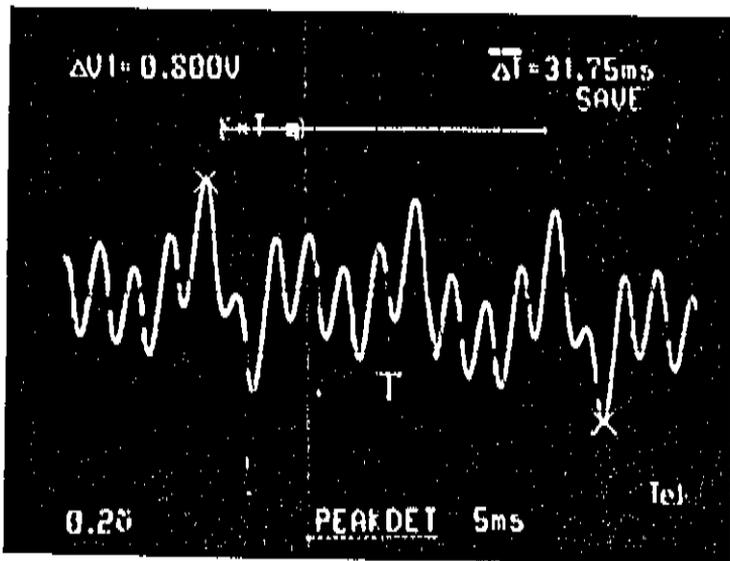
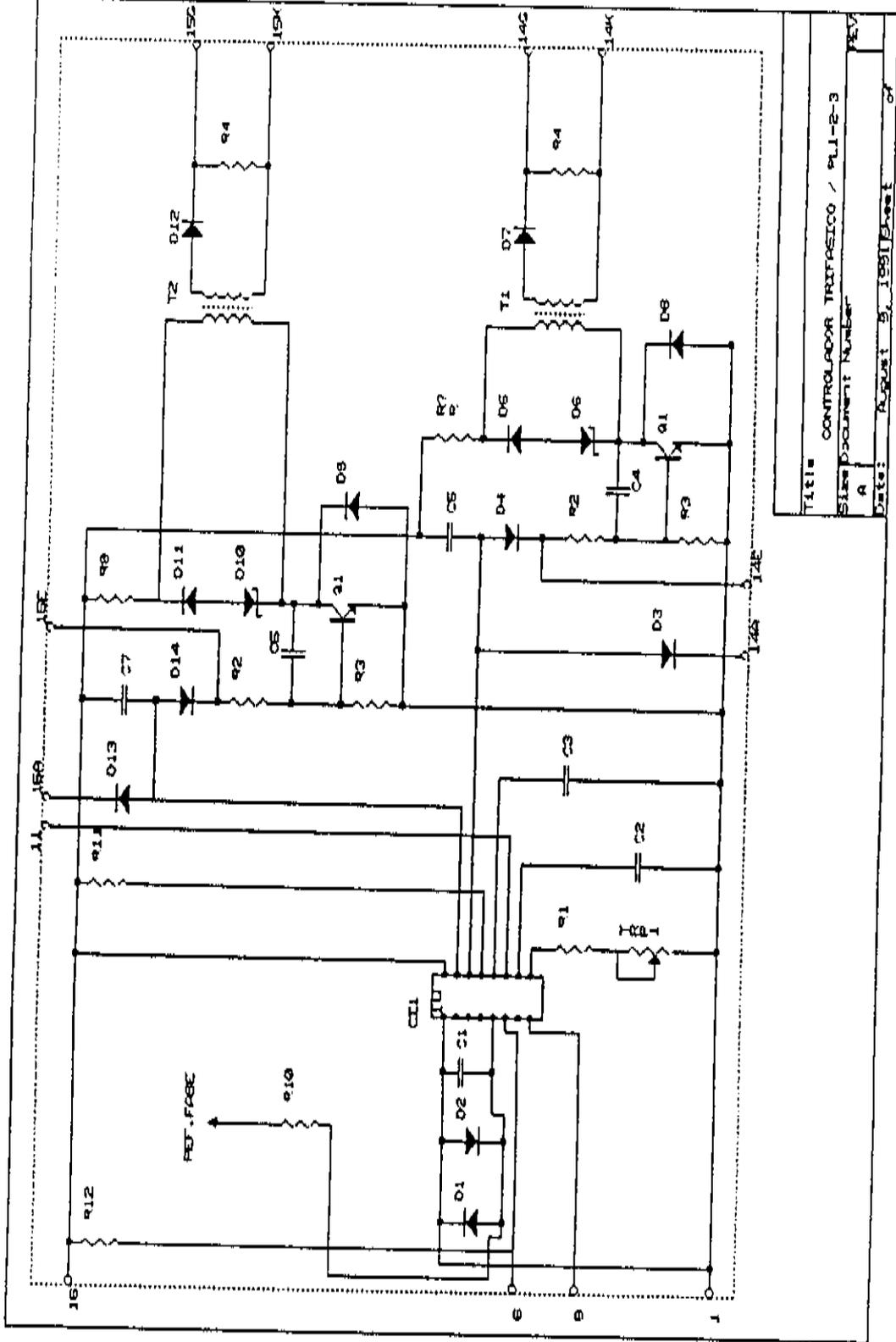


foto 2 - Mostra a tensão de pico a pico no melhor caso, 800mV em 100V a 40A, fornecendo um fator de ruído da ordem de 0,36%



Title	CONTROLADOR TRIFÁSICO / PUJ-2-3
Sheet Document Number	A
Date	August 9, 1991
Sheet	07

Planilha 2- Diagrama eletrônico do controle de disparo de um par de SCR.

Ao mesmo tempo, a fonte de "booster 2" estabelece um potencial de $\approx 1800V$ no capacitor do gerador de pulsos, deixando-o com $\approx 3j$ de energia, ficando assim esses dois capacitores prontos para dispararem.

Quando o laser é ligado, inicia-se a contagem de tempo no temporizador da placa de início (planilha 3); variando entre 1,5 minuto a 7 minutos (escolhido pelo usuário). Isto é necessário para que possíveis bolhas no sistema hidráulico possam ser retiradas do mesmo.

Findo este tempo, acende-se um led verde no painel, indicando que o sistema está pronto para entrar em operação. Apertando-se o botão de início, coloca-se em andamento um ciclo de trabalho definido da seguinte maneira:

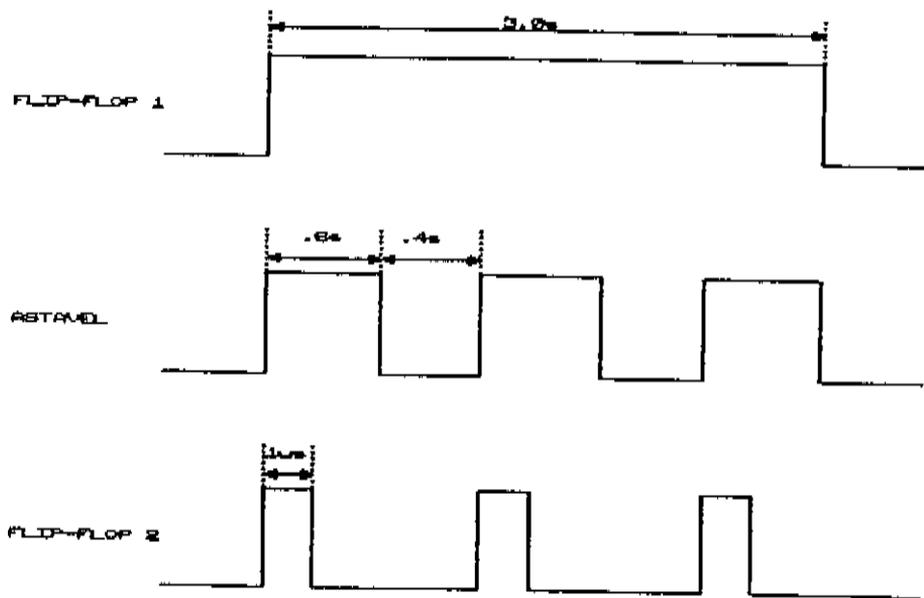


Fig. 4.5- Ciclo de trabalho para o início da operação do laser, mostrando a lógica de disparo dos componentes.

A saída da chave SW1 ($\approx 12V$) aciona uma chave eletrônica (schmitt trigger) que por sua vez aciona um flip-flop mono-estável, sensível à borda de subida, o qual fornece o primeiro período de temporização, com aproximadamente 3s de duração.

À saída deste flip-flop 1, temos um multivibrador astável, sensível à mudança de nível de tensão, que é comandado pelo primeiro período, entregando ao segundo flip-flop, também mono-estável e sensível à borda de subida, três pulsos, com um ciclo de trabalho de aproximadamente 0,6s.

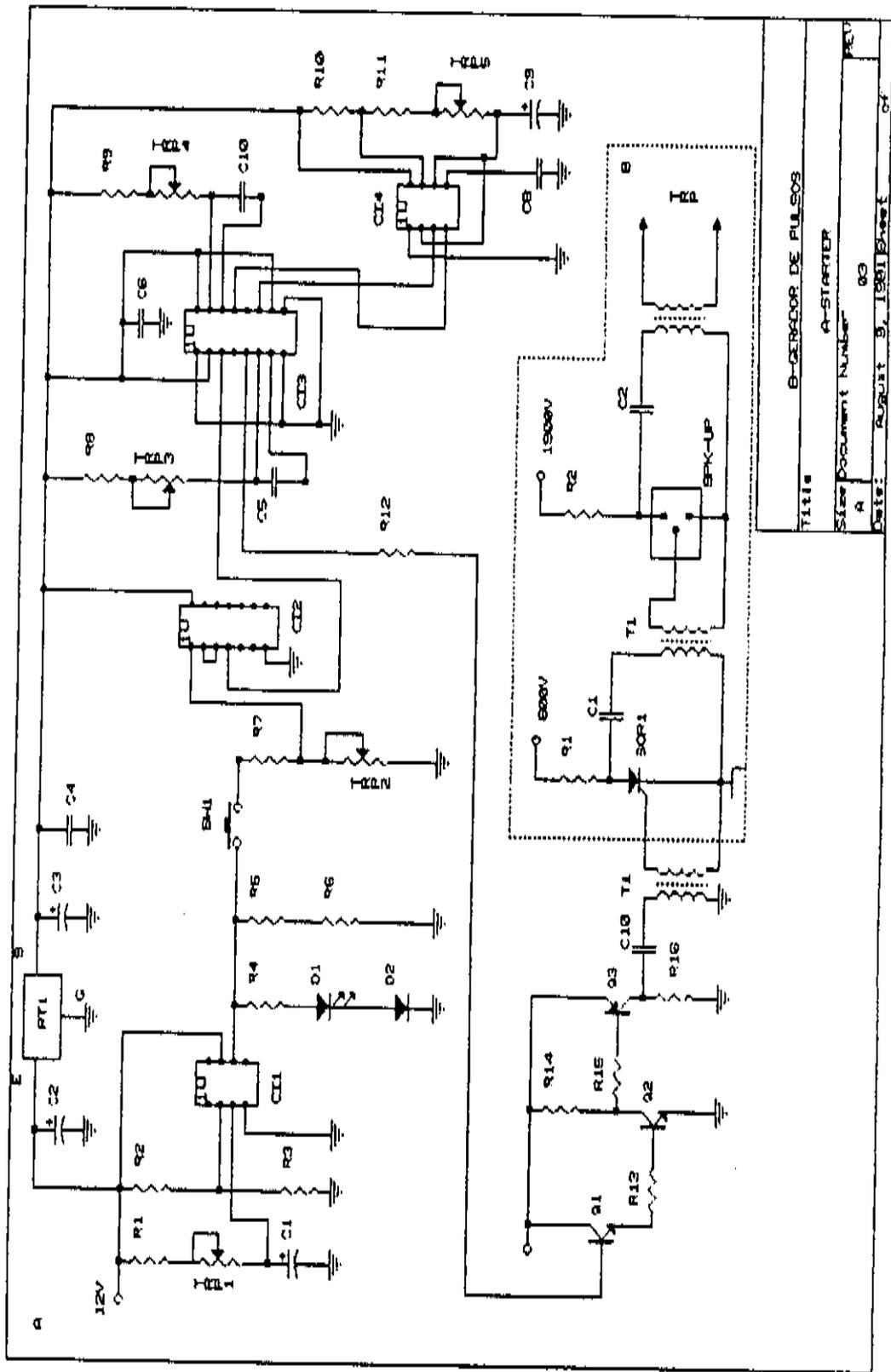
Na saída deste flip-flop 2 temos finalmente 3 pulsos estreitos, de $\approx 1\mu s$, que depois de devidamente amplificados ficam com uma amplitude de $\approx 12V$ e $6\mu s$ de largura, sendo então injetados no gerador de pulsos, o qual entrega $\approx 22KV$ ao circuito, tensão suficiente para pré-ionizar a lâmpada (ver tab.4.1, pág. 1).

Com estes pulsos de pré-ionização, a impedância da lâmpada cai drasticamente, permitindo um caminho para que a energia armazenada em CF descarregue através desta, ocasionando um "flash". No momento do "flash" estabelece-se a corrente elétrica através da lâmpada, acendendo-a.

