



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA (CCEN)
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
BACHARELADO EM FÍSICA

ELVIS ALMEIDA DE SOUSA

INVESTIGAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA CAVIDADE DE FABRY-PEROT PARA
ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA

JOÃO PESSOA- PB

2023

ELVIS ALMEIDA DE SOUSA

INVESTIGAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA CAVIDADE DE FABRY-PEROT PARA
ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA

Dissertação apresentada ao Curso de BACHARELADO EM FÍSICA do CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA (CCEN) da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Física. Área de Concentração: Física Atômica e Molecular

Orientador: Prof. Dr. Thierry Marcelino
Passerat de Silans

JOÃO PESSOA- PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725i Sousa, Elvis Almeida de.

Investigação e construção de uma cavidade de
Fabry-Perot para análise espectroscópica / Elvis
Almeida de Sousa. - João Pessoa, 2023.
70 p. : il.

Orientação: Thierry Marcelino Passerat de Silans.
TCC (Curso de Bacharelado em Física) - UFPB/CCEN.

1. Interferômetro de Fabry-Perot. 2. Faixa
espectral livre. 3. Estabilidade da cavidade. I.
Silans, Thierry Marcelino Passerat de. II. Título.

UFPB/CCEN

CDU 53(043.2)

ELVIS ALMEIDA DE SOUSA

**INVESTIGAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UMA CAVIDADE DE FABRY-PEROT
PARA ANÁLISE ESPECTROSCÓPICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Física, do Departamento de Física, do Centro de Ciências Exatas e da Natureza, da Universidade Federal da Paraíba, como parte do requisito para obtenção do título de bacharel em Física.

Aprovado em: 23 / 05 / 2023.

 Documento assinado digitalmente
THIERRY MARCELINO PASSERAT DE SILAN
Data: 31/05/2023 10:56:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Banca Examinadora

Prof. Doutor Thierry Marcelino Passerat de Silans

Orientador

(UFPB/CCEN/DF)

 Documento assinado digitalmente
CHARLIE SALVADOR GONCALVES
Data: 31/05/2023 11:14:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Doutor Charlie Salvador Gonçalves

Membro Interno

(UFPB/CCEN/DF)

 Documento assinado digitalmente
KAROLINE OLIVEIRA MOURA
Data: 01/06/2023 16:02:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Doutora Karoline Oliveira Moura

Membro Interno

(UFPB/CCEN/DF)

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos principais vão para todos aqueles que me ajudaram nessa caminhada e fazem parte da minha família: Edvando de Souza (pai), Alcinete Almeida (mãe), Erica Almeida (irmã).

Agradecimentos especiais às pessoas que mesmo não sendo familiares me ajudaram nas situações da vida, como Fabiano Pereira, Deynisson Breno, Ediomara Lucindo, Heloiza Cavalcante, Guilherme Cruz, Inaiara Rodrigues, Clécia Vitória, Igor Pessoa, Gessiane Cipriano e muitos outros.

Por fim, também agradeço aos professores que me ajudaram que são; meu orientador Prof. Dr. Thierry Passerat de Silans por todo o suporte; ao Prof. Dr. Jesus Pavon Lopez pelos ensinamentos; ao Prof. Dr. Joel Batista de Fonseca Neto pelos conselhos; ao Prof. Dr. Charlie Salvador Gonçalves pelo apoio e também professor o Eduardo que me ensinou no ensino Fundamental, obrigado, através das suas aulas eu pude escolher esse curso que proporcionou múltiplos conhecimentos.

RESUMO

O interferômetro de Fabry-Perot é um dispositivo utilizado em diversas áreas da tecnologia e ciência, e em especial na Física Atômica experimental, é usado para análises espectroscópicas. Para a Física, descrever as frequências presentes em um espectro é de grande relevância pois trazem informações sobre as interações das partículas do sistema estudado. Entretanto, é necessário que o interferômetro de Fabry-Perot usado seja acurado o suficiente para mostrar as frequências distintas do espectro que estão sendo analisados. Assim, o objetivo geral deste trabalho é a construção de um interferômetro de Fabry-Perot para ser usado em análise espectral. Montamos experimentalmente um Fabry-Perot com Faixa Espectral Livre (FSR, do inglês, Free Spectral Range) de 6 GHz para separar as duas linhas do espectro de fluorescência do Césio, que são separados por 9 GHz. Logo, descrevemos as condições físicas necessários para torná-lo estável, os métodos experimentais adotados e a comparação com o que é previsto pela teoria. Em primeiro momento, analisamos a Faixa espectral livre e largura da meia altura dos máximos de intensidade do sinal de interferência produzido quando incidimos luz laser com frequência variável na cavidade de Fabry-Perot. No segundo momento, fixamos a frequência do laser e variamos o tamanho da cavidade de Fabry-Perot através de um cristal oscilador fixado em um dos espelhos da cavidade afim de utilizar o Fabry-Perot como analisador de espectro. Por fim foi utilizado um difusor para simular a luz espalhada por um vapor com intuito de verificar o limite do instrumento em capturar luz difusa.

Palavras-chave: Interferômetro de Fabry-Perot. Faixa espectral livre. Estabilidade da cavidade.

ABSTRACT

Fabry-Perot Interferometers is an instrument used in many technology areas and science, in special atomic Experimental Physical area, it is used for spectroscopic analysis. For the physics, describing the frequency present in a spectrum has a great relevance, therefore brings more knowledge about particles interactions of the studied system. However, it is necessary that the Fabry-Perot interferometer used could be accurate enough to show the different frequencies of the spectrum that are being analyzed. This way, the general objective of this research is the construction of a Fabry-Perot Interferometers, to be used in spectral analysis. One Fabry-Perot's was assembled with a free spectral range (FSR, in English, Free Spectral Range) of 6 GHz to separate the two lines of the fluorescence spectrum of cesium which are separated by 9 GHz. Thus, we described the physical conditions necessary to make it stable, the experimental methods adopted and the comparison with is predicted by theory. In the first moment, was analyzed the free spectral ranger and also the width of half height of the maximum intensity of the interference signal which is produced when we shine Laser light with variable frequency on the Fabry-Perot cavity. In a second moment, we kept the frequency and we vary the size of Fabry-Perot cavity through a crystal oscillator fixed in one of the cavity mirrors with the intention to use the Fabry Perot as a spectrum analyzer. Finally, was used a diffusor to simulate scattered light by vapor in order to verify the instrument's limits in capturing diffuse light.

Keywords: Fabry-Perot Interferometers. Free spectral range. Cavity stability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interferência por divisão de amplitude. A onda incidente com o primeiro espelho faz um ângulo θ' com a normal, o mesmo é refletido e transmitido parcialmente diversas vezes.	15
Figura 2 – Cálculo da transmissão da cavidade em função da frequência para diferentes valores de refletividades. O FSR e FWHM estão identificados na imagem. As curvas em: Vermelho, azul e em preto, possuem coeficiente de refletividade de 20%, 80% e 99% respectivamente.	17
Figura 3 – Simulação do padrão de reflexão em cavidade com espelho plano e côncavo, variando a distância entre eles	19
Figura 4 – O FG em uma cavidade com um espelho plano M_1 , e um espelho curvo M_2 , propagando-se ao longo do eixo z . O comprimento z_0 que é o intervalo de Rayleigh, a menor largura é w_0 e seu raio de curvatura é $R(z)$	24
Figura 5 – Representação gráfica da configuração. As linhas vermelhas representam feixes do laser.	26
Figura 6 – Espectro de transmissão do interferômetro Fabry-Perot da montagem auxiliar.	28
Figura 7 – Esquemático da montagem experimental construída da CFP.	31
Figura 8 – Pastilha PZT de 27 mm de diâmetro.	32
Figura 9 – Ilustração esquemática do PZT e o suporte no qual o PZT foi fixado.	32
Figura 10 – Polimentos dos espelhos: Os dois primeiros espelhos foram polidos enquanto o último não.	33
Figura 11 – Polimento dos espelhos planos: antes e depois.	34
Figura 12 – Ilustração esquemática do suporte no qual é fixado o espelho concavo para realizar o abastamento: O espelho é fixado no suporte com a parte fosca exposta.	34
Figura 13 – Sistema utilizando para realizar o alimento da cavidade	35
Figura 14 – Modelo ilustrativo do difusor utilizado no experimento.	36
Figura 15 – Aparato experimental utilizando para medir captura o sinal da CFP com luz difusa.	37

Figura 16 – Transmissão da cavidade em função da frequência. Em vermelho: O sinal da CFP comercial. Em azul: O da montagem. Em preto: A rampa de varredura gerada pelo gerador de função.	39
Figura 17 – Transmissão da cavidade em função da frequência. Sinal da CFP	40
Figura 18 – Transmissão da cavidade ao longo do tempo: Em vermelho: $t = 0$ s. Em azul: $t = 10$. Em preto: $t = 70$ s.	42
Figura 19 – Transmissão de cavidade com laser de frequência constante, variando o tamanho da cavidade através do PZT.	43
Figura 20 – Luz difusa: A curva em vermelho representa o ajuste feito através de uma função exponencial, para mostrar como os pontos experimentais (que estão em preto) diminuem com o aumento do grau de difusidade (g.d.d) da luz espalhada.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura e corrente de funcionamento do laser	27
Tabela 2 – Deslocamento dos picos em função do tempo devido a flutuações do ambiente.	42

LISTA DE SÍMBOLOS

E_t	Campo elétrico total
E_0	Amplitude do campo elétrico
τ	Coefficiente de transmissão
ρ	Coefficiente de reflexão
j	Número complexo
$\Delta\Phi$	Fase acumulada pela onda após uma viagem de ida e volta dentro da cavidade
θ'	Ângulo de incidência
θ	Ângulo relacionado com o ângulo de incidência através da lei de Snell
m	Número natural
k	Número de onda
d_s	Comprimento de um segmento AB ou CD
d	Distância entre os espelhos
n	Índice de refração do médio
r	Refletividade dos espelhos
T	Transmissão
F	Fator de contraste (<i>Finesse</i>)
ν	Frequência
ν_{FSR}	Faixa espectral Livre em frequência
ν_{FWHM}	Largura total na metade da altura máxima
c	Velocidade da luz
$\mathcal{F}$	<i>Finesse</i>
w_0	Tamanho da cintura
w_z	Raio no qual as amplitudes caem a 1/e de seu valor axial, no plano z ao longo do feixe
z	Eixo longitudinal
z_0	Comprimento de Rayleigh

λ	Comprimento de onda
r	Distância radial a partir do eixo central do feixe
$R(z)$	Raio de curvatura da frente de onda do feixe em z
$\eta(z)$	Fase de Gouy em z , um termo de fase adicional além daquele atribuível à velocidade de fase da luz
$q(z)$	Parâmetro complexo do feixe
A, B, C, D	Parâmetros que representam as características dos elementos ópticos
M_1, M_2, M_3, M_4	Matrizes que representam cada um dos elementos ópticos do sistema
f	Distância focal
ϕ	Fase em radianos no qual surgem os máximos de intensidade
ΔL_{FSR}	Condição em termo do comprimento de onda para o surgimento dos máximos de intensidade
$\hat{i}, \hat{j}$	Versores
D	Distância entre as lentes

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Propriedades básicas da Cavityde de Fabry-Perot	14
2.2	Padrão de reflexão de uma CFP através do modelo de raios	18
2.3	Modelo de uma CFP com feixe Gaussiano	19
2.3.1	<i>Crítério de estabilidade</i>	21
2.3.2	<i>Largura e raio de curvatura de um feixe Gaussiano dentro da cavityde</i> . .	22
2.4	Analizador de espectro	24
3	CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	26
3.1	Modelo esquemático experimental	26
3.2	O Laser	27
3.3	Isolador óptico	27
3.4	Divisor óptico e espelhos	28
3.5	CFP comercial (Montagem II)	28
3.6	Detectores e Osciloscópio	29
3.7	Experimento Principal	29
3.7.1	<i>Fibra óptica</i>	29
3.7.2	<i>Telescópio</i>	29
3.7.3	<i>Cavityde</i>	30
3.7.4	<i>Pastilha PZT</i>	31
3.7.5	<i>Polimento dos espelhos côncavos</i>	33
3.7.6	<i>Alinhamento da CFP (Montagem II)</i>	35
3.8	Montagem III; simulando fluorescência	36
3.9	Coleta e processamento de dados	37
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES	39
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	47
6	APÊNDICE A	49
7	APÊNDICE B	57
8	APÊNDICE C	59

9	APÊNDICE D	61
---	----------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Em 1899, Charles Fabry e Alfred Perot construíram o interferômetro de cavidade que recebeu seus nomes [1]. Devido ao seu maior poder de resolução e praticidade em comparação com os instrumentos de grade de difração, a cavidade de Fabry-Perot (CFP) desempenhou um papel central nos primeiros estudos da estrutura fina das linhas espectrais, sendo um interferômetro muito importante devido às suas várias aplicações, tais como espectroscopia de raios-X [2] e medidas de fotoluminescência [3].

Desde a criação da CFP, esta tem sido aprimorada e gerado novos campos de estudo, incluindo a Eletrodinâmica quântica de cavidades que utiliza microcavidades [4, 5, 6]. Além disso, existem inúmeras utilidades para as cavidades ópticas, enquanto ressonadores. Por exemplo, nos lasers dos laboratórios, são comumente usadas como mecanismo de *feedback* em osciladores de laser, permitindo estabilizar a frequência de emissão destes últimos [7]. As cavidades ópticas também são empregadas na análise de espectros ópticos, e para o aprimoramento da potência dos feixes fundamentais [8]. Na área de tecnologia, são utilizados sensores de fibra óptica monomodo e multimodo utilizando a CFP, bem como sensores de detecção de sinais de emissão acústica [9, 10].

Neste trabalho, montamos experimentalmente um Fabry-Perot (FP) com Faixa Espectral Livre (FSR, do inglês, Free Spectral Range) de 6 GHz para separar as duas linhas do espectro de fluorescência do Césio. A escolha do FSR de 6 GHz é importante, já que interferômetros comerciais geralmente têm FSR de 1 GHz, 1,5 GHz ou 10 GHz. No entanto, para a fluorescência do vapor de Césio, duas linhas estão separadas por 9,1 GHz, e em um interferômetro de 10 GHz, por exemplo, essas linhas seriam espaçadas por apenas 1 GHz, tornando impossível separá-las devido à sua largura. Com o FSR de 6 GHz, é possível separar as linhas, pois elas são vistas a uma distância espectral de 3 GHz uma da outra.

O presente estudo está dividido em 4 capítulos. No segundo, é apresentada uma introdução sobre as propriedades básicas da cavidade FP, os fenômenos ópticos envolvidos e a teoria para a estabilidade e transmissão da cavidade plana côncava de Fabry-Perot. No terceiro capítulo, é descrita a configuração experimental, com uma breve discussão sobre os principais componentes do sistema e os procedimentos realizados para a coleta de dados, como a medição de diferentes aspectos da transmissão da cavidade.

O quarto capítulo é destinado à apresentação dos resultados e discussões, tais como

a transmissão da cavidade e a configuração estável e previsível do sistema. Por fim, no quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais do estudo realizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentadas as propriedades principais do CFP, tais como sua transmissão, condições de estabilidade e sua utilização como analisador de espectro. Em vista disso, destacam-se dois parâmetros da CFP: i) o fator que mede a qualidade da cavidade, que é a *finesse*, e depende basicamente do alinhamento, da refletividade e da qualidade dos espelhos; e ii) a faixa espectral livre, que é importante para análises espectrais.

Assim sendo, é de praxe que toda teoria científica possa ser descrita de diferentes maneiras. Portanto, discutiremos, através de um modelo usando dois espelhos planos, as propriedades fundamentais do CFP. Usaremos, em um primeiro momento, a teoria dos raios para mostrar o padrão de reflexão dentro da cavidade. Por fim, apresentaremos o modelo mais realista, utilizando o feixe Gaussiano (FG) para descrever como o raio de curvatura e largura do FG devem se comportar para que a cavidade seja estável [11].

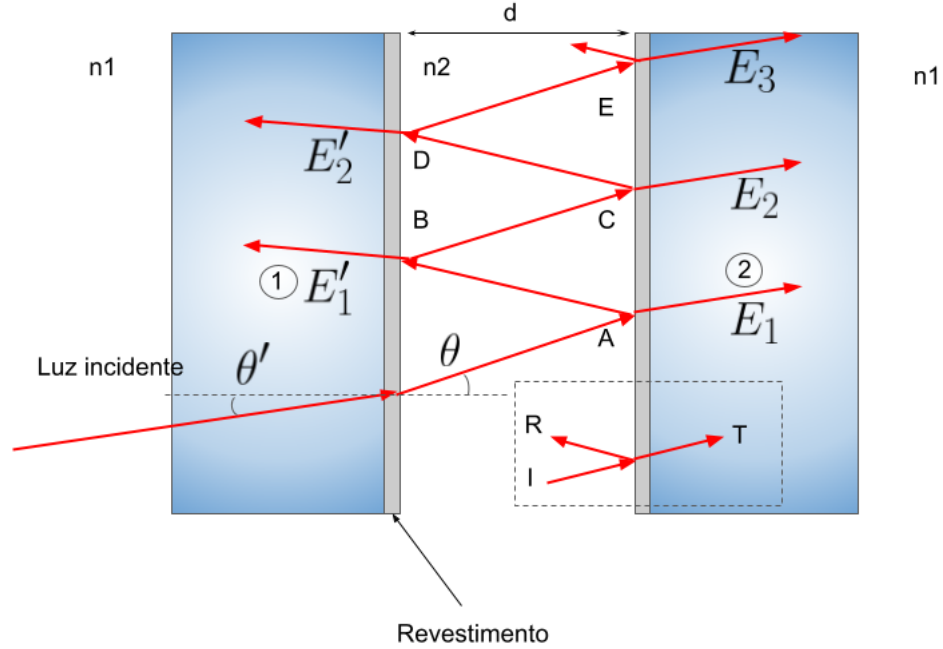
2.1 Propriedades básicas da Cavidade de Fabry-Perot

O dispositivo óptico conhecido como CFP é um dispositivo óptico que gerar padrões de interferência. A CFP é um sistema óptico composto por dois espelhos que formam uma cavidade ressonante. Essa cavidade permite que somente certos comprimentos de onda da luz incidente passem por ela, de acordo com a condição de interferência construtiva que ocorre dentro da cavidade [12].

