

Caracterização de elementos vibrantes por meio de vibrômetros ópticos

Palavras-Chave: Interferometria, Óptica, Sensoriamento, Vibração

Autores(as):

João Pedro Carlini Minchillo, IFGW – UNICAMP

Prof. Dr. Cristiano Monteiro de Barros Cordeiro (orientador), IFGW – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

O projeto apresentado tem como objetivo maior o estudo de vibrações resultantes de dispositivos vibrantes. Especificamente, buscou-se caracterizá-los quanto às frequências de oscilação, frequência de ressonância (se for o caso do dispositivo), amplitude e velocidade do movimento. No contexto de medição de vibrações, há diversas opções de sensores e técnicas disponíveis, entre elas pode-se destacar o sensoriamento óptico, o qual é altamente preciso e muito empregado para medição de pequenas vibrações. Nesse cenário, o uso de interferometria é plausível para atingir tal propósito.

Ao longo da realização deste trabalho, foram montados e utilizados dois sistemas de interferômetros distintos, com a intenção de se explorar a interferometria como técnica aplicada a um vibrômetro óptico. O primeiro dos sistemas montados foi um interferômetro Michelson em espaço livre, utilizando radiação proveniente de um laser vermelho de HeNe (comprimento de onda $\lambda = 633\text{nm}$), enquanto o outro sistema foi feito a fibra óptica seguindo um interferômetro do tipo Fabry-Perot, sob radiação infravermelha (1310nm). Ambas as configurações estão ilustradas na figura 1.

Com ambos os setups experimentais, foram analisados diferentes elementos vibrantes, entre eles um alto-falante, um smartphone e uma cerâmica piezoelétrica (PZT) tubular. Todos possuem características distintas de vibração entre si, tanto com relação à frequência de operação, quanto à amplitude de movimento que atingem. Por isso, são dispositivos adequados para serem analisados, considerando que cada um apresenta certa dificuldade e pode ser mais facilmente medido em alguma das duas configurações de interferômetro.

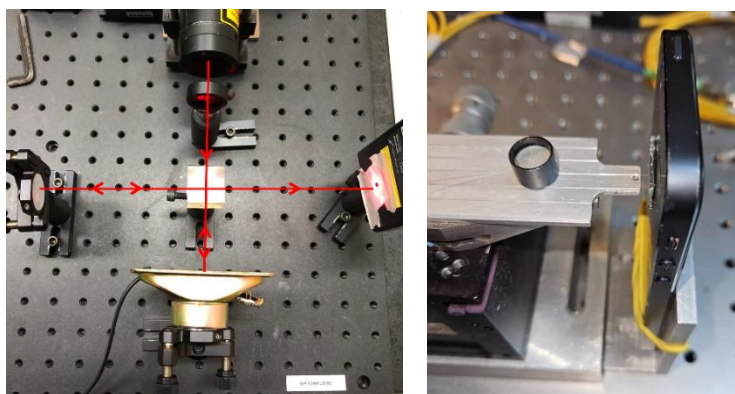


Figura 1: a) Montagem do interferômetro Michelson, o dispositivo vibrante é um alto-falante. b) Montagem do interferômetro Fabry-Perot a fibra, com um smartphone sendo o objeto de estudo.

Durante a trajetória do projeto, experienciou-se como aprimorar ao máximo os procedimentos experimentais que garantem conseguir medir um dispositivo vibrante. Deslocamentos de vibração são, por si só, muito pequenos (da ordem de micrômetros), o que torna qualquer medida desafiadora sem um bom sensor e práticas adequadas de medição. Além do mais, interferômetros também são equipamentos extremamente sensíveis, e que exigem rotinas e verificações contínuas de alinhamento óptico a fim de garantir que as medidas aconteçam, e com a precisão necessária.

METODOLOGIA:

De início, pressupomos que a dinâmica da vibração segue o modelo de um oscilador harmônico simples (OHS), já que assim sabemos facilmente as relações que ditam a amplitude e velocidade da oscilação [1]. Ambas as grandezas são medidas experimentalmente ao longo deste trabalho, mas usando seus valores e a relação entre elas é possível obter também a frequência de oscilação a partir de $f = \frac{v_{max}}{2\pi x_0}$, onde v_{max} é a velocidade máxima e x_0 a amplitude. É por meio de tal valor de frequência calculado e obtido por valores experimentais, que se pode comparar com o valor de frequência alimentando a oscilação do dispositivo vibrante.