4.4- Medidas de Segurança

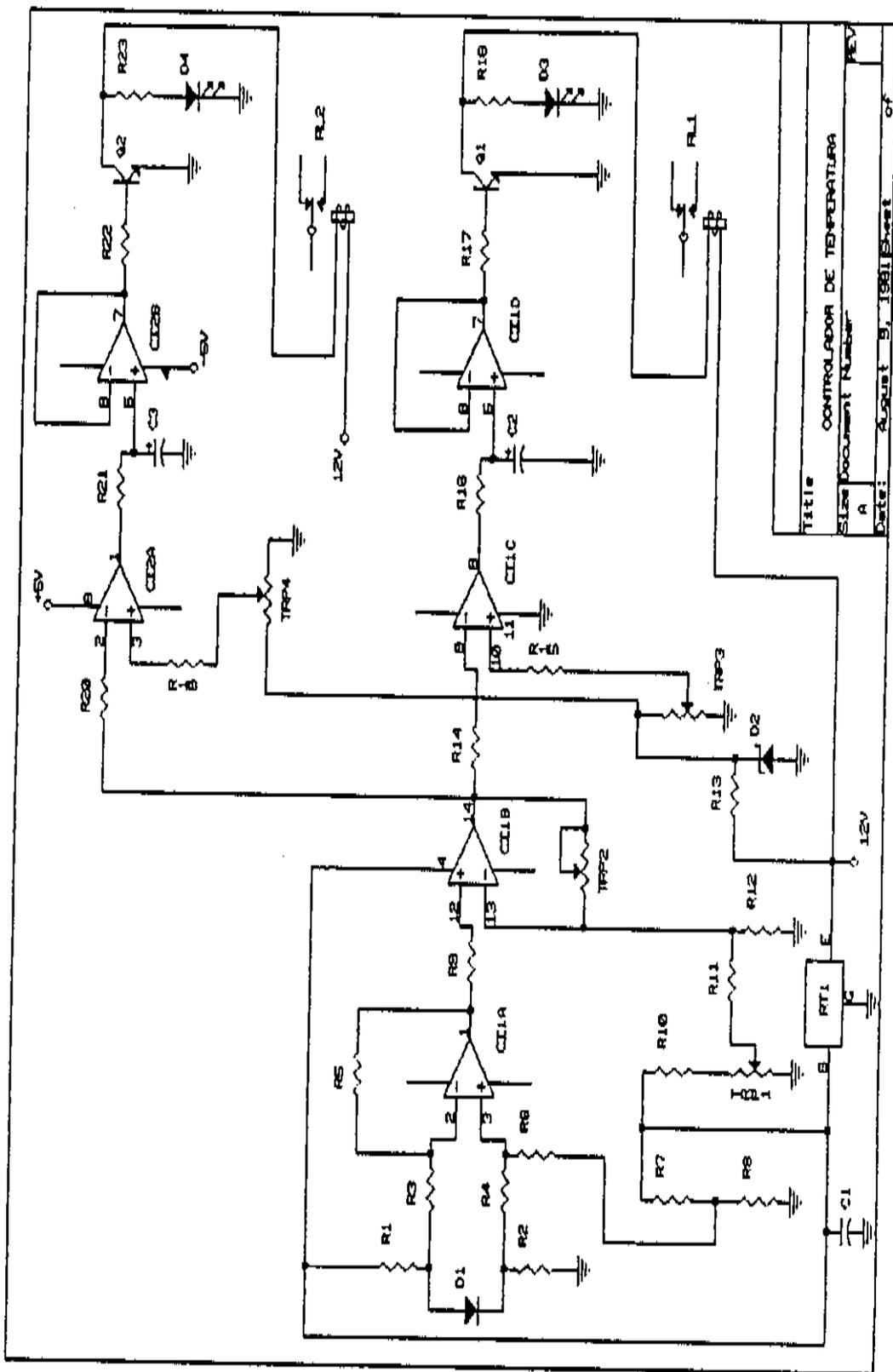
O perfeito funcionamento do laser não se restringe somente na eficiência com que se consegue controlar a lâmpada. É preciso também exercer um rígido controle tanto no fluxo de água como também sobre sua temperatura, já que a energia liberada pela lâmpada é bastante alta e facilmente, em decorrência de qualquer descuido, danificaria o bastão de Nd:YAG.

Para evitar isto, foi desenvolvido um controlador de temperatura (planilha 4) que possui um sensor na saída de água da cavidade, depois desta haver retirado o calor da lâmpada, bastão e cavidade.



TITULO: B-GERADOR DE PULSOS
 A-STARTER
 Size Document Number: A 03
 Date: AUGUST 9, 1981 Sheet 1 of 1

Planilha 3- Diagrama eletrônico da placa de início e gerador de pulsos.



Title: CONTROLADOR DE TEMPERATURA
 Sheet Document Number: A
 Date: August 9, 1981 Sheet 07

Planilha 4- Diagrama eletrônico do controle de temperatura.

Este controlador possui duas saídas. Uma delas fixa a variação da temperatura da água em 2°C ; como a temperatura está inicialmente à 18°C , ao retirar calor do sistema e atingir 20°C , a saída 1 do controlador aciona o relê 1 que por sua vez aciona a válvula solenoide, permitindo então a troca de calor entre o circuito primário (água destilada e deionizada) e circuito secundário (água gelada).

Uma vez tendo abaixado a temperatura desta, o relê 1 é desativado e o ciclo se repetirá enquanto o laser estiver ligado. Este ciclo está indicado no painel através de um led amarelo. A outra saída aciona o relê 2, sobre o qual falaremos adiante.

Para que as três fases da rede sejam ligadas ou desligadas ao mesmo tempo, existe um contactor que faz este controle. Como ele nada mais é do que um relê, em série com sua bobina temos três componentes: relê 2, relê 3 e fluxostato.

O relê 2 será acionado pela segunda saída do controlador de temperatura. Caso, por qualquer falha a temperatura da água suba até atingir 25°C , este relê será fechado, desativando o contactor. Se isto ocorrer há um led vermelho no painel que indicará tal fato.

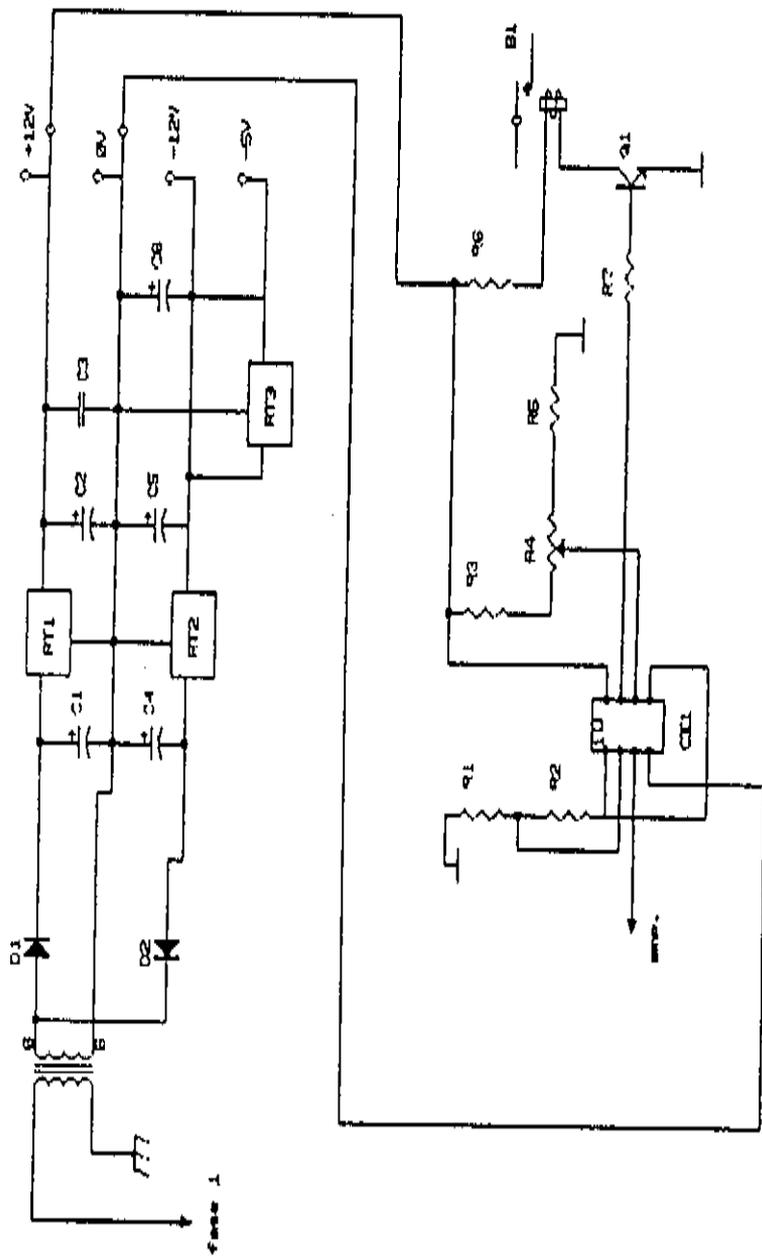
O relê 3 é controlado pela placa de início. Ao terminar o período inicial de temporização (já explicado anteriormente), uma tensão de controle é estabelecida na placa de controle do relê, acionando-o. Caso haja algum problema eletrônico no início da operação do laser, o relê 3 não será ativado, com isto impedindo que o contactor seja acionado.

Finalmente temos o fluxostato, que regula o fluxo da água fixado na máxima vazão que o sistema oferece, ≈ 12 l/min. Caso, por algum motivo este fluxo diminua, instantaneamente o contactor será desativado.

A planilha 5 possui uma fonte suplementar e controla o booster 1. É retirada uma referência de tensão no amperímetro e comparada com uma referência pré-estabelecida, caso a lâmpada entre em operação, o booster 1 será desligado, preservando desta maneira sua resistência de carga.

Na planilha 6 temos o booster 2, que nada mais é do que um multiplicador de tensão, o diagrama do controlador do relê 3 e o rotator de fase. Esta última detecta quando as três fases estão corretamente ligadas, garantindo assim uma transferência máxima de potência para o sistema.

Finalmente a planilha 7 fornece o diagrama em blocos das ligações elétricas do sistema.



Título

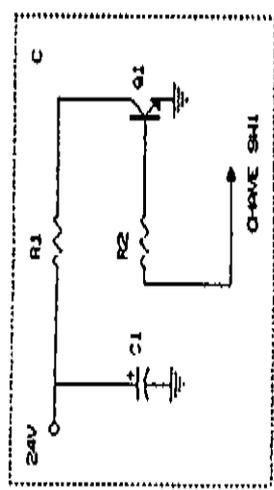
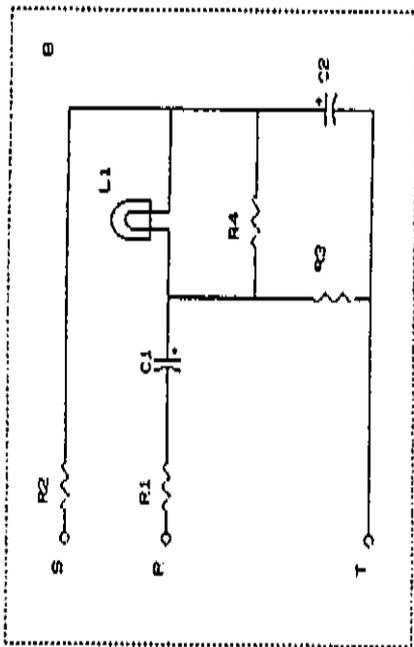
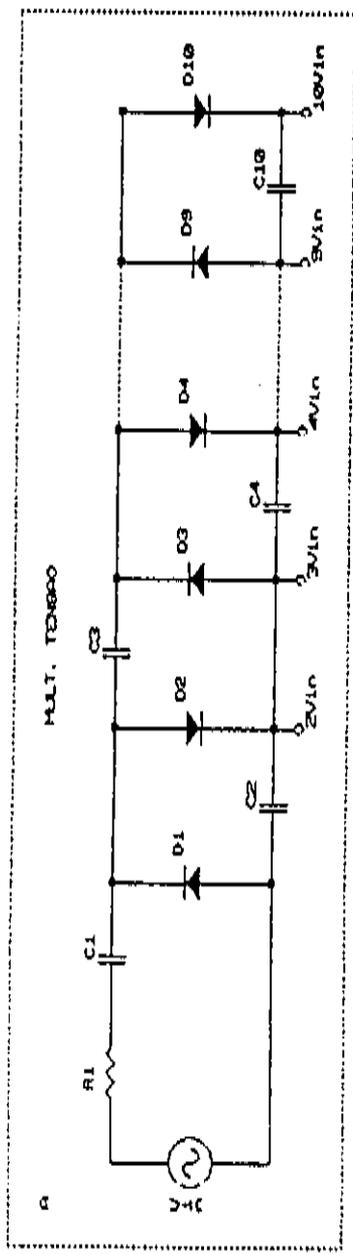
FONTE / CIR. BOOSTER 2

