



**Universidade Estadual de Campinas**

## **F530 – Instrumentação**

1 semestre de 2010

### **Relatório Final:**

# **Interferômetro a fibra para medição de vibrações.**

**Aluno:** Juliano Grigoletto Hayashi  
**e-mail:** [jgh@ifi.unicamp.br](mailto:jgh@ifi.unicamp.br)

**RA** 061953



**Orientador:** Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro  
**e-mail:** [cmbc@ifi.unicamp.br](mailto:cmbc@ifi.unicamp.br)

**Coordenador:** José Joaquim Lunazzi

## **Índice:**

### **1 - Resumo.**

### **2 - Vibração do alto-falante.**

2.1 – Montagem do interferômetro a fibra com o alto-falante.

2.2 – Cálculo da amplitude e velocidade máxima do movimento da membrana.

2.3 – Caracterização da amplitude do movimento da membrana em função da voltagem aplicada ao alto-falante.

### **3 - Caracterização da resposta do detector.**

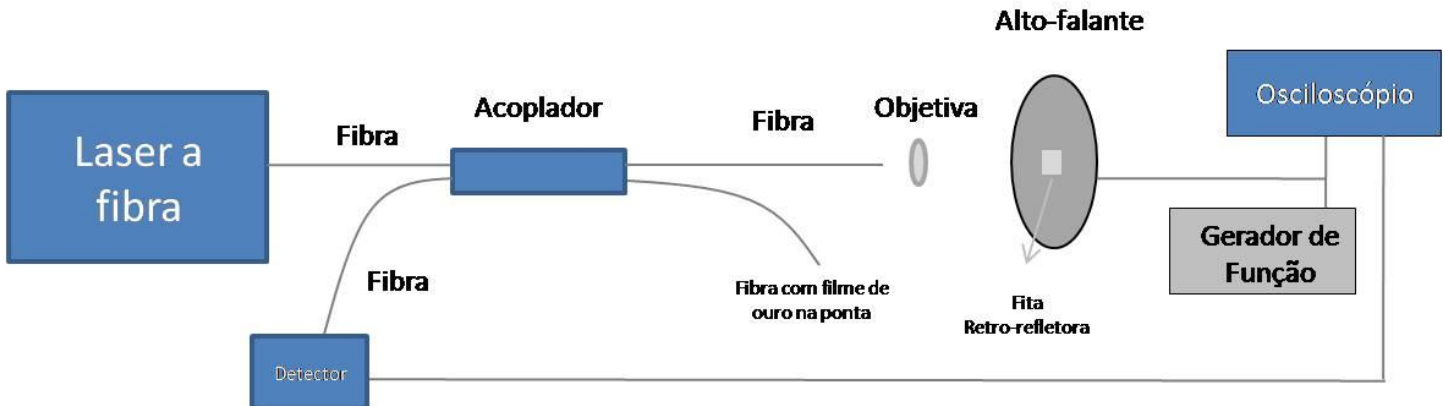
### **4 - Conclusão.**

### **5 - Bibliografia.**

## 1- Resumo.

Este projeto consiste na montagem e caracterização de um interferômetro Michelson a fibra para a detecção de vibrações. Além de sua construção e caracterização, será estudado o movimento de vibração de alto-falantes com intuito de analisar suas respostas e qualidades. Para concluir, iremos caracterizar a resposta do fotodetector através da análise do padrão de interferência para diferentes voltagens aplicadas sobre o alto-falante.

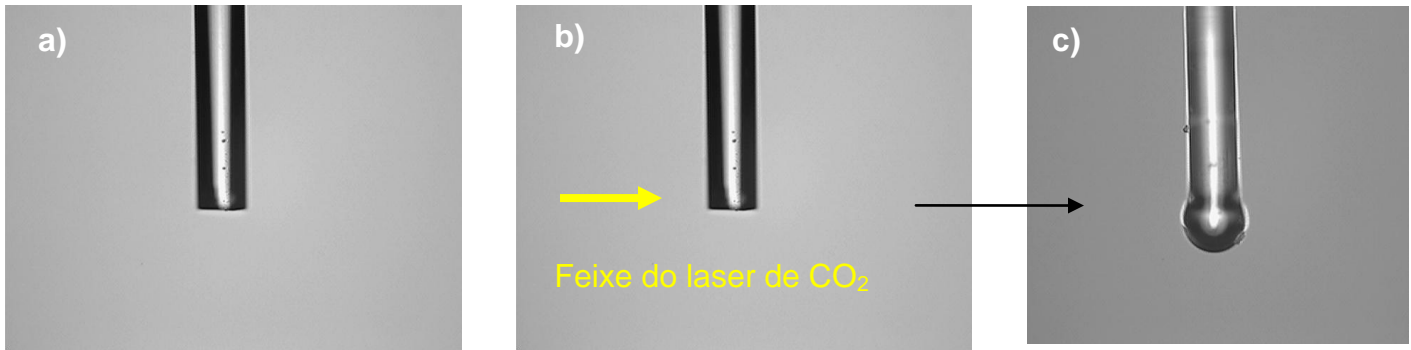
Na figura a seguir temos um esquema da montagem a ser construída.



**Figura 1: Montagem do interferômetro a fibra para medições de vibrações.**

Inicialmente, como relatado no relatório parcial, montamos o interferômetro a fibra sem o alto-falante (com um espelho móvel), caracterizamos todos seus componentes (acoplador e fibra espelhada), e visualizamos a resposta do interferômetro ao variarmos a temperatura de um de seus braços com a aproximação de uma lâmpada de 20W. Além disso, demos início a tentativa de produzir uma lente na ponta da fibra com o laser de CO<sub>2</sub>.

