

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE FÍSICA

MARIANA CASEMENT

**CONSTRUÇÃO DE UM ESPECTRÔMETRO DE
TRANSFORMADA DE FOURIER COM
INTERFERÔMETRO DE MICHELSON**

BRASÍLIA

21 DE MAIO DE 2021

Mariana Casement

Construção de um espectrômetro de transformada de Fourier com interferômetro de Michelson

Monografia apresentada ao Instituto de Física da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Física.

Orientador: Júnio Márcio Rosa Cruz

Coorientador: Luiz Fernando Roncaratti Junior

Universidade de Brasília – UnB

Instituto de Física

Brasília

21 de Maio de 2021

Mariana Casement

Construção de um espectrômetro de transformada de Fourier com interferômetro de Michelson/ Mariana Casement. – Brasília, 21 de Maio de 2021-
93 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Júnio Márcio Rosa Cruz

Monografia – Universidade de Brasília – UnB
Instituto de Física, 21 de Maio de 2021.

1. Interferometria. 2. Interferômetro de Michelson. 3. Arduino. 4. Espectroscopia. 5. Espectroscopia de transformada de Fourier. 6. Espectro ótico. 7. Automatização. I. Júnio Márcio Rosa Cruz. II. Universidade de Brasília. III. Instituto de Física. IV. Construção de um espectrômetro de transformada de Fourier com interferômetro de Michelson

CDU 02:141:005.7

Mariana Casement

Construção de um espectrômetro de transformada de Fourier com interferômetro de Michelson

Monografia apresentada ao Instituto de Física da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Física.

Trabalho aprovado. Brasília, 21 de Maio de 2021:

Júnio Márcio Rosa Cruz
Orientador

Luiz Fernando Roncaratti Junior
Coorientador

Gabriela Cunha Possa
Convidado 1

Pedro Augusto Matos Rodrigues
Convidado 2

Brasília
21 de Maio de 2021

*Dedico este trabalho à memória do professor Ivan.
Irei guardar seus ensinamentos e sua amizade pelo resto
da minha vida.*

Agradecimentos

Ao longo dos anos, inúmeras pessoas me ajudaram e me guiaram no percurso que minha vida tem levado. Todas merecem os meus agradecimentos, mas se eu fosse falar de todas, metade do meu texto seria dedicado a isso. Ainda assim, são 9 páginas (com fotos), então se não quiser ler tudo, aconselho procurar o seu nome. Peço desculpas por trocar para o inglês em alguns momentos, mas me sinto mais confortável me direcionando à minha família e alguns amigos nessa língua.

Escolher a ordem dos agradecimentos foi difícil, mas acabei decidindo seguir uma ordem mais ou menos cronológica... Iniciando, é claro, com a minha família.

Mum & Dad, both of you have been so integral to my life and I would like to thank you both not only for shaping parts of who I am today, but for all of your help and support over the years. Thank you for providing me and Lulu with a loving and caring environment, for playing with us, reading to us, listening to us. Thank you for your support when I wanted to be a mathematician, an architect, an astronomer, an archeologist, an anthropologist, a physicist and now, when I want to go teach English somewhere.

Dad, your love of science and all of your stories and silly jokes have always made me admire you so much. Thank you for teaching me to be curious and to question the world around me, for taking me on adventures (the one to Morená was definitely one I will never forget!) and for introducing me to NFL.

Mum, your love for books and teaching and your patience inspire me each day. Thank you for teaching me to read in English (not only how to actually read, but how to enjoy it), for the thoughtful things you do each and every day, for your amazing food and for your advice.

Both of you have taught me a lot, given me a lot and cared for me a lot. You have both been role models to me in one way or another, too. Thank you from the bottom of my heart. I love you both very much.

Lulu - I'm so happy you still let me call you that - you are the best sister ever, like, literally. I love that despite our differences we have sooooo much in common. I love that we can talk books, films, animes, dance and arts and crafts and be so comfortable around each other. Thank you for getting excited when I'm excited (even if it's about some weird physics thing), for showing me things that get you excited, for understanding me when I'm grumpy and for teaching me how to be patient when you are. I love you and I wish we could have done a subject together at UnB at least once. I'm sorry it didn't happen :(

And, of course, thank you Zoe for being the best dog. I doubt you can read, but

thanks anyway. You and Flora helped me when I needed dog cuddles.



Clearly Zoe is the favoured child.



I am actually taller than you, ok?

Obrigada aos Finageiv Neders, que são quase uma segunda família. Obrigada pelo acolhimento de todos ao longo dos anos. E das caminhadas, muitas caminhadas.

Thank you also to the extended Casement family, including those already passed: Granny, Annie and Walter, Sarah and James, Paddy and Anne, Rob and Bridget, Hugh, Sophie and Ben, Becky &co., Niall &co., Tara &co., Erin.

E à família Moreira: Vovó, Clarissa, Dadado e Mary, Dinho e Neide, Suzanna, Didu, Carol, Flávia, Digo, Nando, Marcelo, Marco, Fábio, Felipe, Thiago, Tia Maria Augusta, Tia Déa, Bella, Luca, e todos os outros primos e pequeninos.

Algumas pessoas não encaixam exatamente nas outras “categorias” que eu delimitiei, então vou colocar meus agradecimentos a elas aqui. Antônio e Romilda, obrigada por terem cuidado de mim enquanto tinha minhas primeiras aventuras em casa. Carol e Duda, obrigada por me acompanhar em várias delas. Cristina, obrigada por ser o raio de sol que é, por perguntar como estavam meus estudos e sempre me desejar boa sorte neles. Jéssyca, você é uma adição nova na minha vida, mas já teve um impacto enorme. Muito obrigada por ter me ajudado e apoiado esse ano.

Mon and Jon, Mary and Richard, Ades and Emily, Kitty and Nick, Lucy and Matt, Jane, Jules, Celia and Justin, Kath and Charles, the Boyds, thank you for always having us over when we visited England. Fiona, Iona, Otto, Tom, Callum, Saraya, thanks for being my companions and for going on silly and exciting adventures with me. We had so much fun whenever we met at some camping expedition or walk.

Isso nos leva aos meu anos de formação inicial, que se passaram no INDI. Lá, tive muito professores essenciais na minha formação, em especial as professoras Vânia e Vanessa, que me alfabetizaram em português e o professor Daniel, que me alfabetizou em matemática. Muitos outros foram importantes, é claro: Gabi, Milena, Lia, Renata, Tiago, Ana Júlia, e muitos mais.

Eu também fiz amizades com pessoas incríveis enquanto estava na escola. Juju e Debi, vocês foram uma parte integral da minha vida, e ainda são. Sempre vou lembrar das nossas brincadeiras e invenções malucas. Obrigada também às suas famílias, por sempre estar de portas abertas.

Lua, Luíza e Louise, obrigada por tudo. Pelos halloweens, Harry Potter, livros, mangás, feitiçaria, videogames, futebol, festas dos pijamas, fadas e muitas outras brincadeiras da nossa infância. Obrigada pelo apoio que vocês me deram e continuam a dar, por sempre ter me aceitado por quem sou. Obrigada também às suas famílias, pelo acolhimento.

Patrão, obrigada por ser meu irmão mais velho, por cuidar de mim e por ser um grande amigo. Você sempre me apoiou e me ensinou muito. Obrigada Pearl, sua bondade sempre foi admirável e fico muito feliz de ter tido tantas conversas filosóficas e morais contigo.

Obrigada também a: Júlia, Bia, Tales, Tomaz, João, Lígia, Melina, Luíza, Caio, Alvim, Caio Sato e muitos outros.

Isso nos leva ao meu ensino médio. Parte dele se passou na Inglaterra e a outra no Brasil.

So, to all those at MAS who helped me grow and have a different world perspective, thanks. Thank you Dr James, for inspiring me to do physics; Mr Mullender, for being a great listener and tutor; Mr Cape for your great math classes and for teaching us a bit of calculus; Miss Chandegra, for inspiring us with your crazyness in English; Mr Cooke, for being the kindest policeman and history teacher. As well as many other teachers who helped and inspired me.

Thank you Luce, for being my buddy since day 1; Aphra, for cycling to school with me every day and all the great chats we had; Sarah Cox, the artist/vet/amazing human; Sarah Jenkins, for being the calm and patient one of the bunch; Rory, for being

the noisy bike-y one (even though you almost ran over Spog); Ed, for being a really cool and kind guy and helping in maths and science. Luce, Ed, Emma, Jess and Sophie, we were the best science group, by far, thanks for the laughs. Ellie, Esme, Honor, Paige, Ben, Jack, Danai, Rihanna, Loretta, Martha, Elinor, Chloe, Kyara, Georgia and many more, thanks.

Eluned, thanks for not only being an amazing Chemistry teacher, but a great friend and jokester too. You, Simon, Catherine and Michael, Victoria, Catriona, Seb and many others helped us feel welcome in Oxford.

Obrigada novamente pra Luíza e Louise por terem feito o trabalho de criar laços no Leonardo e me acolher na volta pra casa. Lis, que eu já conhecia do INDI, mas que se tornou uma verdadeira amiga no EM, você é uma das pessoas mais engraçadas que eu conheço e obrigada pelas risadas e conversas que compartilhamos. Giu, obrigada pelos seus desenhos, seus sorrisos e por ser outra das pessoas mais engraçadas que eu conheço. Felix, sweetie, obrigada pelas conversas aleatórias, por praticar seu inglês comigo e por todas as suas histórias mirabolantes. Olga, obrigada pelos seus sorrisos, pelas suas ideias incríveis e seu ânimo! Iremos nessa viagem ano que vem, eu prometo que vai dar certo. Mari, obrigada pelos seus sorrisos, seu jeito de falar quando está animada e por compartilhar aulas de línguas comigo. Louise, Luíza e Lua, vocês já foram mencionadas antes, mas vocês também fazem parte desse grupo incrível de pessoas, então precisava agradecer de novo. Somos todos diferentes, com gostos diferentes e ideias diferentes, mas vocês sempre me acolheram e me apoiaram, obrigada. Amo vocês. O Leonardo foi aturável por conta de vocês - junto com o PCC, a Alicia, a Sabrina e alguns professores.



A (única) foto de todos nós. Que só seria melhor se a Lis estivesse photoshopada por cima da Mel, coitada...

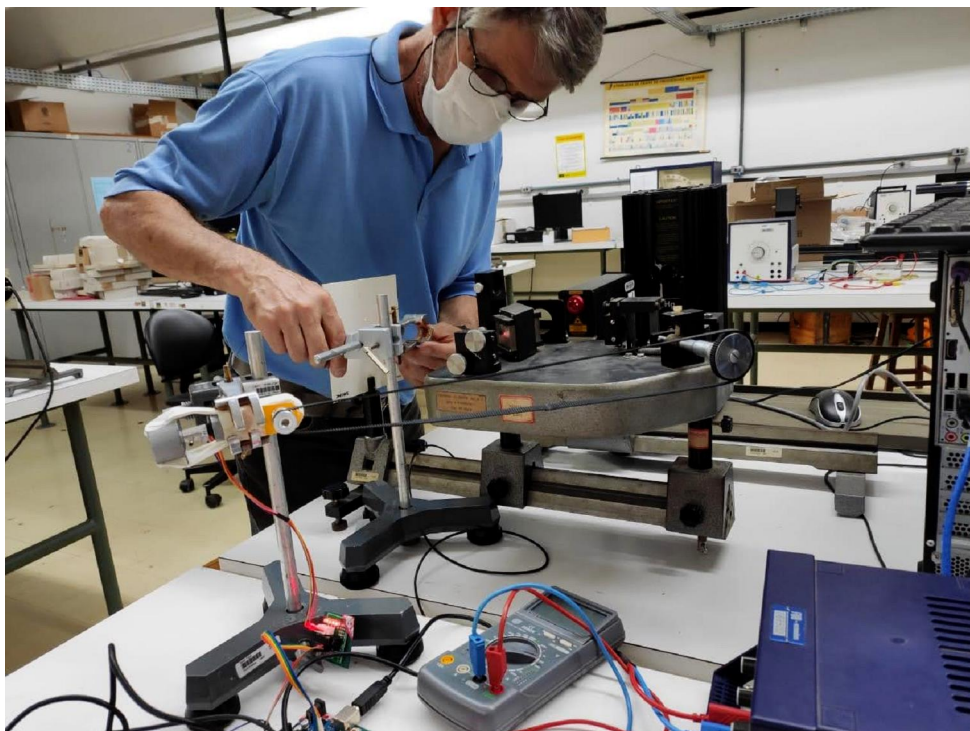
Aqueles professores que me ajudaram e inspiraram no Leonardo, obrigada. Douglas, pelas conversas e os sorrisos; Horowitz, pelo seu amor pela física e por ensiná-la (espero que o doutorado com o Dodonov esteja indo bem); Flávia, por ser uma mulher

na física e uma inspiração; Bôa-Morte, pelas suas tentativas de deixar a nossa vida mais cheia de arte. Em especial, obrigada Clécio, por me deixar chorar nas suas aulas e por me ajudar a decidir fazer física, mesmo que você tenha sido um professor de história. Ainda precisamos nos encontrar no bar. Obrigada também a todos os professores de matemática, que me ajudaram a passar no ENEM e a entender Cálculo 1 melhor.

E agora chegamos na parte mais difícil, já que ela é a mais recente e mais academicamente relevante para este trabalho: a minha graduação.

Primeiro, eu gostaria de agradecer o meu orientador. Júnio, muito obrigada por toda a sua ajuda! Você tem sido o melhor professor de Física Experimental (se não o melhor de todos) na minha vida. Nossa jornada começou em LIC-A, em que você me ensinou muito sobre instrumentação e formas alternativas de avaliação e ensino (mesmo sem perceber). Continuamos com os laboratórios de Mecânica e Termodinâmica (que semestre!) e com as monitorias que dei aos seus alunos. Aprendi muito sobre análise de erros, solução de problemas e ensino nesse período. Sempre vou lembrar do dia que descobri que você era meu vizinho. Gostaria de pensar que você não me reconheceu porque eu estava de capacete de bicicleta.