Scale Document Number

A

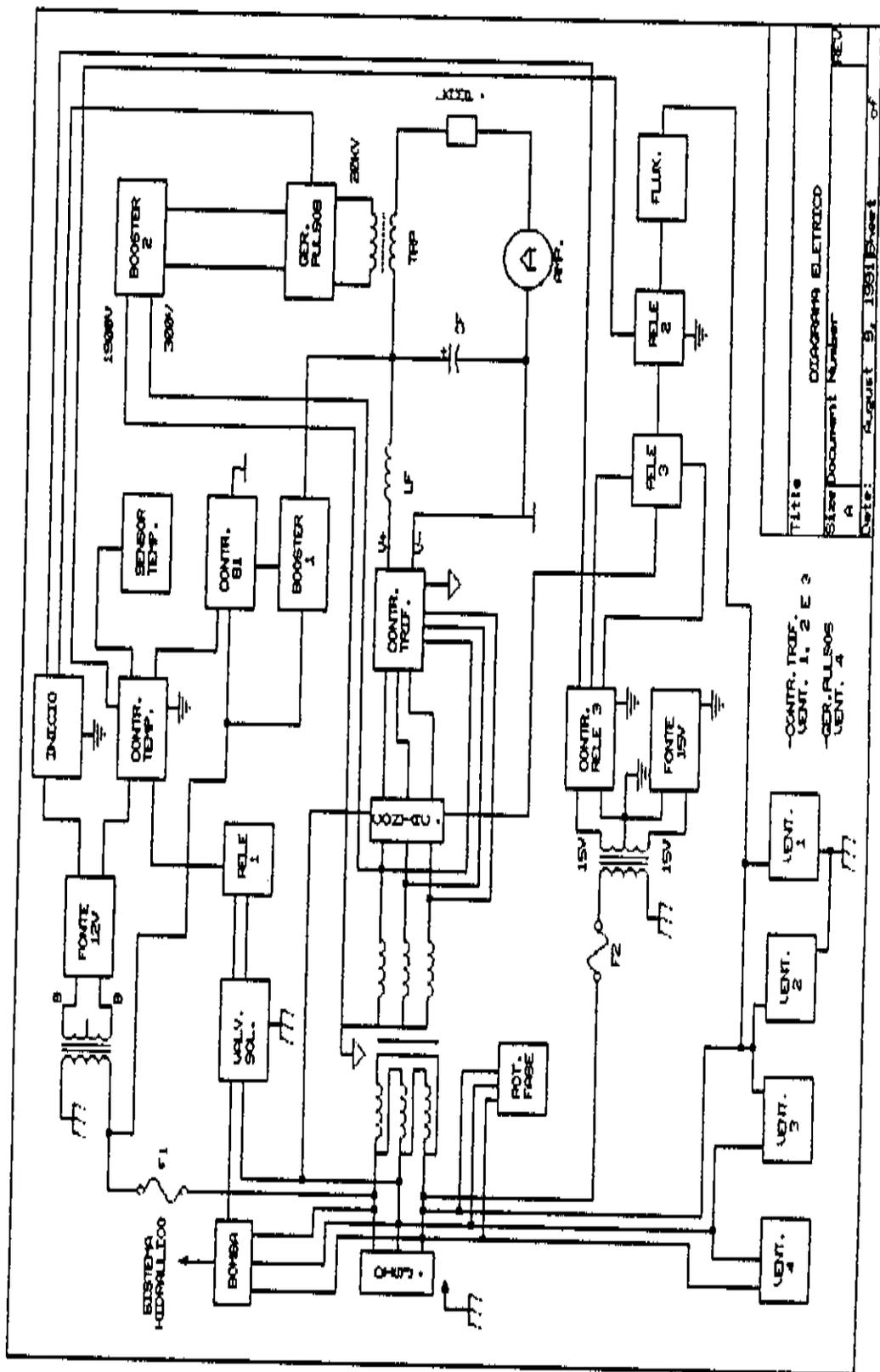
Date: August 8, 1991 Sheet 07

Planilha 5- Fonte suplementar e controle do booster 1



B-ROTORIO DE FASE	
C-CONTROLADOR DO RELÊ 3	
TÍTULO	A-MULTIPLICADOR DE TENSÃO
SIZE	DOCUMENT NUMBER
A	
DATE:	August 9, 1981 Sheet of

Planilha 6- Multiplicador de tensão, rotator de fase e controlador do relê 3



Planilha 7- Diagrama em blocos das ligações elétricas do sistema.

CARACTERIZAÇÃO DO LASER DE ND:YAG

Para a caracterização do laser aqui desenvolvido foram seguidos os seguintes passos:

- a) levantamento da curva de potência utilizada pela lâmpada versus potência emitida pelo laser para dois diferentes espelhos de saída.
- b) perfil espacial do laser nos eixos vertical e horizontal, utilizando dois diferentes diâmetros de "pin-hole" intracavidade.
- c) cálculo do tamanho do feixe bem como sua divergência.
- d) lente térmica de cada cavidade

Para o levantamento da curva de potência do laser procedemos da seguinte maneira: utilizamos um medidor de potência da Coherent com fundo de escala variando desde miliwatts até watts Este medidor era colocado a 30cm do espelho de saída quando variávamos discretamente a corrente do laser, efetuando então um novo alinhamento dos espelhos da cavidade para compensar o efeito da lente térmica e anotávamos a potência. Repetindo-se o processo para várias correntes obtivemos os dados necessários para traçarmos os gráficos da potência elétrica versus potência de saída. A importância deste tipo de gráfico é que o coeficiente angular da reta plotada nos fornece a eficiência dinâmica do laser, ou seja, a relação entre a potência entregue à lâmpada pela potência de saída do laser.

Para a cavidade C2 (da ILC) utilizamos dois diferentes tipos de espelhos de saída, um de 80% de reflectividade e outro de 90%. Com o primeiro espelho obtivemos uma eficiência dinâmica (ED) de 8,07 (ver fig.5.2) e com o segundo, uma ED de 7,86 (fig.5.1).

Para a cavidade C1 (por nós desenvolvida) usamos apenas o espelho de 90% de reflectividade e conseguimos uma ED de 3,29 (fig.5.8).

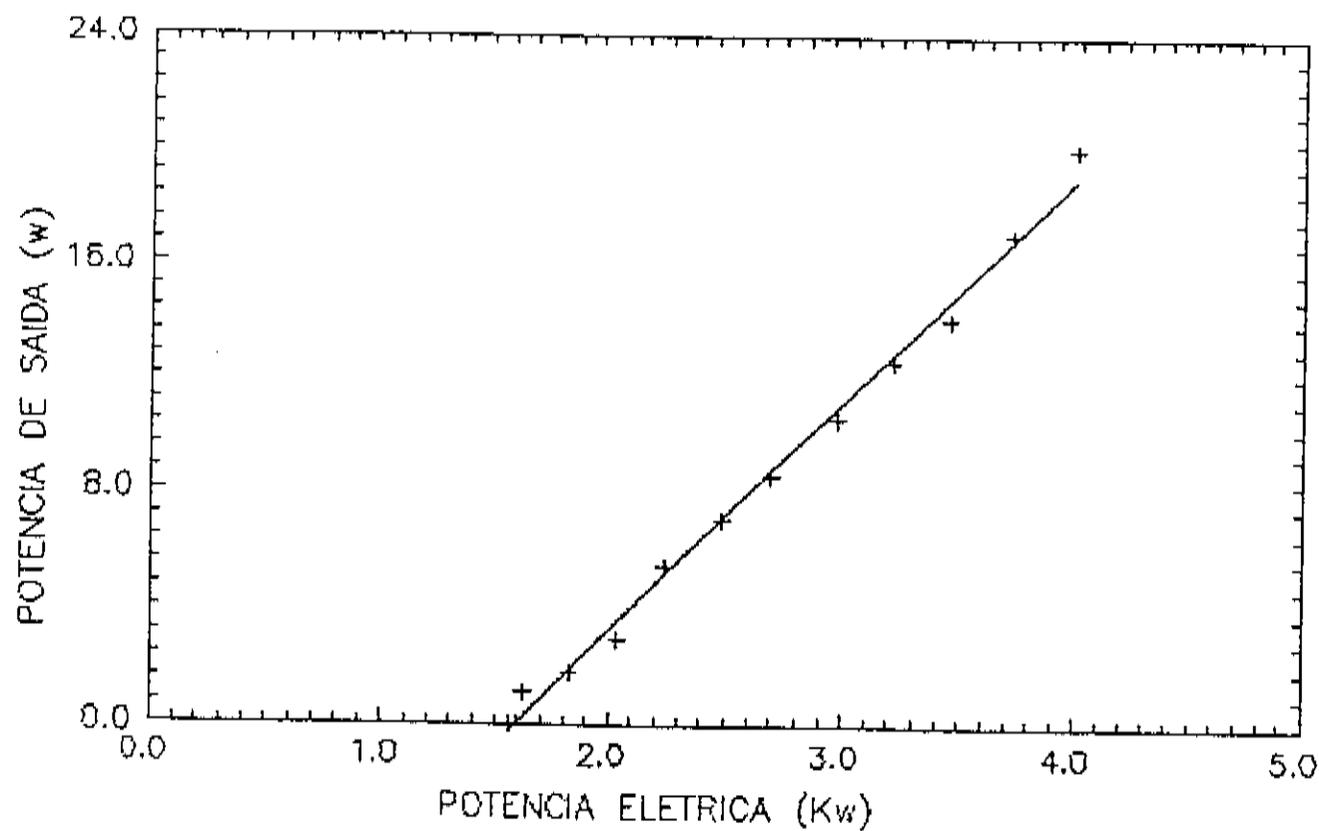


Fig. 5.1- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 90% de reflectância. Eficiência dinâmica obtida = 7,86

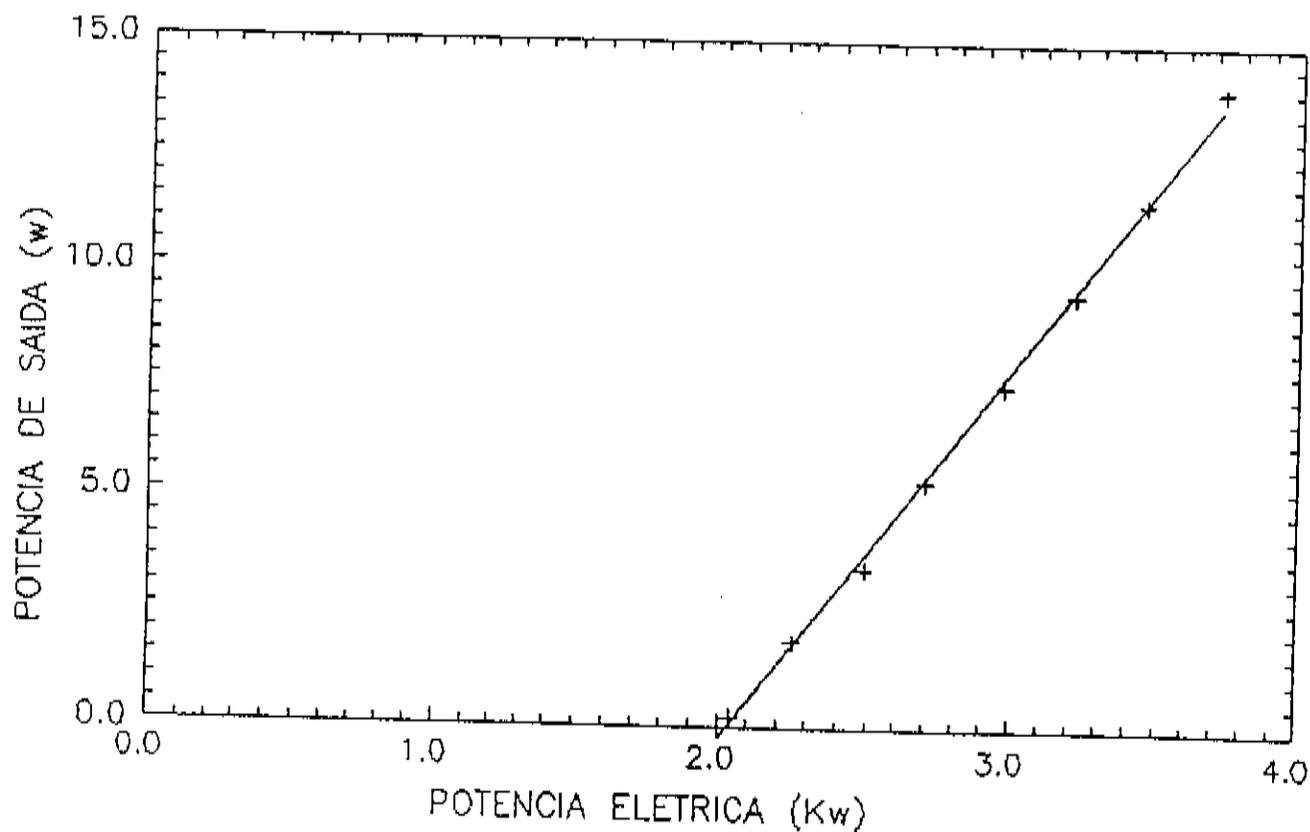


Fig. 5.2- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 80% de reflectância. Eficiência dinâmica obtida = 8,07