A cavidade óptica de um interferômetro Fabry-Perot é criada pelo par de espelhos planos ou esféricos com refletividades r_1 e r_2 , separados por uma distância d , e contendo um meio de índice de refração n_2 entre os espelhos [11]. Embora os interferômetros utilizem espelhos esféricos para obter o resultado pretendido, em um primeiro momento, simplificaremos as coisas e consideraremos o caso de dois espelhos planos paralelos. Nessa situação, considere uma onda plana incidente no interferômetro em uma direção que forma um ângulo θ' com a normal no primeiro espelho (figura 1).

Parte da luz incidente é refletida e parte é transmitida pelo primeiro espelho, dependendo dos coeficientes de transmissão e reflexão do espelho. A onda transmitida pelo primeiro espelho reflete no segundo espelho e o processo se repete. Utilizando o princípio da superposição, podemos encontrar o campo transmitido. Esse campo pode ser dado pela Eq.2.1.

Figura 1 – Interferência por divisão de amplitude. A onda incidente com o primeiro espelho faz um ângulo θ' com a normal, o mesmo é refletido e transmitido parcialmente diversas vezes.



Fonte: Adaptação [11, 13]

$$E_t = \sum_1^{\infty} E_l = E_1 + E_2 + \dots = [E'_0 \tau_1 \tau_2 + E'_0 \tau_1 \tau_2 \rho_1 \rho_2 \exp(j\Delta\Phi) + E'_0 \tau_1 \tau_2 \rho_1^2 \rho_2^2 \exp(2j\Delta\Phi) + \dots] \quad (2.1)$$

no qual $E'_0 = E_0 \exp(-jw)$, $\Delta\Phi$ é fase acumulada pela onda após uma viagem de ida e volta dentro da cavidade. São τ_1 e τ_2 os coeficientes de transmissão nos dois espelhos e, ρ_1 e ρ_2 são os coeficientes de reflexão. Na fig. 1 é representando está situação. Colocando $E'_0 \tau_1 \tau_2$ em evidência obtemos:

$$E_t = E'_0 \tau_1 \tau_2 \sum_0^{\infty} [\rho_1 \rho_2 \exp(j\Delta\Phi)]^m = E_0 \tau_1 \tau_2 \frac{1}{1 - (\rho_1 \rho_2) \exp(2j\Delta\phi)}. \quad (2.2)$$

Nesta última passagem foi usado o fato de que o termo entre colchetes é uma série geométrica [11]. A diferença de fase após duas reflexões sucessivas é dado por $\Delta\Phi = 2\Delta\phi = 2kd_s = 2kdcos\theta = (4\pi n_2 v/c)d \cdot \cos\theta$, no qual d_s é o comprimento dos segmentos AB e CD, o ângulo θ está relacionado com o ângulo de incidência e θ' pela lei de Snell ($n_1 \sin\theta = n_2 \sin\theta'$).

Iremos substituir os coeficientes de reflexão e transmissão pela refletividade pois são estes valores temos acesso nos laboratórios. Sendo, $\tau_1^2 = 1 - \rho_1^2 = 1 - r_1$, $\tau_2^2 = 1 - \rho_2^2 = 1 - r_2$

e $\rho_1^2 = r_1$, $\rho_2^2 = r_2$, sendo r_1 e r_2 são as refletividades dos espelhos 1 e 2. Estas relações são válidas para espelhos sem perdas. A transmissão da CFP é dada por $\frac{|E_t|^2}{|E_0|^2}$;

$$T = \frac{(1 - r_1)(1 - r_2)}{(1 - \sqrt{r_1 r_2})^2} \frac{1}{1 + F \sin^2 \Delta \phi}, \quad (2.3)$$

no qual F indica o contraste das franjas de interferência, também denominada como o fator Q que representa o quão bom é a cavidade. Sendo F definido como;

$$F = \frac{4\sqrt{r_1 r_2}}{(1 - \sqrt{r_1 r_2})^2}. \quad (2.4)$$

F dita a nitidez dos picos de transmissão [14]. Um grande F contribui para uma cavidade de alta qualidade, sendo os valores de 30 em diante represente um sinal de alta qualidade para uma cavidade constituída de uma espelho plano e outro concavo [7]. A *finesse* é definida pela razão entre a FSR e a largura total na metade da altura máxima (do inglês *full width at half maximum*) (FWHM). Os picos de transmissão são espaçados por uma frequência de espaçamento fixa.

O FSR é definido como a frequência de espaçamento dos picos de transmissão, ou a mudança de frequência necessária para sintonizar a cavidade para o próximo pico de transmissão. Constantemente uma CFP com FSR grande é utilizado para fazer análises espectrais, pois, para um valor grande de FSR permite identificar frequências presentes neste intervalo. O FSR para uma cavidade composta por dois espelhos planos é definida como;

$$\nu_{FSR} = \frac{c}{2d}. \quad (2.5)$$

O FWHM é definido como a largura de metade da altura de um dos máximos. E seu valor depende da qualidade dos espelhos e refletividades, ou seja, quanto maior as refletividades dos espelhos menor será o valor de FWHM. O FWHM é definido por;

$$\nu_{FWHM} = \frac{c}{2d} \frac{1 - (r_1 r_2)^{1/2}}{\pi (r_1 r_2)^{1/4}}. \quad (2.6)$$

Um *Etalon*¹ é uma CFP no qual a distância dos espelhos não se alteram com o tempo, podemos observar um padrão de interferência como mostrado na fig. 2 se variarmos a frequência do laser.

¹ Etalon é do francês *étalon*, que significa "medidor de medição" ou "padrão" [13].

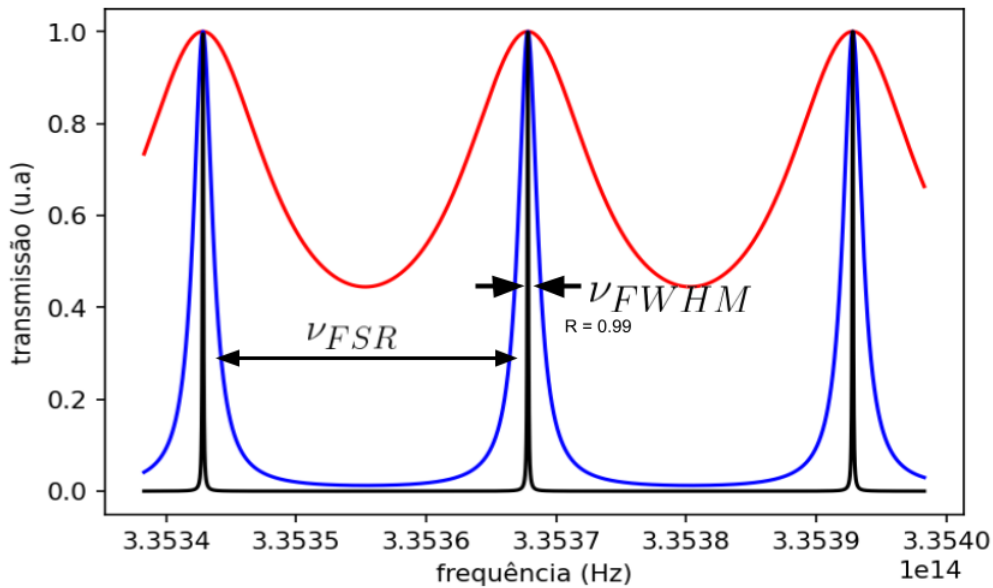
Podemos relacionar o contraste que está em função das refletividades dos espelhos com a razão entre o FSR e FWHM que é a *finesse* através da relação $\mathcal{F} = \frac{\Delta\nu}{\delta\nu} = \frac{\pi}{2}\sqrt{F}$.

$$T = \frac{(1-r_1)(1-r_2)}{(1-\sqrt{r_1 r_2})^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{2}{\pi}\mathcal{F}\right)^2 \text{sen}^2\left(\frac{2\pi d\nu}{c}\right)}, \quad (2.7)$$

Na fig. 2 mostra 3 sinais de transmissão para diferentes refletividades. Note que o FSR é uma constante, ou seja, não depende da refletividade dos espelhos, depende apenas da separação entre os espelhos fixos (d), então, se mudarmos a separação dos espelhos mudam o FSR. Por está razão a CFP é utilizado para selecionar frequências, pois as frequências transmitidas pela cavidade são apenas as que são múltiplas de $c/2d$. No entanto, o FWHM é afetado com a redução da refletividade dos espelhos.

Vale ressaltar que quanto maior a refletividade dos espelhos mais o sinal de transmissão estará sensível a imperfeições das superfícies dos espelhos, a variações de temperatura e pressão, modo do próprio feixe, como também do alinhamento da cavidade, de tal forma, que qualquer imperfeição é capaz de interferir drasticamente no sinal. Por está razão se torna difícil a obtenção se um sinal de transmissão de alta *finesse*[15, 13].

Figura 2 – Cálculo da transmissão da cavidade em função da frequência para diferentes valores de refletividades. O FSR e FWHM estão identificados na imagem. As curvas em: Vermelho, azul e em preto, possuem coeficiente de refletividade de 20%, 80% e 99% respectivamente.



Fonte: Arquivo pessoal (2023) (Apêndice B (7))

2.2 Padrão de reflexão de uma CFP através do modelo de raios

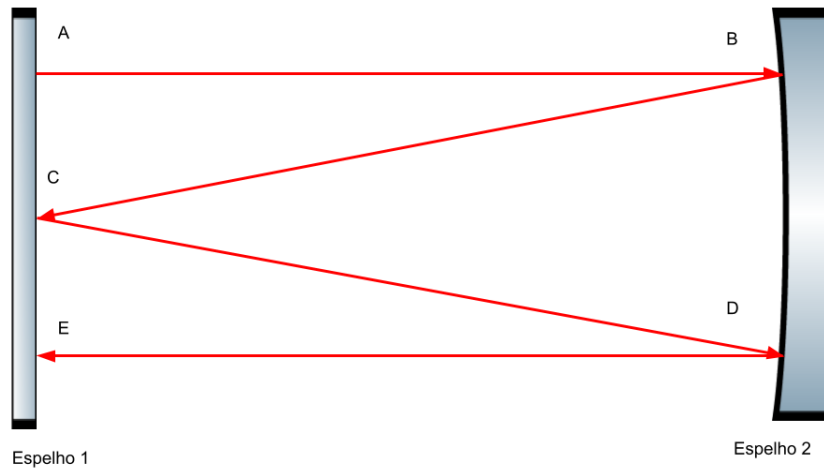
Para ter uma compreensão fundamental de uma cavidade, discutiremos brevemente os efeitos da ressonador usando o formalismo de raios ópticos. Um modelo de luz idealizado é um raio. Ele é perpendicular à fonte e não diverge. A análise da CFP é significativamente simplificado pelos raios, tornando-os ideais para discutir o critério de estabilidade.

Inicialmente, consideramos que com dois espelhos planos seria fisicamente impossível obter um sistema estável. Isso ocorre porque é necessário que o raio incidente na cavidade seja perfeitamente perpendicular, o que é impossível de se obter na prática, tornando a cavidade instável. Por esta razão, usamos, neste trabalho, uma cavidade com um único espelho plano e um espelho côncavo para criar uma cavidade estável.

A ideia geral é que o raio seja redirecionado pelo espelho curvo após cada reflexão do espelho plano para anular o desvio do feixe; para soluções viáveis, isso resultará em um caminho fechado onde o sistema se repete após um certo número de reflexos (considerando a volta completa na cavidade de ida e volta). O caminho de propagação do raio é aproximado usando matriz de transferência de raio [13]. Para tanto devemos considerar ângulos de reflexão pequenos (aproximação paraxial).

Na fig. 3 é ilustrado o padrão fornecido para uma distância fixa igual a distância focal do espelho curvo. O raio parte do espelho plano do ponto A, em é refletido no espelho curvo no ponto B, no qual é redirecionado para o centro do espelho plano no ponto C, novamente é refletido pelo espelho plano para o ponto D, por sua vez é refletido para o ponto E, por fim o raio faz o caminho contrário, ou seja, vai do ponto E para o D, depois C, B e A respectivamente e o processo se repete várias vezes.

Figura 3 – Simulação do padrão de reflexão em cavidade com espelho plano e côncavo, variando a distância entre eles



Fonte: Adaptação da fig. 2.2 [16]

A fig.3 apresenta uma simulação do padrão de reflexão em uma cavidade óptica que utiliza um espelho plano e um espelho côncavo. Essa simulação é feita com base no modelo de raios paraxiais. A distância entre os espelhos é igual à distância focal do espelho côncavo. Vale ressaltar que o padrão de reflexão é distinto para diferentes distâncias entre os espelhos na cavidade.

É importante destacar que, no caso de uma cavidade composta por um espelho plano e um espelho côncavo, a FSR é alterada, já que ela depende do número de reflexões dos raios na cavidade. Para formar uma volta completa em uma cavidade com dois espelhos planos o raio percorre uma distância $2d$ e temos FSR é de $c/2d$, e para cavidade com um espelho plano e outro curvo temos 8 reflexões, considerando a viagem de ida e volta. Portanto o FSR é definido como:

$$v_{FSR} = \frac{c}{8d}. \quad (2.8)$$

Entretanto, a eq.2.7 que calcula a transmissão permanece inalterada. Porém, a expressão da *finesse* sofre modificações, pois ela depende do valor de v_{FSR} .

2.3 Modelo de uma CFP com feixe Gaussiano

A análise da CFP com raios oferece um fantástico modelo para observar as características da curvatura dos espelhos e estabilidade da cavidade. No entanto, um modelo mais realista da luz é a do feixe gaussiano (FG), pois, as suas propriedades consideram largura do feixe,

e curvatura da frente de onda, que são importantes para caracterizar o comportamento da luz no interior da cavidade.

Uma solução importante obtida através das equações de Maxwell utilizando aproximação paraxial de Helmholtz é o FG. Em qualquer posição ao longo do eixo de propagação do feixe (eixo z) é possível determinar a largura do feixe. Sendo assim, qual a posição que se deve posicionar os espelhos tal que seus raios de curvatura coincidam com a frente de onda do feixe Gaussiano? Como também, qual deve ser a distância entre os espelhos? Para tanto, é necessário o uso dos conhecimentos sobre feixes Gaussianos para realizar o cálculo de uma cavidade óptica [7, 11]. A amplitude do campo elétrico do feixe Gaussiano é dado por:

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[-\frac{r^2}{w^2(z)} \right] \times \exp \left[-j \left(kz - \eta(z) + \frac{kr^2}{2R(z)} \right) \right], \quad (2.9)$$

no qual, $w_0^2 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}}$ nos fornece o valor da cintura do feixe no ponto focal, sendo z_0 o comprimento de Rayleigh e z o eixo longitudinal. Como também, a largura do feixe em qualquer que seja o valor de z é dada por;

$$w^2(z) = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2 \right]. \quad (2.10)$$

O raio de curvatura é dado por;

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z_0}{z} \right)^2 \right]. \quad (2.11)$$

O parâmetro que descreve a propagação do FG dada pela expressão;

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j \frac{\lambda}{\pi w^2(z)}, \quad (2.12)$$

a parte real de $1/q(z)$ é $1/R(z)$, enquanto a parte imaginária está ligada a $w(z)$. Como também, através através a lei ABCD o parâmetro q se transforma desta maneira [13];

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (2.13)$$

A, B, C e D são os elementos da matriz que descrevem a propagação geométrica de um feixe de luz entre os planos 1 e 2, e q_1 e q_2 referem-se a dois planos quaisquer perpendiculares ao eixo óptico (z).

2.3.1 Critério de estabilidade

Quando o feixe retorna a sua posição inicial após de ter reproduzido o padrão de reflexão então ele deve recuperar suas características, ou seja, raio de curvatura e largura iniciais, logo $q_2 = q_1 = q$;

$$q = \frac{Aq + B}{Cq + D}. \quad (2.14)$$

Reorganizando a equação 2.14 ficamos com;

$$\frac{1}{q} = \frac{D-A}{2B} \pm \frac{j}{B} \sqrt{1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2}, \quad (2.15)$$

comparando com a equação 2.12 temos que o raio de curvatura se relaciona com o primeiro termo e o segundo termo com a largura do feixe;

$$R = \frac{2B}{D-A}, \quad (2.16)$$

$$w = \frac{\lambda}{\pi} \frac{\sqrt{|B|}}{\left[1 - \left(\frac{D+A}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{4}}}. \quad (2.17)$$

Como a largura é um número real então o denominador tem que satisfazer a seguinte condição;

$$0 \leq \left| \frac{D+A}{2} \right| < 1, \quad (2.18)$$

essa é a condição de uma cavidade estável. Para um sistema de dois espelhos côncavos (pois é o sistema mais geral) temos;

$$M = M_4 \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1, \quad (2.19)$$

no qual, a matriz M é composta por outras 4 matrizes que descrevem a propagação e reflexão do feixe nos meios e elementos ópticos. Estamos considerando o início na matriz M_1 , que descreve a propagação do feixe no vácuo partindo do plano próximo do espelho 1 partindo para o espelho

curvo 2. A matriz M_2 representa a reflexão do feixe no espelho 2, logo em seguida a volta é descrita pela matriz M_3 no qual ela é igual a matriz M_1 pois se trata do mesmo meio, no qual reflete na matriz M_4 e for fim repete do o processo.