A montagem completa usando o interferômetro Michelson está mostrada no diagrama da figura 2. Nela, observa-se a presença da fonte de luz laser, uma lente convergente para expandir o feixe, um fotodetector e um divisor de feixe, que direciona parte da luz rumo a um espelho fixo e outra parte a um espelho móvel. Este espelho móvel corresponde ao dispositivo vibrante a ser medido contendo uma superfície refletora, ou então, que tenha um material refletor acoplado nele, conforme visualiza-se na figura 3.

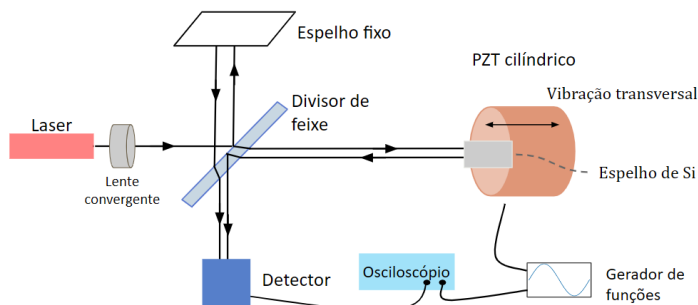


Figura 2: esquematização da montagem do vibrômetro, com o PZT sendo o elemento vibrante.

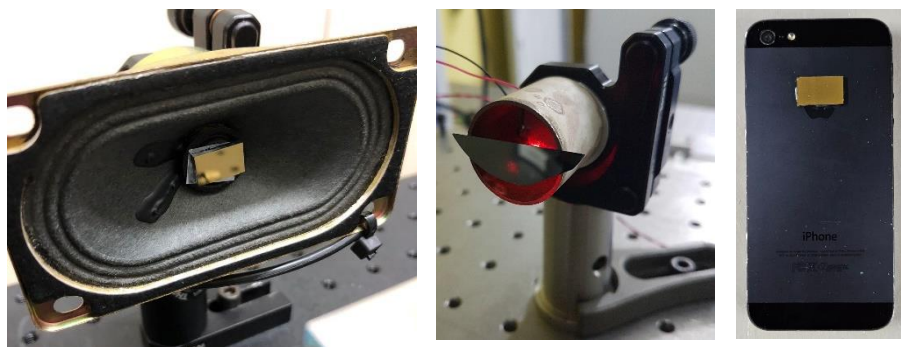


Figura 3: espelhos colados nas superfícies dos objetos vibrantes.

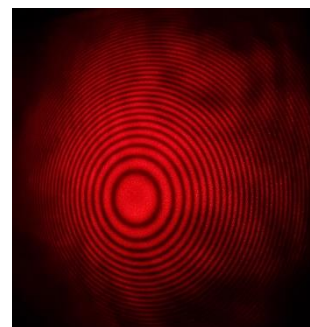


Figura 4: padrão de interferência formado com ambos os espelhos fixos.

Tal movimento vibratório, desde que seja paralelo à direção de propagação do feixe, causa aumento e diminuição do caminho óptico percorrido. Quando o dispositivo está fixo sem oscilar, a recominação dos feixes de ambos os caminhos resulta na formação de um padrão de interferência que permanece fixo (como visualiza-se na figura 4). Porém, é a vibração do espelho móvel causando a mudança de caminho óptico da luz, que promove o descasamento de fases entre as ondas e gera as franjas de interferência. Nesse caso, o resultado se dará no deslocamento das franjas já existentes, provocando um “borrão” uniforme quando visto a olho nu. Apesar de se formar uma um padrão contínuo, as franjas de interferência estão, na verdade, se deslocando rapidamente a uma frequência não perceptível pela visão humana. Mas, com o auxílio de um fotodetector e osciloscópio, pode-se coletar a intensidade da luz em um ponto, registrando o deslocamento das franjas de interferência provenientes da vibração.