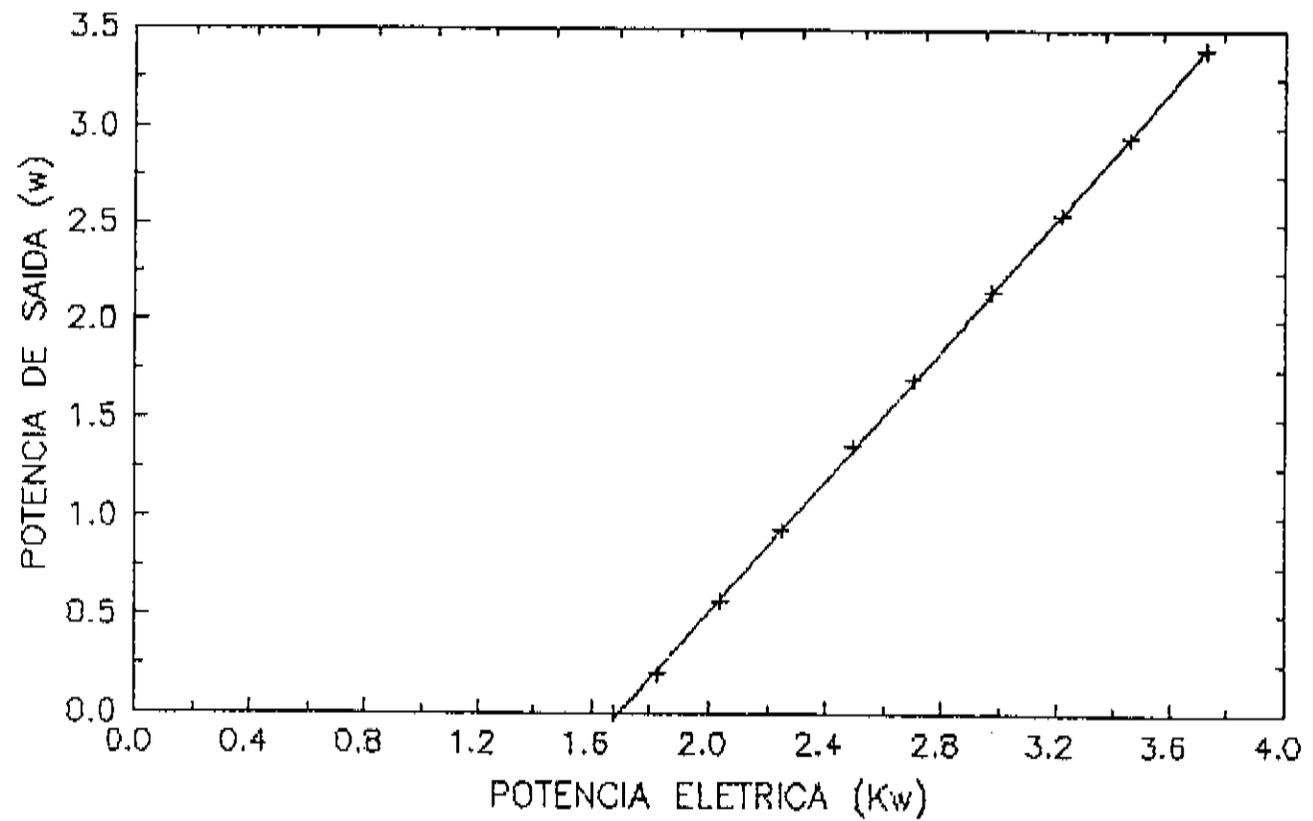


Fig. 5.3- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 90% de reflectância e "pin-hole" intracavidade de 1,5mm de diâmetro. Eficiência dinâmica obtida = 1,74

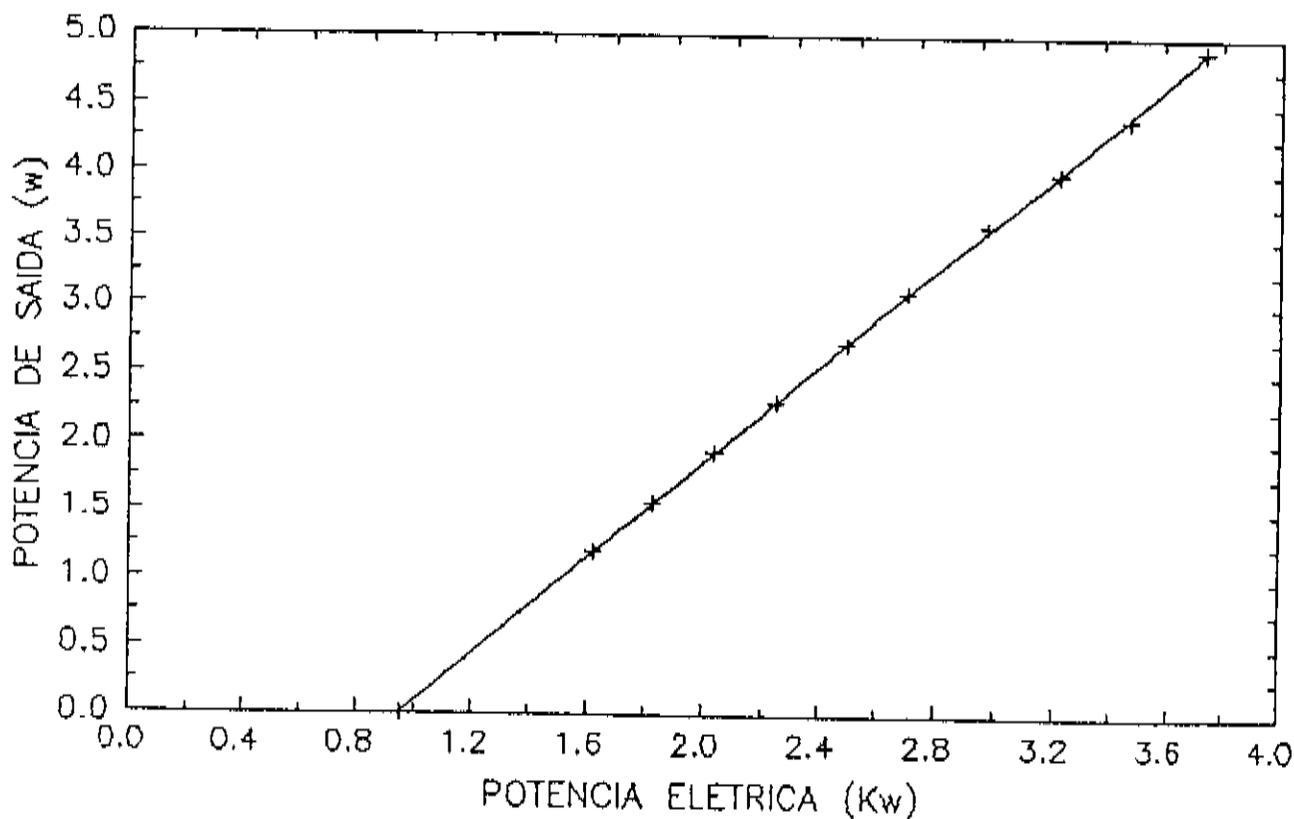


Fig. 5.4- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 2, com espelho de 90% de reflectância e com "pin-hole" intracavidade de 2,0mm de diâmetro. Eficiência dinâmica obtida = 1,76

Para que obtivéssemos uma saída mono-modo (TEM_{00}) lançamos mão do recurso de colocarmos um "pin-hole" intracavidade colocado à 12cm do espelho de saída.

No caso da cavidade C1 utilizamos somente um "pin-hole" de 2,0mm e conseguimos obter uma ED igual a 0,76 (fig.5.9). Para C2 usamos um "pin-hole" de 1,5mm e obtivemos um ED de 1,74 (fig.5.3) e outro de 2,0mm com uma ED de 1,76 (fig.5.4), sempre com o espelho de 90% de reflectividade.

Para o levantamento do perfil do feixe usamos um "pin-hole" de $100\mu m$ distante 130cm do espelho de saída montado em um suporte micrométrico com movimento X-Y, fazendo uma varredura em todo o diâmetro do feixe nas duas direções.

Com o conjunto de pontos obtidos desta forma, fizemos uma regressão linear para uma gaussiana, tendo evidentemente antes disto linearizado tal curva através da multiplicação dos termos da equação pelo logaritmo natural.

$$f(x) = A \times \exp(-B \times (x - \phi)^2) \quad (1)$$

$$\ln f(x) = \ln A - B \times (x - \phi)^2 \quad (2)$$

O resultado obtido pode ser observado, para a cavidade C2 na fig.5.5 (direção vertical) e na fig.5.6 (direção horizontal) com "pin-hole" intracavidade de 1,5mm. Para C1 pode-se notar o resultado na fig.5.10 (direção vertical) e fig.5.11 (direção horizontal) com "pin-hole" de 2,0mm. Nas quatro figuras as linhas sólidas correspondem a curva fornecida pela equação obtida através da regressão linear e os pontos foram obtidos experimentalmente.

Fizemos uma composição espacial destas duas direções - vertical e horizontal - e graficamos o resultado nas fig.5.7 (para C2) e fig.5.12 (para C1) a fim de facilitar a visualização do perfil do feixe à distância medida.

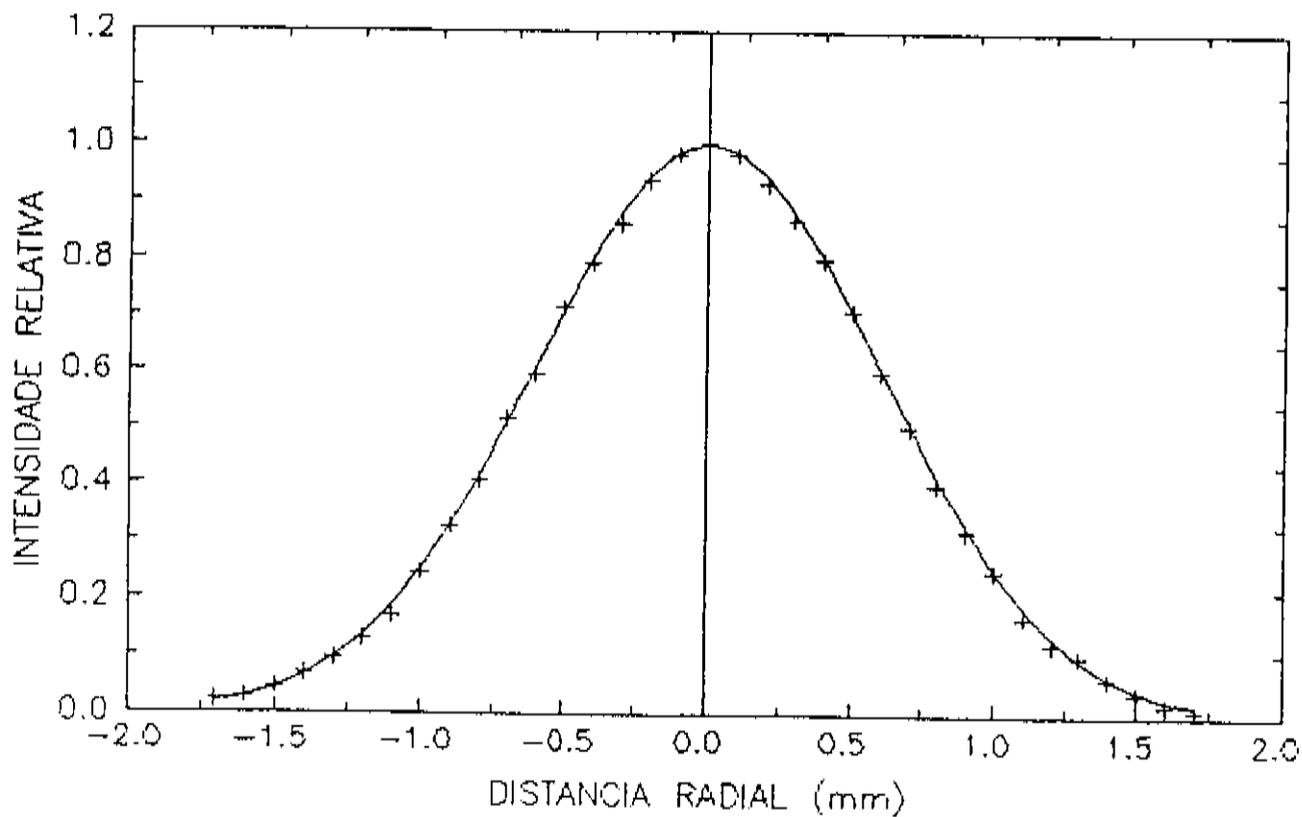


Fig. 5.5- Perfil espacial do feixe a 130cm de distância do espelho de saída (com 90% de reflectividade), direção vertical. Diâmetro do "pin-hole" de varredura igual a $100\mu\text{m}$ e do "pin-hole" intracavidade de 1,5mm.