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 - \frac{d}{f_2} & d \left(2 - \frac{d}{f_2} \right) \\ -\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) & 1 - d \left(\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \right) \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

Utilizando a equação 2.18 encontramos a condição na qual a largura possui solução. Que por sua vez é dita como critério de estabilidade de uma cavidade

$$0 \leq \left(1 - \frac{d}{f_1} \right) \left(1 - \frac{d}{f_2} \right) < 1, \quad (2.22)$$

Para uma cavidade composta por um espelho plano e outro concavo, ou seja, espelho plano ($R_1 = \infty$) e espelho concavo ($R_2 = 2f_2$), temos que;

$$0 < d \leq f_2. \quad (2.23)$$

Na qual, a eq. 2.23 representa a distância mínima e máxima entre os espelho da cavidade para que a cavidade seja estável.

2.3.2 Largura e raio de curvatura de um feixe Gaussiano dentro da cavidade

Devemos lembrar que um espelho plano é um caso especial de superfície esférica quando o raio de curvatura é infinito. Dada uma cavidade composta por dois espelhos esféricos, buscamos o FG que satisfaça as condições de contorno impostas pela curvatura dos espelhos. Começando com uma abordagem invertida, ao invés de buscarmos o FG que satisfaça as condições de contorno, vamos determinar as posições nas quais devemos posicionar os espelhos, de tal forma que seus eixos de curvatura se alinhem com a frente da onda, chamamos isso de acoplamento do modo Gaussiano do feixe com modo Gaussiano da cavidade. Utilizando a eq. 2.11 temos:

$$R_1 = z_1 + \frac{z_0^2}{z_1}, \quad (2.24)$$

$$R_2 = z_2 + \frac{z_0^2}{z_2}, \quad (2.25)$$

no qual se obtém;

$$z_1 = \frac{R_1}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{R_1^2 - 4z_0^2}, \quad (2.26)$$

e

$$z_2 = \frac{R_2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{R_2^2 - 4z_0^2}, \quad (2.27)$$

nos quais são os locais onde deveriam estar os espelhos. No caso prático, temos conhecimento dos raios de curvatura dos espelhos e sua separação, que é definida como $d = z_2 - z_1$. Com esses dados, podemos calcular o valor de z_0^2 usando as equações 2.24 e 2.25, como a cavidade possui um espelho plano, então $R_1 = \infty$, logo, $z_1 = 0$. Portanto:

$$z_0 = \sqrt{d(R_2 - d)}. \quad (2.28)$$

Encontrado z_0 podemos determinar w_0 através de $w_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}}$. Sendo assim, é possível encontrar $w(z)$ e $R(z)$ qual que seja z . As cinturas do feixe no espelho 1 e dois é dada por;

$$w_1 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi} [d(R_2 - d)]^{\frac{1}{4}}}, \quad (2.29)$$

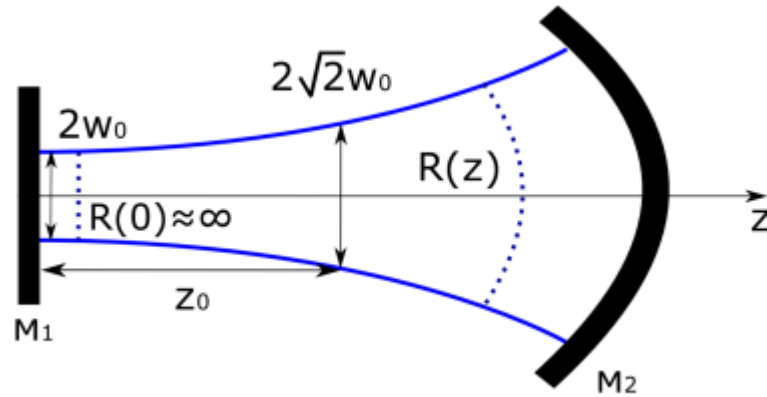
e

$$w_2 = \sqrt{\frac{\lambda R_2}{\pi} \left(\frac{R_2}{d} - 1 \right)^{-\frac{1}{4}}}. \quad (2.30)$$

Para $R_2 = 2d$, implica $z_0 = d$ que implica $w_1 = w_0$ e $w_2 = \sqrt{2}w_0$. A fig. 4 ilustra como o feixe se comporta dentro da cavidade para um d maior de z_0 .

Também podemos observar que para se obter o acoplamento perfeito do FG com a cavidade é necessário que a curvatura da frente onda do feixe seja igual a dos espelhos, ou seja, no espelho plano tem que ter $R = \infty$ e no concavo $R = 2f_2$. Para tanto é necessário de uma lente convergente de distância focal igual a do espelho concavo que deve ser inserida antes do espelho plano.

Figura 4 – O FG em uma cavidade com um espelho plano M_1 , e um espelho curvo M_2 , propagando-se ao longo do eixo z . O comprimento z_0 que é o intervalo de Rayleigh, a menor largura é w_0 e seu raio de curvatura é $R(z)$.



Fonte: [17]

2.4 Analisador de espectro

Há duas maneiras para produzir o sinal de interferência de FP. A primeira está relacionada a varredura de frequência do laser, a segunda é a variação do tamanho da cavidade. Assim, os picos de máximo surgem quando as frequências incidentes na cavidade está em ressonância com as permitidas pela mesma [11].

A segunda maneira é comumente utilizada para realizar análises espectrais que por sua vez consiste em manter a frequência do laser fixa e variar o tamanho da cavidade através de um transdutor piezoelétrico (*PZT*) acoplado em um dos espelhos da cavidade.

O efeito piezoelétrico consiste na capacidade de alguns cristais (como por exemplo o quartzo) gerarem corrente elétrica em resposta a uma pressão mecânica na qual foi submetido.

Aplicando uma tensão alternada ao *PZT*, este produzirá a pressão mecânica responsável por deslocar o espelho. Assumindo que a cavidade tem comprimento d pode ser alterada por alguns comprimentos de onda. A luz transmitida exibirá picos quando $\phi = m\pi$, ou seja, quando o comprimento do interferômetro for igual a $d = m\lambda/2$ sendo m um número inteiro positivo. A mudança em d necessária para mudar de um pico de transmissão para o próximo é [11];

$$\Delta L_{FSR} = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.31)$$

Lembrando que para um analisador de espectro ser eficaz, deve ser capaz de observar diversas frequências que estão presentes na luz. Com isso, é preciso que a CFP possua a

capacidade de capturar frequências que estão distantes uma da outra, para tanto o parâmetro responsável para observar frequências distantes é o FRS, pois o FRS limita o intervalo que a CFP é capaz de capturar. Após isso o padrão se repete, então se há frequências presentes na luz que estejam além do tamanho do FRS não será possível observar.

Retornamos então ao nosso objetivo principal deste trabalho, que é construir um dispositivo com FRS de cerca de 6 GHz de FRS, pois há CFP de 10 GHz de FRS comerciais. Porém, na fluorescência do vapor de Cs temos duas linhas separadas por 9,1 GHz. Para uma CFP de 10 GHz de FRS estas duas linhas iriam aparecer espaçadas por 1 GHz e não iríamos conseguir separá-las. Com o de 6 GHz, uma linha vai ser vista a 3 GHz da outra e assim conseguiríamos separar as linhas.

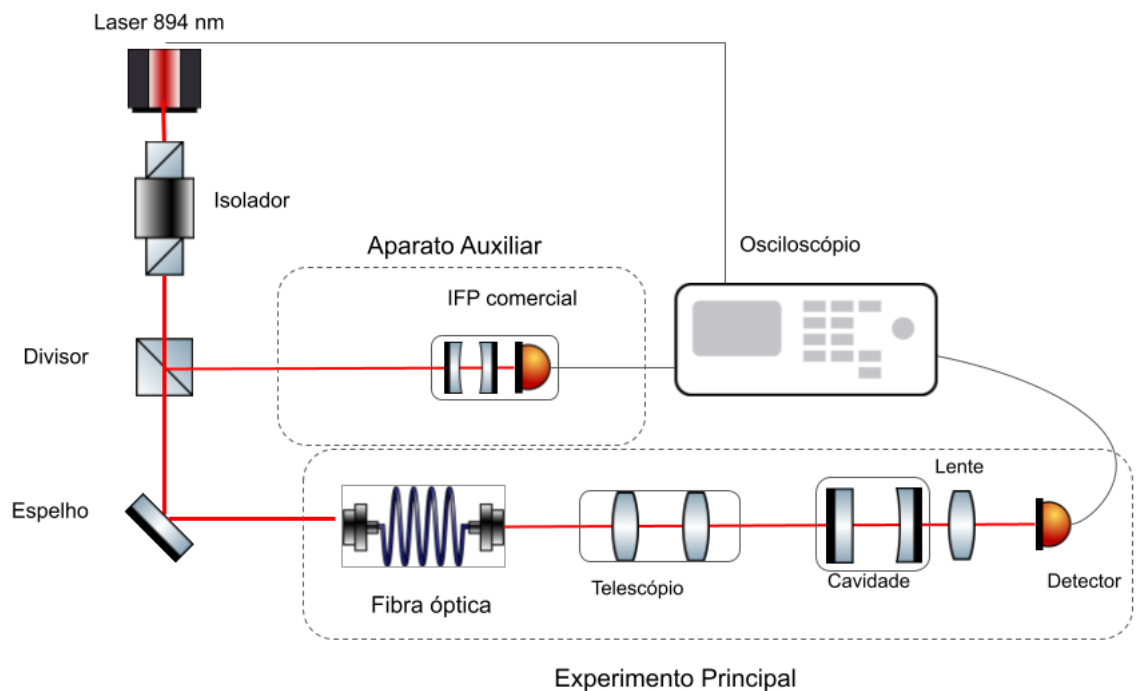
3 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Apresenta-se neste capítulo uma descrição do sistema experimental montado para a obtenção do sinal de transmissão após passar pela cavidade, bem como, os principais dispositivos que compõe o sistema. O aparato experimental foi dividido em três partes: Montagem I principal - responsável pela geração e captura do sinal de interferência (Experimento principal); Montagem II - designado para auxiliar no controle dos parâmetros do experimento, alinhamento do mesmo e como referência para a análise de dados (Experimento Auxiliar); Montagem III - possui o objetivo de simular a luz difusa da fluorescência do gás de Césio. Em seguida, abordaremos os procedimentos experimentais e, finalmente o processo de aquisição de dados experimentais.

3.1 Modelo esquemático experimental

O experimento foi dividido em duas etapas: I) A obtenção do sinal de transmissão através da varredura do laser; II) E a avaliação da capacidade do mesmo para análises espectrais com luz difusa. Na fig. 5 é apresentado o modelo experimental utilizado.

Figura 5 – Representação gráfica da configuração. As linhas vermelhas representam feixes do laser.



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Observando a fig.5, o feixe laser passa por um isolador, que possui a função de evitar

a realimentação do laser devido às reflexões que acontecem no experimento. Em seguida, há a divisão do feixe laser, uma é direcionada para a CFP comercial, (denominado aparato auxiliar) e outra para a montagem principal (denominado experimento principal). A montagem principal apresenta a configuração da construção da CFP, composta por; uma fibra óptica, telescópio, a cavidade com um espelho plano e outro côncavo respectivamente, uma lente convergente e o detector.

Após a fibra óptica é inserido um divisor que reflete 99% da luz da feixe de comprimento de onda 894 nm (infravermelho) e deixa passar grande parte do laser 632,8 nm (luz vermelha) que foi utilizado para realizar o alinhamento da cavidade. A montagem auxiliar utilizada para realizar o alinhamento da cavidade é exibida na subseção 3.7.6 com detalhes.

3.2 O Laser

O laser de diodo utilizado para realização do experimento tem potência de saída de 60 mW, foi fabricada pela empresa Photodigm [18]. Ele é um laser do tipo DBR (*Distributed Bragg Reflector*) com comprimento de onda de 894 nm. O sistema está conectado a um controlador de corrente e temperatura, que são necessários para manter a estabilidade do laser e mudar o comprimento de onda. A tab. 1 mostra os valores correspondentes a temperatura e a corrente, respectivamente.

Tabela 1 – Temperatura e corrente de funcionamento do laser

	Temperatura	Corrente
Laser	21 °C	85,50mA

Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

A corrente máxima permitida para o laser é de 100 mA, contudo para aumentar a potência trabalhamos com corrente alta, próximo do limite, pois quanto mais fótons são incididos na cavidade mais fótons são transmitidos, com isso é possível observar os máximos com maior nitidez.

3.3 Isolador óptico

O isolador óptico funciona através do efeito Faraday [7], no qual a polarização da luz incidente do laser é filtrado por um polarizador alinhado paralelamente com o eixo y, em

seguida o feixe laser é rotacionado à 45° por um elemento de Faraday ficando com a polarização na direção $\frac{1}{\sqrt{2}}(\hat{i} + \hat{j})$ e passa por um segundo polarizador alinhado à polarização. Um feixe retro-refletido no experimento têm sua polarização girada para a direção $\hat{i}$ pelo elemento de Faraday, logo após o feixe laser é bloqueado pelo primeiro polarizador.

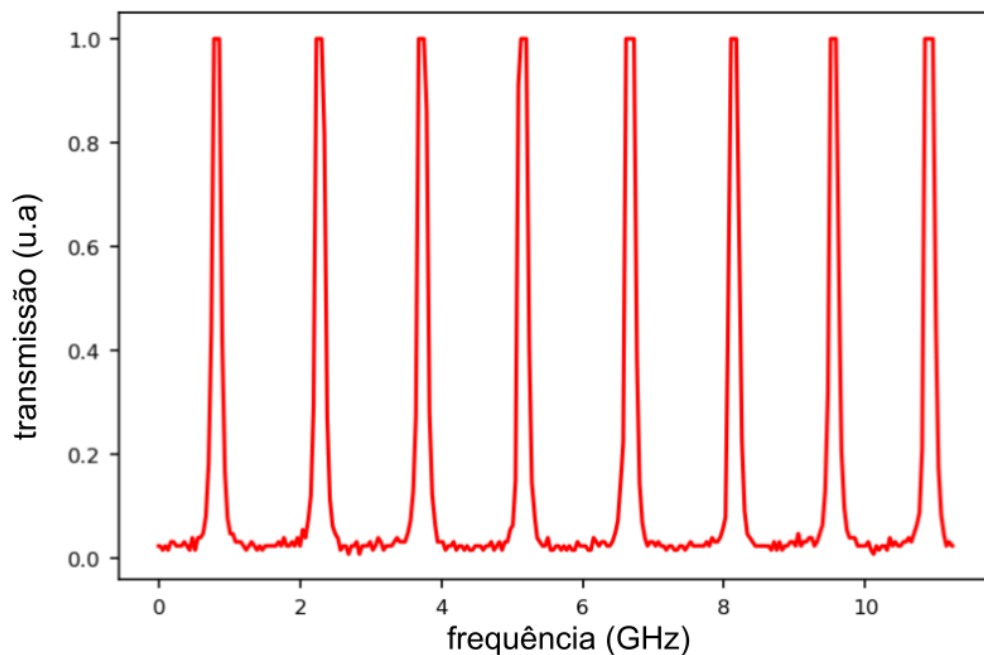
3.4 Divisor óptico e espelhos

Após o feixe ser transmitido pelo isolador ele é separado em duas partes, que é possível devido a um espelho semi-refletor de 50%, ou seja, metade a potência do laser é transmitida pelo espelho e a outra parte (a outra metade) é direcionado a montagem experimental auxiliar.

3.5 CFP comercial (Montagem II)

Na montagem auxiliar adotou-se uma CFP comercial SA200-5B confocal de 1,5 GHz de FRS para monitorar a estabilidade do laser, como também, verificar se o mesmo está com apenas uma frequência incidente. Além disso, foi utilizado como referência para medir o FRS da CFP principal. Na fig. 6 mostra o sinal da CFP comercial de 1,5 GHz usado no experimento auxiliar.

Figura 6 – Espectro de transmissão do interferômetro Fabry-Perot da montagem auxiliar.



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

3.6 Detectores e Osciloscópio

A luz do feixe laser é incidida nos detectores que por sua vez convertem intensidade em potencial elétrico no qual é passada para o osciloscópio por cabos do tipo *BNC*. Assim, é possível observar gráficos nos possibilitando analisar a transmissão da cavidade. Como também maximizar a quantidade de pontos em um determinado intervalo de tempo nos possibilitando obter mais detalhes.

3.7 Experimento Principal

Nesta seção, iremos descrever com detalhes os componentes utilizados na montagem principal para gerar o sinal de FP, além de explicar como o alinhamento foi realizado.

3.7.1 Fibra óptica

A fibra óptica foi fabricada pela empresa *Newport*[19], F-SF-C-3FC, de diâmetro da cintura igual a $5,7\mu m$. Ela é responsável por garantir que o feixe transmitido por ela seja gaussiano, dada a fibra ser monomodo, ou seja, permite apenas o modo Gaussiano do feixe, suprimindo as demais ordens que não sejam gaussianas.

A fibra óptica é produzida com um material com o índice de refração de 1,5 e possui 3 m de comprimento. Além disso, devido o diâmetro ser pequeno há perdas na intensidade como também é necessário um alinhamento delicado na sua entrada, pois quaisquer desvio do feixe pode gerar a perda da intensidade.