A partir da coleta do deslocamento das franjas, torna-se possível caracterizar o movimento vibratório do dispositivo. O sinal obtido no osciloscópio é como o ilustrado na figura 5a, que apresenta um comportamento periódico, conforme esperado da oscilação de “ida e volta” proveniente de uma vibração. O padrão de picos e vales alternados é decorrente das interferências construtiva e destrutiva da luz, respectivamente. Tal fato demonstra o deslocamento das franjas de interferência. Sabe-se, ainda, com base nas condições de interferência da luz [2][3], que o intervalo entre duas franjas claras, isto é, a cada dois picos consecutivos do sinal, a diferença de caminho óptico percorrido pela luz tem que ser de um comprimento de onda λ completo. Logo, a translação espacial do objeto vibrante para isso tem que ter sido de $\lambda/2$. Dessa forma, a contagem do número de picos é a maneira direta de se obter a amplitude da vibração, conforme é feito na figura 5b.

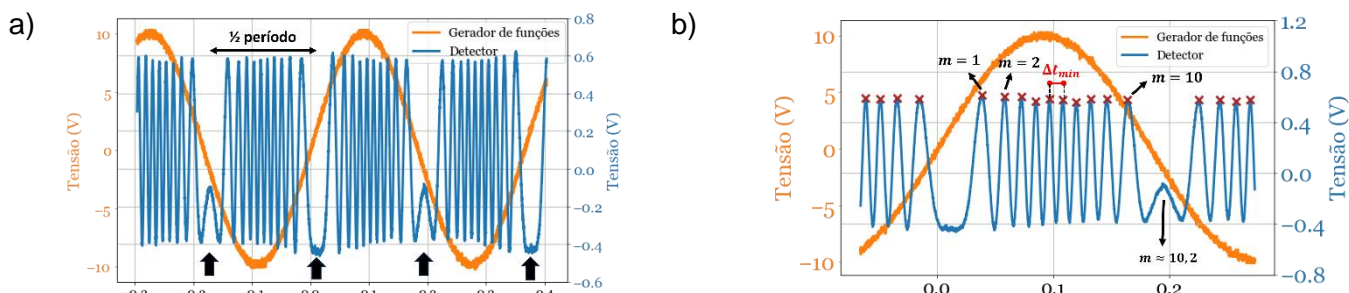


Figura 5: a) Exemplo do sinal coletado pelo detector. b) Ilustrando o procedimento de como realizar a contagem do número de picos (franjas claras) e como obter o valor de Δt_{min} .

Pela dinâmica de oscilação de um OHS e comparando-se com o comportamento do gráfico, nota-se que o intervalo entre 2 regiões de parada (duas flechas), corresponde à $\frac{1}{2}$ período de oscilação do movimento de OHS, totalizando um deslocamento de $2x_0$. Assim, contando-se a quantidade total de picos (valor m), chega-se à amplitude de movimento da vibração: $x_0 = m \frac{\lambda}{4}$. Por fim, uma vez que a distância percorrida entre o acontecimento de dois picos é de $\lambda/2$, ao calcular a diferença temporal entre a medição de duas dessas franjas claras, obtém-se a velocidade máxima de deslocamento alcançada na vibração por $v_{max} = \frac{\lambda}{2\Delta t_{min}}$.

De forma semelhante e utilizando-se do mesmo procedimento de análise, foi realizado o mesmo experimento com o interferômetro Fabry-Perot a fibra óptica, cujo diagrama da montagem está mostrada na figura 6. Nesse caso, foi utilizado um laser infravermelho com comprimento de onda 1310 nm, portanto, trata-se de uma medida com menor resolução que a realizada com o laser vermelho, já que todos os dados extraídos são proporcionais à λ . A interferência da luz acontece entre a parte da radiação que é refletida na extremidade final da fibra (“retornando” e não saindo dela) e o feixe que sai da fibra, reflete no espelho colado no dispositivo vibrante e retorna para dentro da fibra. Os caminhos percorridos pelo feixe estão indicados nas setas em vermelho no esquema.