Obrigada pelos conselhos de vida e as conversas longas na sua sala. Obrigada por ter me tratado como igual, por ter me ouvido, por ter tirado todas as minhas dúvidas e por ter sido paciente comigo. Você me ensinou muito e me acolheu, e eu sou eternamente grata. Eu acho que você não sabe o quão feliz eu fiquei quando você aceitou me orientar.



Júnio em seu habitat natural.

A segunda pessoa que gostaria de agradecer é o meu co-orientador. Ronca, muito obrigada por ter me acolhido, inicialmente como amiga do Pedro e depois como aluna de PIBIC. Obrigada pelos chás, cafés e biscoitos que consumi no lab. O espaço que você e a Gabi criaram me trouxe muitos momentos bons e ajudou nas noites de estudos. Obrigada por compartilhar suas ideias mirabolantes e os materiais do lab. Obrigada por toda a ajuda durante esse projeto, especialmente pela permissão de usar a impressora 3D e o seu laboratório.

Outro professor indispensável na minha graduação foi o Ivan. Ele foi um dos primeiros a me acolher e o primeiro que considere um amigo. Ele criou o LaCosA, um grupo que me ajudou muito no começo do curso, que despertava o meu interesse e que me divertia, mesmo que as reuniões fossem aos sábados de manhã. Ele também foi meu orientador de PIBIC. Infelizmente eu não fui uma excelente aluna, mas aprendi muito com ele. Amador de futebol americano, ou talvez fanático, tivemos várias conversas a respeito da posição dos nossos times.

(Queria que você ainda estivesse aqui, estou com saudades.)

Muitos outros professores me ajudaram no curso. Pedro, que foi o primeiro a me levar para um laboratório de física DE VERDADE, Guy Grebot, Olavo, Lucas Seco, Clóvis, Marco César, Arsen, Pedroza, Gargano, Leonardo Luiz e Castro, Sebastião. E, é claro, todas as mulheres que me inspiraram e cuja presença no instituto sempre foi um incentivo para continuar. Alexandra, Erondina, Makiuchi, Nádia, Letícia, Adriane, Mariana, Adriana, Roseline e as outras com as quais eu, infelizmente, não acabei tendo contato: Alessandra Albernaz, Maria Aparecida Godoy, Maria de Fátima, Mônica Cadilhe, Reva Garg. Especialmente, obrigada Vanessa, por ter me acolhido desde o primeiro semestre, e pelo seu apoio no PET, na coordenação e na direção.

Falando em mulheres inspiradoras, não poderia deixar de agradecer a Gabi. Você é tão incrível e tão confiante, que eu ainda me surpreendo ao lembrar que eu te conheço. Obrigada por toda a sua ajuda ao longo destes anos. Sempre me divirto com as nossas conversas e sempre aprecio sua opinião e seu feedback. Obrigada por ter passado o LVP pra gente, também. Sem ele esse projeto teria sido um desastre.

Outras pessoas foram importantes como mentores durante a minha graduação. Obrigada Sato, por ter me acolhido no CNPEM e ter aturado a minha confusão em relação às partes mais complexas do nosso projeto. Manda um beijo pra Sol e pra Isa. Obrigada Miqueles, Furusato, Thiago, Gustavo e Henrique, que me acolheram não só no CNPEM, mas no mundo da computação científica. Obrigada especialmente ao Miqueles, por toda a ajuda, e ao Furusato, por ser um grande amigo e por me deixar te abraçar de vez em quando. Obrigada Daniel, pelas conversas e os conselhos que você me deu durante o projeto no CBPF. E obrigada Sarthour, pelo acolhimento no CBPF - desculpa não ter tido muito interesse no seu módulo.

Outras pessoas que me ajudaram e me ensinaram muito no CNPEM, foram: Milena, Darío, Letícia, Sebastián, Luiz, Cássio, Álvaro, Kathiana, Leo, Davi, Eduardo, Hígor, Fred. Obrigada especialmente ao Gustavo e à Bianca, meus colegas de grupo e de quarto. Foram as melhores férias que não tivemos!

Fiz muitos amigos durante esse curso. Muitos já se formaram ou mudaram de curso ou universidade, mas a ajuda que elas me deram foi essencial. Obrigada Victor, Fernanda, Marcelo, Marina, Ikawa e Henrique por serem os primeiros a me ajudar a entender o curso. Nayara, GD, Leo, Ângelo, Isabella, Mel, Israel, Larissa, Hugo e muitos outros pelas grandes experiências no PET. Obrigada Lorena, Gabriel, Hugo, Carlos, Raul, Patrick e vários outros que passaram pelo LaCosa. Laura, nosso tempo no CBPF foi curto demais! Lucas, Israel, Cassiano e Dágon, obrigada por me acolher no lab do Ronca.

Um enorme agradecimento tem de ser dado a todas as meninas que entraram comigo no curso. Vocês me fizeram sentir que era possível continuar aqui. Amanda, Giordana, Gabi, Tamires, Alice, Debo e Graci. Alice, você é uma pessoa tão feliz e aberta, que é sempre um prazer passar tempo com você. Debo, você e sua dança e o seu gosto por aula são incríveis. Obrigada a vocês duas por quase sempre estarem nos meus grupos de lab e aturar as minhas chatices com experimentos. Obrigada Graci, pela sua amizade, seu sorriso, seus conselhos, nossas conversas. Você é uma pessoa que eu admiro demais, com sua bondade, determinação e força. Nunca mude!

Caio, obrigado por ser meu primeiro amigo no curso, pelos seus abraços e por conversar de livros e musicais. Paulo, você é uma pessoa incrível e muito mais engraçado do que pensa, obrigada pelos seus sorrisos e seus trocadilhos. PP, estou com saudades dos seus abraços e das nossas conversas, obrigado por manter o contato, eu sempre aprecio falar contigo. Carol, você é uma pessoa tão calma e tão gentil. Obrigada por ter me ajudado tanto, especialmente em como ser uma monitora de laboratório. Raíssa, obrigada pelas risadas e pelas conversas filosóficas. Vítor, Felipe e Ranier, vocês só estão separados agora por conta da pandemia e dos mestrados em lugares diferentes, mas pra mim vocês sempre serão um trio, discutindo física e muitas outras coisas bizarras. Vocês três são pessoas surpreendentes. Victor (Porto), estou com saudades de quando tínhamos aulas de ótica e fotônica e dos seus sorrisos. Vítor (Machado), sua motivação e as suas ideias e tudo que você faz me inspiram muito. Ju, obrigada pelas conversas aleatórias, pelas danças aleatórias, e pelas massagens. Lettieri, estou com saudades dos seus abraços que estralam e das suas brigas com o Caio, obrigado por ser um ótimo amigo, sempre. Igor, obrigada pelos seus abraços e pela sua amizade, você é um doutorando(!) muito bonito e muito incrível. Vini, também sinto saudades do seu abraço de urso, obrigada pelas caronas ouvindo Radiohead e por muito mais. Venda e Rafa, como separá-los? Estou com saudades das nossas reuniões e quero muito ir em outra caminhada com vocês logo. Vocês dois são incríveis e me ajudaram muito, especialmente nestes últimos dois anos.

Amanda, você é um mulher sensacional. Fico muito feliz que descobrimos nosso amor compartilhado por vários livros esse semestre.

Falando em mulheres sensacionais... Lorena, você é umas das pessoas mais dedicadas que conheço e absolutamente incrível e apaixonante. Obrigada pela ajuda e a amizade que sempre compartilhou comigo. A Batata é mais uma dessas mulheres admiráveis na minha vida. Obrigada pelos conselhos, as conversas genuinamente aleatórias, as suas belas jogadas no *Valorant* e todo seu amor pela gente. A Lud pode não ser da física, mas sempre esteve presente pra ajudar, dar conselhos, falar de arte, mostrar sua arte e ser o amor de pessoa que ela é. Muito obrigada.

Passaglia, você é outro dos surpreendentes. Viemos desde o INDI até aqui, onde vamos nos formar juntos. Obrigada por todos seus insights, suas perguntas interessantes em sala e seu gosto por aprender. Sei que tem sido uma viagem longa e árdua para nós dois, mas estou muito feliz de estar aqui contigo.

Miguel, você é outro que deve formar comigo, e eu não poderia estar mais feliz. Obrigada por me acompanhar em tantas aulas, idas ao RU, à biblioteca e à sala do Arsen. Você é um homem incrível que tem me ajudado muito durante esse curso, seja explicando quântica ou carregando coisas. Obrigada por me convencer a fazer coisas contigo, também. Em especial essa matéria do Quixote, que foi incrível. Estou com uma saudade imensa das nossas conversas sobre a vida, sobre suas crushs, sobre seu trabalho com o 229. Obrigada por tudo.

Guto, obrigada por toda a sua ajuda durante esses anos. Ajuda que começou com Mecânica e o Olavinho (mesmo depois de trancar), e ainda não terminou. Eu fico tão feliz de ter feito amizade contigo, de poder falar sobre pensamentos mirabolantes e íntimos, receber seus áudios longos (que eu ainda preciso ouvir) e também das suas narigadas. Obrigada por compartilhar músicas novas comigo, por deixar que eu te acompanhe no violão e por me mostrar as suas músicas de vez em quando. Você é alguém que eu admiro e amo muito.

Pedrides, meus deuses. Não tem como te descrever, se estou sendo honesta. Você é uma daquelas pessoas únicas na vida, que não para de surpreender. Obrigada por toda a sua ajuda ao longo do curso: por ter sido o meu monitor não oficial de Mecânica, por ter me ensinado tanto de física, biologia, química, partículas do amor e muito mais. Obrigada por se vestir de Jack Sparrow na prova final do Clóvis, por desenhar coisas por todas as partes, por me levar em aventuras e me convencer a fazer inúmeras coisas bizarras. Obrigada pelas noites estudando no lab do Ronca, no PET, no laboratório 2, no chão do ICC. Eu ainda não sei como você consegue fazer tudo que faz, estudar e ler tudo que você lê, e ainda tem tempo de me levar na Asa Sul pra pegar comida. Te amo, obrigada por tudo.



João, eu nem sei por onde começar. Você tem me inspirado desde a primeira semana de aula, e nunca vai parar de inspirar. Você é uma pessoa tão gentil, engraçada, sorridente, linda e inteligente e eu sou tão feliz de ter te conhecido. Obrigada por compartilhar tudo comigo, por me conhecer mais que qualquer um e por me aceitar independente das minhas falhas. Obrigada por me abraçar, me beijar e me ouvir. Obrigada por me ajudar com tudo, discutir problemas e soluções comigo, me ensinar coisas e me corrigir quando estou errada. Obrigada por ver filmes, videos de culinária, live shows no youtube e muito mais comigo. Obrigada por não se importar when I change languages mid-sentence. Você me apoiou muito durante todo o curso, especialmente nestes 3 anos em que estivemos juntos. Obrigada, do fundo do meu coração. Te amo demais.



O homem perfeito

Resumo

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de construir um espectrômetro de transformada de Fourier por meio da automatização de um Interferômetro de Michelson presente nos laboratórios de ensino do Instituto de Física da Universidade de Brasília (IF-UnB). Com isso, será possível ilustrar uma técnica de medida adicional aos métodos dispersivos utilizados na análise espectral de experimentos em sala. A automatização do interferômetro ocorreu principalmente com a utilização de um motor de passo, um fotodetector e um microcontrolador Arduino. Estes acessórios foram acoplados ao interferômetro por meio de peças projetadas e então produzidas em uma impressora 3D. Programas foram desenvolvidos para auxiliar na comunicação entre os acessórios e a obtenção de dados, controlados pelo usuário em um computador externo. Com o equipamento funcional, do ponto de vista mecânico e eletrônico, medidas foram realizadas com um laser de HeNe, usado para calibração e caracterização do equipamento, e com uma lâmpada de mercúrio, cujos resultados são apresentados. Dados obtidos com o laser mostraram picos satélites que são razoavelmente bem correlacionados a imperfeições mecânicas nas engrenagens construídas. Propostas de soluções de problemas e modificações são discutidas.

Palavras-chaves: interferometria, interferômetro de Michelson, Arduino, espectroscopia, espectroscopia de transformada de Fourier, espectro ótico, automatização.

Abstract

This work was developed with the intention of constructing a Fourier transform spectrometer through the automation of a Michelson Interferometer present in the Physics Institute at the University of Brasília. With it, an experiment different from the usual dispersive spectroscopy techniques becomes available to students. The Michelson interferometer was automated mainly by the use of a step motor, a photodetector and an Arduino microcontroller. These accessories were joined to the interferometer by several supports that were drawn and then printed in 3D. To control the equipment and permit communication between the accessories and data collection, a computer program was developed. With the spectrometer ready for use from a mechanical and electronical point of view, a HeNe laser and a mercury lamp were used for calibration and as initial tests. The measurements and results are shown and discussed. Spectral data collected while using the laser show satellite peaks that seem to be connected to mechanical imperfections. Some solutions, as well as possible changes to the equipment, are discussed.