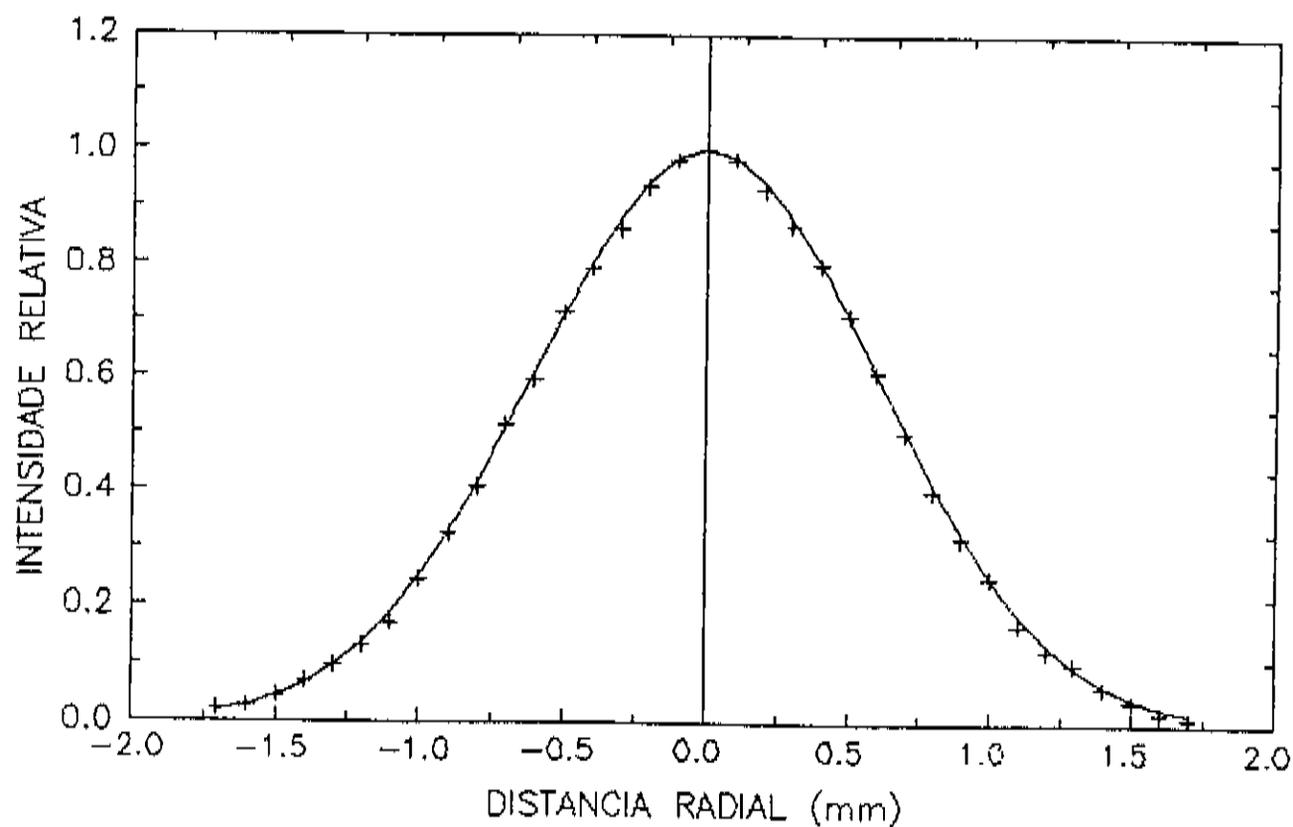


Fig. 5.6- Perfil espacial do feixe a 130cm de distância do espelho de saída (com 90% de reflectividade), direção horizontal. Diâmetro do "pin-hole" de varredura igual a $100\mu\text{m}$ e do "pin-hole" intracavidade de 1,5mm.

Perfil Espacial

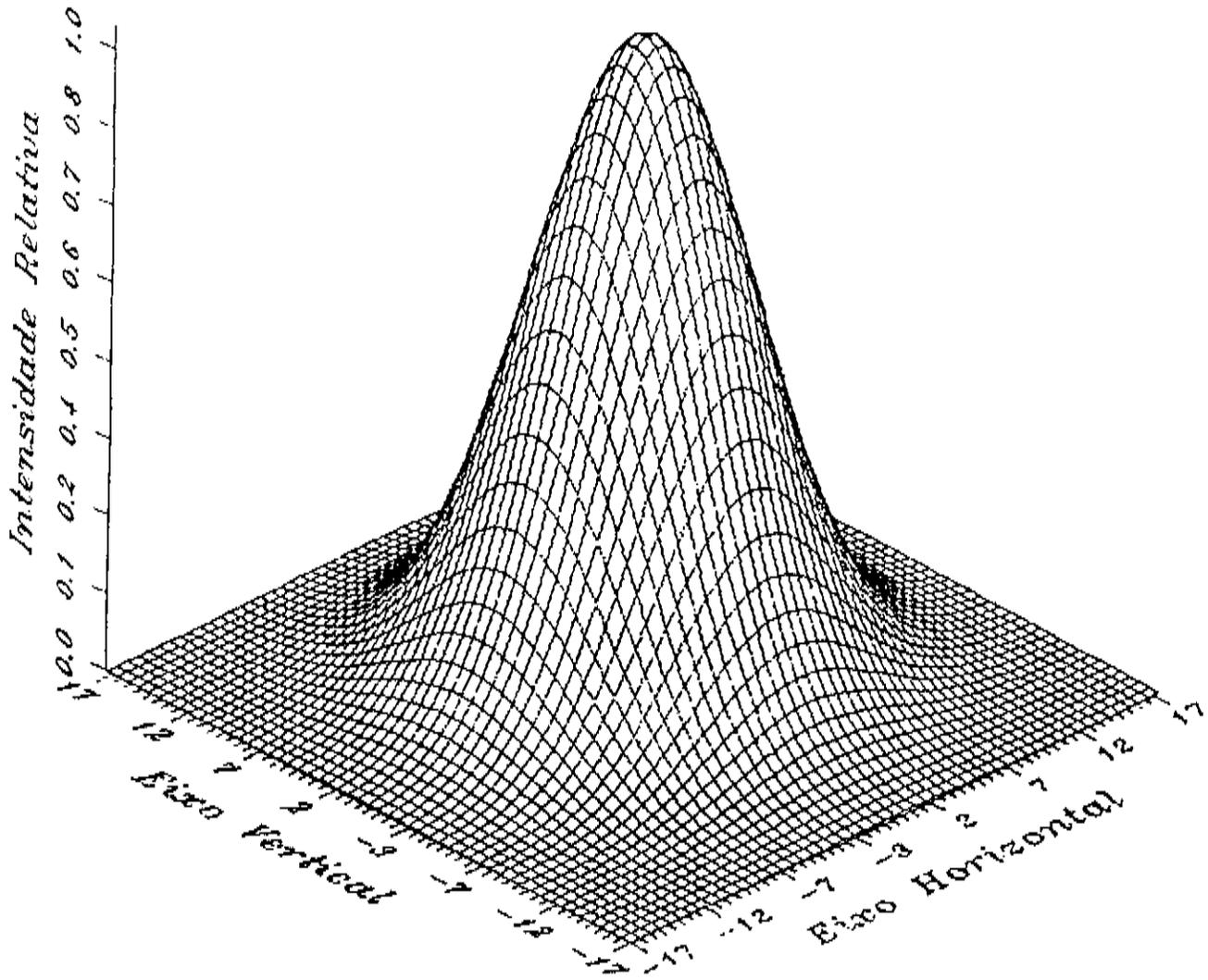


Fig. 5.7- Perfil espacial do feixe a 130cm de distância do espelho de saída (com 90% de reflectividade), "pin-hole" de varredura de $100\mu\text{m}$ e intracavidade de 1,5mm.

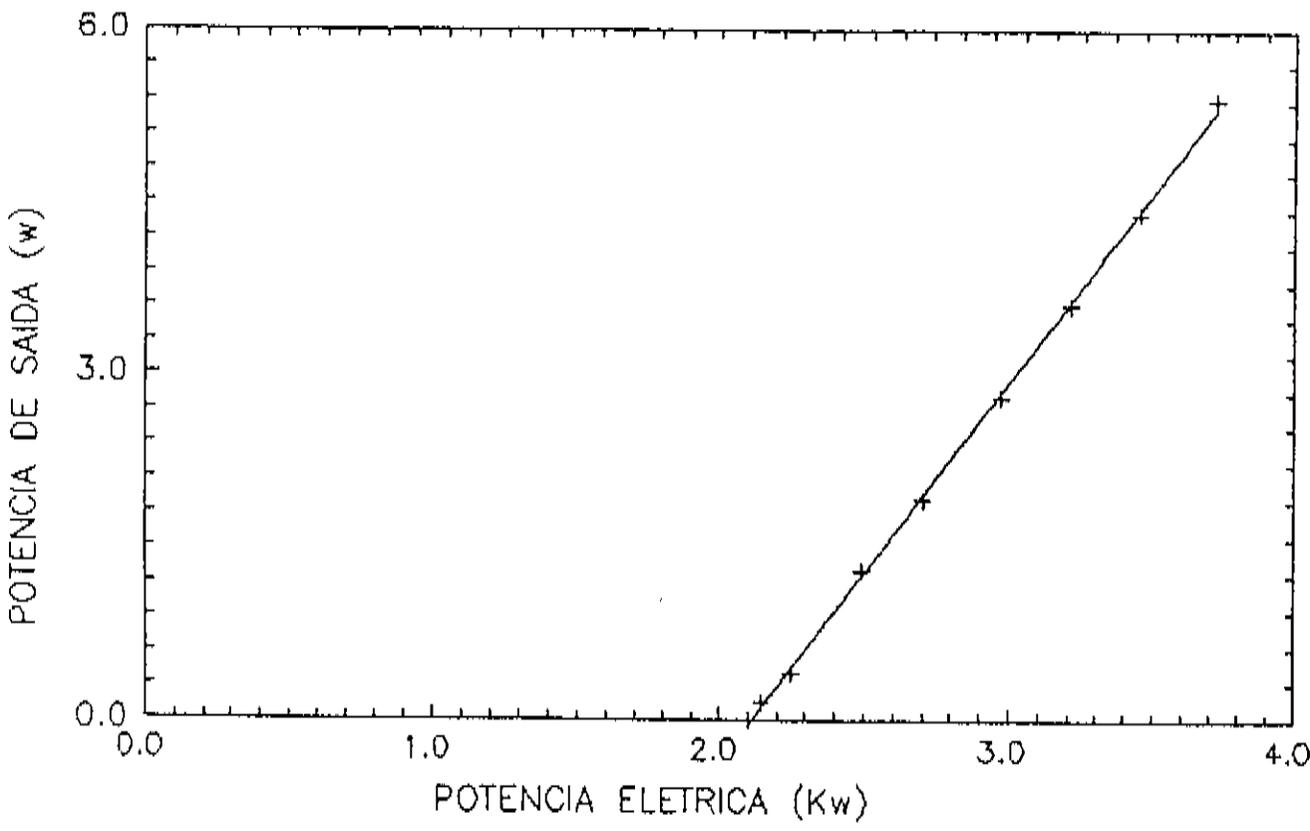


Fig. 5.8- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 1, com espelho de 90% de reflectância. Eficiência dinâmica obtida = 3,29

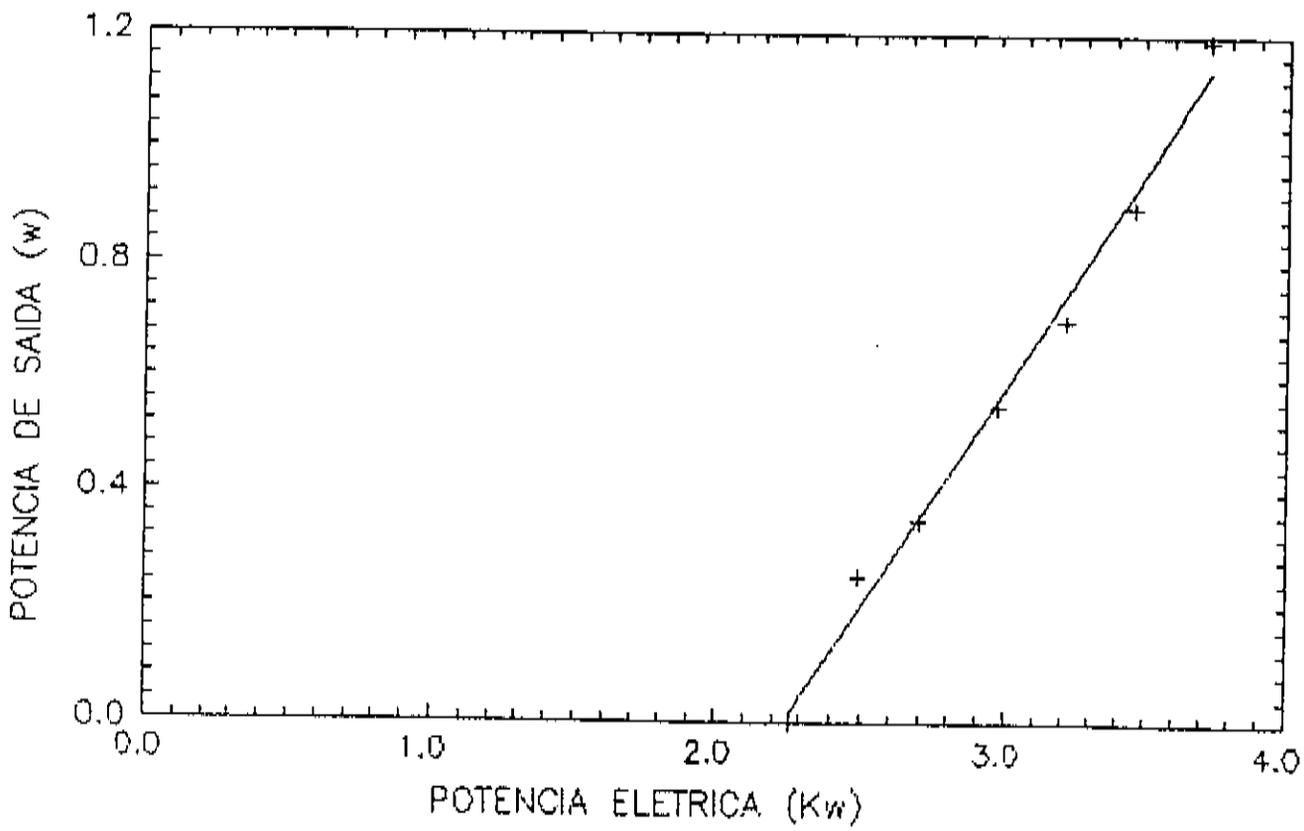


Fig. 5.9- Potência de bombeio versus potência de saída do laser na cavidade 1, com espelho de 90% de reflectância e com "pin-hole" intracavidade de 2,0mm de diâmetro. Eficiência dinâmica obtida = 0,76