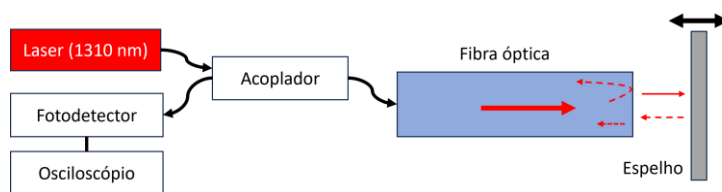


Figura 6: esquematização do interferômetro Fabry-Perot montado. Os feixes em tracejado indicam toda radiação refletida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Com base nos procedimentos já descritos, foram testados diferentes elementos vibrantes em ambas as configurações de medida, a fim de caracterizá-los quanto a frequência de oscilação, amplitude de movimento, velocidade máxima atingida e frequências de ressonância. Os três dispositivos apresentam características e comportamentos bem distintos quanto à frequência de operação e amplitude de deslocamento. Por isso, foi possível explorar medidas realizadas em limites opostos de operação. O alto falante, por exemplo, foi submetido a frequências no intervalo de 124 a 1489 Hz, enquanto o PZT operou em frequências de 2kHz a até 24kHz. Cada um deles será comentado separadamente.

O alto falante foi medido apenas com o setup Michelson e atuou como uma espécie de estudo de caso, pois com ele foi possível descobrir as principais características e detalhes experimentais que seriam exigidos para a realização dos experimentos com outros dispositivos vibrantes. Em especial, verificou-se a necessidade de práticas de alinhamento muito precisas e feitas de maneira rotineira, além de espelhos com alta refletividade e devidamente acoplados a seus dispositivos, os quais devem permanecer fixos sem a influência de movimentações externas. Ao longo do intervalo de frequência de operação mencionado, foram coletadas medidas em 18 frequências fixas. Duas delas estão registradas na figura 7, expondo a grande diferença na amplitude de oscilação do objeto. Sob 400Hz, há 147 picos registrados, o que equivale a $46,5\mu m$, já sob 700 Hz, há apenas 31 picos, resultando numa amplitude de oscilação uma ordem de grandeza menor: $9,8\mu m$.

Na figura 8, observa-se o gráfico contendo o resultado do deslocamento e o número de picos correspondente para todas os valores de frequência coletados. Ele ilustra um padrão no qual foi possível encontrar a região de ressonância do equipamento, à qual apresenta a maior amplitude de oscilação.

Nota-se, também, a grande discrepância entre os valores máximos alcançados em comparação com as frequências fora da ressonância.

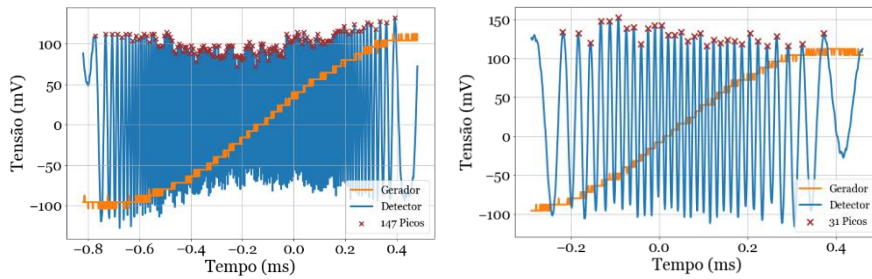


Figura 7: a) sinal obtido sob 400 Hz; b) sob 700Hz

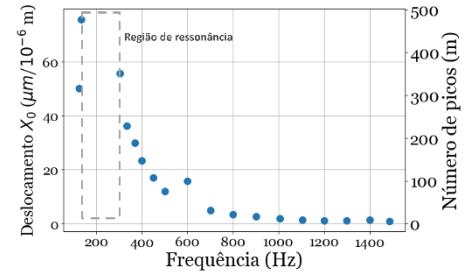


Figura 8: amplitude de oscilação (em deslocamento e número de picos) em função da frequência.

Já com o PZT, foi possível coletar dados de diferentes frequências de operação, e todas elas são regiões de ressonância, em menor ou maior grau, uma vez que ele não gera deslocamento suficiente em todas as frequências na qual é alimentado para deslocar as franjas no padrão de interferência observado, isto é, podem se tratar de deslocamentos menores que a resolução de $\lambda/4$, o mínimo que podemos medir [3]. Em cada uma das regiões de frequência medidas, coletou-se gráficos como os da figura 7, no entanto, com muito menos picos, cujo máximo atingindo foram 11 deles. Isto é, o deslocamento da vibração do PZT é muito menor que a da membrana do alto falante. Além disso, foram construídos não apenas gráficos de amplitude de movimento (e contagem de picos), como o da figura 8, mas também da velocidade máxima alcançada em função da frequência. Isto foi feito para as quatro regiões de ressonância verificadas, as quais correspondem aos intervalos: 2,63 a 2,83 kHz; 16,4 a 16,8 kHz; 21,2 a 21,4 kHz; 23,69 a 23,75 kHz. Os gráficos da amplitude de movimento para as duas primeiras regiões estão ilustrados na figura 9 e ambas são as que possuem maior deslocamento.