3.7.2 Telescópio

Após a fibra óptica é inserido um par de lentes convergentes com o intuito de colimar o feixe, ou seja, deixar o diâmetro do feixe fixo. Assim, o par de lentes constitui um telescópio, na qual podemos considerar que o feixe laser vindo do infinito é incidido na primeira lente com distância focal de 15 cm. A segunda lente com distância focal de 5 cm é posicionada a 20 cm da primeira lente, de modo que o ponto focal de ambas estão no mesmo ponto. Portanto, por esta razão o diâmetro do feixe laser irá diminuir e ficar colimado após passar o telescópio [7].

Podemos analisar este fenômeno matematicamente aplicando a lei da matriz ABCD utilizando formalismo de raios. Assim, podemos expressar a relação entre as distâncias focais e

a distância da imagem produzida do feixe como;

$$\frac{1}{f_{eq}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D}{f_1 f_2}, \quad (3.1)$$

no qual,

- f_1 é a distância focal da primeira lente (que é a de 15 cm).
- f_2 é a distância focal da primeira lente (que é a de 5 cm).
- D é a distância entre as lentes.
- f_{eq} distância focal equivalente do sistema.

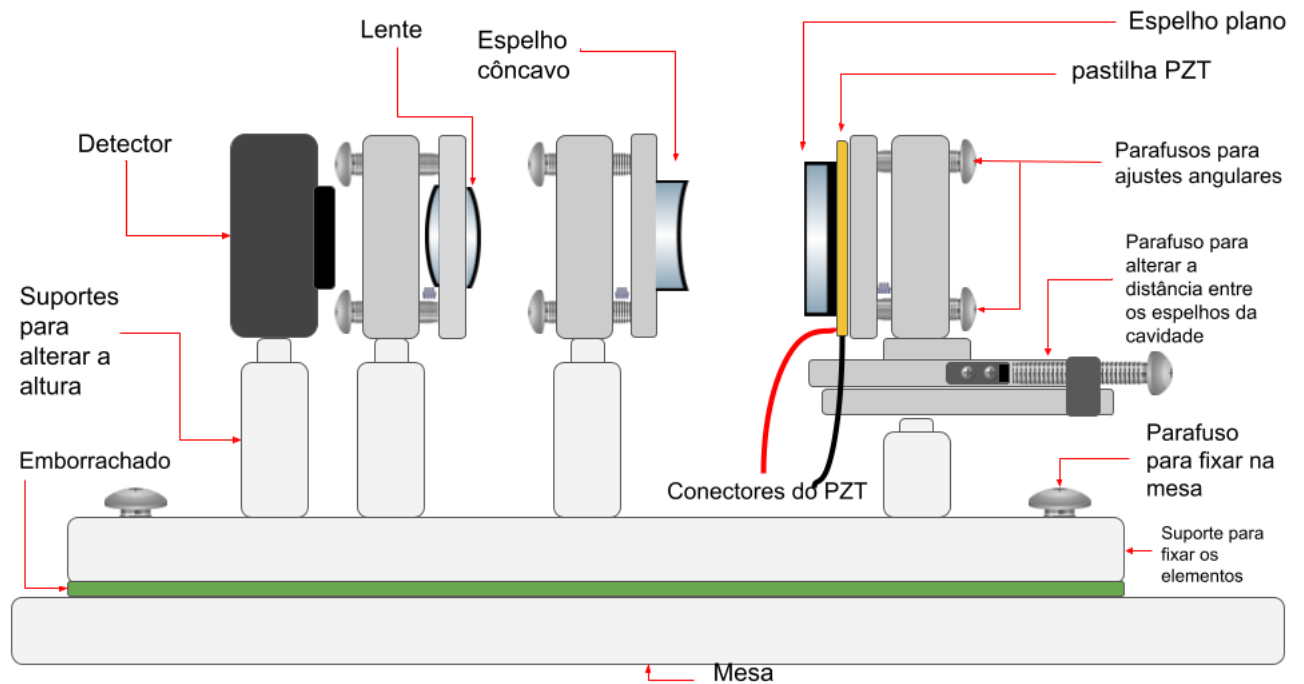
Com $D = f_1 + f_2$. Contudo, na prática tal condição ideal é difícil de conseguir, após uma certa distância o feixe laser irá divergir, com isso consideramos a colimação de pelo menos 1 metro de distância como satisfatória, visto que não é necessário grandes distâncias.

3.7.3 Cavidade

A cavidade consiste um espelho plano com 90% de refletividade para luz de 894 nm de comprimento de onda[20], e um côncavo de 98% de refletividade para comprimentos de ondas que vão de 450 até 13500 nm [21] com raio de curvatura de 12 mm. Contudo, o espelho côncavo possui um lado coberto por um material fosco, tornando necessário realizar o abastamento e polimento (que será descrito mais adiante com detalhes na subsecção 3.7.5).

A cavidade foi construída sobre um suporte que permite ajustar o alinhamento e o tamanho da cavidade, dando-nos a liberdade de ajustar a distância entre os espelhos de 1 mm até 50 mm, nos permitindo a opção de realizar uma grande faixa de ajustes. Logo após a cavidade foi utilizado uma lente de 5 cm de distância focal, com o intuito de aumentar a intensidade do sinal que chega no detector. Assim, o método utilizado para medir a transmissão é através do detector fotodiodo, como pode ser visto na fig 7. Também foi inserido uma caixa de acrílico ao redor da sistema da fig.7 juntamente com um material preto fosco com o intuito de impedir que espalhamentos ou qualquer outra parte do feixe possa ser detectado sem antes passar pela cavidade.

Figura 7 – Esquemático da montagem experimental construída da CFP.



Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

No experimento, há uma disposição de elementos que inclui, em ordem, o suporte do espelho plano, o suporte do espelho côncavo, a lente focalizante e, por último, o detector fotodiodo. O emborrachado é utilizado para reduzir as oscilações mecânicas provenientes da mesa. Além disso, o experimento é coberto por uma caixa de acrílico com material fosco para evitar que luzes externas interfiram no sinal proveniente da cavidade.

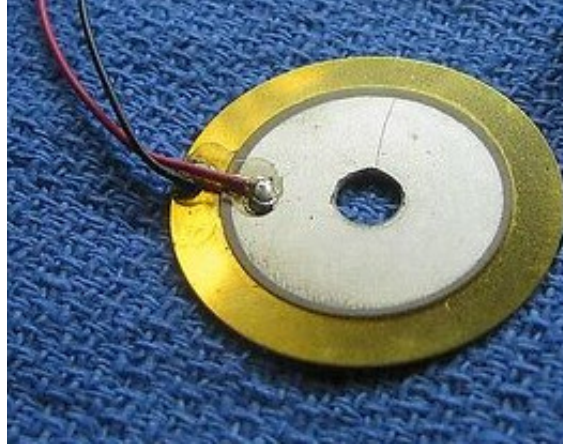
3.7.4 Pastilha PZT

No experimento foi utilizado uma pastilha PZT que possui 27 mm de diâmetro, no entanto não temos informações sobre as especificações pois não encontramos o *datasheet* do mesmo. Como pode ser vista na fig. 8, foi necessário realizar uma aforaço de cerca de 5 mm de diâmetro no centro do PZT para que luz possa passar e ser transmitida no espelho plano que está acoplado. Foi utilizado também um suporte feito na impressora 3D para encaixar o espelho plano e ser colado na pastilha do PZT.

Antes de utilizar este PZT foi usado outro que já possuía um furo, contudo devido o furo ser muito pequeno (de cerca de 1 mm) parte da luz laser era impedida de incidir na cavidade, com isso maior parte da potência era perdida resultando em um sinal de transmissão menor.

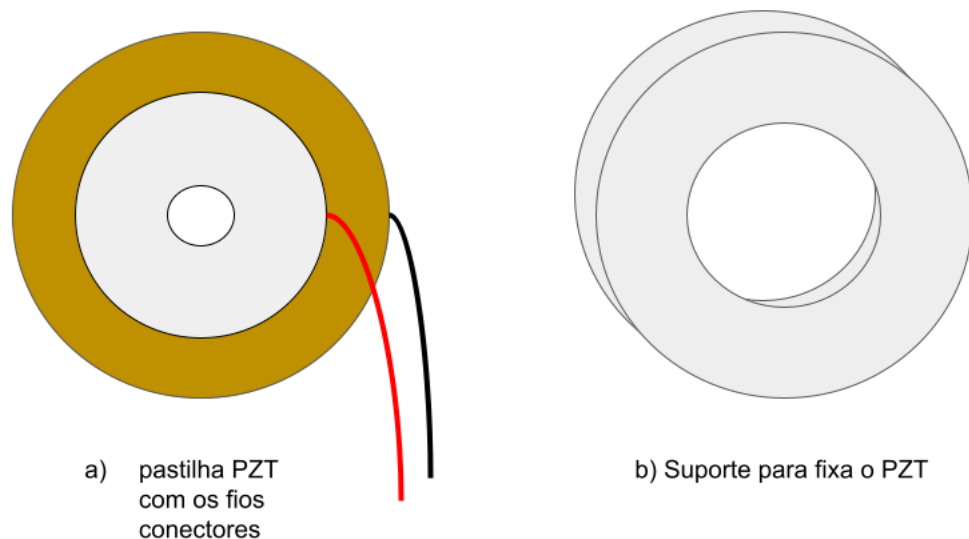
Com isso, tivemos que ir em busca de outro PZT que realizar a aforação para um tamanho mais adequado, ou seja, 5 mm.

Figura 8 – Pastilha PZT de 27 mm de diâmetro.



Fonte: [22]

Figura 9 – Ilustração esquemática do PZT e o suporte no qual o PZT foi fixado.



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

A fim de ser fixado no suporte dos espelhos e colado no PZT, o suporte foi desenvolvido por meio de uma impressora 3D, conforme demonstrado na figura 7. A parte branca do PZT é a que oscila e está colada em um suporte semelhante ao da figura b), o qual mantém o espelho plano fixo. O PZT é conectado a um gerador de função no qual gera uma tensão alternada em

formato triangular, fazendo com que a variação de corrente no PZT gere uma oscilação mecânica alternada como resposta.

O intuito de produzir este sinal é justamente para a análise espectral, pois a luz da fluorescência produzida por elementos químicos (em especial o Césio no qual trabalhamos) possui uma largura espectral da ordem de GHz no qual temos interesse em medir, é preciso da CFP juntamente com o PZT. Além disso uma FSR da CFP deve ser entorno de 6 GHz pois a distância em frequência entre as transições do Césio é de 9 GHz, logo com este FRS é possível obter um espaçamento de 3 GHz entre as transições e assim poder distingui-las melhor.

3.7.5 Polimento dos espelhos côncavos

O espelho côncavo [20] possuía o outro lado externo convexo e coberto por um material fosco, tornando o feixe laser transmitido difuso. Por esta razão foi necessário realizar o abastamento para tornar este plano e o polimento para assim o feixe incidente na parte côncava ser transmitido sem sofrer alterações nas suas características iniciais, exceto pela potência, uma vez que o espelho irá refletir 98% da sua potência.

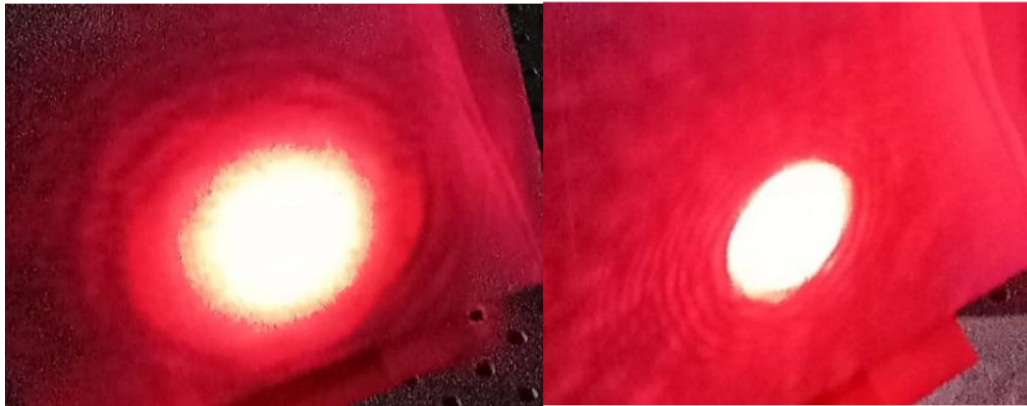
Figura 10 – Polimentos dos espelhos: Os dois primeiros espelhos foram polidos enquanto o último não.



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

O procedimento para realizar o abastamento (desgaste) como também o polimento da parte externa do espelho côncavo foi com abrasivos de óxido de alumínio em pó com diferentes valores de espessura [23]. Assim, começamos com os abrasivos mais espessos que são utilizados para fazer o desgaste das peças, e gradualmente utilizamos outros cada vez menos espessos para ir polindo a peça. A fig.11 mostra o comportamento do feixe antes e depois do polimento

Figura 11 – Polimento dos espelhos planos: antes e depois.



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Na figura a esquerda é a transmissão do laser Hélio-Neônio antes de realizar o polimento e a da direita é logo após. Podemos observar o laser da esquerda (antes do polimento) mais espalhado em comparação ao da direita (depois do polimento).

Posteriormente, tornou-se necessário fabricar um suporte para acomodar os espelhos e facilitar o processo, conforme esquematizado na fig.12. Isso se deve ao fato de que é importante evitar qualquer dano à parte côncava ou ao revestimento dos espelhos, uma vez que impurezas ou arranhões podem ocasionar uma redução significativa da *finesse* [7].

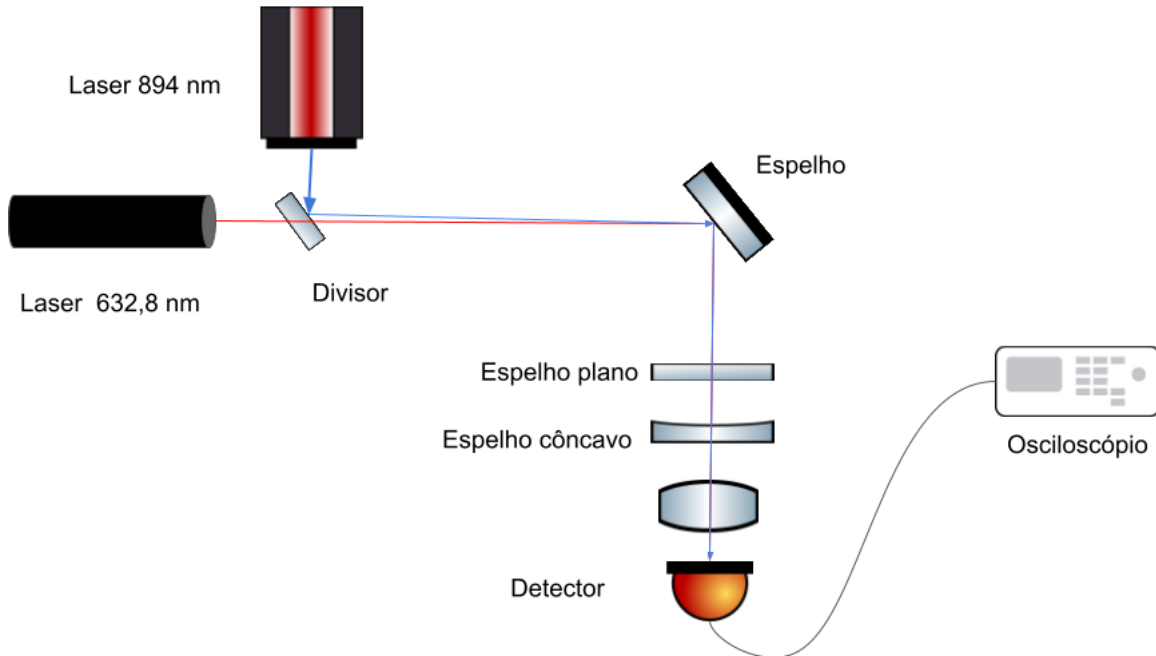
Figura 12 – Ilustração esquemática do suporte no qual é fixado o espelho concavo para realizar o abastamento: O espelho é fixado no suporte com a parte fosca exposta.



Fonte: Arquivo pessoal (2023)

3.7.6 Alinhamento da CFP (Montagem II)

Figura 13 – Sistema utilizando para realizar o alinhamento da cavidade



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

A fig. 13 mostra a montagem usada para realizar o alinhamento da CFP. Através de um divisor que reflete 99% do feixe de comprimento de onda $\lambda = 894$ nm, e transmite maior parte do laser de $\lambda = 632,8$ nm podemos alinhar a cavidade. Utilizamos o laser de Hélio-Neônio pela praticidade visto que possui luz visível.

Primeiramente com auxílio de íris com aberturas alinhadas e com a mesma altura de cerca de 12,3 cm alinhamos os dois lasers para serem coincidentes e com a mesma direção. Para iniciar o alinhamento da cavidade inserimos o detector e alinhamos ao seu centro o laser de Hélio-Neônio, em seguida, inserimos a lente convergente de 5 cm de foco, com o detector no seu foco.

No segundo momento, inserimos o espelho côncavo com feixe do laser alinhado com o seu centro e alinhamos o feixe refletido na mesma direção do incidentes para que a incidente seja perpendicular. Por fim, inserimos o espelho plano repetimos o mesmo processo de alinhamento feito com o espelho côncavo.

A potencia incidente no detector fornece o valor de 10 volts medido no osciloscópio, após a cavidade é de cerca de 150 milivolts visto que a maior parte do feixe laser incidente é

refletido pelo primeiro espelho. O parafuso do suporte é responsável por ajustar a distância dos espelhos. Como existe várias configurações que podemos ajustar a cavidade (de $0 < d \leq f_2$), assim ajustamos de modo que seja possível observar que a distância entre cada máximo consecutivo no osciloscópio da cavidade montada seja equivalente a cerca de 4 máximos da CFP comercial, pois a distância entre cada máximo consecutivo da CFP comercial é conhecido e de 1,5 GHz. Portanto, esta configuração nos permite obter cerca 6 GHz de FSR.