Na figura 2 temos fotos da extremidade de uma fibra convencional e das lentes produzidas ao incidirmos o feixe do laser de CO<sub>2</sub> lateralmente a fibra.



**Figura 2:** a) Foto de microscopia da ponta de uma fibra óptica convencional clivada (objetiva utilizada – 10 x); b) Esquema da incidência do feixe do laser de CO<sub>2</sub>; c) Foto de microscopia da lente produzida.

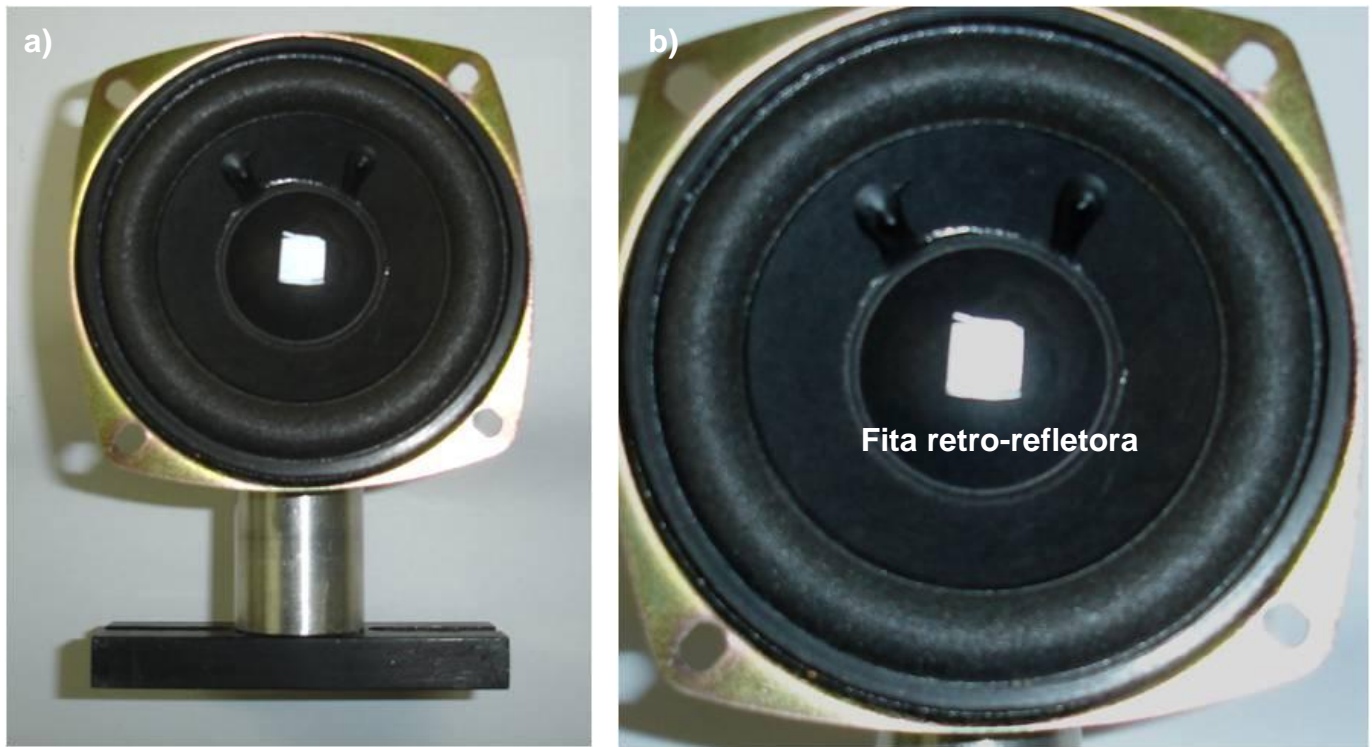
Neste relatório final iremos descrever a montagem e caracterização do interferômetro com um alto-falante e deste dispositivo. Estudamos o movimento da membrana do alto-falante, sua resposta ao variarmos a amplitude movimento, e a resposta do detector.

## 2 - Vibração do alto-falante.

### 2.1 – Montagem do interferômetro a fibra com o alto-falante.

Inicialmente, antes de introduzirmos o alto-falante no sistema, foi necessário introduzir um elemento refletor na sua membrana para refletir a luz de volta para o interferômetro. Esse elemento refletor poderia ser uma fita, uma tinta retro-refletora, ou um espelho colado na sua membrana.