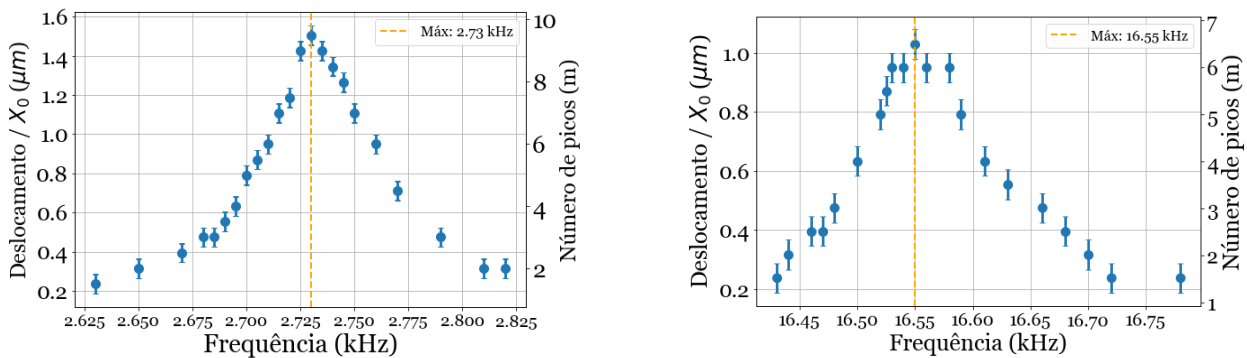


Figura 9: Gráficos de deslocamento e número de picos, coletados sob tensão de 20 Vpp. Intervalos de frequência: a) 2,63 a 2,83 kHz; b) 16,4 a 16,8 kHz.

Nota-se que os deslocamentos são muito pequenos, sendo da ordem de unidades ou décimos de micrômetros, bem menores que os registrados para o caso do alto falante, e demonstra o uso e aplicação do vibrômetro em uma condição limite de detecção mínima de vibração, próximo do valor de $\lambda/4 = 158\text{nm}$. Além dessas medições, com o uso interferômetro Michelson foi ainda possível elaborar uma nova técnica de detecção de regiões de ressonância e até identificar a frequência de vibração máxima dentro dela. Isso foi feito baseando-se no padrão de interferência formado em um anteparo e a condição mencionada de que o padrão só apresenta o “borrão”, o qual é indicativo de deslocamento, somente quando está sob uma ressonância. Dessa forma, ao gravar um vídeo do padrão de interferência formado e programar uma varredura de frequência no PZT, é possível aplicar técnicas de análise de imagem que detectam a variação no padrão transformando-se em um “borrão” e geram gráficos semelhantes aos da figura 9. Duas análises possíveis são o cálculo de intensidade em cada pixel ou a

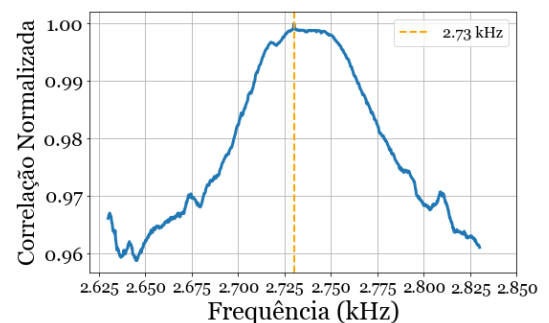


Figura 10: Correlação normalizada em relação à frequência de ressonância máxima

correlação pixel a pixel (ZNCC) [4][5]. Utilizando esta última, obteve-se o resultado exemplificado no gráfico da figura 10.