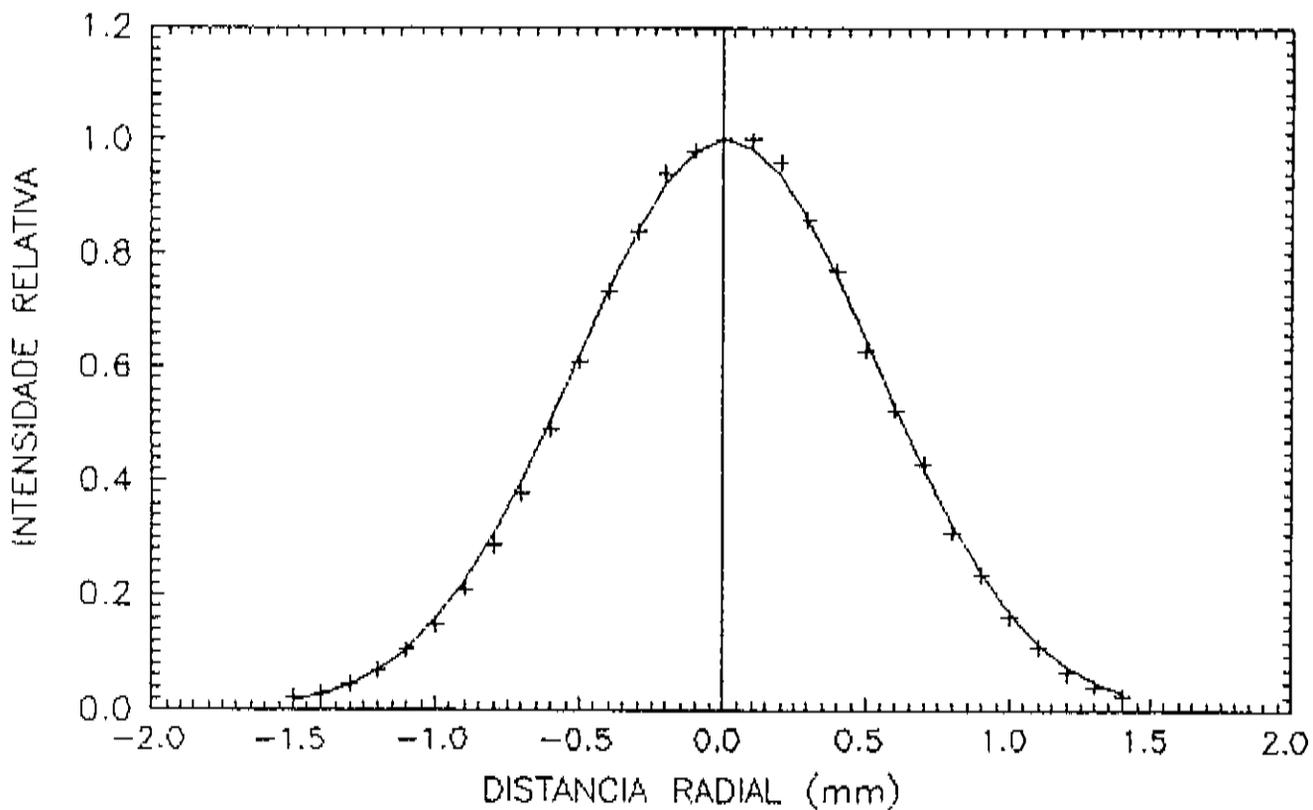


Fig. 5.10- Perfil espacial do feixe de Cl a 130cm de distância do espelho de saída (com 90% de reflectividade), direção vertical. Diâmetro do "pin-hole" de varredura igual a $100\mu\text{m}$ e do "pin-hole" intracavidade de 2,0mm.

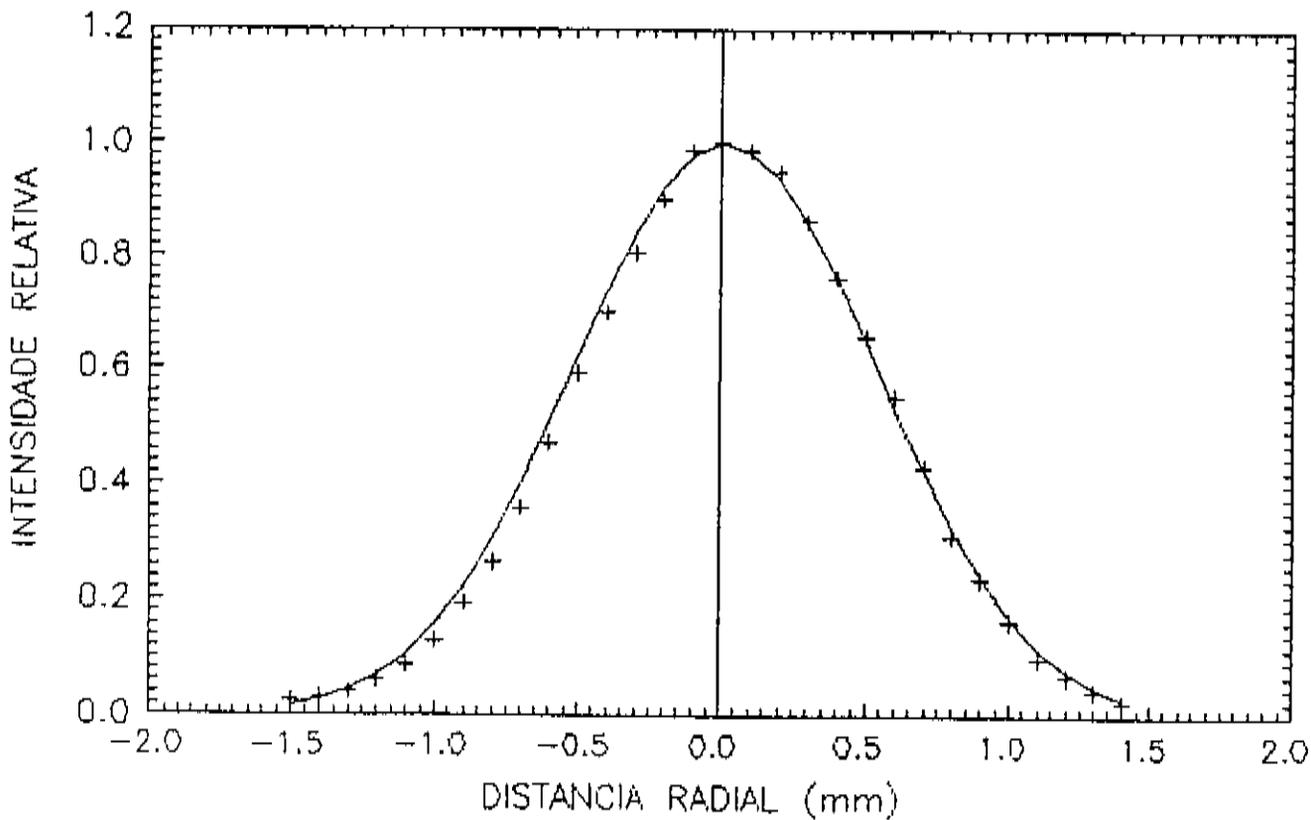


Fig. 5.11- Perfil espacial do feixe de Cl a 130cm de distância do espelho de saída (com 90% de reflectividade), direção horizontal. Diâmetro do "pin-hole" de varredura igual a $100\mu\text{m}$ e do "pin-hole" intracavidade de 2,0mm.

Perfil Espacial

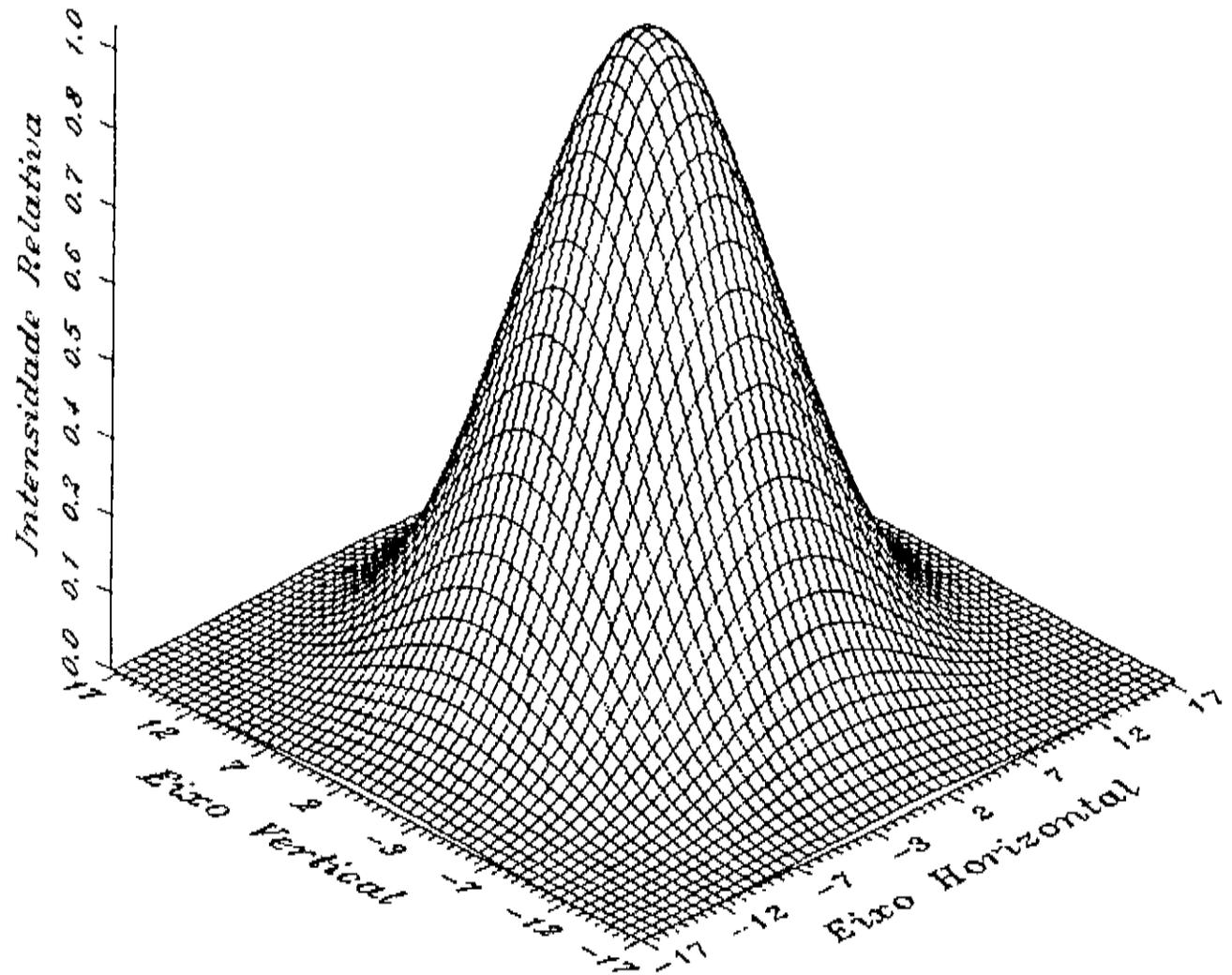


Fig. 5.12- Perfil espacial do feixe de Cl a 130cm de distância do espelho de saída (com 90% de reflectividade), "pin-hole" de varredura de $100\mu\text{m}$ e intracavidade de 2,0mm.

Conforme já demonstrado anteriormente, temos um feixe gaussino, isto é, um feixe cuja intensidade em sua secção transversal é descrito por uma equação do tipo:

$$I = I_0 \times e^{-2(r^2/\omega^2)} \quad (3)$$

Onde I_0 é a intensidade de pico e ω é o raio do feixe. Sendo ω_0 o raio do feixe no acinturamento (onde a frente de onda é plana e o feixe chega a seu mínimo valor), z_0 a distância desde a cintura do feixe até a abertura, então o raio do feixe em função da distância da abertura do oscilador será dado pela seguinte relação:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + ((z - z_0)/F_f)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

onde $F_f = \pi \times \omega_0^2 / \lambda$ é uma constante.