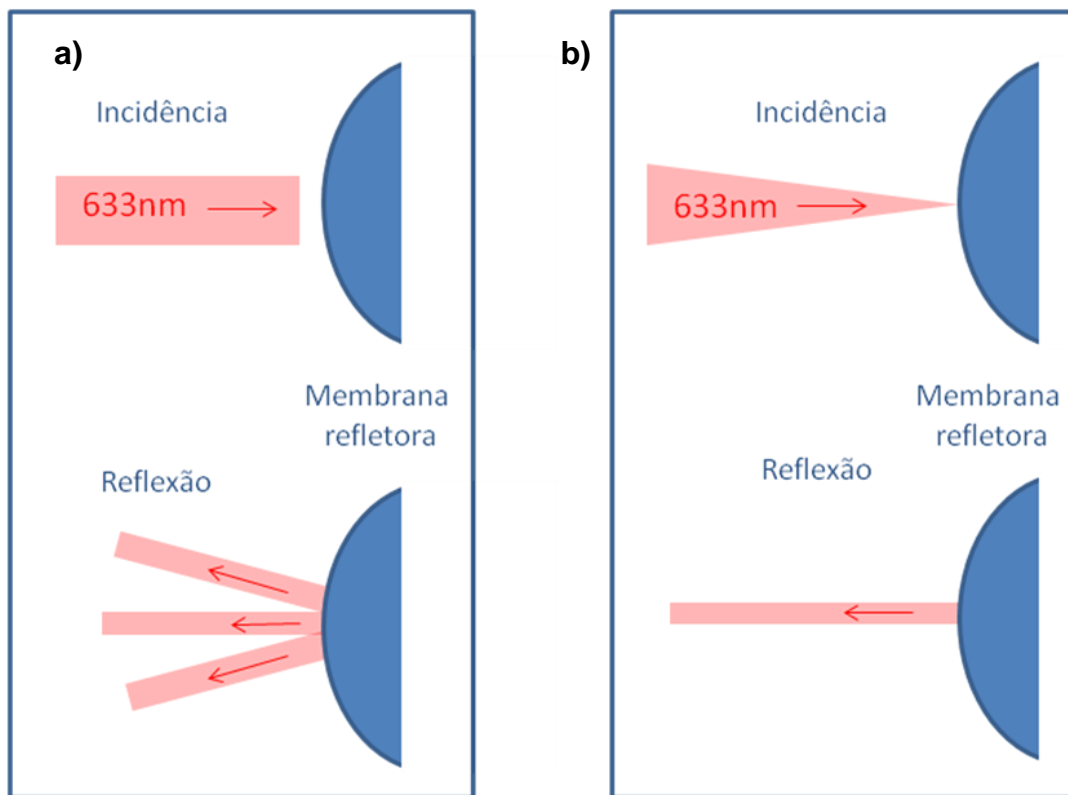
Decidimos primeiramente utilizar a colagem de uma fita retro-refletora. Na figura 3 temos a foto do alto-falante com a fita.



**Figura 3:** Alto-falante com uma fita retro-refletora colada a sua membrana.

Ao introduzirmos o alto-falante no sistema, percebemos que a reflexão do laser colimado sobre a fita retro-refletora apresenta um baixo acoplamento de volta ao interferômetro. Descobrimos que a única forma de termos uma quantidade de luz mínima para um bom padrão de interferência foi através da focalização do laser em cima da fita refletora.

Na figura 4 temos um esquema que mostra a luz refletida pela fita retro-refletora no para o laser colimado e para o laser focalizado.

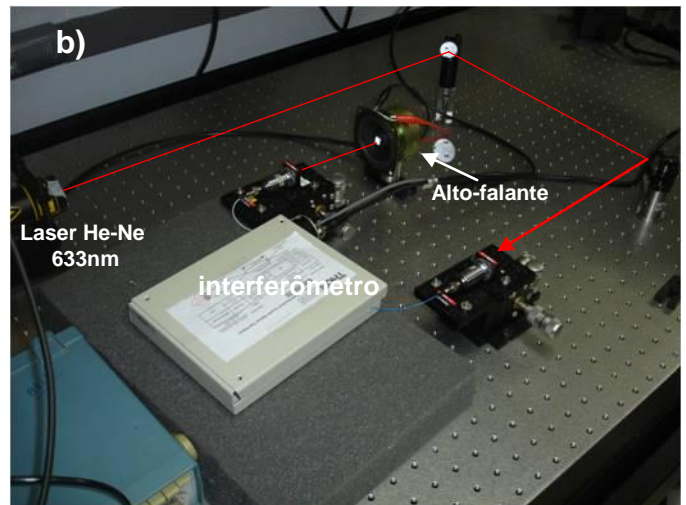
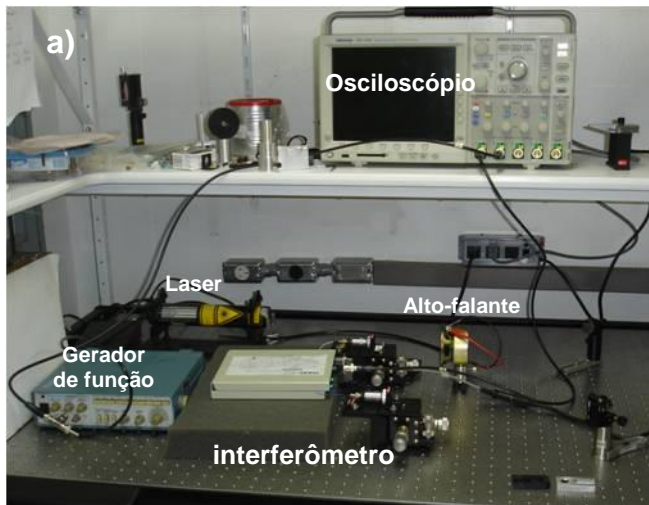


**Figura 4:** a) Esquema que nos mostra a reflexão do feixe colimado ao incidir sobre a membrana do alto-falante com a fita refletora. b) Esquema da reflexão ao focalizarmos o feixe na fita.

Mesmo utilizando o procedimento da figura 4b para maximizar a quantidade de luz que volta do alto-falante e é re-acoplada ao sistema, precisamos introduzir um atenuador de 15dB no outro braço de referência (fibra espelhada) para obtermos um bom contraste das franjas de interferência (potência igual em ambos os braços).

Por esse motivo, a baixa porcentagem de luz re-acoplada ao sistema ao incidir um feixe colimado, não prosseguimos na idéia de utilizar a lente criada na ponta da fibra pelo laser de CO<sub>2</sub> (figura 2). Como vimos no relatório anterior, as lentes produzidas diminuíam a divergência do feixe, porem não chegavam a colimá-lo. Desta forma, ao incidirmos esse feixe sobre a fita refletora colada na membrana do alto-falante a não temos uma quantidade de luz suficiente para produzirmos a interferência.