3.8 Montagem III; simulando fluorescência

Para realizar a análise espectral da fluorescência do Césio é necessário que a fluorescência passe pela CFP. No entanto, devido a fluorescência possuir baixa potência como também ser uma luz espalhada, não tivemos sucesso em alinhar luz com a entrada da CFP. Assim, com intuito de alinhar a cavidade com a luz espalhada inicialmente usamos difusores de baixa capacidade de espalhar a luz do laser. Além disso, substituímos gradualmente os difusores por outros com a capacidade maior de espalhar a luz, para simular a fluorescência do Césio.

Figura 14 – Modelo ilustrativo do difusor utilizado no experimento.



Fonte: difusor da Empresa Thorlabs [20]

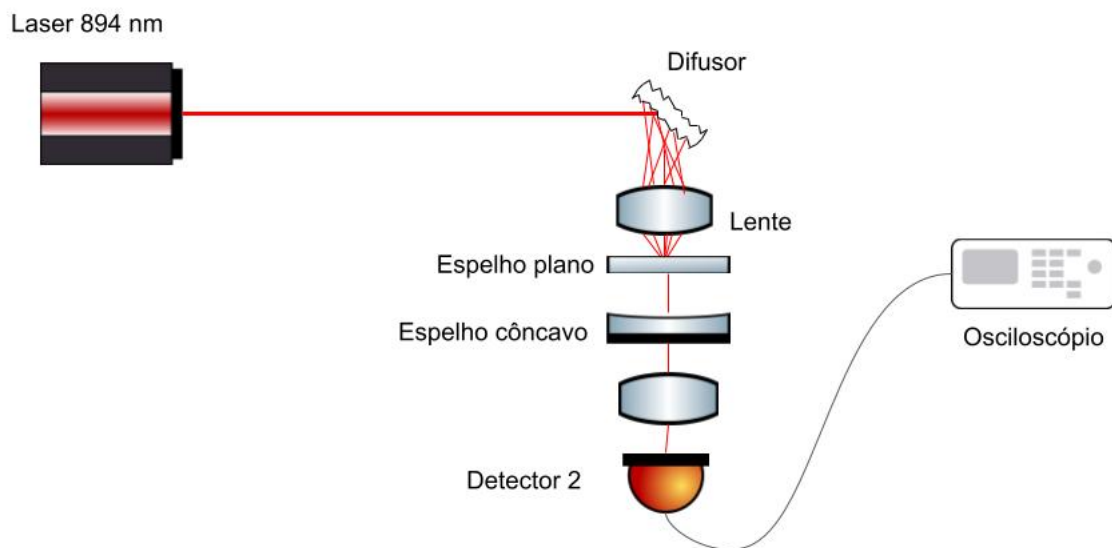
O difusor é qualquer dispositivo capaz de espalhar a luz de alguma maneira, na fig. 14 tem um exemplo. Na ótica, um difusor como mostrado na fig. 14 é um dispositivo que tem estrutura física granular, no qual espalha ou distribui a luz de maneira uniforme. O padrão uniforme formado pelo espalhamento do difusor é denominado de padrão de *speckles* (traduzindo do inglês "salpicos de luz").

Os materiais usados para fazer difusores incluem vidro, vidro laminado e materiais

termoplásticos como policarbonato, poliestireno e polietileno. Além de seu uso em pesquisas científicas, os difusores ópticos são ideais para uso em telas ou outros alvos em aplicações de formação de imagem, como o difusor que distribui a luz estroboscópica de uma câmera [24].

O experimento consiste em obter o sinal da CFP mesmo para luz difusa quando o feixe laser incide em um difusor (que pode ser visto na fig. 15). Após o difusor a luz espalhada é coletada por uma lente irá ser focalizada no plano da frente do espelho plano da cavidade da fig 7. Assim, realizamos o procedimento para diferentes valores de difusores iniciando com o de grau 10 até o 80 e medimos o valor em volts da intensidade dos máximos encontrados para então sabermos o limite que é possível se medir o padrão de interferência da CFP dada uma luz difusa. Nesta montagem mantivemos a frequência do laser fixa e variamos o tamanho da cavidade através do PZT.

Figura 15 – Aparato experimental utilizando para medir captura o sinal da CFP com luz difusa.



Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

3.9 Coleta e processamento de dados

O detector fotodiodo é responsável pela captura da diferença de potencial em função do tempo, visto que ela converte a luz em corrente e por sua vez em diferença de potencial. Com o sinal travado na frequência estabelecida pelo gerador podemos salvar os sinais da rampa, CFP comercial e CFP montado. Os sinais salvos foram; transmissão da CFP comercial, CFP

construído e a rampa triangular produzida pelo gerador de função.

O tratamento de dados foi feito através da linguagem de programa python (que está no apêndice A (6)). No programa, foi selecionado uma rampa do sinal fornecido pelo gerador de função, com isso, os picos tanto da CFP comercial e do construído foram selecionados. Utilizamos a distância entre dois máximos consecutivos da CFP comercial para realizar a conversão de escala através da relação;

$$v_{novo} = v_{FRS} \frac{X_{antigo}}{\Delta X_{antigo}}, \quad (3.2)$$

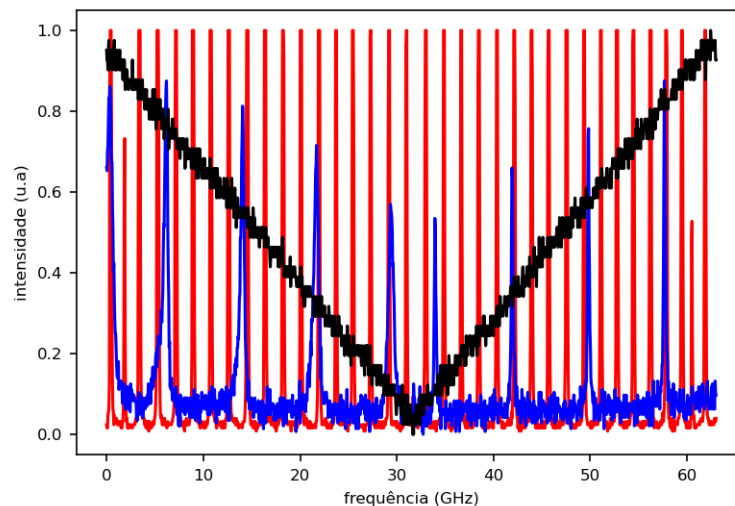
no qual, v_{novo} é a nova escala em frequência, v_{FRS} é o FRS do CFP comercial (de 1,5 GHZ), X_{antigo} é a a escala antiga do eixo das abscissas escolhida arbitrariamente e ΔX_{antigo} é o FRS da escala antiga da CFP comercial. Portanto, uma vez conhecida a escala horizontal podemos obter o FRS da CFP construído, FWHM e *finesse*. Portanto usamos a CFP comercial para transformar o eixo de abscissas em frequência. E usamos este eixo para determinar as propriedades do nosso FP.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÕES

Este capítulo é dedicado a avaliação da transmissão do Faby-Perot tanto para a incidência de um feixe colimado quanto de uma luz difusa. A discussão dos resultados é dividida em três partes: o primeiro momento é dedicado a uma análise descritiva do FSR, da FWHM, da *finesse* e da estabilidade do sinal, usando um feixe colimado e variamos a frequência deste; o segundo momento, com a frequência do laser fixa variamos o tamanho da cavidade usando o PZT; por último foi feita uma análise da capacidade de detecção para luz difusa, dada transmissão em função da difusidade.

Verificamos a qualidade da cavidade avaliando o espectro de transmissão, o FSR e a *finesse* obtidos. Assim, verificamos que a transmissão da cavidade é em sua maior parte influenciada pelo sinal de interferência e não por transmissão direta¹ devido a baixa *finesse*. Apresentamos a transmissão da cavidade em função da frequência na fig. 16 que mostra o que é visto no monitor do osciloscópio.

Figura 16 – Transmissão da cavidade em função da frequência. Em vermelho: O sinal da CFP comercial. Em azul: O da montagem. Em preto: A rampa de varredura gerada pelo gerador de função.



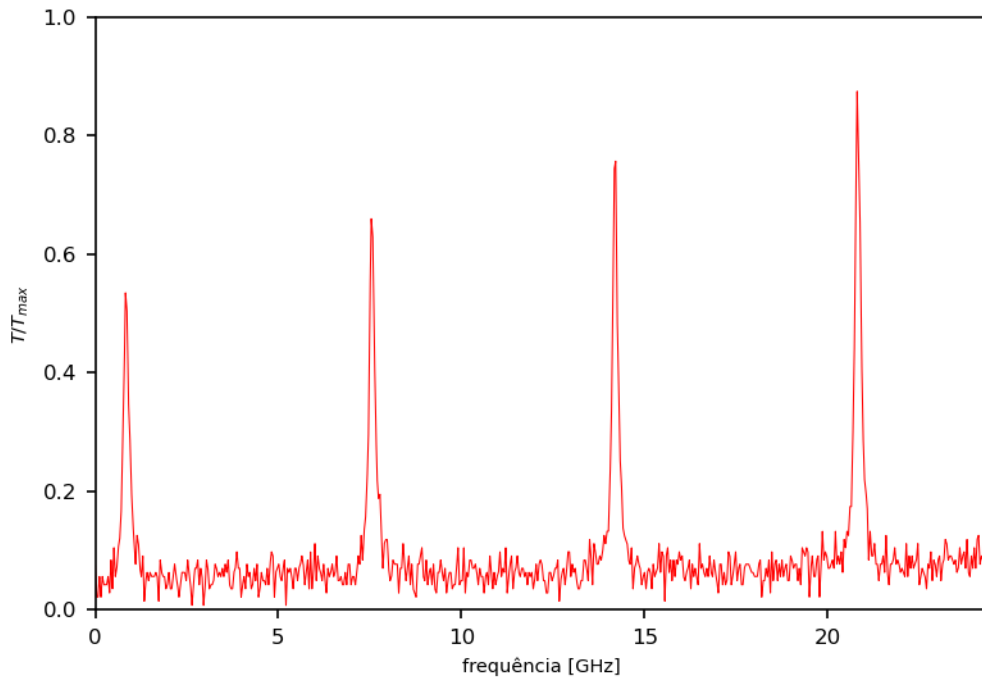
Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

Apenas um único volt fornecido pelo gerador de funções corresponde a 2,9 GHz

¹ A transmissão direta é justamente quando o feixe laser é transmitido sem sofrer qualquer influencia da interferência produzida pela CFP, ou seja, como se não existisse cavidade e o feixe incidir diretamente no detector. Isso pode ser causado pelo; 1) desalinhamento do feixe incidente na cavidade ou 2) cavidade desalinhada 3) ou até mesmo por luz espalhada que chega no detector.

de variação de frequência do laser, isto nos dá um alcance de varredura de 32 GHz. Podemos observar através da fig. 16 que a intensidade do laser diminui e aumenta acompanhando a variação de tensão do gerador de funções, isso se dá pela variação da intensidade da luz laser que está diretamente ligada a variação da tensão.

Figura 17 – Transmissão da cavidade em função da frequência. Sinal da CFP



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Na fig.17 o FSR possui um valor estável dentro de uma margem de erro, os máximos da cavidade mostram que a cavidade opera bem sem apresentar instabilidade e sem transmissão direta. Concluimos que encontramos uma configuração da cavidade estável e previsível usando nosso sistema. O FSR fornecido juntamente com a margem de erro dada pelo desvio médio padrão é;

$$\nu_{FSR} = (6,7 \pm 0,1) GHz. \quad (4.1)$$

Através da eq. 2.8 podemos encontrar a distância entre os espelhos da cavidade considerando o índice refração do ar sendo igual 1;

$$d = (56,2 \pm 0,4) \times 10mm, \quad (4.2)$$

que está dentro do critério de estabilidade para a distância entre os espelhos, visto que é de no máximo igual a distância focal do espelho concavo (que é de 6 mm). O valor encontrado para O FWHM foi de;

$$\nu_{FWHM} = (2,1 \pm 0,1) \times 10GHz, \quad (4.3)$$

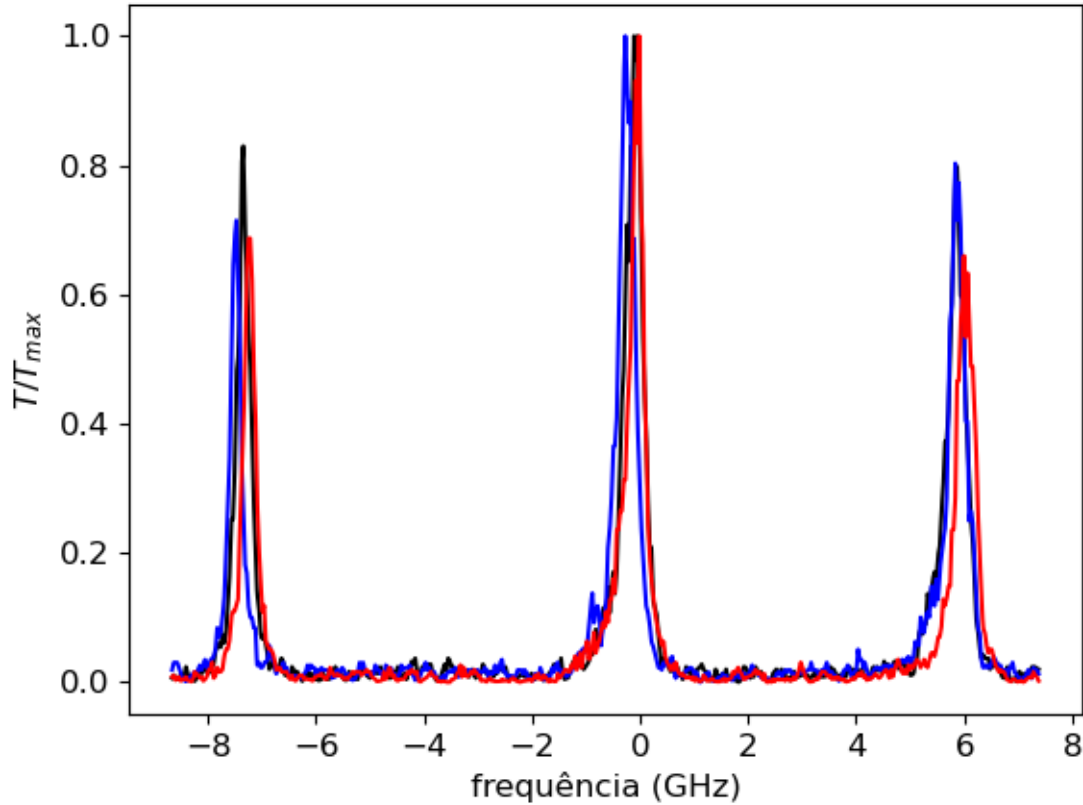
através da eq. 2.6 substituindo 2 no denominador pelo 8, pois no nosso caso se trata de uma cavidade composta de um espelho plano e côncavo, encontramos que o valor teórico para ν_{FWHM} é de 0.13 para uma cavidade acoplada com o feixe. Assim, visto que a cavidade não está perfeitamente acoplada pois estamos utilizando um feixe colimado podemos considerar valor aceitável. Além disso, sabendo que as distâncias entre as transições do Césio são maiores que 200 MHz, logo, com esta margem de erro é possível distinguir as transições. Por fim, calculamos a partir dos valores medidos da FRS e da FWHM a *finesse*, que é;

$$\mathcal{F}_{exp} = (34 \pm 2), \quad (4.4)$$

como se trata de uma razão entre frequências o valor da *finesse* não possui dimensão, ela representa a qualidade da cavidade, os parâmetros responsáveis por atuarem diretamente e indiretamente no seu valor são; alinhamento da cavidade e a distância entre os espelho como também a qualidade dos espelhos utilizados e suas refletividades. Através da eq. 2.4 obtemos 50 de *finesse* para um feixe gaussiano acoplado com a cavidade.

Outro fator importante para se mensurar é a estabilidade da cavidade ao longo do tempo, visto que devido as vibrações mecânicas e flutuações de temperatura podem ocasionar modificações do comprimento da cavidade.

Figura 18 – Transmissão da cavidade ao longo do tempo: Em vermelho: $t = 0$ s. Em azul: $t = 10$. Em preto: $t = 70$ s.



Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

A tabela a seguir representa a translação dos máximos em cada intervalo de tempo;

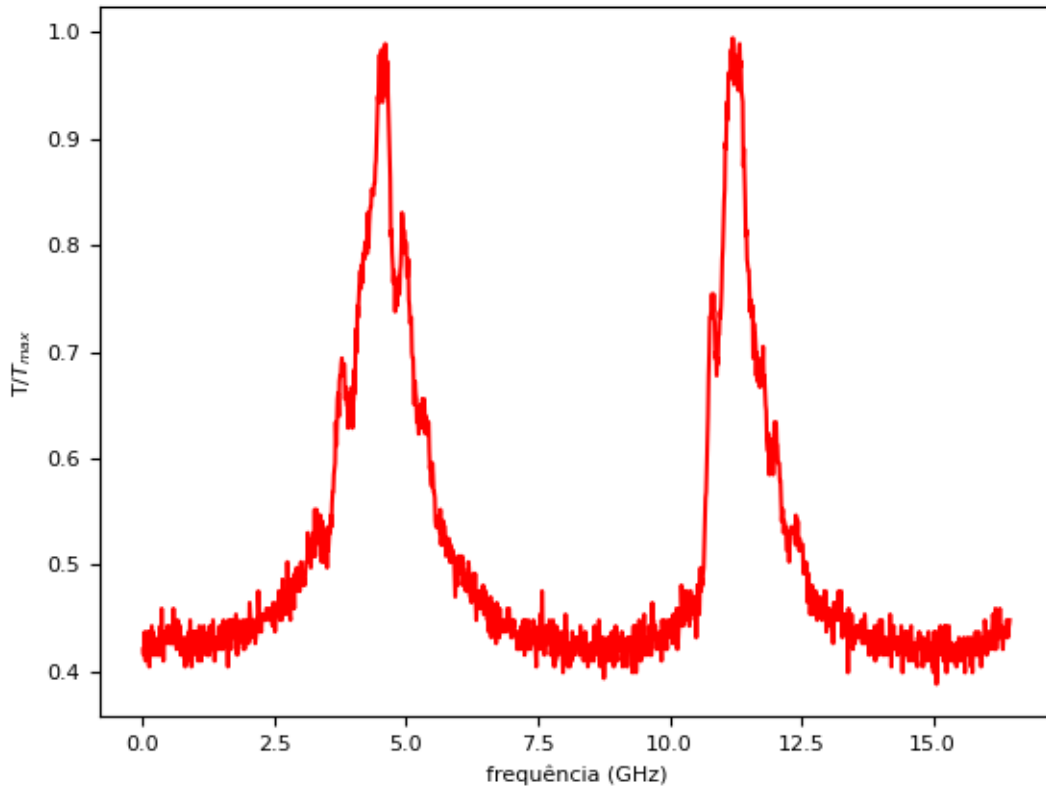
Tabela 2 – Deslocamento dos picos em função do tempo devido a flutuações do ambiente.