Keywords: interferometry, Michelson interferometer, Arduino, spectroscopy, Fourier transform spectroscopy, optical spectrum, automation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Espectro da radiação eletromagnética, mostrando valores de comprimento de onda e frequência de cada parte. A energia da REM é proporcional à frequência. Adaptado de Villate (2012).	29
Figura 2 – Porção do espectro de uma lâmpada de hélio vista através da ocular do espectroscópio esquematizado na Figura 3.	32
Figura 3 – Esquema de disposição de um espectroscópio.	32
Figura 4 – Ilustração simplificada de um interferômetro de Michelson.	35
Figura 5 – Esquematização de como os feixes são tratados como fontes distintas S_1 e S_2 , separadas por uma distância d	35
Figura 6 – Gráfico da parte real da função $f(t)$	37
Figura 7 – As curvas normalizadas de $g(\omega)$ e $G(\omega)$, em vermelho e verde, respectivamente.	37
Figura 8 – Vista superior do interferômetro de Michelson a ser utilizado. A fonte de luz (na borda esquerda) utilizada é um laser de $HeNe$. O detector (na borda inferior) é um fotodiodo de silício.	42
Figura 9 – Ilustração do interferômetro de Michelson, com os elementos principais enumerados e destacados em azul claro. O caminho ótico do feixe de luz está representado em amarelo, com setas indicando o seu sentido.	42
Figura 10 – Motor de passo 28BYJ-48 da <i>Kiatronics</i>	44
Figura 11 – Diagrama esquemático da disposição das vias do motor de passo. Adaptado de Kiatronics (S/D).	44
Figura 12 – Driver ULN2003 da <i>Texas instruments</i> . Ele está fixado em um pedaço de EVA para isolar a base ⁵	45
Figura 13 – Diagrama do chip no driver. À esquerda, uma ilustração legendada de uma visão superior. À direita, uma esquematização simplificada das componentes internas, também legendada. Diagramas adaptados de Texas-Instruments (S/D).	45
Figura 14 – Arduino UNO conectado a um computador pessoal, ao detector pelo pino A0, ao terra pelo GND e ao driver pelos pinos 8, 9, 10 e 11. Ele está fixado em um pedaço de EVA para isolar a base ⁵	45
Figura 15 – Desenho 3D das engrenagens. À esquerda está a engrenagem do micrômetro e, à direita, a engrenagem do motor.	47
Figura 16 – Desenho 3D das três peças que compõem a base do suporte do motor. No canto superior direito, a vista é da parte traseira das peças, com elas posicionadas na orientação certa para serem unidas em uma só.	48

Figura 17 – Quarta peça do suporte do motor. Ela desliza verticalmente sobre a maior peça que forma a base do suporte (Figura 16).	48
Figura 18 – Quinta peça do suporte do motor. O motor se encaixa nela e ela é parafusada à quarta peça (Figura 17).	48
Figura 19 – Suporte para o motor, motor, sua engrenagem e a engrenagem montados no interferômetro. As engrenagens já foram alinhadas e o equipamento está pronto para fazer uma medida.	49
Figura 20 – Fotodiodo de silício 41736.5E da PHYWE.	50
Figura 21 – Amplificador universal 13626.93 da PHYWE.	50
Figura 22 – Curva típica de resposta de um fotodiodo de silício em função de seu comprimento de onda. Figura adaptada de KaiMartin (2009).	50
Figura 23 – Peças que formam a base do detector.	51
Figura 24 – Fotodiodo, seu suporte e telescópio montados no interferômetro, pronto para realizar medidas.	51
Figura 25 – Alinhadores em suas peças separadas. Da esquerda para a direita: base montada com disco de furo desalinhado, base sem disco, base do suporte em frente à fonte sem disco, discos de diferentes furos.	52
Figura 26 – Alinhador posicionado na frente do segundo espelho, inserido no furo da base do interferômetro.	52
Figura 27 – Interface gráfica do programa Terminal. Os elementos relevantes estão indicados por retângulos coloridos em vermelho e laranja tracejado.	53
Figura 28 – Multímetro conectado à saída do amplificador.	59
Figura 29 – Laser de HeNe da PHYWE pronto para ser utilizado como fonte em uma medida.	60
Figura 30 – Trecho do interferograma coletado durante a segunda rodada de testes. O valor de cada ponto é a média de 10 registros de sinal.	60
Figura 31 – Trecho do interferograma coletado durante a segunda rodada de testes. O valor de cada ponto é a média de 100 registros de sinal.	61
Figura 32 – DFT do sinal com uma média de 100 registros, com a amplitude normalizada. O Espectro inteiro está representado no gráfico principal. Inserido à direita está um trecho do mesmo espectro, focalizando nos picos mais proeminentes. Os diferentes picos e grupos de picos foram sinalizados.	62
Figura 33 – Trecho do sinal (em preto) sobreposto com dois ajustes para uma função senoidal (em vermelho) e uma com saturação da mesma função (em azul).	63
Figura 34 – Trecho da DFT do sinal (em preto) e da função com saturação ajustada (em azul). Ambas as intensidades foram normalizadas.	63
Figura 35 – Filtro de atenuação de 10^2 posicionado entre a fonte e o interferômetro.	65
Figura 36 – Engrenagens cobertas com borracha para servir como roletes.	65

Figura 37 – Trecho do sinal medido para o laser de HeNe utilizando os roletes ao invés das engrenagens.	66
Figura 38 – DFT de um interferograma feito com o laser de HeNe como fonte. Sobreposto ao espectro está um ajuste por uma função Lorentziana, em vermelho. À direita do pico, a expressão da função, em conjunto com os parâmetros encontrados para ela, está apresentado.	67
Figura 39 – Lâmpada de Hg de média pressão da PHYWE pronta para ser utilizada como fonte em uma medida.	69
Figura 40 – Interferograma da lâmpada de Hg da PHYWE com um filtro verde. . .	69
Figura 41 – Espectro do interferograma da Figura 40. A parte destacada é uma faixa que percorre desde o IV próximo ao UV próximo.	70
Figura 42 – Interferograma completo da lâmpada de Hg da PHYWE passando pelo ponto central do interferômetro. Um filtro verde e um que bloqueia IV foram utilizados.	70
Figura 43 – Espectro do interferograma da Figura 42. A parte destacada é uma faixa que percorre desde o IV próximo ao UV próximo. Alguns picos ou grupos de picos estão indicados por números. A posição em que o pico correspondendo ao da luz verde estaria está identificado por uma seta verde.	71
Figura 44 – Lâmpada incandescente pronta para ser utilizada como fonte em uma medida.	72
Figura 45 – Interferograma da lâmpada incandescente.	72
Figura 46 – Espectro do interferograma da Figura 45. Em destaque está uma porção do espectro que cobre do IV ao UV próximo. Cinco pontos estão indicados.	73
Figura 47 – Espectro da lâmpada incandescente em termos do comprimento de onda medida de duas formas distintas.	73
Figura 48 – Lâmpada de Hg da PASCO pronta para ser utilizada como fonte em uma medida.	74
Figura 49 – Trecho de um interferograma feito utilizando a linha de emissão verde do Hg.	75
Figura 50 – DFT do sinal da Figura 49. O trecho em destaque percorre do IV próximo ao UV próximo, onde o pico principal se encontra. Duas distribuições Lorentzianas foram ajustadas ao pico. Uma, em vermelho, considera o espectro todo; a outra, em verde, somente o trecho delimitado pelas linhas pontilhadas.	75
Figura 51 – Espectro de frequências da lâmpada de Hg projetado sobre o alinhador da fonte. É possível ver que a linha amarela é a única que passa pelo furo. A linha vermelha que pode ser vista provavelmente é gerada pela proteção metálica na lâmpada, utilizada para impedir a emissão no UV.	76

Figura 52 – Figura com quatro gráficos. Os gráficos superiores são interferogramas medidos com as linhas amarelas do Hg e compartilham da mesma escala no eixo das ordenadas (Intensidade (V)). Abaixo de cada interferograma está seu espectro completo e a parte dele que vai do IV próximo ao UV próximo destacado. Novamente, os espectros compartilham da mesma escala no eixo das ordenadas (Amplitude [u.a]). Cada espectro foi ajustado com uma Lorentziana, mostrada em vermelho.	77
Figura 53 – Interferograma medido com a lâmpada de Hg como fonte.	78
Figura 54 – DFT do sinal da Figura 53. Destacado está a faixa do espectro entre o IV próximo e o UV próximo, com as posições das linhas de emissão do Hg na faixa visível marcadas por linhas coloridas representando suas cores correspondentes. A grossura das linhas também representa a intensidade relativa de cada linha como dada em Jenkins e White (2018).	78

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com valores da posição dos picos do sinal medido e sua distância do pico principal.	64
Tabela 2 – Linhas do espectro do mercúrio na faixa do visível. Baseado em Jenkins e White (2018).	68

Lista de abreviaturas e siglas

DFT	Transformada de Fourier discreta (<i>Discrete Fourier Transform</i> em inglês)
FTS	Espectroscopia de transformada de Fourier (<i>Fourier Transform Spectroscopy</i> em inglês)
GUI	Interface gráfica (<i>Graphic User Interface</i> em inglês)
HeNe	Hélio-Neônio
Hg	Mercúrio
IF	Instituto de Física
IV	Infravermelho(a)
LVP	Protocolo de rótulos e valores (<i>Labels and Values Protocol</i> em inglês); biblioteca para Arduino
Na	Sódio
REM	Radiação eletromagnética
S/D	Sem data
SI	Sistema Internacional de Unidades (<i>Système international d'unités</i> em francês)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
[u.a]	Unidades arbitrárias
UnB	Universidade de Brasília
UV	Ultravioleta

Lista de símbolos

c	Velocidade da luz ($\approx 2,998 \cdot 10^8$ m/s)
d	Diferença de caminho entre os feixes em um interferômetro de Michelson
E	Energia
\mathbf{E}	Vetor campo elétrico
φ	Fase
$\Gamma_{12}(\tau)$	Função de correlação
$\gamma(\tau)$	Grau de coerência
\mathbf{H}	Vetor campo magnético
h	Constante de Planck ($\approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s)
I	Irradiância
K_B	Constante de Boltzmann ($= 1,381 \cdot 10^{-23}$)
k	Número de onda
\mathbf{k}	Vetor de onda
l_c	Comprimento de coerência
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência
T	Temperatura
τ	Período
θ	Ângulo
\mathbf{r}	Vetor posição
ω	Frequência angular

Sumário

	INTRODUÇÃO	24
1	EXPERIMENTOS PROPOSTOS E CONCEITOS TEÓRICOS	27
1.1	Luz, emissão e espectroscopia	28
1.2	Interferometria e coerência	32
1.3	Espectroscopia de Transformada de Fourier	38
2	EQUIPAMENTO E PROGRAMAS	41
2.1	Aparato Experimental	41
2.1.1	Interferômetro de Michelson	41
2.1.2	Outras peças	43
2.2	Comunicação eletrônica	52
3	TESTES E PERSPECTIVAS FUTURAS	58
3.1	Laser	59
3.1.1	Calibração	66
3.2	Lâmpadas Policromáticas	67
3.2.1	Lâmpada de Hg (PHYWE - 08147.00)	68
3.2.2	Lâmpada Incandescente	71
3.2.3	Lâmpada de Hg (PASCO - OS-9286A)	74
3.3	Perspectivas Futuras	79
	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	82
	ANEXOS	84
	ANEXO A – PROGRAMA ARDUINO	85

Introdução

Radiação eletromagnética (REM) permeia nosso universo e pode ser gerada por diversos fenômenos. A forma como ela interage e é gerada por matéria diz muito sobre as propriedades da matéria. Uma área que emergiu com o intuito de estudar essas interações é a espectroscopia. Nesse âmbito, vários tipos de instrumentos foram desenvolvidos para a determinação das intensidades e frequências das radiações, entre eles o interferômetro.

Existem muitas técnicas associadas à espectroscopia. Uma delas é FTS - espectroscopia de transformada de Fourier. Interferômetros de Michelson são bastante utilizados para a obtenção de um espectro com esta técnica. Variações sobre o interferômetro de Michelson têm sido utilizados em aplicações diversas, desde a mais simples medição do comprimento de onda (λ) de uma fonte monocromática, à detecção de ondas gravitacionais. Uma das utilizações mais importantes e históricas de interferômetros foi na refutação da existência do éter ([Nussenzeig \(1997\)](#)).

Os laboratórios didáticos possuem interferômetros usados para demonstrar os fenômenos de interferência da radiação e sua capacidade de medir seus comprimentos de onda. Nesse contexto, eles ficam restritos a fontes *quasi* monocromáticas face à complexidade das interferências percebidas no campo visual do usuário. Este projeto foi desenvolvido com o propósito de avaliar a capacidade desse instrumento didático para lidar com radiações policromáticas, mostrando os princípios envolvidos no seu uso para análise espectral.

Com isso, se espera expor os alunos de Bacharelado em Física da UnB a conceitos que não são explorados em nenhum dos experimentos atuais do currículo obrigatório. Assim, foi proposta a construção de um espectrômetro de transformada de Fourier utilizando um interferômetro de Michelson já presente nos laboratórios de ensino do Instituto de Física da Universidade de Brasília (IF-UnB).

Com a construção desse equipamento, os alunos poderão explorar conceitos amplamente estudados em matérias teóricas, mas pouco explorados experimentalmente no curso, tal como interferometria, domínios recíprocos e espectroscopia não dispersiva. No [primeiro capítulo](#) deste texto, abordamos os experimentos propostos com a construção deste equipamento e os conceitos teóricos associados a eles.

Mesmo que a construção do espectrômetro de transformada de Fourier se baseie no interferômetro de Michelson já presente nos laboratórios, algumas adições precisaram ser feitas para que ele cumprisse seu objetivo. Principalmente, acessórios foram projetados e impressos em 3D e um microcontrolador Arduino controlado por um computador externo foi incorporado para auxiliar na automatização e no manuseio do interferômetro.

Uma descrição do equipamento e as adições mecânicas e eletrônicas feitas a ele estão apresentados em detalhe no [segundo capítulo](#).

Com o equipamento funcional, testes com diferentes fontes foram feitos. Os dados coletados apresentam elementos inesperados e picos adicionais em sua transformada de Fourier discreta (DFT). Uma análise dos dados, hipóteses do que pode estar causando as diferenças nos espectros e outras propostas para uma continuação do projeto são apresentadas no [último capítulo](#) do texto.