Para encontrarmos os parâmetros de interesse ω_0 e z_0 usaremos $s = z\lambda/\pi$ como sendo uma nova variável adimensional e reagruparemos a equação (4) da seguinte forma:

$$\omega^2(s) - \omega_0^2 = ((s - s_0)/\omega_0)^2 \quad (5)$$

fazendo finalmente uma última alteração chamando a raiz quadrada da equação (5), chegamos a:

$$y = (\omega^2 - \omega_0^2)^{1/2} = (s - s_0)/\omega_0 \quad (6)$$

Ajustamos agora a equação (6) aos dados experimentais da tabela 5.1 (referentes à C1) usando um método iterativo dos mínimos quadrados. Inicia-se o processo supondo um valor para ω_0 , o qual chamaremos ω_0' e com este valor introduzido no membro da esquerda de (6) resolvemos a equação linear na variável s .

Através da regressão linear desta última equação encontramos um novo valor para ω_0' o qual injetaremos novamente no termo da esquerda até que seu valor convirja.

Tab. 5.1

d_z (cm)	d'_z (mm)	P(mW)	s	ω (mm)
60	720	2,13	0,243	0,591
70	820	1,60	0,277	0,692
80	920	1,25	0,310	0,770
90	1020	0,97	0,344	0,860
100	1120	0,82	0,378	0,951
110	1220	0,71	0,411	1,039
120	1320	0,60	0,445	1,130
130	1420	0,53	0,471	1,185
140	1520	0,43	0,513	1,311
150	1620	0,38	0,547	1,402

Os valores que deram o melhor ajuste foram:

$$\omega_0 = 0,35\text{mm}$$

$$z_0 = 20,7\text{cm}$$

Para a divergência angular, que se define como:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} \quad (5)$$

obtivemos, colocando-se os parâmetros obtidos:

$$\theta = 1,91\text{mrd}$$

Repetindo-se o processo agora para a cavidade C2 e usando os dados da tab. 5.2, chegamos aos seguintes parâmetros para esta cavidade:

Tab. 5.2

d_z (cm)	d'_z (mm)	P(mW)	s	ω (mm)
60	720	1,23	0,22	0,64
70	820	0,98	0,25	0,65
80	920	0,81	0,29	0,73
90	1020	0,78	0,32	0,81
100	1120	0,58	0,35	0,82
110	1220	0,48	0,39	0,96
120	1320	0,39	0,42	1,05
130	1420	0,28	0,45	1,16
140	1520	0,26	0,49	1,37
150	1620	0,22	0,52	1,39

Temos então os valores que melhor se ajustaram:

$$\omega_0 = 0,34\text{mm}$$

$$z_0 = 15\text{cm}$$

$$\theta = 1,98\text{mrd}$$

O gráfico da gaussiana equivalente em função da distância desde a abertura do "pin-hole" intracavidade foi plotado e superpondo-se a este, um gráfico obtido pela equação (4), usando-se os valores de ω_0 e z_0 . Na fig. 5.13 temos o gráfico para a cavidade C2 e na fig. 5.14 para a cavidade C1.

Convém salientar que o ponto de mínimo destes gráficos correspondem à saída do "pin-hole" intracavidade.

Nas figuras 5.15 e 5.16 temos os gráficos da lente térmica das duas cavidades (C2 e C1, respectivamente). Observa-se claramente o melhor desempenho da cavidade por nós desenvolvida, fornecendo uma estabilidade térmica maior e portanto uma vida útil maior para a lâmpada.

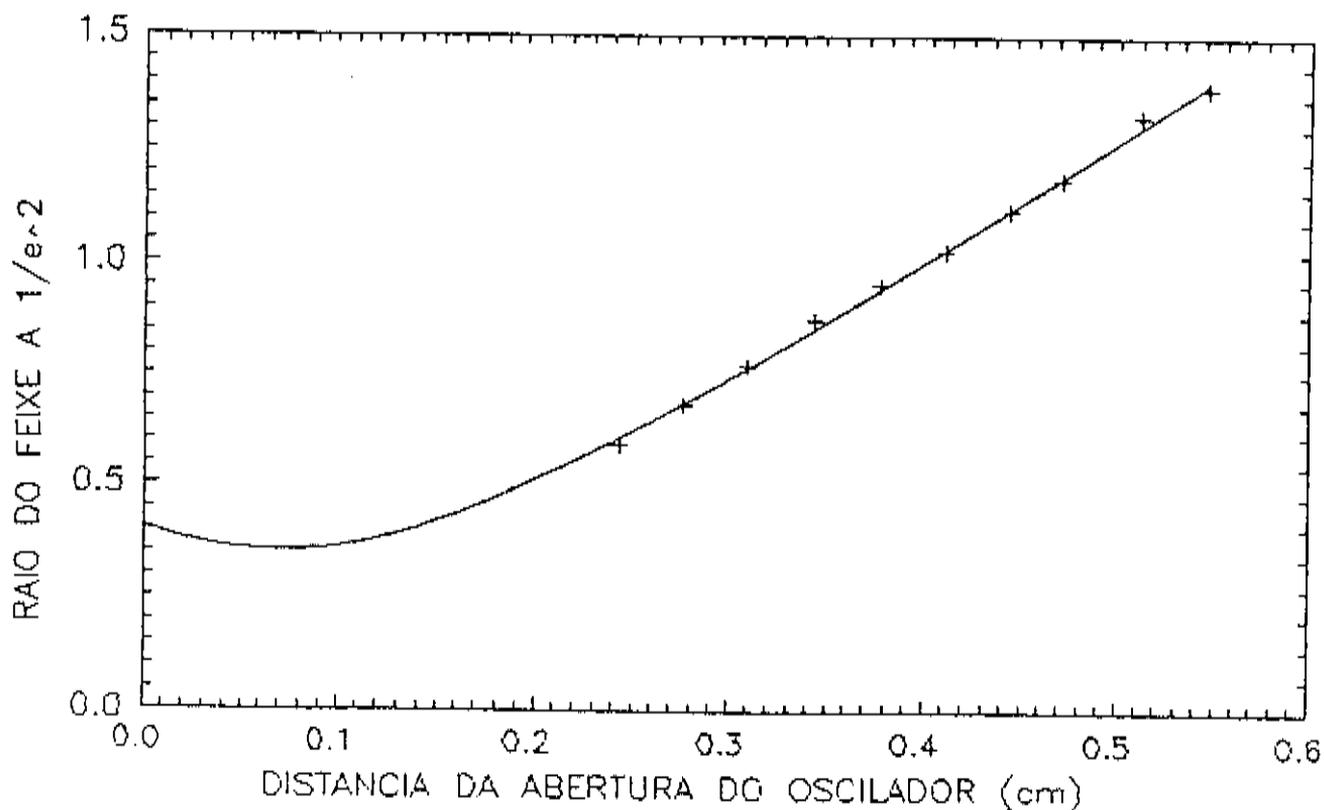


Fig. 5.13- Divergência do feixe do laser de Cl desde o "pin-hole" intracavidade. Linha sólida representa a curva fornecida pela equação obtida através da regressão linear e os pontos correspondem aos dados experimentais.

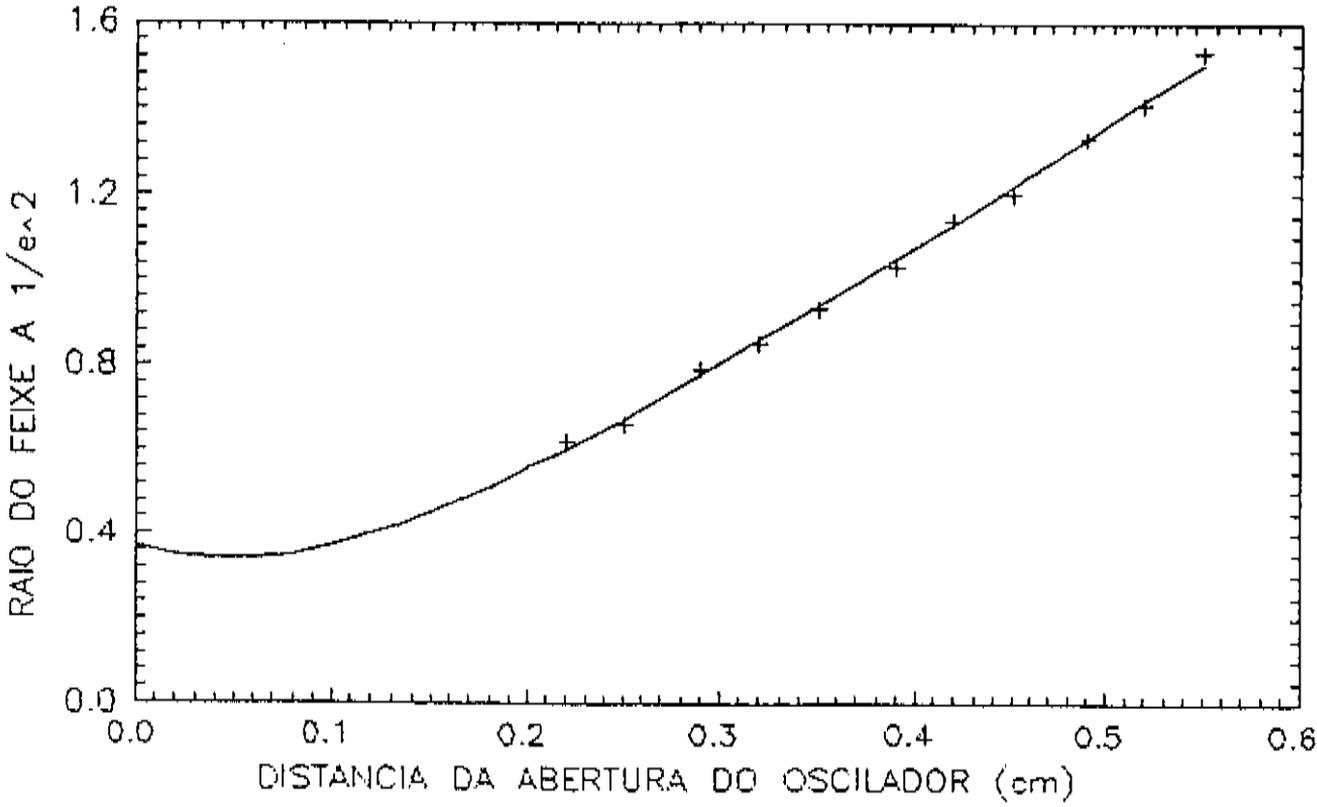


Fig. 5.14- Divergência do feixe do laser de Cl desde o "pin-hole" intracavidade. Linha sólida representa a curva fornecida pela equação obtida através da regressão linear e os pontos correspondem aos pontos experimentais.