Tempo (s)	Frequência ($\times 10$ MHz)
0 até 10	7 ± 4
10 até 70	8 ± 4
0 até 70	8 ± 5

Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

Embora a mesma esteja exposta ao ambiente apresenta uma boa estabilidade visto que não ultrapassa a distâncias em frequência das transições atômicas do Césio que são da ordem de 200 MHz, no qual é de nosso interesse pois é o qual buscamos analisar. Valer ressaltar que até mesmo o laser está sujeito a flutuações mesmo com controladores de temperatura e corrente, de modo que nenhum mecanismo está isento de tais perturbações.

Figura 19 – Transmissão de cavidade com laser de frequência constante, variando o tamanho da cavidade através do PZT.



Fonte: Arquivo Pessoal (2022)

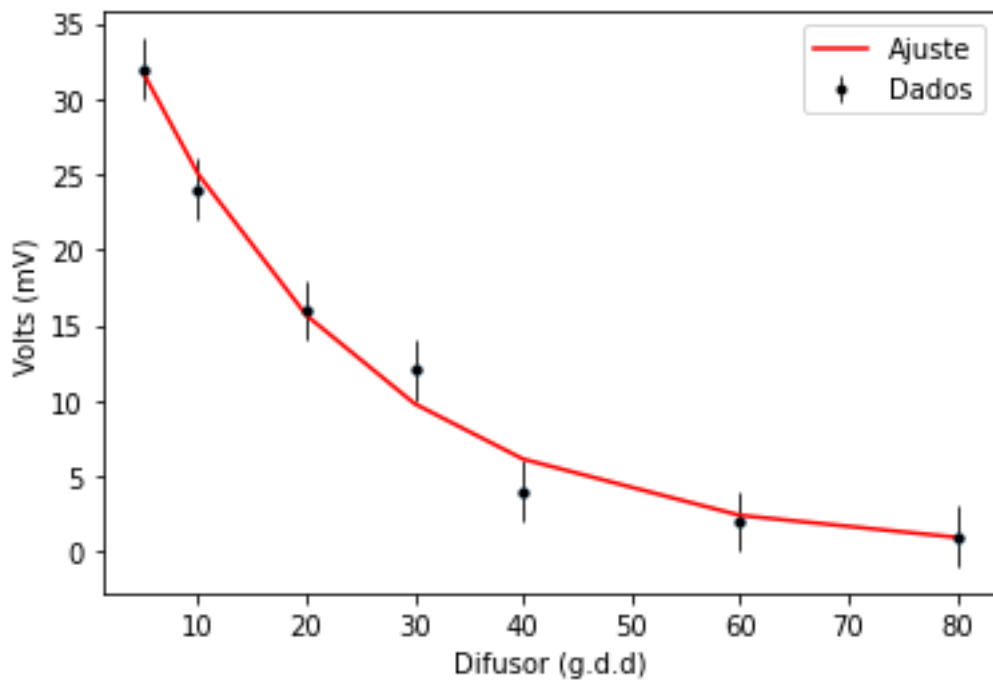
Na fig. 19 temos utilizamos o PZT para variar o tamanho da cavidade e mantendo a frequência do laser fixa, assim produzir o padrão de interferência. Conseguimos varrer a CFP e ver os picos, com amplitude de cerca de 50 mV, com frequência entorno de 7 GHz. O valor obtido do FWHM da fig. 19 é maior do que o da fig. 17. Entretanto, havíamos observado o sinal anteriormente com FWHM menor contudo os dados se perderam. Usamos o FSR da CFP comercial para converter a tensão do PZT em frequência.

O aumento do FWHM é devido danificações térmicas causadas pela alta potência do laser de HeNe pois o espelho plano possuem um revestimento que reflete maior parte do laser no infravermelho, no entanto o vermelho deixa passar maior parte. Logo, como o ponto focal do espelho côncavo está no espelho plano houve o aquecimento nesta região, resultando em um furo no revestimento justamente no ponto no qual o feixe está focalizado. Entretanto, ainda é preservada FSR. O valor obtido para o FWHM após o espelho plano ser danificado é;

$$v_{FWHM} = (6 \pm 1) \times 100MHz \quad (4.5)$$

Como o intuito é para análise espectrais e fluorescência é diferente do laser colimado (pois é isotrópica), fizemos também uma simulação de luz difusa utilizando difusores para avaliar a capacidade de se observar o padrão de interferência de FP, dada que a luz difusa é similar a fluorescência do Césio. A fig. 20 mostra como decresce exponencialmente o potencial a medida que aumenta o grau do difusor.

Figura 20 – Luz difusa: A curva em vermelho representa o ajuste feito através de uma função exponencial, para mostrar como os pontos experimentais (que estão em preto) diminuem com o aumento do grau de difusidade (g.d.d) da luz espalhada.



Fonte: Arquivo pessoal (2022)

Observe que os valores de transmissão são afetados pela maneira como os dados são coletados. À medida que os valores de grão aumentam, a luz é mais dispersa, dificultando a coleta de toda a luz no espectrômetro. Portanto, valores de grão mais altos parecerão ter uma transmissão mais baixa.

Através da função $a \cdot e^{b \cdot x}$, no tal a e b são os melhores parâmetros escolhidos através do método dos mínimos quadrados [25] com coeficiente de correlação de -0.7 que representa que existe 70% de correlação entre os pontos, o fato de ser negativa é por ser uma exponencial decrescente. Os valores dos melhores parâmetros escolhidos são;

$$a = (40 \pm 3)mV, \quad (4.6)$$

$$b = (-0.05 \pm 0.01)g.d.d^{-1}. \quad (4.7)$$

O parâmetro a está relacionado com o potencial, se não existisse o difusor (ou seja, sem difusor) o termo x seria zero com isso obteríamos apenas o valor do potencial do laser incidente. Enquanto b , está relacionado com a difusividade. O programa feito para analisar estes dados está no Apêndice C 8.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como apresentado ao longo do trabalho, o principal objetivo foi construir um aparato experimental com FSR de cerca de 6 GHz para realizar análises espectrais, visto que é de grande relevância na área de Física Atômica, em especial, para conhecer as frequências presentes na fluorescência do vapor de Césio. Esse objetivo foi alcançado e obtivemos uma FSR com uma incerteza aceitável, visto que 10 é um valor já aceitável de *finesse* para as configurações da CFB trabalhada.

Em seguida, descrevemos as condições físicas necessárias para tornar o sinal de FP estável por meio de pesquisas bibliográficas e testes experimentais. Nesse sentido, testamos a estabilidade da CFP ao longo do tempo.

Detalhamos as configurações experimentais necessárias para realizar o experimento, como suportes impressos em impressora 3D para os elementos ópticos usados, bem como os possíveis problemas que podem surgir devido a erros sistemáticos na configuração e no alinhamento.

Logo após, comparamos os resultados obtidos com a teoria e obtivemos, no primeiro momento, resultados promissores, a saber: $\nu_{FSR} = (6,7 \pm 0,1)GHz$, $\nu_{FWHM} = (2,0 \pm 0,1) \times 10GHz$ e $\mathcal{F}_{exp} = 34 \pm 2$. Embora os resultados tenham sido afetados devido à danos físicos no revestimento do espelho plano, o valor do FSR se manteve constante.

Por fim, o problema da pesquisa não foi completamente resolvido, visto que, devido às limitações da configuração experimental, não foi possível realizar o acoplamento da luz difusa da fluorescência com a CFP, bem como houve a perda da *finesse* devido à danificação do revestimento do espelho plano. Contudo, os resultados obtidos serviram para termos informações necessárias para elaborar um modelo de configuração experimental da CFP no qual é possível realizar o acoplamento. O modelo desenhado no software *SolidWorks* está no Apêndice D 9, e com um novo espelho plano, será possível a realização futura das análises espectrais.

REFERÊNCIAS

- 1 VAUGHAN, J. *The Fabry-Perot Interferometer : History, Theory, Practice and Applications*. [S.l.]: Taylor Francis Group, LLC, 1989. 12
- 2 LEPETRE, Y. et al. Fabry-perot etalons for x-rays: Construction and characterization. *Optics Communications*, v. 51, n. 3, p. 127–130, 1984. ISSN 0030-4018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0030401884902190>>. 12
- 3 HUMS, C. et al. Fabry-perot effects in ingangan heterostructures on si-substrate. *Journal of Applied Physics*, 2007. 12
- 4 The fabry-perot spectrometer. In: SHEPHERD, G. G. (Ed.). *Spectral Imaging of the Atmosphere*. Academic Press, 2003, (International Geophysics, v. 82). p. 102–128. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0074614202800407>>. 12
- 5 CAVIDADES Fabry-Pérot no Interior de Fibras Ópticas. [S.l.]: *Applied Physics Letters*. 12
- 6 BITARAFAN, M. H.; DECORBY, R. G. On-chip high-finesse fabry-perot microcavities for optical sensing and quantum information. *Sensors*, v. 17, n. 8, 2017. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/8/1748>>. 12
- 7 ZILIO, S. C. rgio C. *Óptica Moderna Fundamentos e aplicações*. [S.l.]: Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009. 12, 16, 20, 27, 29, 34
- 8 NAGOURNEY, W. *Quantum Electronics for Atomic Physics and Telecommunication*. Oxford University Press, 2014. (Oxford graduate texts). ISBN 9780199665488. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=YDOTAwAAQBAJ>>. 12
- 9 GUNDERSON, L. C. Fiber optic sensor applications using Fabry-Perot interferometry. In: KERSTEN, R. T. (Ed.). *Fiber Optic Sensors IV*. SPIE, 1990. v. 1267, p. 194 – 204. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.20306>>. 12
- 10 WEN-RONG, S. e. C.-Z. *Estudo Preliminar sobre um Sensor Interferômetro Extrínseco de Fibra Óptica Fabry-Perot de Detecção Acústica para Descarga Parcial*. [S.l.]: 2018 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation (ICSGEA), 2018. 12
- 11 SVELTO, O. *Principles of Lasers*. Springer US, 2010. ISBN 9781441913029. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ioywRI5W2HEC>>. 14, 15, 20, 24
- 12 SIKDAR, D.; KORNYSHEV, A. A. An electro-tunable fabry-perot interferometer based on dual mirror-on-mirror nanoplasmonic metamaterials. *Nanophotonics*, v. 8, n. 12, p. 2279–2290, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0317>>. 14
- 13 PEATROSS, M. W. J. *Physics of Light and Optics*. Brigham Young University, 2011. ISBN B002ADBR2U. Disponível em: <<https://www.e-booksdirectory.com/details.php?ebook=6802>>. 15, 16, 17, 18, 20
- 14 DOORN, J. van. *An investigation of the plane-concave Fabry Perot cavity*. Tese (THESE IN MASTER OF SCIENCE in PHYSICS) — y, Leiden University, 2019. 16
- 15 THORLABS. *Tutorial do Interferômetro Fabry-Perot*. 2023. <https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup;d=9021>. 17

- 16 DOORN, J. van. *An investigation of the plane-concave Fabry Perot cavity*. Tese (Mestrado) — Leiden University, 2019. 19
- 17 SZKUDLAREK, S. *The simulation of a plane-concave Fabry-Perot micro-cavity*. Tese (Barcharel) — Faculty of Science, 2019. 24
- 18 PHOTODIGM. *Diodo laser*. 2023. <https://www.photodigm.com/spectroscopy-certified-laser-products>. 27
- 19 NEWPORT. *Fibra óptica*. 2023. <https://www.newport.com/p/F-SF-C-3FC>. 29
- 20 THORLABS. *Kits para Filtro Bandpass*. 2023. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=873. 30, 33, 36
- 21 EDMUND. *Espelhos Esféricos Côncavos*. 2023. [Howpublished=https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9021](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=9021). 30
- 22 ROBÓTICA, C. da. *Pastilhas Piezoelétrico*. 2023. <https://encurtador.com.br/IKQY0>. 32
- 23 MONTAGNA. *O QUE SÃO ABRASIVOS?* 2023. <https://montagna.com.br/abrasivos/>. 33
- 24 ALVES, S. B. *Dinâmica em frequência de lasers semicondutores sob injeção ótica e efeitos da dispersão e absorção na estatística de fótons em vapor ressonante*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba. Departamento da Pos-Graduação em Física, 2016. 37
- 25 TAYLOR, J. *Introdução à Análise de Erros: O Estudo de Incertezas em Medições Físicas*. Bookman, 2009. ISBN 9788540701373. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-KiLlh3641sC>>. 44

6 APÊNDICE A

Coleta do FSR e da FWHM

```

1  """ BLIBIOTECAS-----
    """
2  #NumPy para manipulação de dados
3  import numpy as np
4  #Matplotlib para gráficos
5  import matplotlib.pyplot as plt
6  #Editar texto do grafico
7  from matplotlib import rc
8  """ FONTE----- """
9  font = {'family' : 'normal',
10         'weight' : 'normal', #bold      negrito
11         'size'   : 8}
12
13  rc('font', **font)
14  """-----END
    ----- """
15  """ ENTRADAS DE DADOS
    ----- """
16  inicial = -15
17  final = 15
18
19  #cavidade
20  dados = np.loadtxt("elvis90123000_Ch1.csv")
21
22  #trazendo para o zero
23  y = (dados)-dados.min()
24
25  #normalizando
26  y = y/y.max()
27
28  #fabry perot
29  dados1 = np.loadtxt("elvis90123000_Ch2.csv")
30  y1 = dados1 - dados1.min()
31  y1 = dados1/dados1.min()
32
33  #rampa

```

```

34 dados2 = np.loadtxt("elvis90123000_Ch3.csv")
35 y2 = dados2 - dados2.min()
36 y2 = y2/y2.max()
37
38 #frequencia
39 t = np.linspace(inicial ,final ,dados.size)
40 #
    =====
41
42 #cavidade
43 plt.plot(t, y, c="black")
44 plt.plot(t, y1, c="red")
45 plt.plot(t, y2, c="blue")
46 plt.show()
47 """ -----END
    ----- """
48
49 """-----cortando grafico: pegando uma das rampas
    ----- """
50
51 #rampa
52 y2corte = y2[np.argmin(y2) : np.argmax(y2)]
53
54 #fabry perot
55 y1corte = y1[np.argmin(y2) : np.argmax(y2)]
56
57 #cavidade
58 ycorte = y[np.argmin(y2) : np.argmax(y2)]
59
60 #frequencia
61 tcorte = t[np.argmin(y2) : np.argmax(y2)]
62
63 #-----interpola o
    -----
64 #eixo x
65 x_inter = np.linspace(tcorte[0], tcorte[ len(tcorte) -1],100000)
66
67 #rampa

```

```

68 y_inter2 = np.interp(x_inter , tcorte , y2corte)
69
70 #FPI
71 y_inter1 = np.interp(x_inter , tcorte , y1corte)
72
73 #cavidade
74 y_inter = np.interp(x_inter , tcorte , ycorte)
75
76
77 """-----END
    -----"""
78 """definindo o primeiro pico do fabry perot em zero e os demais com
    multiplos de FSR"""
79 #menor m ximo permitido
80 mm = 0.4
81 #m ximos globais
82 def maximos(y1corte):
83     f = (np.diff(np.sign(np.diff(y1corte))) < 0).nonzero()[0] + 1 # local
        max
84     j = 0
85     for i in range(len(f)):
86         if (y1corte[f[i]]>=mm):
87             # print(f[i])
88             j = j+1
89             jj=0
90     c = np.zeros(j)
91     for i in range(len(f)):
92         if ((y1corte[f[i]]>=mm)):
93             # print(f[i])
94             c[jj] = f[i]
95             jj = jj+1
96             #convertendo float p/ int
97             o = c.astype('int')
98     return o
99 #
    -----
100
101 #posi o dos m ixmos

```

```

102 o = maximos(y_inter1)
103
104 #definindo o primeiro pico do fabry perot em zero e o ultimo
105 new = y_inter1[o[0]:o[o.size-1]]
106
107 #rampa
108 y2cortel = y_inter2[o[0] : o[o.size-1]]
109
110 #fabry perot
111 yl cortel = y_inter1[o[0]:o[o.size-1]]
112
113 #cavidade
114 ycortel = y_inter[o[0]:o[o.size-1]]
115
116 #frequencia
117 tt = x_inter[o[0]:o[o.size-1]]
118
119 #transalando para o zero
120 tt = tt - tt[0]
121
122 #
    -----
123
124
125 #m ximos apos o corte
126 m = maximos(yl cortel)
127 #fator da convers o da escala horizonatal: dist ncia entre os picos
128 FSR = 1.5 #dist ncia entre os m ximos so fabry perot em GHz(FSR)
129 h = FSR/( tt[m[1]]-tt[m[0]])
130 #criando uma nova escala horizontal para diferen a entre os picos sere 1
131 tnew = [tt[i]*h for i in range(new.size)]
132
133 #posi o dos maximos dos picos da cavidade
134 w = maximos(ycortel)
135
136
137
138