Inicialmente, o projeto tinha como objetivo projetar e construir peças para automatizar o interferômetro, desenvolver programas para a comunicação entre as partes, desenvolver uma interface gráfica intuitiva para facilitar na utilização, escrever um roteiro a ser seguido em sala e testar o equipamento em uma turma de laboratório. Infelizmente, devido à situação atual de pandemia, nem todos os objetivos propostos no projeto inicial foram cumpridos.

1

1 Experimentos propostos e conceitos teóricos

A construção e automatização de um espectrômetro de transformada de Fourier com um interferômetro de Michelson vem com o intuito de utilizá-lo para a realização de experimentos com fontes policromáticas em disciplinas de laboratório. Assim, foram escolhidas 3 fontes luminosas para testar o equipamento e sua implementação em sala. A teoria referente ao processamento de cada sinal é praticamente a mesma, mas a complexidade aumenta de uma para a outra, dependendo da respectiva complexidade da fonte escolhida. As fontes estão listadas abaixo:

1. Um laser de feixe contínuo;
2. Uma lâmpada de vapor de um elemento com um dubleto¹ em seu espectro;
3. Uma lâmpada incandescente.

A [primeira](#) fonte proposta, na verdade, é monocromática. Um exemplo presente nos laboratórios é o laser de Hélio-Neônio (HeNe), com comprimento de onda de 632,8 nm, ou seja, na faixa do vermelho ([Rodrigues \(2019\)](#)). O laser será utilizado para calibrar o equipamento e verificar seu funcionamento, já que o comprimento de onda é bem conhecido. Se aplicado em sala de aula, ele também será útil para introduzir os conceitos teóricos básicos do funcionamento do equipamento. Nominalmente, espectroscopia, interferometria e a transformada de Fourier.

O [segundo](#) experimento já será um pouco mais complexo. Exemplos comuns de lâmpadas de vapor com um dubleto em seu espectro são de mercúrio (Hg) ou de sódio (Na), que têm dubletos na faixa amarela do espectro. Seus comprimentos de onda (λ) se encontram em torno das linhas de $\lambda_{Hg} \approx 579$ nm ([Burns, Adams e Longwell \(1950\)](#)) e $\lambda_{Na} \approx 589$ nm ([Baugh et al. \(1998\)](#)). A lâmpada de Na só emite nessa faixa, no visível, então ela seria a escolha ideal, não precisando de filtros. No entanto, a que estava nos laboratórios está danificada, então para os testes iniciais, a de Hg foi utilizada.

A lâmpada de Hg precisa de um filtro para isolar a faixa do espectro em que o dubleto se encontra². Com o dubleto, a luz que sofre interferência não será mais monocromática, mas também não será muito complexa. Como as duas frequências que serão

¹ Característica no espectro de alguns elementos. O que parece ser uma linha espectral é, na verdade duas linhas bastante próximas. Dubletos provem de uma quebra de degenerescência de um nível energético do elemento, causando emissões em duas energias próximas.

² Existem outras formas de isolar uma faixa de frequências, como com a utilização de uma rede de difração.

observadas são muito próximas, elas acabam gerando um “batimento” que pode ser observado no interferograma medido. Utilizar uma fonte dessas permite medir um espectro com mais de uma linha, sem que seja muito complexo. Em sala de aula, o experimento permite explorar mais os conceitos teóricos, a representação de um interferograma e encontrar os comprimentos de onda exatos do dubleto.

Outros experimentos poderão ser feitos utilizando as [lâmpadas de vapor](#), com o intuito de medir seus espectros inteiros. Neste caso, a exigência de um dubleto não seria aplicável. Os laboratórios de ensino da UnB têm lâmpadas de hidrogênio, hélio e neônio, além de três de mercúrio - uma de baixa e duas de média pressão - que podem ser usadas para comparar os efeitos da pressão tanto no interferograma medido, ao observar o comprimento de coerência da fonte, quanto seu efeito no espectro calculado. Medições de espectros inteiros são interessantes não só para lâmpadas de vapor de diferentes elementos, com seus espectros bem definidos, mas para outras fontes policromáticas. A medição de um espectro completo é boa para testar o equipamento, e também para fixar os conceitos explorados em sala.

Este capítulo serve como uma revisão teórica para os elementos de ótica e matemática que devem ser entendidos para desenvolver o projeto e os experimentos propostos. As principais fontes utilizadas para a teoria foram [Fowles \(1989\)](#) e [Nussenzveig \(1997\)](#). Estes livros, além de [Eisberg e Resnick \(1985\)](#), [Rodrigues \(2019\)](#), [Jenkins e White \(2018\)](#) e [Bell \(2012\)](#) são sugeridos para quem tiver interesse em se aprofundar mais nos tópicos discutidos aqui.

A [primeira seção](#) trata em mais detalhes os experimentos propostos, conceitos básicos de espectroscopia e do comportamento de luz e radiação eletromagnética. As fontes escolhidas e suas diferenças são descritas. A [segunda seção](#) discute interferência, coerência e outras características de sinais luminosos. A [terceira seção](#) abarca a espectroscopia de transformada de Fourier (FTS).

1.1 Luz, emissão e espectroscopia

Um dos contatos comuns que temos com espectros de luz no nosso dia a dia é o arco íris. Esse espectro específico contém todas as cores visíveis - cada cor é a interpretação que nossos olhos têm de uma frequência ou energia diferente da luz. O arco íris é o exemplo mais usado para explicar o que é um espectro contínuo: uma variação contínua de alguma grandeza (no caso, frequência), delimitado por dois valores extremos. Luz é radiação eletromagnética (REM), aquela visível para seres humanos. Mas o espectro que conseguimos ver é meramente uma pequena porção do espectro inteiro de REM, que varre desde as ondas de rádio, com baixas energias, até os raios gama, com altas energias. O espectro da REM está ilustrado na [Figura 1](#).

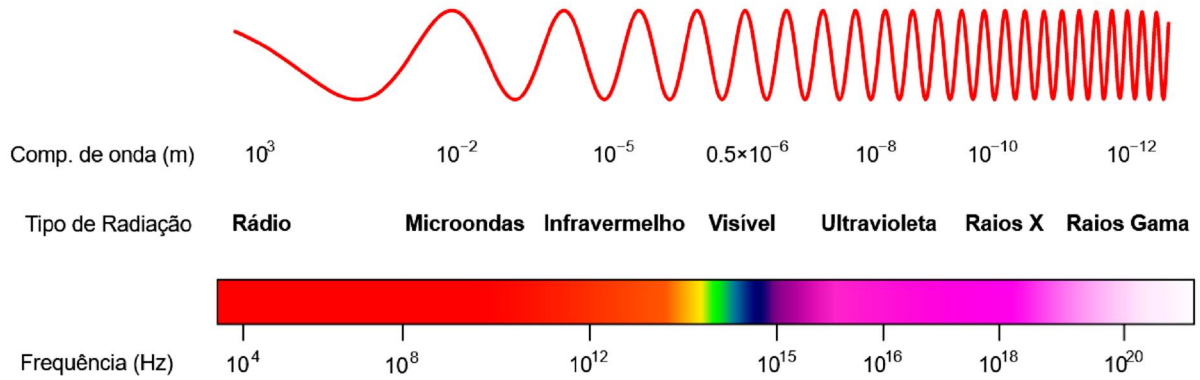


Figura 1 – Espectro da radiação eletromagnética, mostrando valores de comprimento de onda e frequência de cada parte. A energia da REM é proporcional à frequência. Adaptado de [Villate \(2012\)](#).

Cada tipo de REM tem energias diferentes, mas suas velocidades são a mesma no vácuo: $c \approx 2,998 \cdot 10^8$ m/s. REM pode ser descrita como uma onda eletromagnética ou como um fóton: um *quantum* do campo eletromagnético e uma partícula elementar. Suas frequências (ν) estão relacionadas com seus comprimentos de onda (λ) pela equação 1.1:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}. \quad (1.1)$$

Enquanto a sua energia E está relacionada à ν pela equação 1.2:

$$E = h\nu, \quad (1.2)$$

em que $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$ J·s é a constante de Planck. Assim, a frequência de uma onda é proporcional à sua energia, mas inversamente proporcional ao seu comprimento de onda.

A natureza ondulatória da luz será abordada neste projeto, especialmente na descrição de como diferentes feixes interferem. Mas é importante lembrar que a luz também se comporta como partícula, que explica as formas de emissão das fontes utilizadas.

Uma onda eletromagnética harmônica plana é caracterizada pelos seus campos elétrico \mathbf{E} e magnético \mathbf{H} :

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t), \quad (1.3)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}_0 \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t), \quad (1.4)$$

em que \mathbf{E}_0 e \mathbf{H}_0 são as amplitudes dos campos, \mathbf{r} o vetor posição, t o tempo, \mathbf{k} o vetor de onda³ ($k = |\mathbf{k}| = 2\pi/\lambda$ é o número de onda) e $\omega = 2\pi\nu$ a frequência angular.

Quando descrevendo uma onda com múltiplas frequências, as funções que descrevem os campos se tornam mais complexas, dependendo da distribuição de frequências,

³ Cujas direção indica a direção de propagação da onda e é a mesma do vetor de Poynting.

ou seja, o espectro desejado. Assim, existem duas formas de representar as ondas: como elas se comportam em função do tempo e em função da frequência. Estas diferentes representações nos dizem como a onda se comporta nos chamados domínio do tempo e domínio da frequência, respectivamente. Um domínio é o recíproco do outro, e ondas podem ser representadas não só em termos do tempo e da frequência, mas também em termos do espaço e da frequência espacial. Como passar de um domínio ao seu recíproco é discutido mais a fundo na seção 1.3.

Qualquer conjunto de radiação que se encontra no universo pode ser disposto como um espectro em função de sua frequência. Existem diferentes formas de detectar diferentes tipos de radiação e separar cada uma de suas frequências. A espectroscopia estuda os espectros encontrados com o intuito de entender um pouco mais sobre como eles são gerados. Existem diversas formas de classificar cada faceta da espectroscopia: por tipo de radiação emitida, interação e material envolvido. Neste texto, abordaremos em especial a espectroscopia ótica, que estuda a luz emitida por átomos e como isso caracteriza os mesmos.

Cada tipo de fonte proposta emite luz de uma forma diferente. Um [laser](#), como o próprio nome já diz⁴, emite luz ao estimular um material (chamado de meio ativo) dentro de uma cavidade ressonante. A cavidade ressonante geralmente é composta por dois espelhos paralelos, um dos quais é semi-refletor. No geral, algum mecanismo fornece energia ao meio ativo, que então começa a emitir radiação ele mesmo. Essa radiação é refletida pela cavidade ressonante, atingindo o meio ativo e o estimulando novamente. Esse processo de retroalimentação amplifica a radiação sendo emitida pelo meio ativo, gerando um feixe de alta intensidade, colimado, monocromático e coerente. ([Rodrigues \(2019\)](#))

A luz que é emitida por um laser depende do meio ativo e de como ele se retroalimenta. Um laser de HeNe, por exemplo, é um laser a gás. Ele tem uma mistura de gás de hélio (He) e de neônio (Ne) como meio ativo. O processo de retroalimentação desse laser pode gerar luz de diferentes comprimentos de onda, mas que pode ser selecionado utilizando espelhos que só refletem o desejado. Assim, o espectro desse laser contém somente um valor de frequência⁵. ([Rodrigues \(2019\)](#))

Um laser só consegue emitir luz monocromática por conta da capacidade de átomos de absorver e emitir radiação⁶ e pela maneira que sua retroalimentação ocorre. Como cada elemento atômico tem uma configuração eletrônica distinta, seus níveis de energia estão

⁴ O nome *laser* vem de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, ou em português: *Amplificação de Luz por Emissão Estimulada de Radiação*.

⁵ Existem lasers que emitem em um espectro largo de frequências, mas não vamos abordá-los neste trabalho.

⁶ Para se aprofundar mais no assunto, sugiro a leitura das partes relevantes em [Nussenzveig \(1997\)](#), [Fowles \(1989\)](#), [Eisberg e Resnick \(1985\)](#) ou até [Rodrigues \(2019\)](#), que fala mais especificamente de aplicações a lasers.

distribuídos de uma forma única. Isso também significa que as energias que um átomo absorve e emite serão únicas e muito específicas. Assim, os comprimentos de onda da radiação emitida por um átomo de mercúrio serão bastante diferentes dos emitidos por um átomo de hélio. O mesmo vale para seus espectros, que apresentam valores específicos de frequências.

Para que átomos emitam radiação, eles devem ser excitados para que seus elétrons mudem de nível de energia. Ao absorver energia, um elétron sai de seu estado fundamental e passa a outro nível mais alto. No entanto, sua tendência é sempre de retornar ao seu nível original e, quando isso ocorre, ele *emite* energia novamente, seja de forma radiante ou por meio de outros mecanismos não-radiativos.

Uma **lâmpada de vapor** de um elemento químico faz justamente isso: ela fornece energia ao vapor, excitando os átomos para que emitam luz. A luz que vemos é, então, a mistura das frequências contidas no espectro do elemento.

Uma **lâmpada incandescente**, no entanto, emite luz de uma forma diferente. Ela é composta por um filamento metálico (geralmente tungstênio) pelo qual se passa uma corrente elétrica. Quando isso ocorre, o filamento se aquece por efeito Joule, fazendo com que seus átomos vibrem e emitam radiação térmica. Essa emissão não se restringe a um comprimento de onda só, mas cobre uma faixa grande de frequências⁶, se comportando aproximadamente como um corpo negro. A radiância espectral R de um corpo negro obedece a Lei de Planck, dada por:

$$R(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda K_B T}} - 1}, \quad (1.5)$$

em que T é a temperatura, h a constante de Planck, c a velocidade da luz, λ o comprimento de onda, e K_B é a constante de Boltzmann⁷.