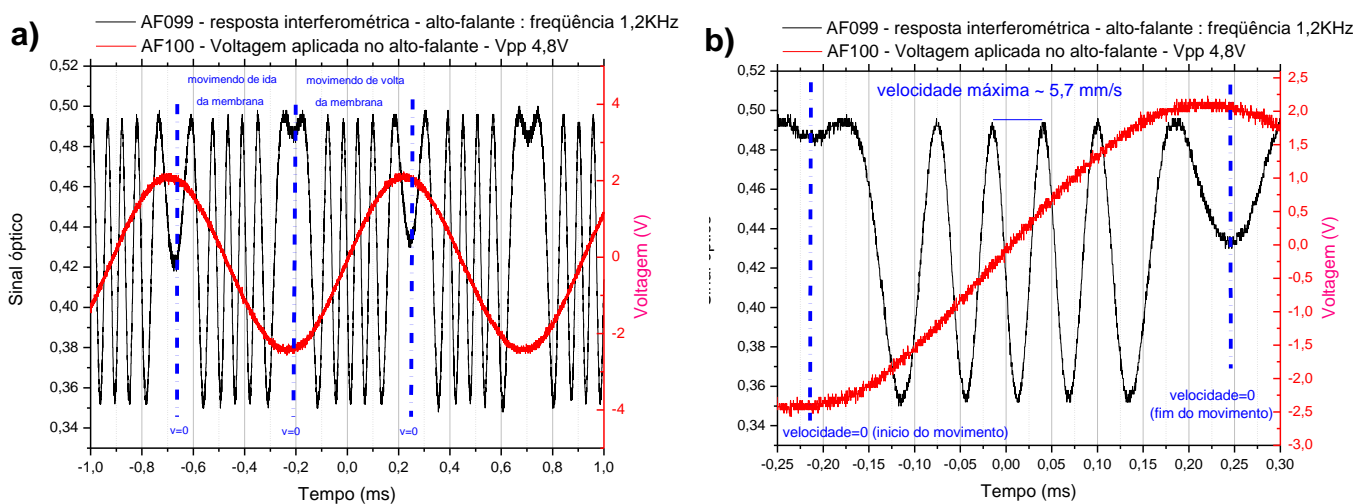
Na figura 5 temos fotos do nosso interferômetro a fibra com o alto-falante em um de seus braços.



**Figura 5:** a) Foto geral da montagem do interferômetro; b) Zoom mostrando o alto-falante em um dos braços.

Após montarmos o interferômetro com o alto-falante e conseguirmos a obtenção de franjas com bom contraste (utilizando o atenuador que 15dB no braço de referência), visualizamos a resposta do interferômetro para diferentes freqüências de vibrações.

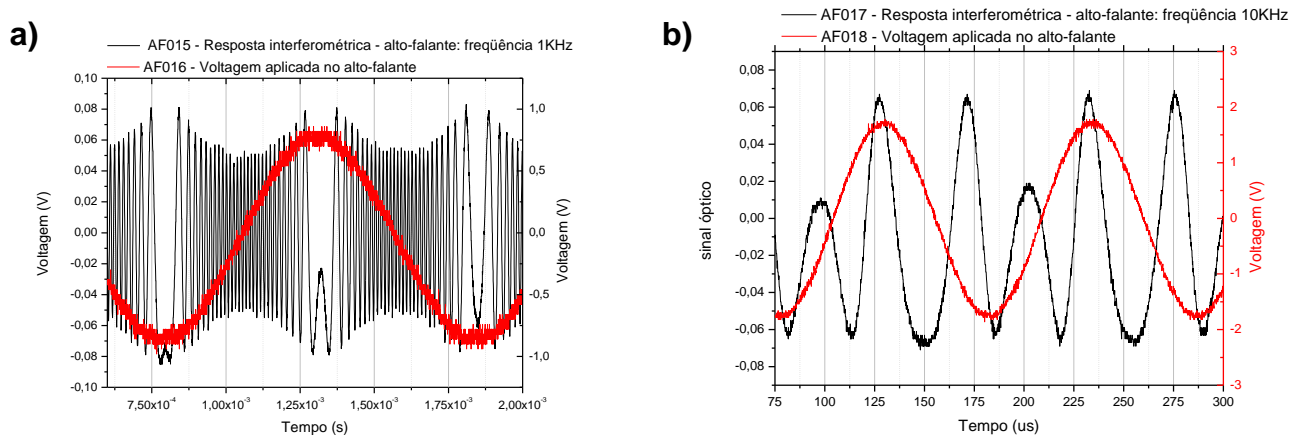
Na figura 6a temos um exemplo do padrão de vibração para uma freqüência de 1.2kHz. Junto ao sinal do interferômetro (curva preta) temos o sinal aplicado sobre o alto-falante pelo gerador de função (curva vermelha). Na figura 6b temos o zoom da região que representa meio período de oscilação da membrana do alto-falante, isto é, o deslocamento da posição de inicial de repouso até a sua amplitude máxima.



**Figura 6:** a) Padrão de interferência do alto-falante para uma freqüência de 1.2kHz e Vpp de 4,8V. b) Zoom da região de meio período de oscilação, onde a membrana parte do repouso e se desloca até a amplitude máxima.

Através dos gráficos da figura 6b, podemos visualizar os instantes em que a membrana apresenta velocidade zero (linhas pontilhadas azuis), isto é, na amplitude máxima e mínima da oscilação, definindo o meio período de oscilação.

Na figura 7a e 7b temos dois exemplos de padrões de interferência com vibrações de 1 KHz e 10 KHz, respectivamente. Junto ao sinal do interferômetro temos o sinal aplicado sobre o alto-falante pelo gerador de função.