```

```

139 np.savetxt("dados.dat", list(zip(tnew, ycorrel)), fmt="%f")
140
141 #-----largura das curvas
    -----
142 #primeiro pico
143 print("\n\n\n")
144 t=np.where(ycorrel >=(ycorrel[w[0]]/2))
145 tt = t[0]
146 #for i in range(1000):
147 #    print(tt[i])
148 for i in range(1, len(tt)):
149     if(1<(tt[i]-(tt[i-1]))):
150         print((np.argwhere(tt==tt[i])-1))
151 ttt = np.array([tt[0], tt[819]])
152 print("\n\n\n")
153 #segundo pico
154 q=np.where(ycorrel >=(ycorrel[w[1]]/2))
155 qq = q[0]
156 for i in range(0, len(qq)):
157     if(1<(qq[i]-(qq[i-1]))):
158         print((np.argwhere(qq==qq[i])-1))
159 qqq =np.array([qq[591], qq[1319]])
160 print("\n\n\n")
161 #terceiro pico
162 p=np.where(ycorrel >=(ycorrel[w[2]]/2))
163 pp = p[0]
164 for i in range(0, len(pp)):
165     if(1<(pp[i]-(pp[i-1]))):
166         print((np.argwhere(pp==pp[i])-1))
167 ppp =np.array([pp[1069], pp[1793]])
168 print("\n\n\n")
169 #quarto pico
170 z=np.where(ycorrel >=(ycorrel[w[3]]/2))
171 zz = z[0]
172 for i in range(0, len(zz)):
173     if(1<(zz[i]-(zz[i-1]))):
174         print((np.argwhere(zz==zz[i])-1))
175 #for i in range(200000):
176 #    if ((ycorrel[zz[1794]]) <=(ycorrel[1794+i])):

```



```

177 #         print((1794+i))
178 zzz =np.array ([ zz[1443],80799])
179 print("\n\n\n")
180 #for i in range(0,1000):
181 #     print(qq[i])
182 #for i in range(1,len(qq)-1):
183 #     if(1<(qq[i]-(qq[i-1]))):
184 #         print(qq[i])
185 #qqq = np.array([qq[0],tt[819]])
186
187
188 #
189
190 -----
191
190 #Nome da f gura , dimens es , resolu o em pixels e cor da borda
191 #fig = plt.figure("Figura 1", figsize=(6,4), dpi=150, facecolor='w')
192
193 #Colocando no quadro;
194 #ax = fig.add_subplot()
195
196
197 #cavidade
198 #ax.plot(t, y, c='black')
199 #ax.plot(tcorte, ycorte, c='black')
200 #ax.plot(tnew, ycorte1, c="red", lw=0.5)
201 #ax.plot(x_inter, y_inter, c='red', marker='.', ls='--',lw=1, label='x',
202         markersize=1, markerfacecolor='red', markeredgecolor='red')
203 #ax.plot(x, (1+x**2)/2, c='r', marker='o', ls='--',lw=2, label='x',
204         markersize=10, markerfacecolor='b', markeredgecolor='black')
205
206 #for i in range(len(ttt)):
207 #     ax.plot(tnew[ttt[i]], ycorte1[ttt[i]], c='r', marker='.', ls='--',lw
208         =1, label='x', markersize=2, markerfacecolor='b', markeredgecolor='
209         black')
210
211
212 print("\n\n\n")
213
214 #segundo

```

```

210
211
212
213
214 #Quadro branco:
215 #Nome da figura, dimensões, resolução em pixels e cor da borda
216 fig = plt.figure("Figura 1", figsize=(6,4), dpi=150, facecolor='w')
217
218 #Colocando no quadro;
219 ax = fig.add_subplot()
220
221
222 #media e desvio
223 d = np.array([tnew[w[1]]-tnew[w[0]], tnew[w[2]]-tnew[w[1]], tnew[w[3]]-tnew
    [w[2]])
224 d1 = np.array([tnew[ttt[1]]-tnew[ttt[0]], tnew[qqq[1]]-tnew[qqq[0]], tnew
    [ppp[1]]-tnew[ppp[0]], tnew[zzz[1]]-tnew[zzz[0]])
225
226 #definindo o nome do eixo x
227 ax.set_xlabel('frequência [GHz]', fontsize=7)
228
229 #definindo o nome do eixo y
230 ax.set_ylabel(r'$T/T_{\max}$', fontsize=7)
231
232 #exibição do eixo y
233 ax.set_ylim(0,1)
234
235 #titulo
236 ax.set_title(r'$r_{1}=90\%$ e $r_{2}=98\%$, sem a lente')
237
238 #exibição do eixo x
239 ax.set_xlim(0,(tnew[len(tnew)-1]))
240
241 #ax.text(8,0.4,r"FSR=({} $\pm$ {})GHz".format(np.round(d.mean(), decimals
    =2), np.round(np.std(d), decimals=2)),fontsize=8)
242 #salvando imagem
243 plt.savefig('fabryperot.jpeg')
244
245 plt.show()

```

```

246 #incluido legenda
247 #ax.legend(frameon=False, loc= 1)
248 Delta = np.mean(d)
249 sig_Delta = np.std(d)
250 delta = np.mean(d1)
251 sig_delta = np.std(d1)
252 F = Delta/delta
253 sig_F = np.sqrt((sig_Delta/delta)**2+(Delta*sig_delta/delta**2)**2)
254 print("\n\n\n D = {} +- {}".format(np.round(Delta, decimals=2), np.round(
    sig_Delta, decimals=2)))
255 print("\n\n\n d = {} +- {}".format(np.round(delta, decimals=2), np.round(
    sig_delta, decimals=2)))
256 print("\n\n\n F={ } +- {}".format(np.round(F, decimals=2), np.round(sig_F,
    decimals=2)))

```



```

    ) ** 2)
    ** -1)

30     return t
31     TT = [T(v[i],0.2,0.2) for i in range(n)]
32     TTT = [T(v[i],0.8,0.8) for i in range(n)]
33     TTTT = [T(v[i],0.99,0.99) for i in range(n)]
34     #plt.plot(v,TT)
35     fig = plt.figure("Figura 1", figsize=(6,4), dpi=150, facecolor='w')
36
37     ax = fig.add_subplot()
38     ax.plot(v, TT, c="red")
39     ax.plot(v, TTT, c="blue")
40     ax.plot(v, TTTT, c="black")
41     ax.set_xlabel("frequ  ncia (Hz)")
42     ax.set_ylabel("transmiss  o (u.a)")
43     #plt.plot(t, y2, c="blue")
44     #ax.plot(tcorte[maximo], y1corte[maximo], c='black', marker='o', ls='--',
45         lw=1, label='x', markersize=2, markerfacecolor='b', markeredgecolor='
46         black')
47     #plt.plot(t, y2, c="blue")
48     plt.show()

```

8 APÊNDICE C

Ajuste dos dados difusor

```

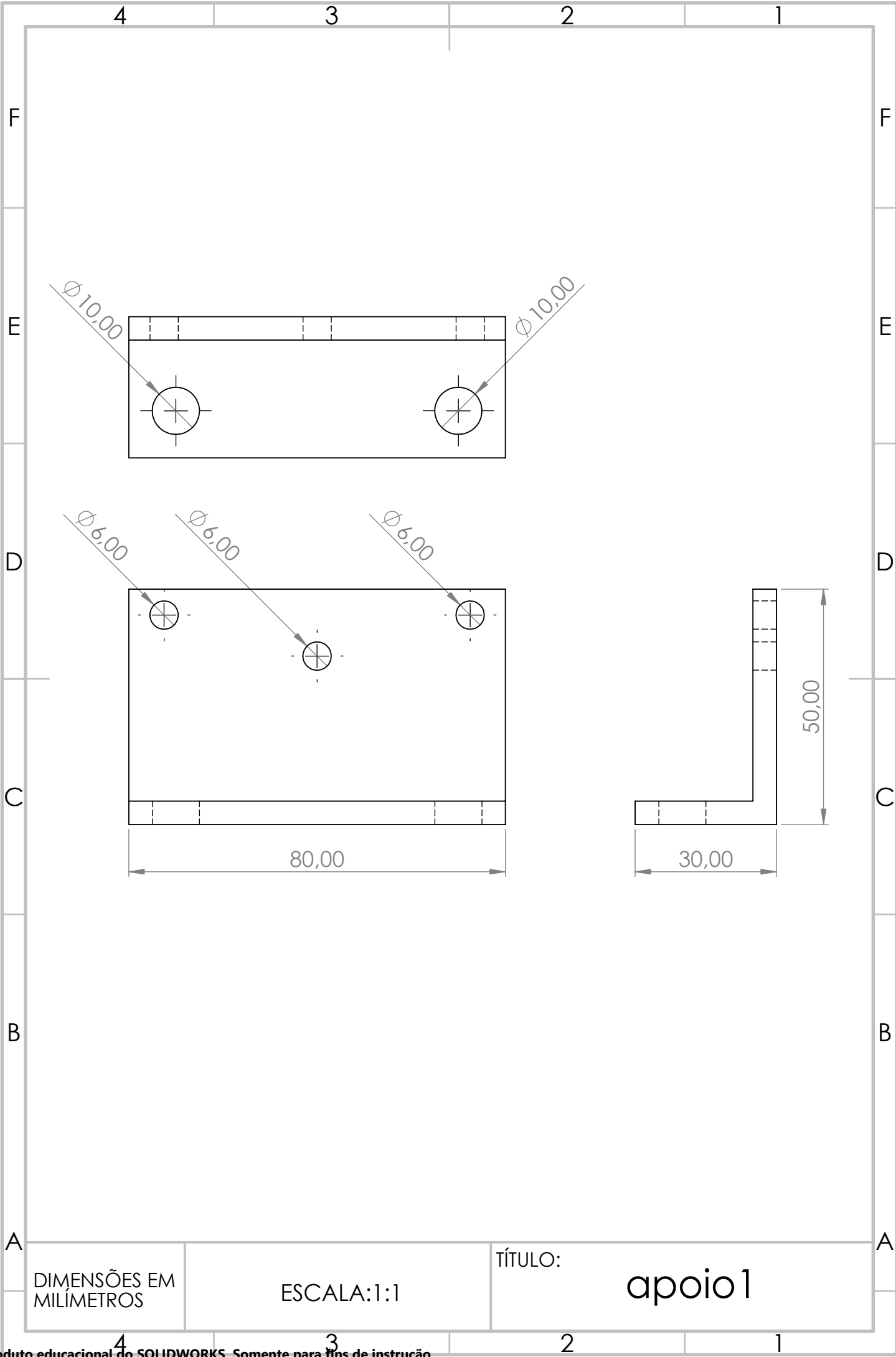
1  #!/usr/bin/env python3
2  # -*- coding: utf-8 -*-
3  """
4  Created on Sun Sep  4 14:24:15 2022
5
6  @author: elvis
7  """
8
9  import matplotlib.pyplot as plt
10 import numpy as np
11 from scipy.optimize import curve_fit
12 from scipy import stats
13 from scipy.stats import t
14 from matplotlib import rc
15
16 difusor = np.array([5,10,20,30,40,60,80])
17 volts = np.array([32,24,16,12,4,2,1]) #mVolts
18
19 def f(x,a,b):
20     return a*np.exp(b*x)
21 p0=[1,0]
22 erro_y = np.ones(len(difusor))*2
23 params,pcov = curve_fit(f,difusor,volts,p0,sigma=erro_y,absolute_sigma
24                        =True,check_finite=True)
25 print(params)
26 print(pcov)
27
28 err_par=np.sqrt(np.diag(pcov))
29 print(err_par)
30 yfit = [f(difusor[i],params[0],params[1]) for i in range(len(difusor))]
31 plt.errorbar(difusor, volts, yerr=erro_y,color='k',elinewidth=0.8,lw=0,
32             marker='.',label='Dados')
33 plt.plot(difusor, yfit,c='r',label='Ajuste')
34 info1 = r'$a$ = {:.2f} $\pm$ {:.2f}'.format(params[0],err_par[0])
35 info2 = r'$b$ = {:.2f} $\pm$ {:.2f}'.format(params[1],err_par[1])

```

```
35 print(info1)
36 print(info2)
37 plt.xlabel("Difusor (graus)")
38 plt.ylabel("Volts (mV)")
39 plt.legend()
40
41
42 x1=0.
43 x2 = 0.
44 y1 = 0.
45 y2 = 0.
46 xy = 0.
47 r = 0.
48 n = len(difusor)
49 for i in range(len(difusor)):
50     x1 = x1+difusor[i]
51     x2 = x2+difusor[i]**2
52     y1 = y1+volts[i]
53     y2 = y2+volts[i]**2
54     xy = xy + difusor[i]*volts[i]
55
56 r = (xy-(x1*y1)/n)/(np.sqrt(((x2-x1**2)/n)*((y2-y1**2)/n)))
57 print(r)
```

9 APÊNDICE D

Modelo para a construção futura da CFP com FSR de 6 GHz

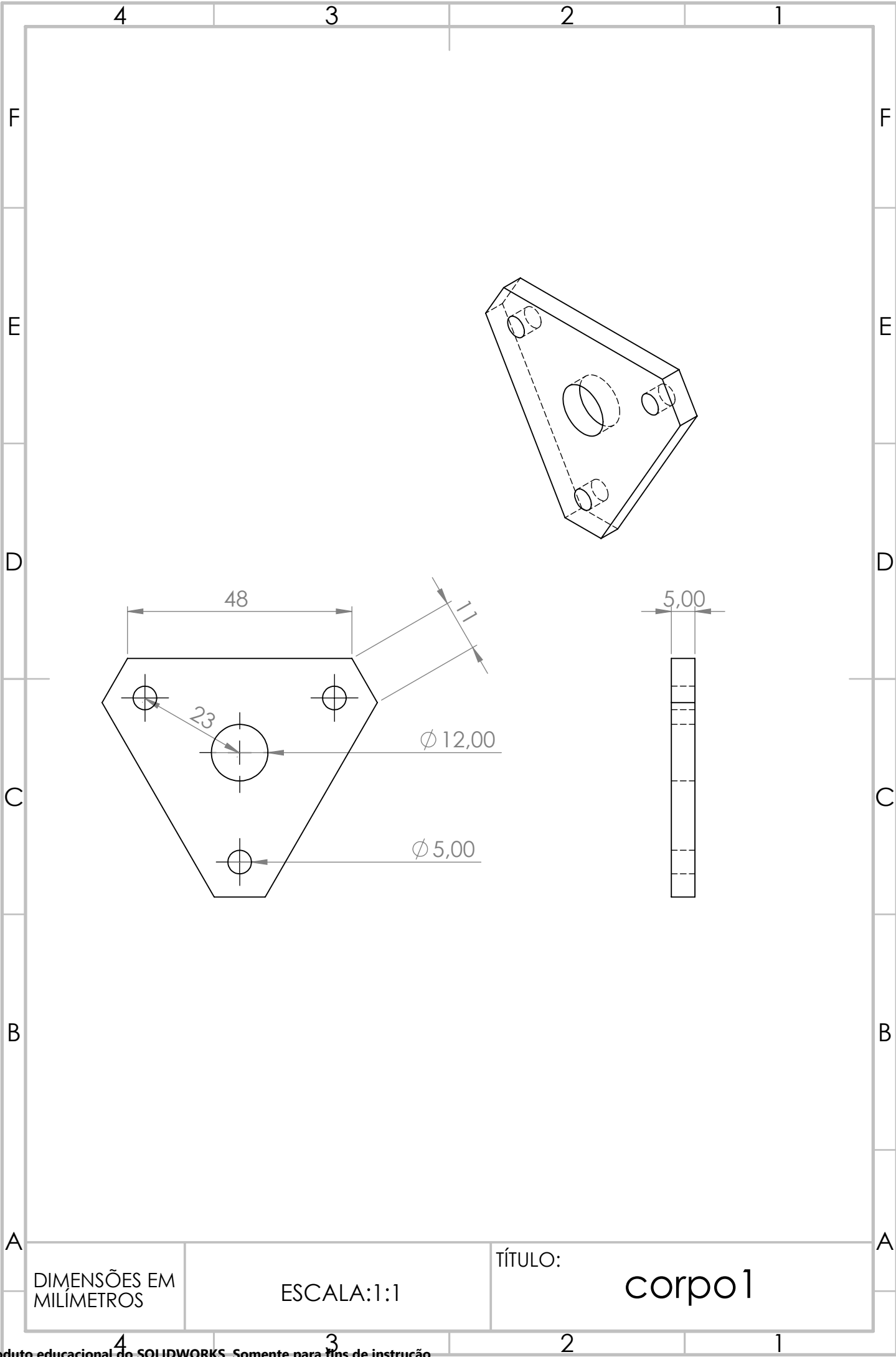


DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA:1:1

TÍTULO:

apoio1

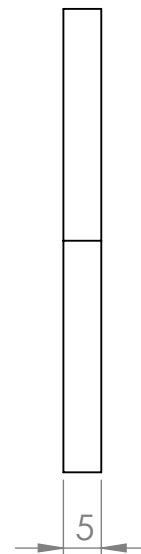
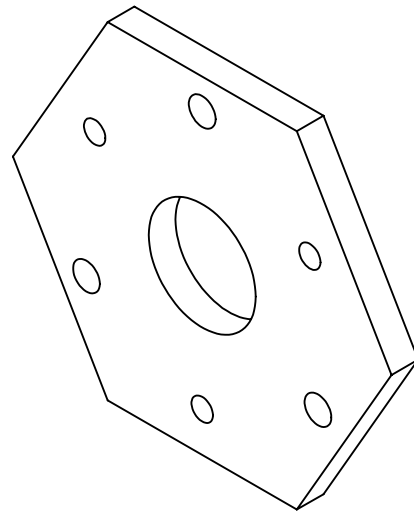
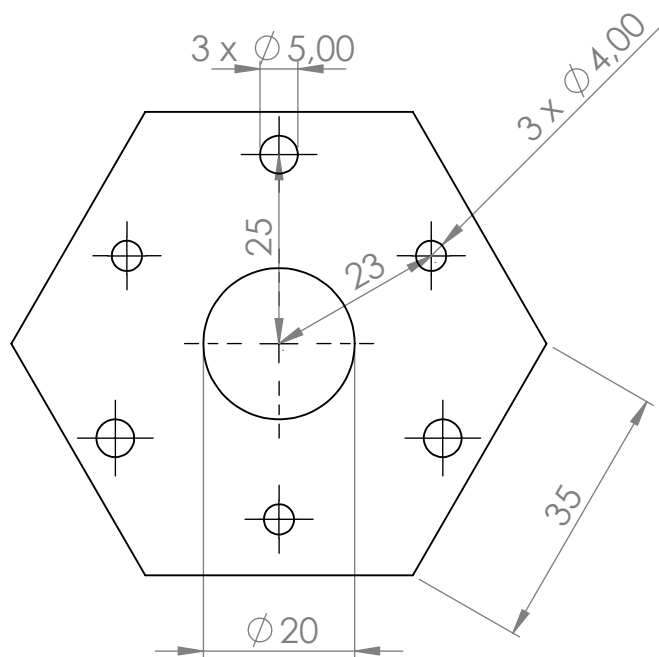


DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA:1:1

TÍTULO:

corpo1

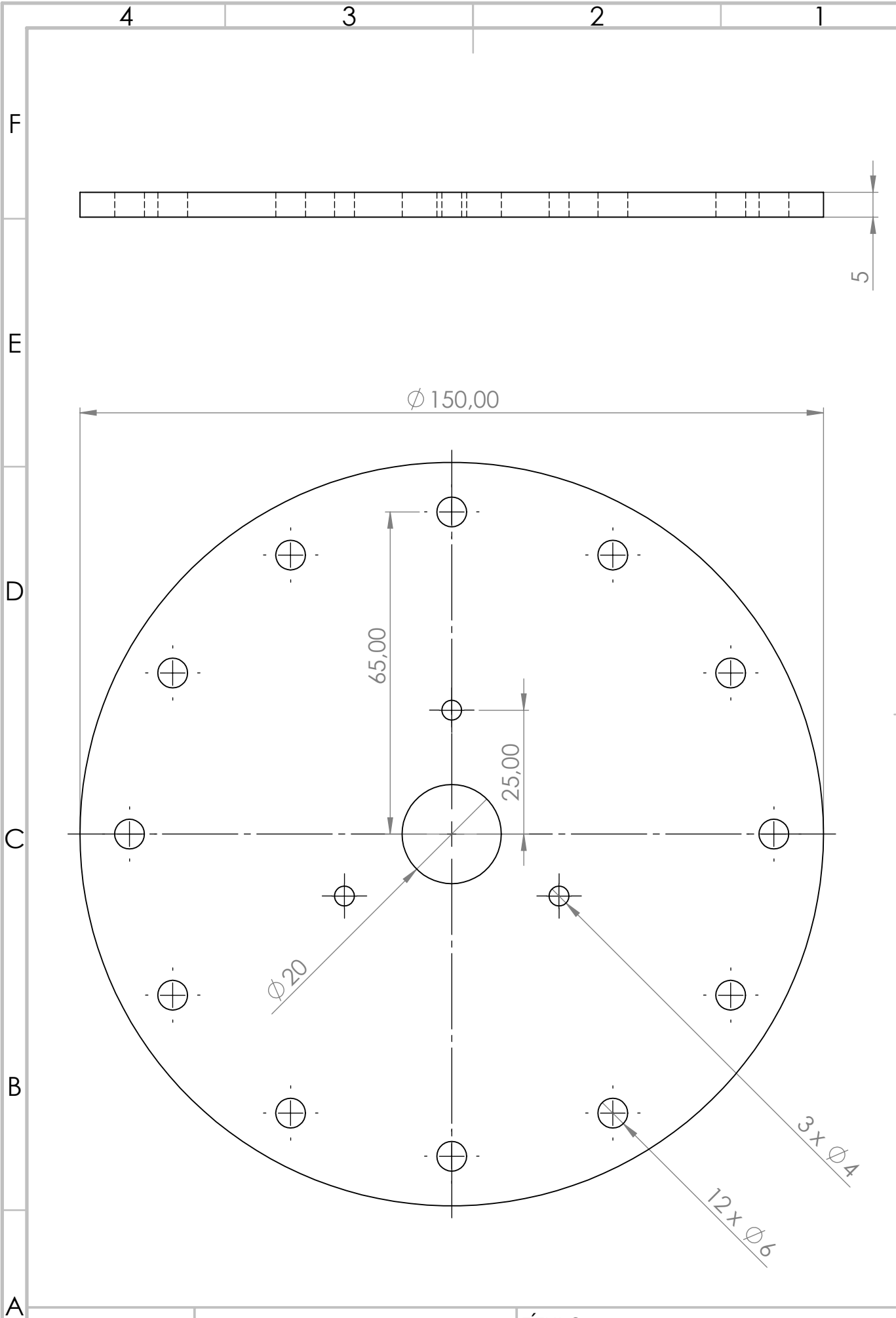


DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA:1:1

TÍTULO:

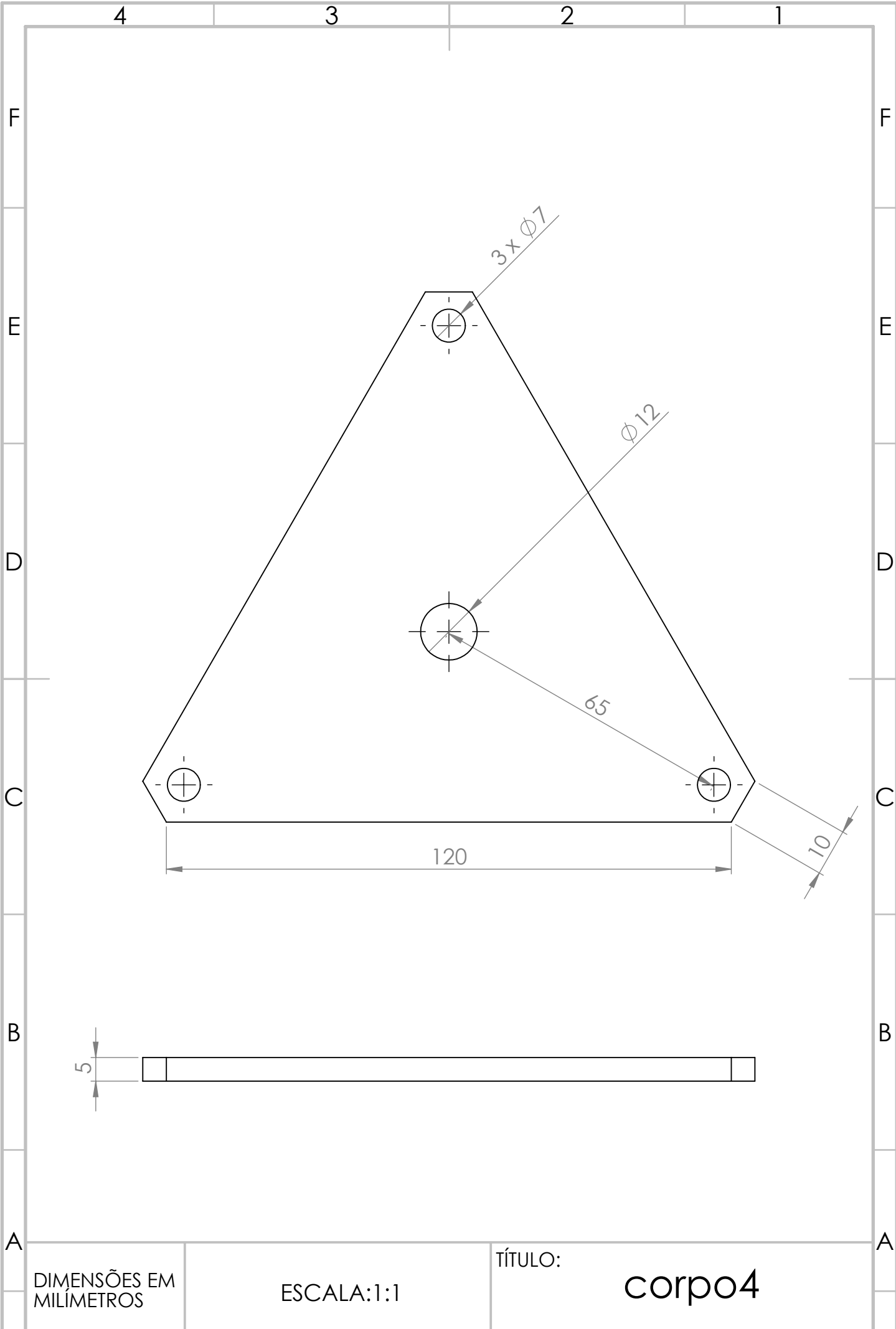
corpo2



DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA: 1:1

TÍTULO: **corpo3**

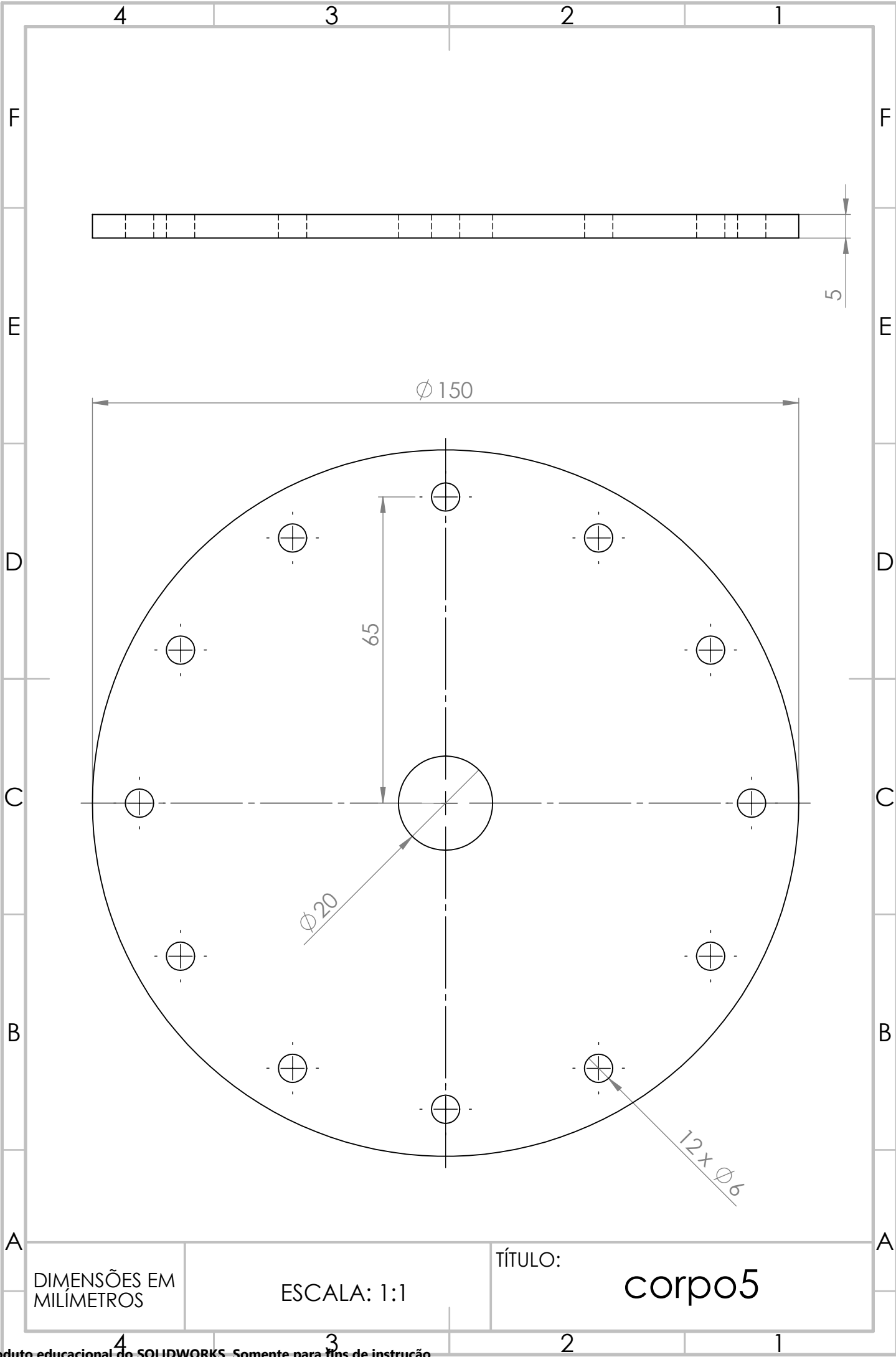


DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA:1:1

TÍTULO:

corpo4

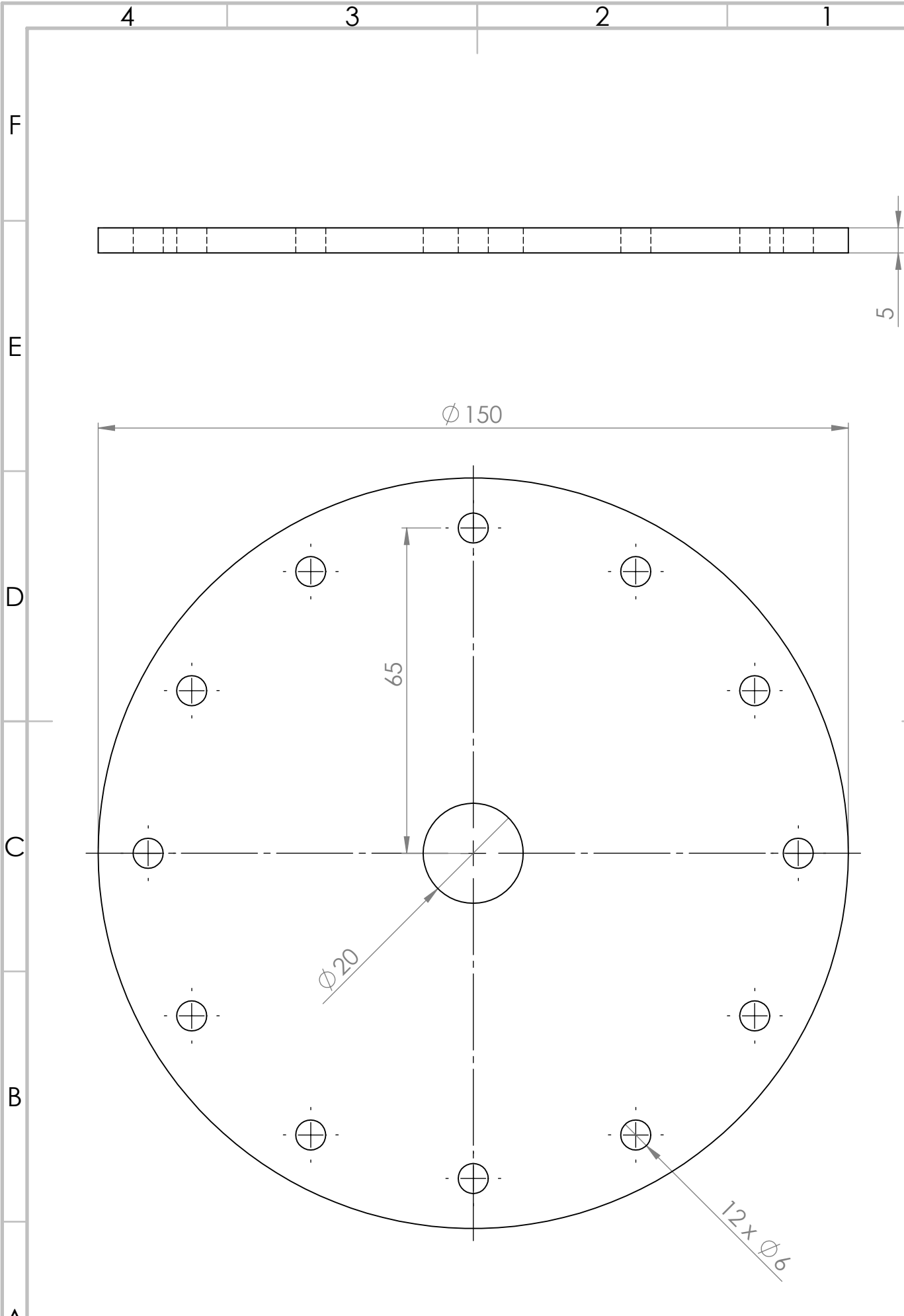


DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA: 1:1

TÍTULO:

corpo5



DIMENSÕES EM
MILÍMETROS

ESCALA: 1:1

TÍTULO: **corpo6**

6 parafusos M4 16mm 12 contra porcas

3 parafusos M6 60+mm 6 contra porcas

4 parafusos M6 16mm 8 contra porcas

3 parafusos M6 25mm 6 contra porcas

4 parafusos M10