Existem muitos métodos de obtenção e análise destes espectros. O mais utilizado nos laboratórios didáticos da UnB é a espectroscopia dispersiva. Como o nome sugere, ela utiliza elementos óticos como prismas e grades para *dispersar* a luz emitida pela fonte luminosa. Quando isso ocorre, a luz acaba percorrendo caminhos que dependem de sua frequência, evidenciando quais são as que compõem seu espectro. Um exemplo de um equipamento de espectroscopia dispersiva é o espectroscópio mostrado nas Figuras 2 e 3. Ele separa as frequências da luz espacialmente a partir de uma rede de difração⁶, criando um “leque” de cores que pode ser visualizado a partir de uma ocular móvel.

Na Figura 2, uma porção do espectro de uma lâmpada de vapor de hélio pode ser observada na ocular: 3 linhas em azul e turquesa. A forma da linha é uma imagem da fenda utilizada. O vapor na lâmpada é excitado pela passagem de corrente elétrica, e a luz produzida passa por uma fenda, uma lente, uma rede de difração e finalmente por outra lente na ocular do espectroscópio (Figura 3).

⁷ Com um valor de $K_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K.

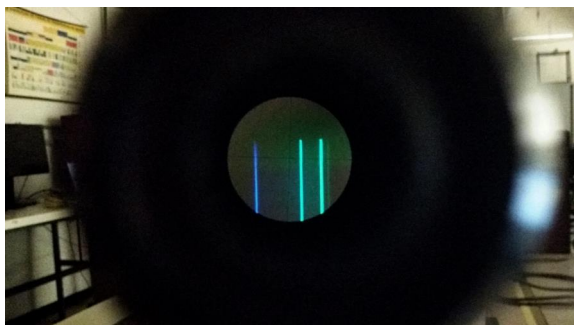


Figura 2 – Porção do espectro de uma lâmpada de hélio vista através da ocular do espectroscópio esquematizado na Figura 3.

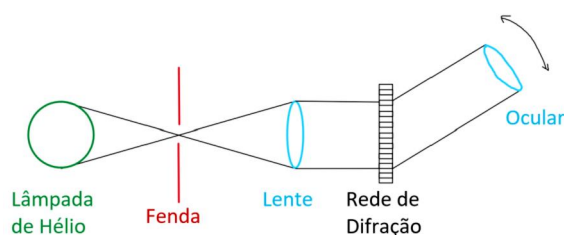


Figura 3 – Esquema de disposição de um espectroscópio.

Durante o curso de bacharelado em física da UnB, os alunos entram em contato somente com técnicas de espectroscopia dispersiva em suas disciplinas de laboratório. Algo que é pouco explorado no laboratório didático é a observação de um espectro usando interferometria.

A forma como espectroscopia dispersiva apresenta o espectro de uma fonte é bastante intuitiva, já que as frequências são separadas espacialmente. Isso permite medir as distâncias entre as linhas e a intensidade de cada parte do espectro com equipamento adicional. No entanto, existem outras técnicas de espectroscopia que são menos diretas e permitem uma análise da radiação no domínio do tempo ou do deslocamento, como a espectroscopia de transformada de Fourier (FTS). Ela exige que uma transformada de Fourier seja aplicada ao sinal detectado para que o domínio da frequência temporal ou espacial seja observado. No caso, o sinal medido na ocular do interferômetro se encontra no domínio do *deslocamento espacial* do feixe e passa ao domínio da *frequência espacial*.

Um dos equipamentos mais utilizados para esse tipo de espectroscopia é o interferômetro de Michelson. Mais detalhes sobre interferência, interferômetros e FTS serão apresentados nas próximas seções.

1.2 Interferometria e coerência

Para entender melhor o que ocorre em um interferômetro e como FTS é feita, é necessário primeiro revisar conceitos de ótica como interferência e coerência de fontes. Neste trabalho, trata-se em especial o caso da interferência que ocorre em um interferômetro de Michelson: entre feixes vindos de uma mesma fonte.

Na faixa visível do espectro eletromagnético, a interferência se manifesta na intensidade total das ondas eletromagnéticas que interferem, ou seja, pela irradiância⁸ total

⁸ O termo correto para o que geralmente é chamado de intensidade.

$I \propto |\mathbf{E}|^2$, em que \mathbf{E} é o campo elétrico total no ponto em que I é medida. \mathbf{E} é dado pela superposição linear dos campos elétricos que descrevem cada feixe, nesse caso⁹.

Os campos de cada feixe podem ser escritos como

$$\begin{cases} \mathbf{E}_{(1)} = \mathbf{E}_1 \cdot \exp [i(\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi_1)] \\ \mathbf{E}_{(2)} = \mathbf{E}_2 \cdot \exp [i(\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi_2)] \end{cases}, \quad (1.6)$$

em que \mathbf{E}_1 e \mathbf{E}_2 são as amplitudes das ondas, $i = \sqrt{-1}$, \mathbf{k}_1 e \mathbf{k}_2 os vetores de onda, \mathbf{r} a distância da origem ao ponto medido, ω a frequência angular e φ_1 e φ_2 as fases de cada feixe. Neste caso, a irradiância será dada, a menos de uma constante de proporcionalidade¹⁰, pela equação (1.7):

$$I = |\mathbf{E}|^2 = |\mathbf{E}_{(1)} + \mathbf{E}_{(2)}|^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* = I_1 + I_2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \cos \theta, \quad (1.7)$$

em que $I_n = |\mathbf{E}_{(n)}|^2$ é a irradiância de cada feixe, com $n = 1, 2$. O termo $2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \cos \theta$ é chamado de termo de interferência. Ele varia com $\theta = \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r} + \varphi_1 - \varphi_2$, que depende da *diferença de caminho* de cada feixe $\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}$ e da diferença de fase $\varphi_1 - \varphi_2$. Essa variação gera franjas claras e escuras, chamadas de franjas de interferência. Neste caso particular, os campos não passam por meios distintos, e são considerados mutuamente coerentes ($\varphi_1 - \varphi_2$ é constante), monocromáticos, com amplitudes \mathbf{E}_n constantes e com vetores de onda $\mathbf{k}_1 = \mathbf{k}_2$. Assim, as franjas são igualmente espaçadas.

Em um modelo mais realista, as fases e as amplitudes dos campos flutuam aleatoriamente e é necessário considerar a média temporal da irradiância. Assim,

$$I = \langle |\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + 2\Re(\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^*) \rangle, \quad (1.8)$$

em que $\Re(f)$ denomina a parte real de $f = \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^*$ e $\langle g \rangle$ é a média temporal de $g = |\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + 2\Re(\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2^*)$, dada explicitamente por

$$\langle g \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g(t) dt. \quad (1.9)$$

Se os campos forem estacionários e vierem de uma mesma fonte, diferindo somente em seus caminhos óticos¹¹, o termo de interferência em (1.8) pode ser reescrito como $2\Re[\Gamma_{12}(\tau)]$, em que $\Gamma_{12}(\tau)$ é dado por

$$\Gamma_{12}(\tau) = \langle E_1(t) E_2^*(t + \tau) \rangle. \quad (1.10)$$

Como os campos têm caminhos distintos, um percorre seu caminho em um tempo t enquanto o outro em um tempo $t + \tau$.

⁹ A superposição pode ser não linear em regimes de alta intensidade.

¹⁰ Dada por $n/2\sqrt{\epsilon_0/\mu_0}$, em que n é o índice de refração do meio, ϵ_0 é a constante de permissividade do vácuo, e μ_0 é a constante de permeabilidade do vácuo.

¹¹ Isso significa que a polarização também será a mesma, e o caráter vetorial das amplitudes pode ser desconsiderado.

A função $\Gamma_{12}(\tau)$ é chamada de função de correlação ou de coerência mutual, e representa a correlação entre os feixes. É possível também definir $\Gamma_{11}(\tau)$, que é a função de auto correlação ou auto coerência do feixe 1 com si mesmo. Temos que $\Gamma_{11}(0) = \langle E_1(t)E_1^*(t+0) \rangle = I_1$. O interferograma medido na ocular de um espectrômetro de transformada de Fourier é dado pela auto correlação da fonte.

Outra função, que é a normalização da função de correlação, chamada de grau de coerência, é bastante utilizada. Ela é uma função periódica complexa que é definida como

$$\gamma_{12}(\tau) \equiv \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{\Gamma_{11}(0)\Gamma_{22}(0)}} = \frac{\Gamma_{12}(\tau)}{\sqrt{I_1 I_2}}. \quad (1.11)$$

O valor do módulo de $\gamma_{12}(\tau)$ indica qual é o grau de coerência entre os feixes:

$$\begin{aligned} |\gamma_{12}(\tau)| = 0 & \quad \text{(Incoerência total);} \\ 0 < |\gamma_{12}(\tau)| < 1 & \quad \text{(Coerência parcial);} \\ |\gamma_{12}(\tau)| = 1 & \quad \text{(Coerência total).} \end{aligned}$$

O valor da irradiância pode então ser reescrito como

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \Re(\gamma_{12}(\tau)),$$

que irá variar entre um valor máximo

$$I_{max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|$$

e um valor mínimo

$$I_{min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|.$$

Outra grandeza pode então ser definida: ela é a visibilidade das franjas, dada por

$$\mathcal{V} = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2} |\gamma_{12}(\tau)|}{I_1 + I_2}. \quad (1.12)$$

A visibilidade do padrão de interferência, ou o quão fácil é distinguir entre os máximos e mínimos das franjas, depende do grau de coerência e das intensidades dos feixes.

Em um interferômetro de Michelson (Figura 4), a luz vinda de uma fonte é dividida ao passar por um espelho semi-refletor. Os feixes são então refletidos por um espelho para serem novamente sobrepostos e gerar um padrão de interferência. Estes feixes podem ser tratados como se estivessem vindo de duas fontes idênticas, S_1 e S_2 (Figura 5). Nessa situação, as fontes continuam sendo pontuais e, se os espelhos estiverem a diferentes distâncias do espelho semi-refletor, a diferença de caminho entre os feixes será dada por d .

Assumindo que as amplitudes são separadas igualmente no espelho semi-refletor, $|E_1| = |E_2|$ e $I = 2I_T + 2I_T \Re(\gamma(\tau))$, com $I_T \equiv I_1 = I_2$ e $\gamma(\tau) \equiv \gamma_{11}(\tau) = \gamma_{22}(\tau)$. Além disso, a expressão (1.12) é simplificada para $\mathcal{V} = |\gamma(\tau)|$.

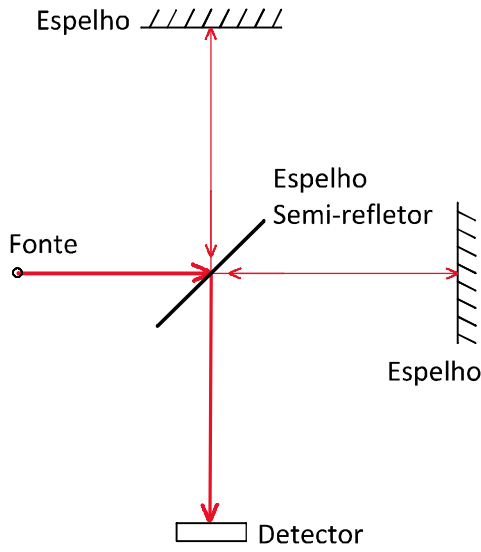


Figura 4 – Ilustração simplificada de um interferômetro de Michelson.

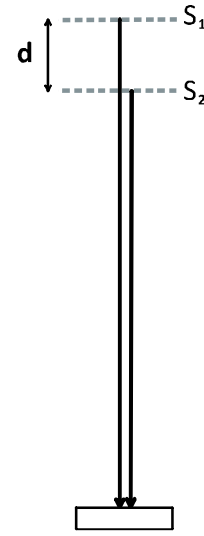


Figura 5 – Esquematização de como os feixes são tratados como fontes distintas S_1 e S_2 , separadas por uma distância d .

Até o momento, a fonte foi considerada monocromática e coerente, então tivemos $|\gamma(\tau)| = 1$. Para explorar mais a fundo como o grau de coerência está relacionado às propriedades da fonte, vamos considerar uma fonte *quasi* monocromática que muda abruptamente de fase cada vez que um período τ_0 é decorrido¹². As suas diferentes fases são aleatórias e representadas por uma função $\varphi(t)$. O período τ_0 é chamado de tempo de coerência. No caso dos gases, ele representa o tempo entre colisões das moléculas.

Nessa situação, podemos escrever

$$E(t) = E_0 e^{i\omega t} e^{i\varphi(t)}, \quad (1.13)$$

$$\Rightarrow \gamma(\tau) = \frac{\langle E(t)E^*(t+\tau) \rangle}{\langle |E|^2 \rangle} = e^{i\omega\tau} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \exp\{i[\varphi(t) - \varphi(t+\tau)]\} dt. \quad (1.14)$$

Se o tempo de coerência τ_0 for maior ou igual ao período $\tau = d/c$, em que c é a velocidade da luz, as fases de cada feixe serão diferentes a todo momento. Isso significa que $\Delta\varphi \equiv \varphi(t) - \varphi(t+\tau)$ terá um valor aleatório e a integral em (1.14) será zero¹³.

Se $\tau < \tau_0$, cada intervalo de τ_0 terá dois períodos com diferentes características. O primeiro período, de tamanho $\tau_0 - \tau$, terá as fases dos feixes iguais, e a integral em (1.14) será τ . O outro período, de tamanho τ , terá fases diferentes, que significa que a integral será zero.

¹² Uma aproximação que representa um átomo irradiando ao passo que ele colide com outros átomos. (Fowles (1989))

¹³ A média de infinitos valores aleatórios é zero.

Juntando as duas situações, temos

$$\gamma(\tau) = \begin{cases} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_0}\right) e^{i\omega\tau} & \tau < \tau_0 \\ 0 & \tau \geq \tau_0 \end{cases}, \quad (1.15)$$

$$\mathcal{V} = |\gamma(\tau)| = \begin{cases} 1 - \frac{\tau}{\tau_0} & \tau < \tau_0 \\ 0 & \tau \geq \tau_0 \end{cases}. \quad (1.16)$$

Dessa forma, para que dois feixes de uma mesma fonte sejam coerentes, a diferença de caminho d deles não pode ser maior que $l_c = c\tau_0$, o comprimento de coerência.