**Figura 7:** a) Padrão de interferência do alto-falante para uma frequência de 1KHz. b) 10KHz.

## 2.2 – Cálculo da amplitude e velocidade máxima do movimento da membrana.

Através do número de franjas observadas em cada meio período, podemos determinamos a amplitude do deslocamento da membrana do alto-falante. Isto é possível porque uma franja de interferência ( $2\pi$ ) no sinal corresponde a um deslocamento da membrana de meio comprimento de onda, implicando na equação 1. Na equação 1, temos que “A” é a amplitude máxima do movimento da membrana, “m” é o número de franjas contadas em meio período e “ $\lambda$ ” é o comprimento de onda do laser utilizado (633nm).

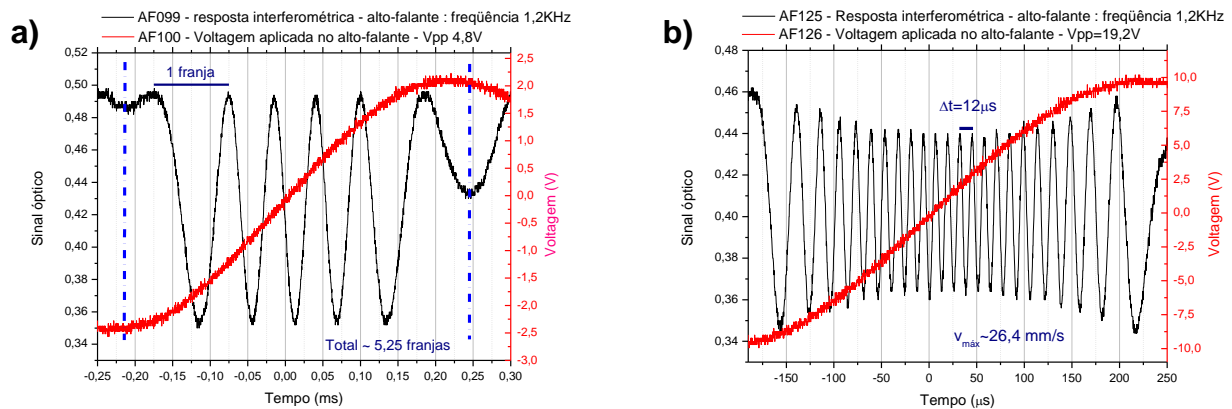
$$A = m \cdot \frac{\lambda}{2} \quad [1]$$



Além do cálculo da amplitude máxima, conseguimos extrair do padrão de interferência a velocidade máxima da membrana do alto-falante durante seu movimento. Isto é possível através da medida do período mínimo entre as franjas de interferência e da equação [2]. A seguir temos a equação [2], onde “ $\Delta t_{\min}$ ” é o menor tempo entre duas franjas de interferência dentro de um meio período do movimento.

$$v_{\max} = \frac{\lambda}{2(\Delta t_{\min})} \quad [2]$$

Na figura 8a temos um exemplo da contagem de fase utilizada na determinação da amplitude. Na figura 8b temos um exemplo da determinação do período mínimo utilizado no cálculo da velocidade máxima.

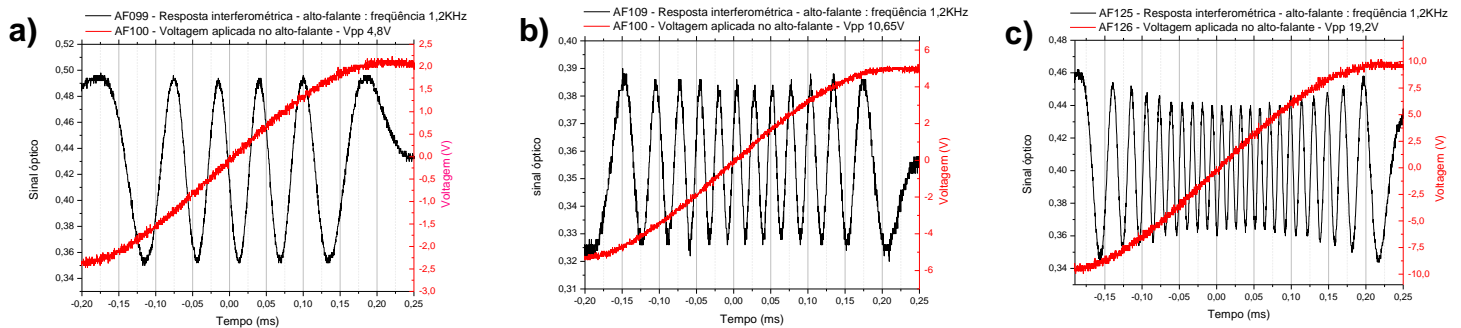


**Figura 8:** a) Exemplo de contagem de franjas em meio período do movimento da membrana; b) Exemplo da determinação do período mínimo entre as franjas.

### 2.3 – Caracterização da amplitude do movimento da membrana em função da voltagem aplicada ao alto-falante.

Após visualizarmos diferentes padrões de interferência ao variarmos a frequência de vibração do alto-falante, buscamos caracterizar a resposta deste dispositivo em função da tensão aplicada sobre ele. Para isso, fixamos a frequência e analisamos a amplitude do movimento da membrana em função da voltagem aplicada sobre o alto-falante.