Já com o uso do interferômetro Fabry-Perot, também foi possível caracterizar as vibrações do PZT, porém, somente na ressonância que possui maior deslocamento, já que o uso do laser infravermelho diminui a resolução da medida por conta do comprimento de onda mais que 2 vezes maior. Mesmo assim, captou vibrações das frequências de máxima amplitude da região de 2,63-2,83 kHz, conforme mostrado na figura 11.

Por fim, é importante ressaltar que o setup a fibra é especialmente vantajoso devido à sua simplicidade de montagem, menor exigência de estabilidade mecânica dos componentes e do elemento vibrante, além de maior flexibilidade quanto ao posicionamento do mesmo. Considerando esse cenário, o interferômetro Fabry-Perot detém de facilidades no contexto de se tentar caracterizar dispositivos diversos. Sendo assim, foi escolhido para a caracterização do smartphone, mostrado nas figuras 1b e 3. Ele foi colocado a vibrar em uma frequência única, e captou-se pelo detector o sinal com o padrão de picos e vales. Assumiu-se que sua frequência de oscilação é a mesma que a do som gerado por ela, e foi obtida a partir de uma FFT do espectro de áudio no momento da vibração, o qual foi captado com o auxílio do aplicativo e software “Phyphox” [6]. O valor registrado foi de 187,5 Hz. Assim, os resultados obtidos a partir da análise de 5 medidas captadas no osciloscópio estão representados na tabela da figura 12.

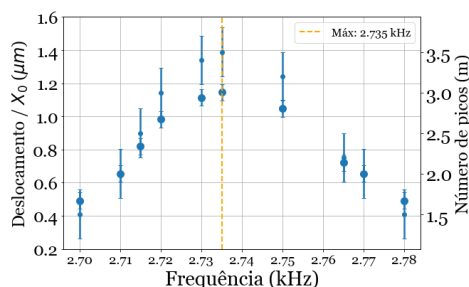


Figura 11: Gráfico de deslocamento e número de picos, coletado com o interferômetro a fibra.

	Número de picos	Deslocamento (μm)	Velocidade (mm/s)	Frequência (Hz)
Medida 1	24	7,86	8,97	181,7
Medida 2	24	7,86	10,23	207,2
Medida 3	24	7,86	9,92	201
Medida 4	25	8,19	9,78	190
Medida 5	24	7,86	10,23	207,2
Média	24,20	7,93	9,83	197,4

Figura 12: Tabela de dados coletados caracterizando a vibração do smartphone. A tabela fornece o número de picos, amplitude de movimento da vibração, velocidade máxima atingida e frequência calculada.

CONCLUSÕES:

Logo, o presente trabalho cumpriu com o objetivo de caracterizar vibrações, as quais foram provenientes de dispositivos distintos, proporcionando cenários e dificuldades diferentes em cada um. Foram elaborados e construídos dois setups de vibrômetros ópticos capazes de mensurar vibrações. O primeiro deles foi um interferômetro Michelson em espaço livre, extremamente preciso e poderoso para realização de sensoriamento, no entanto, também desafiador, uma vez que exige práticas de alinhamento óptico, alta estabilidade mecânica dos componentes e do sistema como um todo, paridade de intensidade luminosa entre os caminhos ópticos, entre outros detalhes. Já o outro tratou-se de um interferômetro Fabry-Perot a fibra óptica, apresentando uma montagem mais simples e prática e também bons resultados. Em síntese, foram medidos com ambos os equipamentos, de maneiras distintas, um alto falante, um PZT e um smartphone, os quais foram caracterizados quanto às frequências, amplitude de oscilação e velocidade máxima atingida durante suas vibrações.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jerry B Marion. Classical dynamics of particles and systems. Academic Press, 2013.
- [2] David Halliday. Fundamentos de Física: Óptica E Física Moderna. Volume 4 . Grupo Gen-LTC, 2000.
- [3] Frank L Pedrotti, Leno M Pedrotti, and Leno S Pedrotti. Introduction to optics. Cambridge University Press, 2017.
- [4] Opencv library, template matching, zncc. https://docs.opencv.org/3.4/de/da9/tutorial_template_matching.html.
- [5] Érika Spencer de ALBUQUERQUE. Desenvolvimento de um módulo para template matching baseado em zncc com prototipação em fpga. Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- [6] <https://phyphox.org/>