Esse valor também é válido para fontes que mudam de fase de maneira mais aleatória: se o período entre as mudanças de fase tiver um valor médio de $\langle\tau_0\rangle$, o comprimento de coerência será a média $\langle l_c \rangle$. Assim, se o comprimento d na Figura 5 for maior que l_c , um padrão de interferência não será visível. Além disso, a visibilidade será máxima quando $d = 0$.

Nenhuma fonte de luz é completamente monocromática, ela sempre terá uma banda de frequências, mesmo que seja muito pequena. Em um espectro, essa banda é representada pela largura de linha no espectro. Para entender como a largura de uma linha afeta a coerência de uma fonte, precisamos utilizar a transformada de Fourier. Ao aplicar a transformada numa função $f(t)$, ela fornece uma função $g(\omega)$ no domínio das frequências. Para recuperar a função $f(t)$, a transformada inversa deve ser aplicada a $g(\omega)$. A transformada e a sua inversa serão, então:

$$\begin{cases} g(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{i\omega t} dt \\ f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} g(\omega) e^{-i\omega t} d\omega \end{cases} \quad (1.17)$$

Em espectroscopia dispersiva, o espectro de uma fonte luminosa geralmente é visualizado a partir da sua densidade espectral, $G(\omega) = |g(\omega)|^2$.

Se uma fonte luminosa enviar um pulso¹⁴ de duração τ_0 na forma

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t \leq -\frac{\tau_0}{2} \\ e^{-i\omega_0 t} & -\frac{\tau_0}{2} < t < \frac{\tau_0}{2} \\ 0 & t \geq \frac{\tau_0}{2} \end{cases}, \quad (1.18)$$

sua transformada de Fourier e densidade espectral serão

$$g(\omega) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \frac{\sin [(\omega - \omega_0)\tau_0/2]}{\omega - \omega_0}; \quad (1.19)$$

¹⁴ Um pulso precisa de uma gama de frequências para descrevê-lo, então mesmo que a fonte seja monocromática, o sinal ao todo não o será.

$$G(\omega) = \frac{2 \sin^2 [(\omega - \omega_0)\tau_0/2]}{\pi (\omega - \omega_0)^2}. \quad (1.20)$$

Essas funções estão representadas nas Figuras 6 e 7. Os valores que foram escolhidos para ω_0 e τ_0 , nestas imagens, são de $\omega_0 = 2,75$ e $\tau_0 = 8$. É possível ver que $g(\omega)$ e $G(\omega)$ têm seu maior pico centrado em ω_0 . Para $G(\omega)$, este pico tem uma largura (entre os primeiros mínimos) de $\Delta\omega = 2\pi/\tau_0$. Como $\omega = 2\pi\nu$, ν sendo a frequência da fonte, podemos escrever esta largura como $\Delta\nu = 1/\tau_0$.

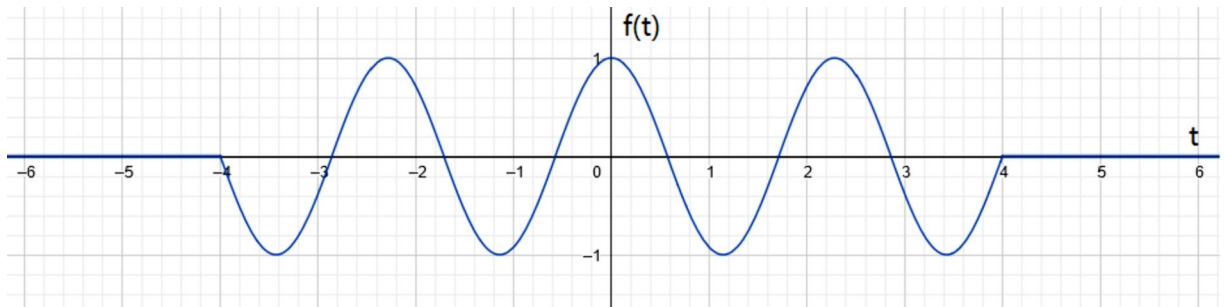


Figura 6 – Gráfico da parte real da função $f(t)$.

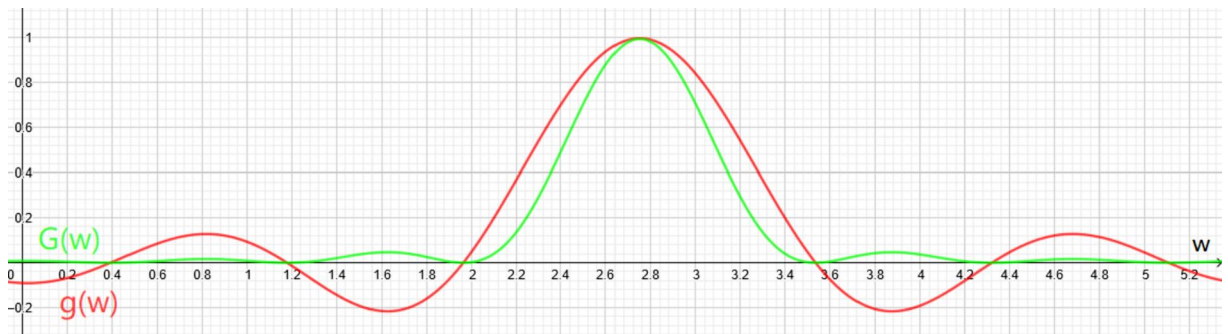


Figura 7 – As curvas normalizadas de $g(\omega)$ e $G(\omega)$, em vermelho e verde, respectivamente.

Se vários pulsos com períodos τ_0 forem detectados, os espectros serão os mesmos das Figuras 6 e 7. Se os pulsos tiverem períodos distintos de valor médio $\langle\tau_0\rangle$, a distribuição dos espectros será diferente, mas a largura do pico central ainda será $\Delta\nu \approx \langle\tau_0\rangle^{-1}$. Assim, o comprimento de coerência pode ser escrito como $l_c = c \langle\tau_0\rangle$ ou

$$l_c = \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta\lambda}, \quad (1.21)$$

em que $\bar{\lambda}$ é o comprimento de onda médio do sinal, e $\Delta\lambda$ a largura de linha na escala de λ .

Esta fórmula também é válida quando tratando de fontes com duas frequências próximas. Neste caso, $\Delta\lambda$ é a diferença entre os comprimentos de onda e l_c fornece o comprimento dos “batimentos” gerados no sinal.

Com uma ferramenta tão útil quanto a transformada de Fourier, podemos fazer medidas em um domínio e ainda conseguirmos descrevê-lo no outro. Dessa forma, técnicas de FTS foram desenvolvidas. Algumas serão descritas na próxima seção.

1.3 Espectroscopia de Transformada de Fourier

O campo de estudo de espectroscopia de transformada de Fourier (FTS) foi iniciado com Michelson em 1880, quando ele construiu seu interferômetro. Ele é mais famoso por ter utilizado seu interferômetro em conjunto com Morley para testar a existência do éter, em que ele teve de analisar as curvas de visibilidade manualmente (Bell (2012)). O experimento de Michelson-Morley é famoso por ter refutado a existência de um meio de propagação para a luz: o éter. O interferômetro que Michelson criou para este experimento perdurou, no entanto, e é utilizado para diferentes fins até hoje.

Ao utilizar um interferômetro de Michelson para espectroscopia de transformada de Fourier, a intensidade do padrão interferométrico é registrada em função do deslocamento de um dos espelhos. Esta relação gera um interferograma, cuja transformada de Fourier fornece o espectro da fonte utilizada. Já que os dados do interferograma são discretos, uma transformada de Fourier discreta (DFT) é utilizada, computacionalmente. Hoje, é possível utilizar até um celular para aplicar uma DFT a um conjunto de dados e encontrar seu espectro com facilidade.

Para realizar FTS com um interferômetro de Michelson, um dos espelhos é movimentado, alterando o comprimento do caminho d de um dos feixes. Nessa situação, como a distribuição medida está em função de d , a densidade espectral $G(\omega)$ passa a ser descrita em função do número de onda $k = \omega/c$: $G(\omega) \rightarrow X(k)$. A irradiância medida no detector irá variar com d e, para o espectro inteiro, pode ser descrita como

$$I(d) = \int_0^{\infty} [1 + \cos(kd)] X(k) dk = \frac{1}{2}I(0) + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} X(k)e^{ikd} dk, \quad (1.22)$$

em que $I(0)$ é a irradiância para $d = 0$.

A partir da expressão (1.22), é possível ver que $X(k)$ é a transformada de Fourier de uma função $W(d)$, dada por

$$W(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} X(k)e^{ikd} dk \Rightarrow W(d) = 2I(d) - I(0). \quad (1.23)$$

FTS é bastante utilizada para analisar fontes fracas e a absorção de gases no infravermelho (Fowles (1989)). Ela também tem vantagens sobre espectroscopia dispersiva, em especial as chamadas vantagens de Fellgett e de Jacquinot (Bell (2012)). A vantagem de Fellgett é a de que um interferômetro guarda a informação do espectro inteiro em cada período de uma varredura. Por outro lado, um espectrômetro dispersivo só tem a

informação do espectro em sua fenda. Hoje, essa vantagem já foi superada por detectores de imagem extensos, que coletam o espectro integral na fenda.

A resolução de uma grade dispersiva depende da largura das suas fendas de entrada e saída, ou da densidade de pixels de um detector matricial. No caso de um interferômetro, a fonte pode ser extensa sem uma grande limitação na sua resolução. Essa é a chamada vantagem de Jacquinot.

Utilizar um espectrômetro de transformada de Fourier em sala de aula, ao invés de um de dispersão, trará essa forma alternativa de analisar e observar um espectro. Com FTS à disposição, será possível explorar o espectro no domínio da defasagem d e da frequência espacial k .

||

2 Equipamento e programas

Este capítulo descreve a parte principal do projeto: a construção e o desenvolvimento do espectrômetro.

A proposta original era projetar e construir as peças necessárias, desenvolver um programa de medidas e uma interface de usuário antes de testar o equipamento em sala de aula. Infelizmente, não foi possível desenvolver a interface planejada, mas uma alternativa foi encontrada.

A [primeira seção](#) descreve o aparato experimental. Isso inclui a descrição do interferômetro presente nos laboratórios de ensino, de outras ferramentas adquiridas e das peças projetadas e impressas ao longo do projeto.

A [segunda seção](#) apresenta como a comunicação eletrônica entre as partes e o usuário é feita. Uma descrição de partes do programa principal também é dada.

Os desenhos em 3D e o programa desenvolvido estão disponíveis no GitHub: (<https://github.com/MarianaCasementM/TCC>).

2.1 Aparato Experimental

2.1.1 Interferômetro de Michelson

A peça principal no espectrômetro de transformada de Fourier é o interferômetro. Um interferômetro presente no laboratório 4 do IF-UnB foi modificado para o projeto. Ele é um interferômetro 25-700 da *Beck-Ealing* da década de 1960, que vem em um kit que inclui uma base para montar um interferômetro de Michelson ou de Fabry-Perot, além dos acessórios para isto. A montagem escolhida é a do interferômetro de Michelson, apresentada na Figura 8.

Uma esquematização enumerada, com a disposição dos elementos do interferômetro de Michelson é mostrada na Figura 9, e descrita a seguir:

1. Suporte que possibilita a inserção de filtros e outros elementos óticos.
2. Divisor de feixe (DF), com face posterior semi-refletora (em vermelho na Figura 9). Ele está disposto a 45° da direção de propagação do feixe.
3. Primeiro espelho plano (E1) montado em uma base móvel (veja item 7). Ele está a uma distância a da superfície semi-refletora do DF.
4. Vidro com mesma espessura que o DF, mas sem uma superfície semi-refletora.

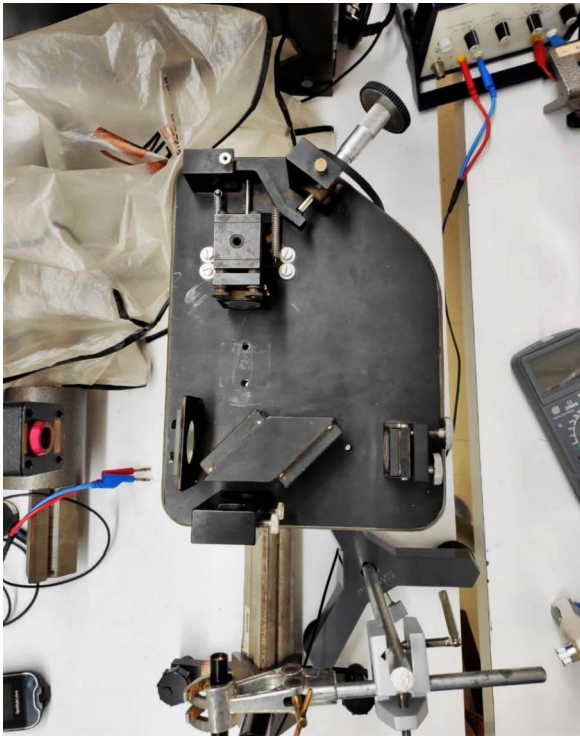


Figura 8 – Vista superior do interferômetro de Michelson a ser utilizado. A fonte de luz (na borda esquerda) utilizada é um laser de $HeNe$. O detector (na borda inferior) é um fotodiodo de silício.