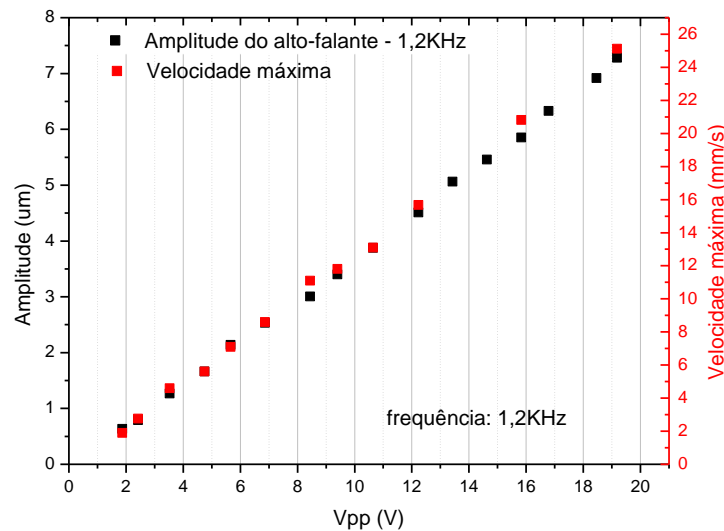
Na figura 9 temos um exemplo mostrando a variação do número de franjas de interferência em um meio período do movimento ocasionada pelo aumento da voltagem aplicada.



**Figura 9:** Número de oscilações em um meio período para uma frequência de 1.2kHz variando a Vpp aplicada. a) Vpp=4,8V; b) Vpp=10,65V ; c) Vpp=19,2V.

Observando os gráficos da figura 9, visualizamos claramente um acréscimo do número de franjas de interferência, implicando em um aumento da amplitude do movimento, quando aumentamos a voltagem aplicada sobre o alto-falante.

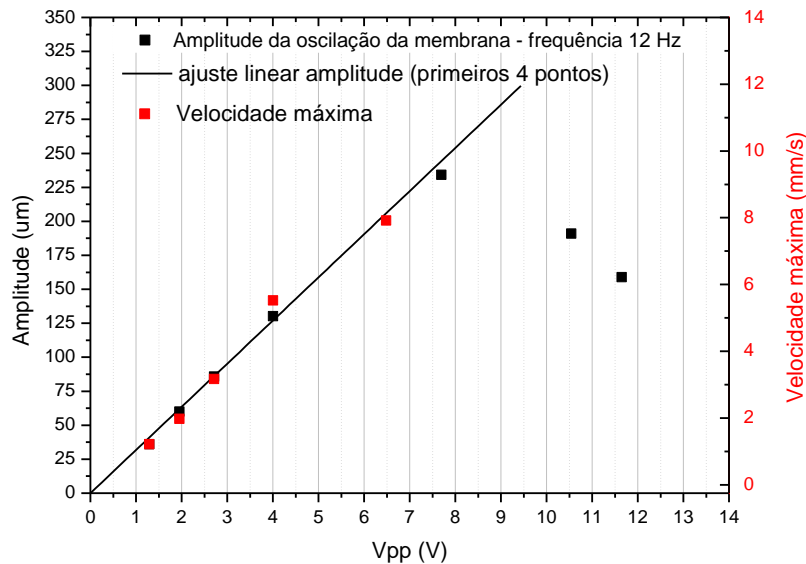
Na figura 10 temos um gráfico que nos mostra a amplitude e a velocidade máxima do movimento da membrana em função da Vpp aplicada (0 a 20V), para uma frequência de 1.2KHz.



**Figura 10:** Amplitude e velocidade máxima da membrana para 1,2KHz variando a Vpp de 0 a 20V.

Através do gráfico da figura 10, podemos constatar uma resposta linear da variação da amplitude máxima e da variação da velocidade máxima em função da  $V_{pp}$  aplicada. Além disto, podemos verificar que para a frequência de 1,2KHz chegamos a uma amplitude do movimento da membrana de aproximadamente 8 $\mu$ m e a uma velocidade máxima da membrana de 25mm/s (utilizando uma voltagem máxima de 20V).

Na figura 11 temos um gráfico que nos mostra a amplitude do movimento da membrana em função da  $V_{pp}$  aplicada (0 a 13V) para uma frequência de 12Hz.