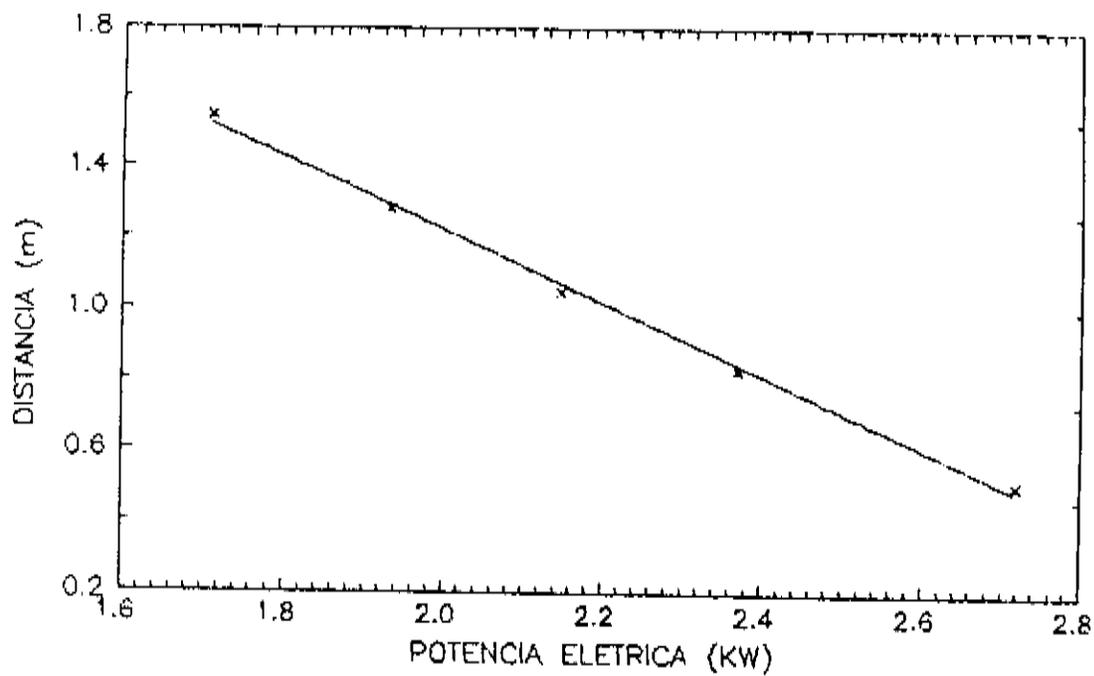


Fig. 5.15 - Lente Térmica na cavidade C2

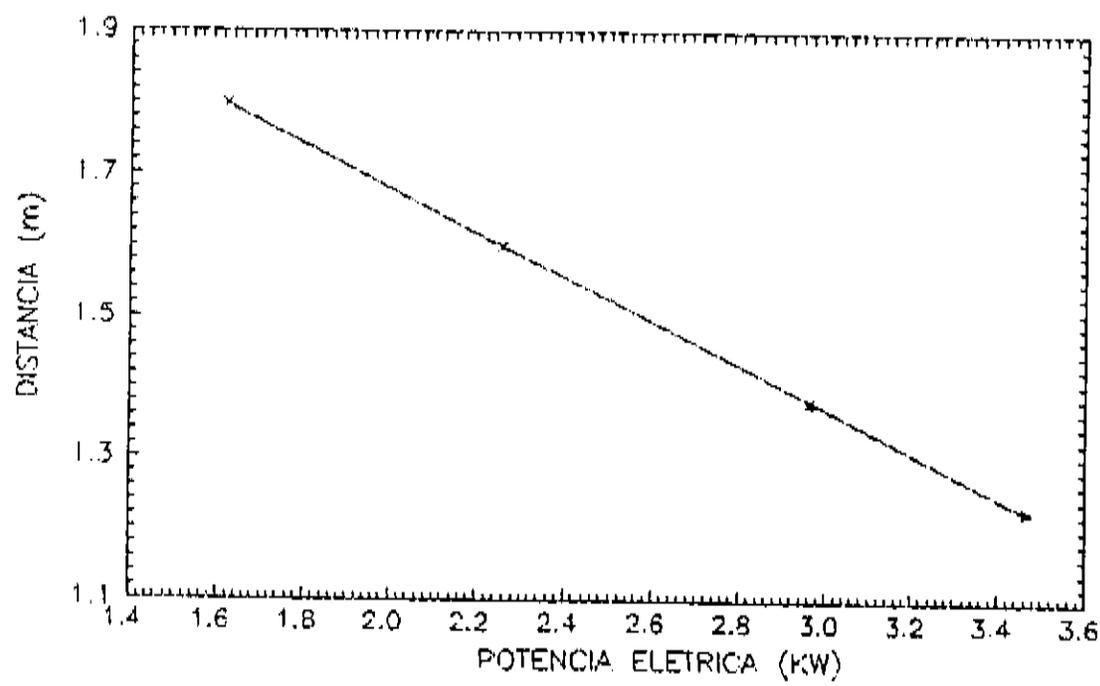


Fig. 5.16 - Lente Térmica na cavidade C1

BIBLIOGRAFIA

Daño por Laseres de Capas Finas Sumergidas en Líquidos

Antonio G. J. Balbin Villaverde

Buenos Aires, 1973

CONCLUSÃO

Com a construção deste laser, o laboratório domina a tecnologia de lasers de potência média, ficando aparelhado com uma fonte confiável no infravermelho para uma gama enorme de experimentos. Não devemos esquecer ainda que podemos dobrar a frequência e obtermos uma fonte de luz no visível e também podemos fazer o laser operar em "mode-lock" ou "Q-switch".

A fonte de potência desenvolvida mostrou-se bastante confiável, com uma ótima estabilidade e um nível de ruído comparável com as melhores fontes comerciais.

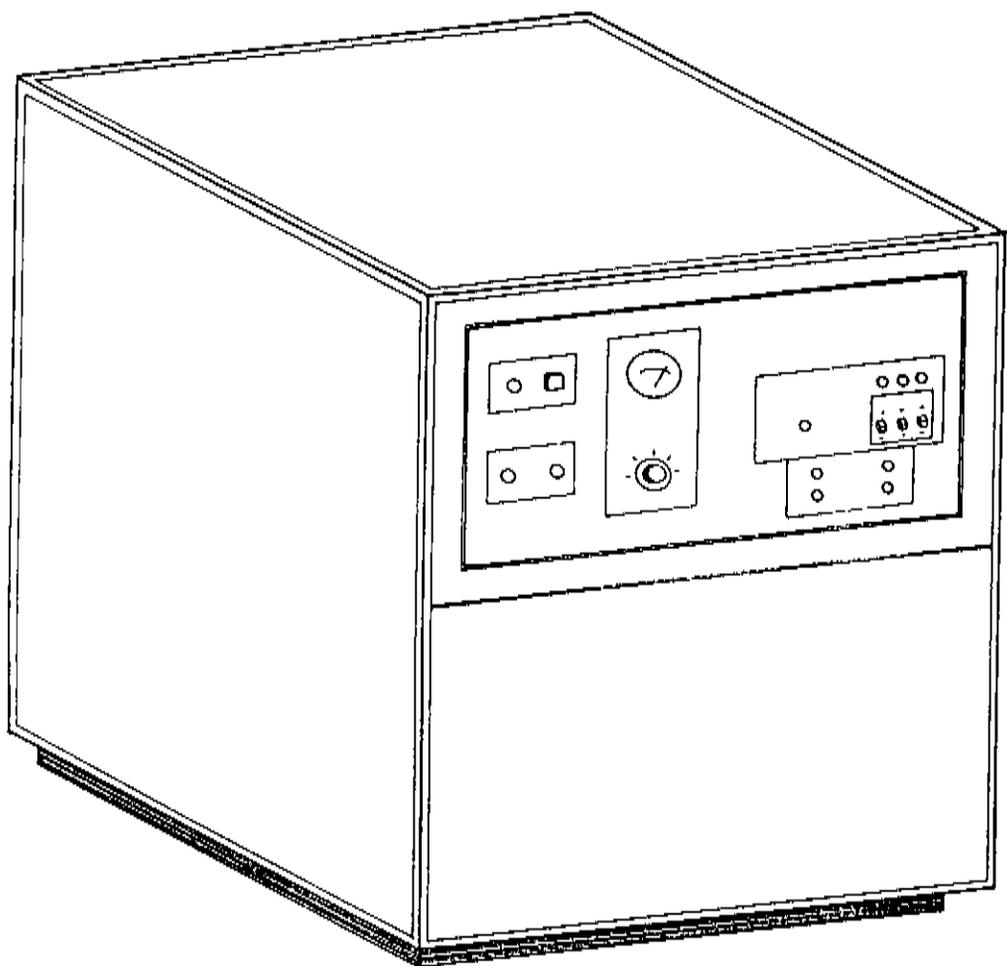
A cavidade comercial testada, fabricada pela ILC (C2) atesta estas afirmações. Conseguimos com seu uso e com um espelho de 90% de reflectividade na saída potências da ordem de 20W (com bombeio de 4kW). O que significa uma potência máxima da ordem de 34W com uma potência de bombeio de 6kW. Já com um espelho de 80% de reflectividade, conseguimos respectivamente 16W e 32W. Com um "pin-hole" intracavidade, para que o laser operasse em monomodo, obtivemos potências de 5,5W (9W) e 4W (7W) nas mesmas condições anteriores e respectivamente com diâmetros de 2,0mm e 1,5mm, ambos utilizados com o espelho de 90%.

Com a cavidade por nós desenvolvida (C1), as potências alcançadas foram menores, 6,5W (13W) e 1,5W (3W com "pin-hole") sempre com o espelho de 90% de reflectividade.

Com um melhor acoplamento óptico esperamos elevar estas potências até valores bastante próximos àqueles conseguidos pela cavidade comercial.

O alinhamento e manutenção da cavidade também foram bastante facilitados pelo desenho desenvolvido mostrando-se muito mais simples que de outras cavidades.

Na figura que se segue mostra-se o desenho da fonte de potência, onde pode-se ter ideia do painel, já descrito no capítulo 5.



Desenho da fonte de potência desenvolvida

APENDICE 1

COMPONENTES ELETRONICOS

Obs.- todos os resistores são de 1/4W, salvo especificações em contrário.

Planilha 1- Controlador Trifásico

R1 a R6 = 100Ω

R7 = $2,7K\Omega$

C1 a C6 =

R8 = $4,7K\Omega$ (pot. lin.)

C7 = $1000\mu F/25V$

R9 = 560Ω

Planilha 2- Placa controladora de cada fase

R1 = $22K\Omega$

R2 = $2,2K\Omega$

R3 = $2,2K\Omega$

R4 = $2,2K\Omega$

C1 = $22nF$

C2 = $47nF$

C3 = $1nF$

D1 = 1N4148

D2 = 1N4148

D3 = 1N4148

D4 = 1N4148

D5 = 1N4001

CI1 = TCA 780

T1 e T2 = transformador de pulso 1:1

TRP1 = trim-pot de $200K\Omega$

R5 = $24\Omega/2W$

R6 = $2,2K\Omega$

R7 = $2,2K\Omega$

R8 = $2,2k\Omega$

C4 = $22nF$

C5 = $22nF$

C6 = $22nF$

D6 = zener $20V/1W$

D7 = 1N4001

D8 = 1N4001

D9 = 1N4001

D10 = zener $20V/1W$

R9 = $24\Omega/2W$

R10 = $470K\Omega$

R11 = $56K\Omega$

R12 = $10K\Omega$

C7 = $22nF$

D11 = 1N4001

D12 = 1N4001

D13 = 1N4148

D14 = 1N4148

A-SARTER

R1 = 18K Ω	R7 = 1K5	R13 = 47 Ω
R2 = 1K Ω	R8 = 15K Ω	R14 = 4K7 Ω
R3 = 4K7 Ω	R9 = 3K3 Ω	R15 = 470 Ω
R4 = 1K Ω	R10 = 10K Ω	R16 = 1K Ω
R5 = 1K5 Ω	R11 = 27K Ω	
R6 = 1K2 Ω	R12 = 1K Ω	
TRP1 = 100k	TRP2 = 3k3	TRP3 = 67k
TRP4 = 6k7	TRP5 = 56k	
C1 = 2200 μ F/25V	C5 = 100pF	C9 = 10 μ F/25V
C2 = 2200 μ F/25V	C6 = .1 μ F	C10 = .047 μ F
C3 = 470 μ F/25V	C7 = 1000nF	
C4 = .1 μ F	C8 = .01 μ F	
CI1 = 741	CI3 = 74123	CI4 = 555
CI2 = 7414		
RT1 = 7805		
D1 = LED verde	D2 = 1N4007	
Q1 = BD137	Q2 = BD137	Q3 = BD140
T1 = trafo pulso 1:1		
SW1 = push-button (NA)		

B- GERADOR DE PULSOS

R1 = 220k Ω	R2 = 100k Ω
C1 = 1 μ F/25V	C2 = 2.5 μ F/2000V
SCR1 = SKT2/80	
T1 = trafo 1:5	TRP = trafo 1:10

Planilha 4- Controlador de Temperatura

R1 = 10k Ω	R9 = 2k7 Ω	R17 = 1k Ω
R2 = 10k Ω	R10 = 33k Ω	R18 = 1k Ω
R3 = 100k Ω	TRP1 = 1K Ω	R19 = 10k Ω
R4 = 100k Ω	R11 = 1k8 Ω	R20 = 10k Ω
R5 = 100k Ω	R12 = 4k7 Ω	R21 = 10k Ω
R6 = 100k Ω	TRP2 = 47k Ω	R22 = 1k Ω
R7 = 10k Ω	R15 = 10k Ω	R23 = 1k Ω
R8 = 1k8 Ω	R16 = 27k Ω	
C1 = 100nF	C2 = 10 μ F	C3 = 10 μ F
D1 = 1N4148	D3 = LED verm.	D4 = LED amar.
D2 = zener 3V/500mw		
Q1 = BC237	Q2 = BC237	
CI1 = LM324	CI2 = LM748	
RL1 = MC2RC2	RL2 = MC2RC2	

Planilha 5 - Fonte/ Controlador do Booster2

R1 = 1k Ω	R4 = trim-pot 10k Ω	R7 = 1k Ω
R2 = 120k Ω	R5 = 1k Ω	
R3 = 3k3 Ω	R6 = 68 Ω	
C1 = 2700 μ F/25	C3 = .1 μ F	C5 = 100 μ F/25V
C2 = 470 μ F/25V	C4 = 1000 μ F/25V	C6 = 100 μ F/25V
RT1 = 7812	RT2 = 7912	RT3 = 7905
CI1 = 748		
Q1 = BD137		

Planilha 6

A- Multiplicador de tensão

R1 = 27Ω

D1 a D10 = 1N4007

C1 a C10 = $100\mu\text{F}/400\text{V}$

B- Rotação de Fase

R1 = $30\text{k}\Omega/2\text{W}$

R3 = $30\text{k}\Omega$

R4 = $36\text{k}\Omega$

R2 = $91\text{k}\Omega/2\text{W}$

C1 = $.05\mu\text{F}/1000\text{V}$

C2 = $.05\mu\text{F}/1000\text{V}$

L1 = lâmp. neon

C- Controlador do relê 3

R1 = relê

R2 = $3\text{k}\Omega$

C1 = $2700\mu\text{F}/25\text{V}$

Q1 = BD137