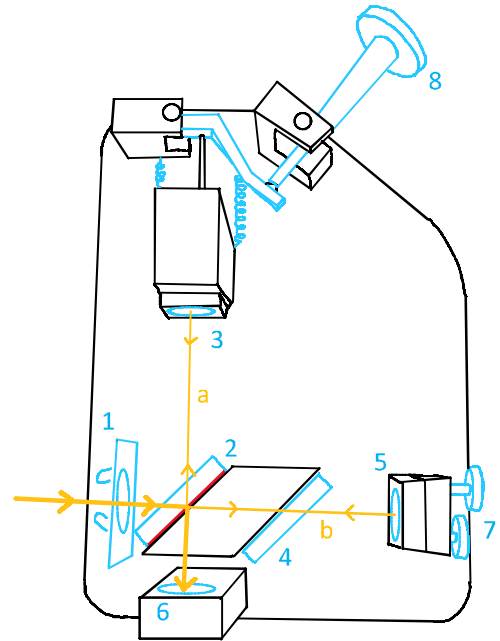


Figura 9 – Ilustração do interferômetro de Michelson, com os elementos principais enumerados e destacados em azul claro. O caminho óptico do feixe de luz está representado em amarelo, com setas indicando o seu sentido.

5. Segundo espelho plano (E2). Ele está a uma distância b da superfície semi-refletora.
6. Suporte para inserção de um tubo telescópico que pode ser usado para visualização do padrão de interferência.
7. Base de E2 com dois parafusos micrométricos para ajuste angular.
8. Sistema com molas, alavanca e micrômetro para transladar E1 horizontalmente e modificar a distância a .

Para fazer uma medição no interferômetro, uma fonte de luz é necessária. Ela deve ser posicionada à esquerda¹ do suporte. O feixe de luz emitido pela fonte atravessa o DF e atinge a superfície semi-refletora na sua face posterior. Assim, parte da intensidade do feixe é refletida para E1, enquanto a outra parte é transmitida e segue para E2.

Ao atravessar vidro, um meio material distinto do ar, a fase do feixe é modificada. É importante notar que o feixe inicial passa uma vez pelo primeiro vidro e que a parte

¹ De acordo com a orientação na Figura 9

refletida o atravessa novamente criando uma diferença de fase em relação ao feixe que segue para o segundo espelho. O **segundo vidro** existe justamente para corrigir essa diferença de fase.

Os feixes então atingem os espelhos e são completamente refletidos de volta à superfície semi-refletora. Quando isso ocorre, a parte que foi para **E1** atravessa o **DF** novamente². No outro ramo, a parte que seguiu para **E2** atravessa o segundo vidro de novo antes de ser refletida na superfície do DF. Isso significa que ambas as partes do feixe atravessam a mesma espessura de vidro e sofrem a mesma mudança de fase. Após refletir no DF, os dois feixes se propagam na direção do observador e criam um padrão de interferência que pode ser observado na posição do **suporte da ocular**.

Para que o padrão de interferência seja completamente construtivo, é necessário que as distâncias a e b sejam iguais³. É importante iniciar cada medida calibrando corretamente o equipamento e encontrando o ponto em que o padrão de interferência é construtivo. Isso é feito com o auxílio dos **micrômetros de ajuste** angular de **E2**. A inclinação do espelho é ajustada, mas a distância b praticamente não é modificada com isso. Esse movimento possibilita que os dois feixes sejam ajustados para que seus caminhos sejam sobrepostos e gerem um padrão de interferência detectável.

Por sua vez, o **micrômetro** acoplado a **E1** o translada horizontalmente, encurtando ou aumentando a distância a . Isso é feito com auxílio de uma alavanca e duas molas, que garantem que o espelho se mova somente nesta direção. Com esse movimento, é possível encontrar o ponto em que $a = b$ e o padrão de interferência é completamente construtivo.

Uma redução de 5:1 entre o micrômetro e o espelho é proporcionada pela alavanca. O micrômetro provê um deslocamento de 0,5 mm em uma de suas voltas, ou seja, um deslocamento de $\Delta a = 0,1$ mm no espelho. Ao modificar a distância a entre a superfície semi-refletora e **E1** por uma Δa , o caminho do feixe será proporcionalmente modificado em uma distância $2 \times \Delta a$. Para um laser de HeNe, cujo comprimento de onda é $\lambda = 632,8$ nm (**Rodrigues (2019)**), $2 \times \Delta a = 0,2$ mm corresponde a $\approx 316\lambda$.

Mesmo sendo a peça principal, acessórios adicionais são necessários para automatizar as medições feitas e facilitar a utilização do interferômetro para FTS. Eles serão descritos nas seções a seguir.

2.1.2 Outras peças

Ao realizar um experimento com o interferômetro de Michelson, os dois elementos principais que devem ser automatizados são o controle da movimentação do primeiro

² Na realidade, parte é refletida e parte é transmitida, mas somente consideramos a parte transmitida.

³ Ou difiram de um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda, caso a diferença entre a e b seja menor que o comprimento de coerência da luz.

espelho e a aquisição de dados. Um [motor de passo](#) e um [fotodetector](#) acoplados a um microcontrolador Arduino UNO foram as duas ferramentas escolhidas para isso.

Para que essas peças pudessem cumprir seu objetivo, suportes ajustáveis foram projetados para o motor e o detector. Outras peças também foram desenhadas: [alinhadores](#) para a fonte luminosa e [engrenagens](#) para o motor e o micrômetro. Todas foram projetadas em um modelador 3D, principalmente no programa *SketchUp 2017*, e então impressas em PLA (Poliácido láctico) por uma impressora *Creativity CR-10S Pro V2 3D Printer* presente no Laboratório de Fotobiorreatores na UnB.

Movimentação

Com um motor de passo (Figura 10) acoplado ao micrômetro que movimenta o primeiro espelho (E1) do [interferômetro de Michelson](#), é possível controlar a medição e eliminar a inconsistência do movimento quando ele é controlado manualmente. O motor de passo escolhido para isso foi o 28BYJ-48 - 5V *Stepper Motor*, fabricado pela *Kiatronics*, facilmente adquirido. Ele tem 4 fases, 5 vias e 4096 meios-passos⁴ por volta ([Bakker \(2019\)](#)). Seu eixo tem um diâmetro de 5mm e ele funciona com uma tensão de 5V ([Kiatronics \(S/D\)](#)). A Figura 11 mostra o diagrama esquemático da conexão elétrica interna do motor, com as vias que controlam cada uma de suas fases.

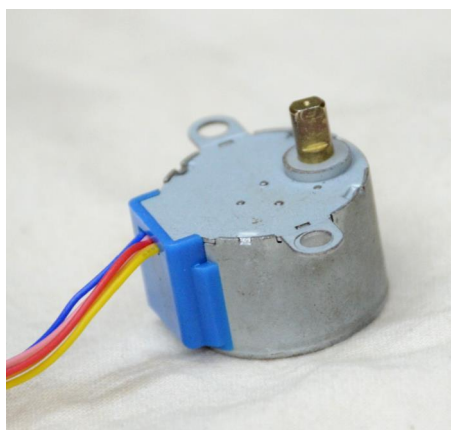


Figura 10 – Motor de passo 28BYJ-48 da *Kiatronics*.

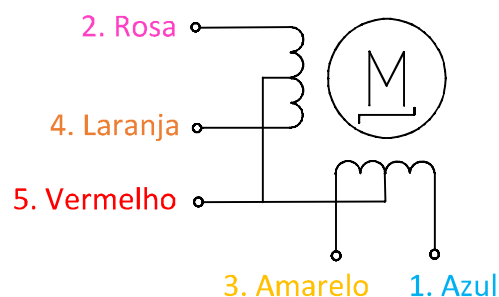


Figura 11 – Diagrama esquemático da disposição das vias do motor de passo. Adaptado de [Kiatronics \(S/D\)](#).

O motor é utilizado em conjunto com o Driver ULN2003 para Arduino da *Texas instruments* (Figura 12). O motor é acoplado ao driver pelas suas cinco vias, que têm um soquete de conexão ao lado direito do chip que pode ser visto na Figura 12. O chip do driver é composto por 7 pares de transistores Darlington NPN, dos quais somente 4

⁴ Um passo é visto como a ativação de uma das fases do motor. No nosso programa que controla o andar do motor, no entanto, nós trabalhamos com meios-passos. Isso significa que entre a ativação de uma fase e a próxima, temos um passo em que as duas fases são ativadas.

são utilizados e cuja esquematização está apresentada na Figura 13. Os 4 transistores que são utilizados estão conectados a 4 LEDs que acendem quando a respectiva bobina é ativada. Ele foi afixado em um pedaço de EVA para isolar a parte inferior do circuito⁵. Um microcontrolador Arduino UNO (Figura 14) pode ser conectado ao driver pelos quatro pinos à esquerda do chip. Estes pinos estão indicados como IN1, IN2, IN3 e IN4 na placa do driver. Além disso, o driver é alimentado pelos dois pinos em sua parte inferior, indicados por - e +.

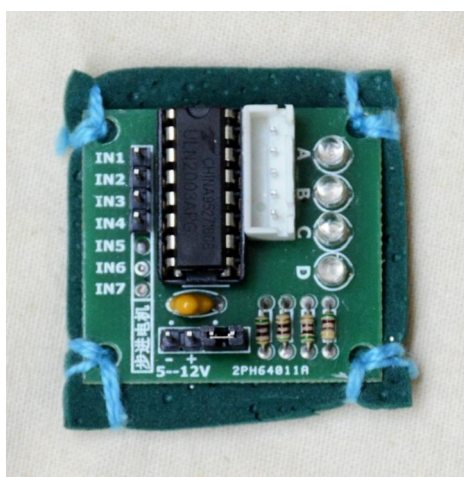


Figura 12 – Driver ULN2003 da *Texas instruments*. Ele está fixado em um pedaço de EVA para isolar a base⁵.

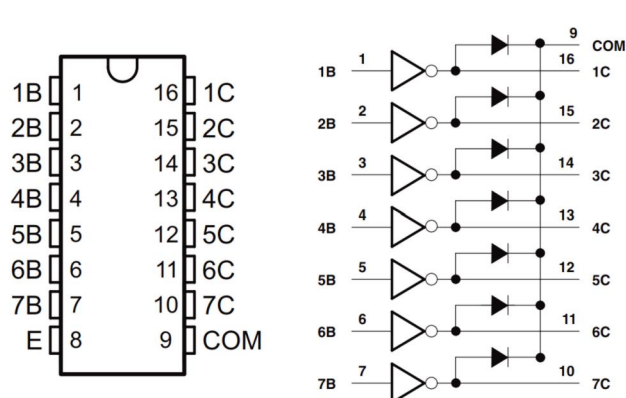


Figura 13 – Diagrama do chip no driver. À esquerda, uma ilustração legendada de uma visão superior. À direita, uma esquematização simplificada das componentes internas, também legendada. Diagramas adaptados de [Texas-Instruments \(S/D\)](#).

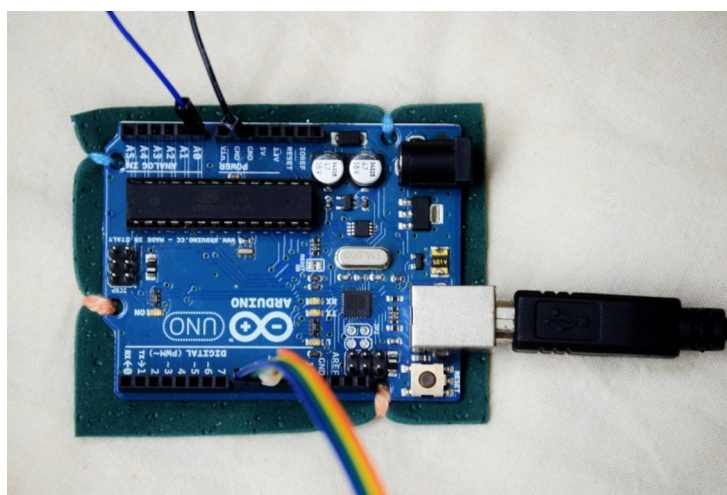


Figura 14 – Arduino UNO conectado a um computador pessoal, ao detector pelo pino A0, ao terra pelo GND e ao driver pelos pinos 8, 9, 10 e 11. Ele está fixado em um pedaço de EVA para isolar a base⁵.

⁵ O circuito é soldado em sua parte inferior, mas um curto circuito pode ser fechado se ele for colocado em cima de uma mesa metálica.

Cada fase do motor é ativada com um sinal enviado ao pino do driver correspondente. Para que o motor gire, as fases devem ser ativadas uma depois da outra. O Arduino foi programado para que a ordenação destes sinais esteja correta e o driver, ligado a uma fonte externa de 5 V, fornece a corrente necessária para ativar cada fase.

Um meio-passo do motor corresponderia a um deslocamento de $2\Delta a \approx 48,8 \text{ nm}$ ⁶ do feixe se o motor fosse acoplado diretamente ao micrômetro. Para uma fonte com um comprimento de onda presente na porção violeta do espectro ($\approx 400 \text{ nm}$), isso significaria um deslocamento de $\approx 12\%$ do comprimento de onda. Se uma medida da intensidade do padrão de interferência for feito a cada meio-passo, 8 dados seriam adquiridos para esse comprimento de onda inteiro.

Mesmo que isso seja uma resolução boa o suficiente para fazer uma medida, qualquer ruído que aparecer influenciaria bastante a medida. Além disso, para acoplar o motor diretamente ao micrômetro, que é móvel, seria necessário um suporte que fosse móvel também, dificultando a sua construção. Desse modo, um suporte diferente foi projetado para acoplar o motor ao micrômetro, com uma redução adicional para aumentar a resolução das medidas.

Suporte para o motor e engrenagens

O micrômetro do espelho móvel do interferômetro vem acoplado a um rolete de diâmetro maior (veja na Figura 8) para facilitar o manuseio delicado na sua movimentação, já que qualquer variação angular causa rápida mudança de vários comprimentos de onda. Para acoplar o motor ao micrômetro, surgiu a ideia de substituir este rolete por uma engrenagem, que seria movimentada por outra engrenagem acoplada diretamente ao eixo do motor.