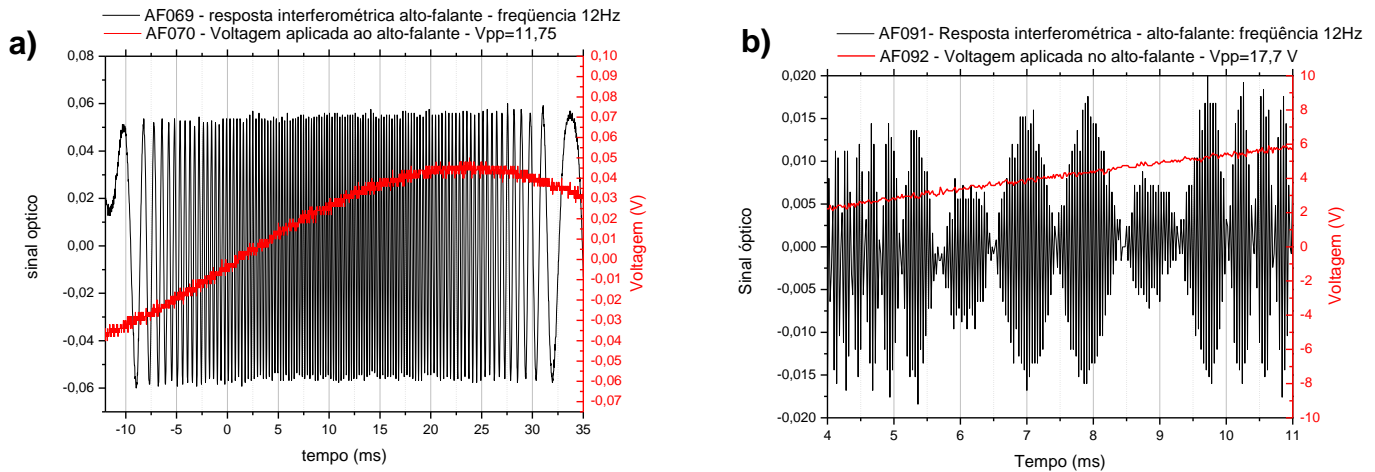


**Figura 11:** Amplitude e velocidade máxima da membrana para 12Hz variando a  $V_{pp}$  de 0 a 12V.

Através dos gráficos da figura 11, podemos constatar uma resposta linear (linha preta) da variação da amplitude máxima somente até uma  $V_{pp}$  de aproximadamente 8V. Após essa voltagem, o dispositivo começou a não responder mais linearmente e visualizamos uma queda amplitude do movimento da membrana. Além disto, podemos obter que, para a frequência de 12Hz, chegamos a um deslocamento da membrana e velocidade máxima de aproximadamente 225  $\mu$ m e 10mm/s, respectivamente.

Analisando o perfil de interferência para 12Hz, observamos que a partir de  $V_{pp}$  de 8V o movimento de oscilação da membrana do alto falante começou a apresentar um comportamento anarmônico.

Na figura 12a temos uma figura que mostra, para 12Hz, a resposta do alto-falante para uma média voltagem ( $V_{pp}=11,57V$ ). Na figura 12b a resposta do alto-falante para alta voltagem (17,7V) mostrando a presença de anomalias e descontinuidades no padrão de interferência.



**Figura 12:** Amplitude e velocidade máxima da membrana para 12Hz variando a  $V_{pp}$  de 0 a 12V.

Através do gráfico da figura 12a, podemos observar que para médias voltagens o padrão de interferência é contínuo e com amplitude constante em todo seu meio período de oscilação. Através do gráfico da figura 12b, podemos visualizar que para altas voltagens existe algumas descontinuidades e anomalias no perfil de interferência, o que indica que a vibração do alto-falante deixou de ser harmônica. Esta mudança de comportamento explica a mudança da resposta a partir de 8V visualizada na figura 11.

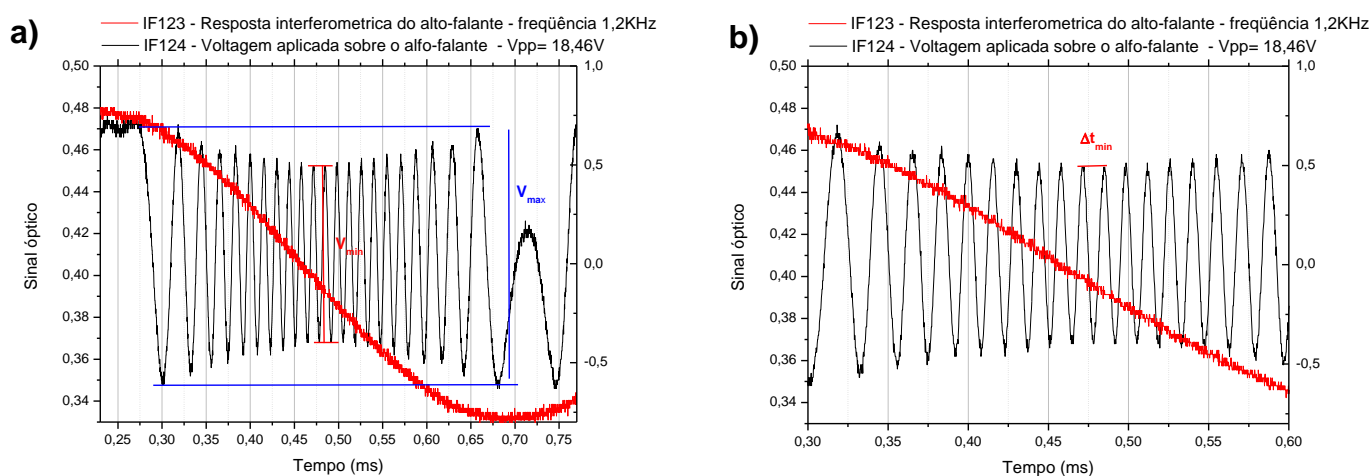
Comparando a resposta da amplitude em relação a  $V_{pp}$  para as duas frequências estudadas (1,2KHz e 12Hz), conseguimos observar que vibrações de alta frequência possuem uma amplitude de deslocamento da membrana menor (na ordem de micros) do que a amplitude para baixas frequência (na ordem de milímetros). Além disto, conseguimos observar que a velocidade máxima da membrana, para uma mesma voltagem, é sempre maior para 1,2KHz do que para 12Hz.

### 3 – Análise da resposta do detector.

Através dos diversos padrões de interferências obtidos pelas vibrações do alto-falante, além da caracterização do movimento de sua membrana e de sua resposta, é possível caracterizar a resposta do fotodetector.

Para isso, utilizamos a simetria do padrão de interferência e a diferença entre a amplitude do seu sinal no início e no meio do meio período de oscilação.

Na figura 13 temos um exemplo mostrando um padrão de interferência e o que é necessário para caracterizar sua resposta.



**Figura 13:** Padrão de interferência e valores necessários para caracterizar o detector; a)  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$ . b) Período mínimo.

A resposta do detector é definida pela equação [3], onde  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  são as variações na amplitude do sinal mostradas na figura 13a.

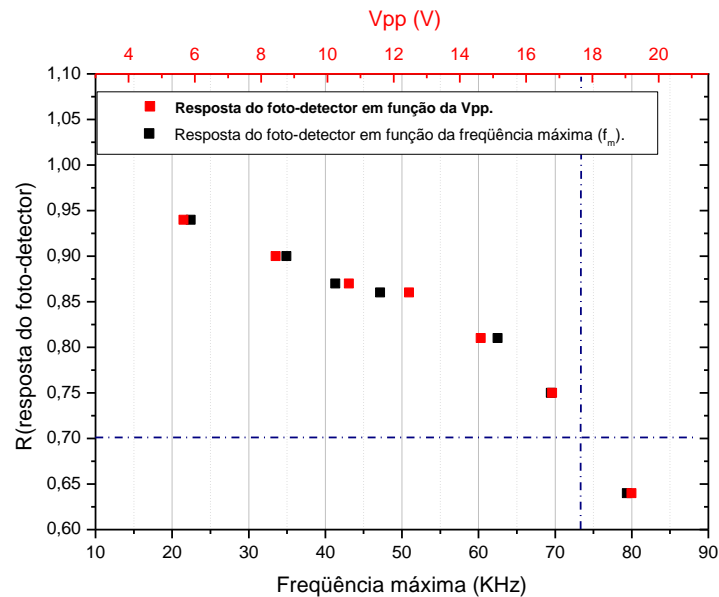
$$R = \frac{V_{\min}}{V_{\max}} \quad [3]$$

Através do inverso do valor do período mínimo (figura 13b), conseguimos determinar a frequência máxima ( $f_m$ ) das franjas de interferência.

Como vimos anteriormente, ao variarmos a frequência de vibração do alto-falante e a voltagem pico-a-pico aplicada sobre ele, mudamos o padrão de interferência no meio período de oscilação. Para caracterizar nosso foto-detector, fixamos a frequência em

1,2KHz e variamos a  $V_{pp}$  aplicada sobre o dispositivo, e analisamos a alteração dos valores de  $V_{max}$ ,  $V_{min}$  e  $f_m$ .

Na figura 14 temos um gráfico que nos mostra o valor da resposta do detector em função da frequência máxima ocasionada pela variação da  $V_{pp}$  aplicada sobre o alto-falante. Além disto, temos também a resposta do detector somente em função do  $V_{pp}$  aplicado.



**Figura 14:** Resposta do foto-detector em função da frequência máxima e da  $V_{pp}$  aplicada sobre o alto-falante.

Através do gráfico da figura 14 podemos visualizar o comportamento da resposta do detector em função da  $V_{pp}$  e da frequência máxima. Além disso, obtemos o valor da frequência de corte (aproximadamente 75KHz), que corresponde a frequência onde

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \sim 0,7.$$

#### 4 - Conclusão.

Neste trabalho inicialmente montamos e caracterizamos um interferômetro Michelson a fibra e começamos um estudo para a produção de lentes nas pontas das fibras (relatório parcial). Em seguida, estudamos o movimento de vibração de um alto-

falante através da análise do padrão de interferência obtido como resposta pelo interferômetro.

Em relação ao movimento da membrana do alto-falante, para uma frequência de 1,2KHz, visualizamos uma resposta linear da amplitude do movimento e da sua velocidade máxima em função da  $V_{pp}$  aplicada (figura 10). Para a frequência de 12Hz, visualizamos um comportamento linear da amplitude até aproximadamente 8V (figura 11). Após essa voltagem, observamos uma queda na amplitude e o surgimento de anomalias e descontinuidades no padrão de interferência (figura 12).

Para finalizar, após caracterizarmos o interferômetro e o alto-falante, utilizamos os padrões de interferência produzidos pelas vibrações da membrana para caracterizar a resposta do nosso fotodetector. Obtivemos a sua resposta em função da frequência máxima das franjas e da  $V_{pp}$  aplicada sobre o alto-falante (figura 14). Conseguimos obter a frequência de corte para nosso detector (aproximadamente 75KHz).

#### Opinião do orientador:

Juliano desenvolveu neste semestre um interferômetro a fibra para medição de vibrações e que, indiretamente também pode ser utilizado para caracterizar a resposta em frequência do detector utilizado. O trabalho ocorreu como esperado sendo o protótipo final compacto e relativamente estável para medidas rápidas (da ordem de um segundo). O aluno conseguiu caracterizar um alto-falante (AF) em duas frequências, 12 e 1200 Hz. No caso da alta frequência mostrou que, aplicando 20 volts pico-a-pico, a membrana do AF se desloca da ordem de 8 microns e com uma velocidade máxima da ordem de 25 mm/segundo.

Para baixas frequências obteve resultados ainda mais interessantes quando voltagem aplicada excede 8  $V_{pp}$  e o AF deixa de responder de maneira linear. Nesta situação novos tons (frequências) são gerados e podem ser visualizados nas franjas de interferência.

Para finalizar o detector utilizado também pôde ser caracterizado com a montagem realizada mostrando que o mesmo deixa de responder quando a frequência ultrapassa certo valor.

A montagem realizada tem grande valor didático e será futuramente melhorada para tentar deixar o interferômetro mais estável e compacto permitindo, por exemplo, medidas de variação de temperatura em tempos longos (>10 segundos).

Estou satisfeito com os resultados obtidos, tanto pela parte de instrumentação quanto pela parte didática.

Campinas, 15 de junho de 2010,

Prof. Cristiano Cordeiro

## **5 - Bibliografia.**

1 - Apostila: "Óptica Moderna", Prof. Jaime Frejlich, UNICAMP, IFGW, Laboratório de óptica, paginas 153 a 163. Versão de agosto de 2009

2 – Fang Xie,, Xian feng Chen , LinZhang .“High stability interleaved fiber Michelson interferometer for on-line precision displacement measurements”, Optics and Lasers in Engineering 47 (2009) 1301–1306.