De imediato, alguns problemas surgiram. Como o micrômetro se move, seria necessário movimentar o motor em conjunto, ou criar uma engrenagem longa o suficiente para o micrômetro deslizar por ela em todo o seu comprimento enquanto o micrômetro se movimenta. Além disso, o eixo da engrenagem do motor teria de ser ajustável para encaixar com o eixo do micrômetro e a redução provida pelas engrenagens teria que gerar uma boa resolução do equipamento. Outra decisão que teve de ser feita era se o suporte do motor seria acoplado ao interferômetro ou se estaria apoiado na mesma bancada que ele.

As escolhas feitas foram: ter uma engrenagem longa no eixo do motor, para que ele não precisasse ser movimentado, ajustar o alinhamento angular do eixo a partir de uma sistema de três pontas e apoiar o suporte na base do próprio interferômetro. A redução entre as engrenagens foi de 4:1, com a engrenagem do motor tendo 20 dentes

⁶ Baseado nas reduções estimadas entre o motor e o espelho, apresentados ao final da seção 2.1.1. Ao calibrar o equipamento, isso foi confirmado.

e um diâmetro de 10 mm, enquanto a engrenagem do micrômetro tem 80 dentes e um diâmetro de 40 mm.

Ambas as engrenagens foram desenhadas utilizando o modelador *FreeCAD*, que contém funções que facilitam o desenho de engrenagens. Elas podem ser vistas na Figura 15.

O rolete do micrômetro, preso por um parafuso, pode ser facilmente substituído pela engrenagem, com um desenho bastante simples. Ela tem um corte circular que encaixa no corpo do micrômetro e um furo para o parafuso.

A engrenagem do motor requer um desenho mais detalhado. Ele tem uma base maior que a sua parte dentada, para que seja preso de forma mais robusta ao eixo do motor. A parte interna é recortada para que encaixe bem no eixo chanfrado do motor, com dois furos para parafusos 3M que o pinçam.

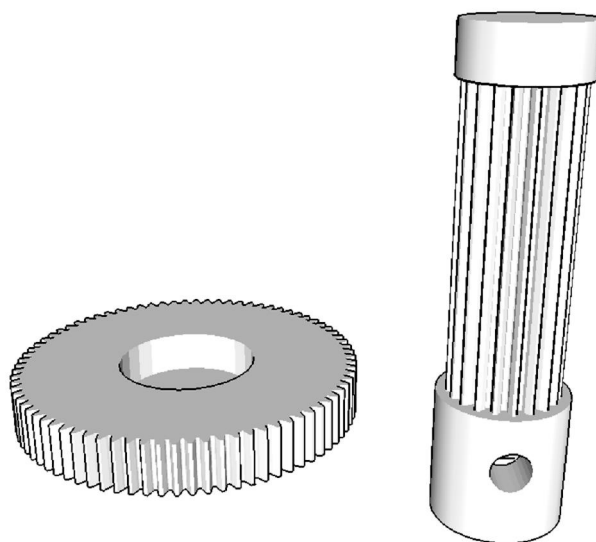


Figura 15 – Desenho 3D das engrenagens. À esquerda está a engrenagem do micrômetro e, à direita, a engrenagem do motor.

A base inteira do motor consiste de 5 diferentes peças, além de 10 parafusos Allen 3M, 8 porcas⁷ para os parafusos e um pedaço de EVA. Três das peças (Figura 16) se juntam por meio de dois parafusos para criar uma base que encaixe na base do interferômetro. Um parafuso pode ser apertado para fixar o conjunto das peças à base do interferômetro, mas se estiver solto, a base impressa pode deslizar sobre o interferômetro. Isso garante um fácil ajuste da posição horizontal do motor.

A quarta peça (Figura 17) se encaixa na parte chanfrada da base impressa. Ela pode deslizar sobre a base, regulando a altura do motor, e pode ser fixada nela com dois

⁷ Que foram utilizadas para garantir que a maior parte dos parafusos não escorregasse nos furos das peças impressas. Elas foram coladas às peças de PLA com cola instantânea.

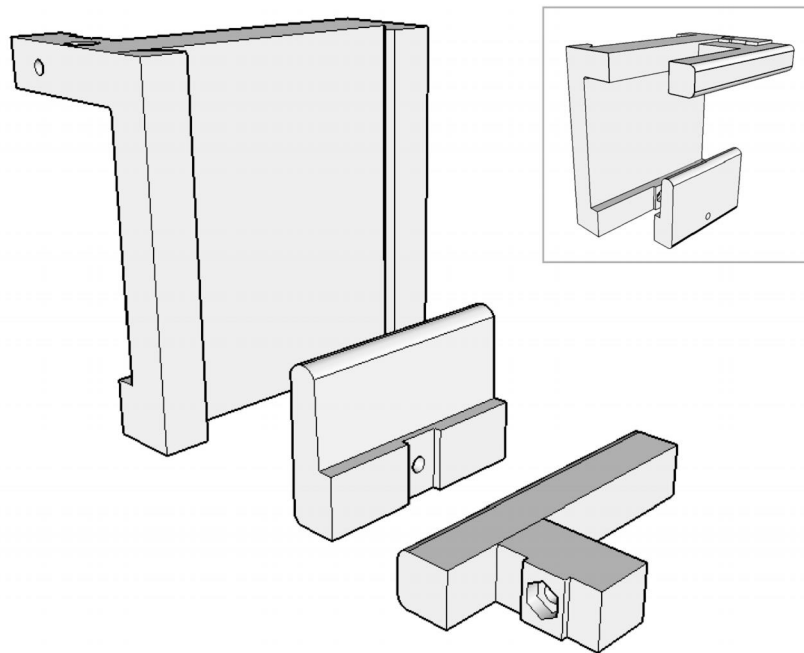


Figura 16 – Desenho 3D das três peças que compõem a base do suporte do motor. No canto superior direito, a vista é da parte traseira das peças, com elas posicionadas na orientação certa para serem unidas em uma só.

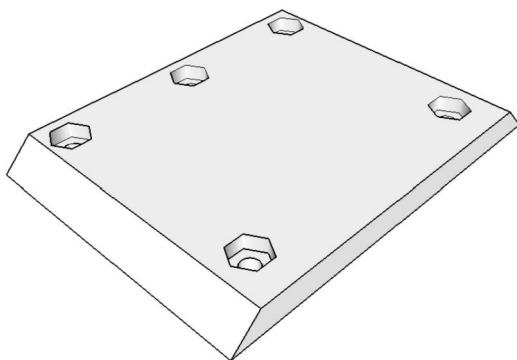


Figura 17 – Quarta peça do suporte do motor. Ela desliza verticalmente sobre a maior peça que forma a base do suporte (Figura 16).

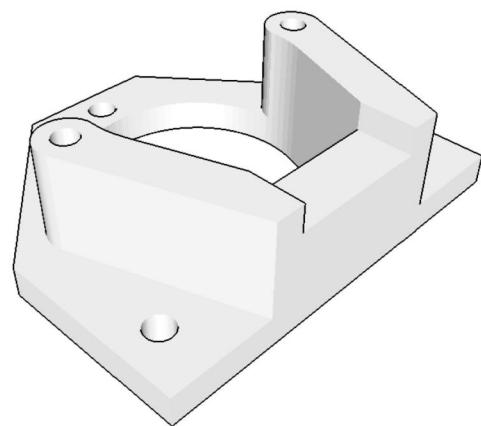


Figura 18 – Quinta peça do suporte do motor. O motor se encaixa nela e ela é parafusada à quarta peça (Figura 17).

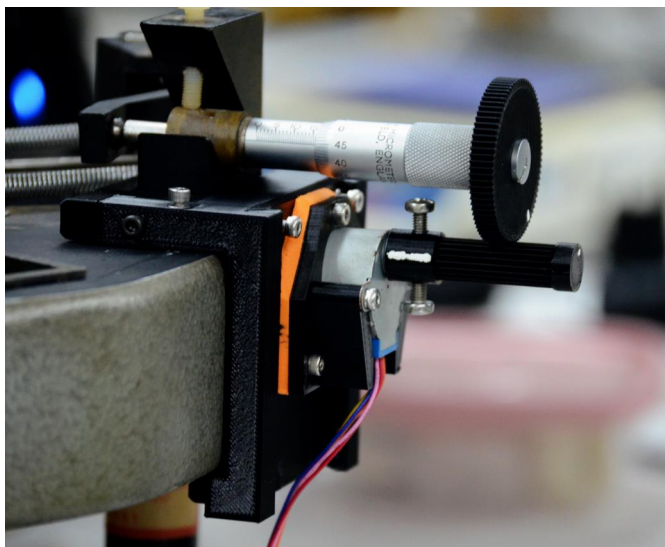


Figura 19 – Suporte para o motor, motor, sua engrenagem e a engrenagem montados no interferômetro. As engrenagens já foram alinhadas e o equipamento está pronto para fazer uma medida.

parafusos. A quinta peça (Figura 18) se encaixa na quarta, com um pedaço de EVA entre elas. Ela é mais detalhada e foi projetada para que o motor se encaixe bem nela, preso por dois parafusos. Ela tem três pontos pelos quais ela está presa à quarta peça. Parafusos nestes três pontos podem ser apertados ou soltos para que o eixo do motor seja ajustado ao do micrômetro com auxílio da EVA, que pode ser comprimida, mas tende a expandir. O motor, as engrenagens e o suporte já impressos e prontos para uso estão apresentados na Figura 19.

Detecção

Um fotodiodo de silício *silicon-receiver module* da PHYWE disponível no laboratório foi utilizado para a detecção do sinal. O fotodiodo é posicionado para detectar a intensidade do padrão de interferência gerado (Figura 20) e seu sinal é amplificado. O amplificador utilizado foi o Amplificador Universal 13626.3 da PHYWE (Figura 21), no modo de baixa impedância ($10k\Omega$), que gera uma tensão proporcional à intensidade luminosa detectada. O sinal é então lido pelo Arduino em uma de suas 6 entradas analógicas.

O fotodiodo de silício foi escolhido por ter uma faixa de detecção que engloba a parte visível do espectro (Figura 22). Outra possibilidade de detector, também presente nos laboratórios de ensino, seria o de germânio. No entanto, ele tem um *bandgap*⁸ menor que o silício e, portanto, é mais sensível ao infravermelho, mas com sensibilidade bem menor na parte visível e UV do espectro.

⁸ Banda proibida, em português.



Figura 20 – Fotodiodo de silício 41736.5E da PHYWE.

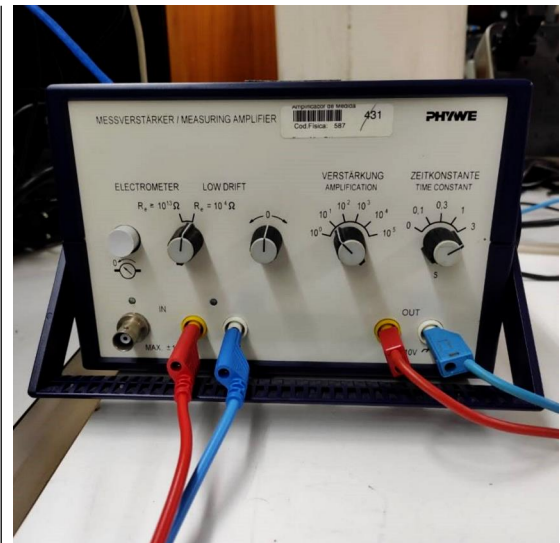


Figura 21 – Amplificador universal 13626.93 da PHYWE.

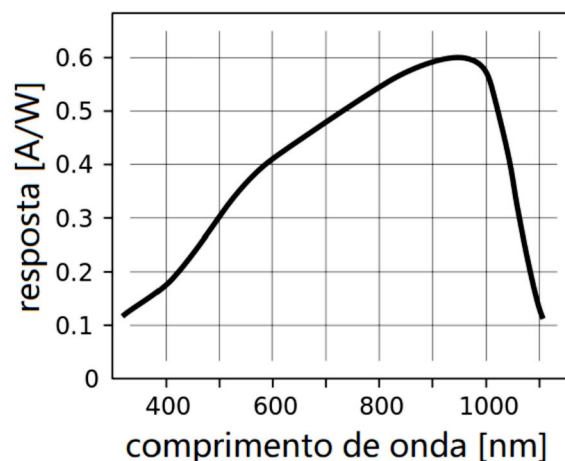


Figura 22 – Curva típica de resposta de um fotodiodo de silício em função de seu comprimento de onda. Figura adaptada de [KaiMartin \(2009\)](#).

Suporte para o detector

Para posicionar o detector adequadamente, um suporte foi projetado para ele. Ele tem quatro componentes: o tubo telescópico incluído no kit do interferômetro e mais três peças impressas. O tubo telescópico tem uma lente convergente em uma ponta, cujo foco se encontra na outra ponta, onde o fotodiodo deve ser posicionado. Ele foi escolhido justamente por focalizar a luz.

As outras três peças servem para posicionar o detector corretamente no foco do tubo. A primeira se encaixa no tubo telescópico e tem um chanfro para que a segunda peça possa se movimentar dentro dela. A segunda peça é fixada em sua posição por um parafuso preso à primeira peça, e também tem uma parte chanfrada para que a terceira peça possa deslizar dentro dela. A parte chanfrada da terceira e da segunda peça são perpendiculares

entre si para que o detector possa ser movimentado no plano de detecção. A terceira peça também pode ser fixada por um parafuso preso à segunda peça. Ao todo, 5 parafusos Allen 3M e 4 porcas foram utilizadas.

Cada peça tem um furo para permitir a inserção e movimentação do detector, que é preso à terceira peça por um parafuso. A sua inserção nas peças controla o posicionamento do fotodiodo na terceira dimensão, possibilitando encontrar o foco do sinal advindo do interferômetro. As peças são apresentadas na Figura 23, com o equipamento posicionado para uso na Figura 24.

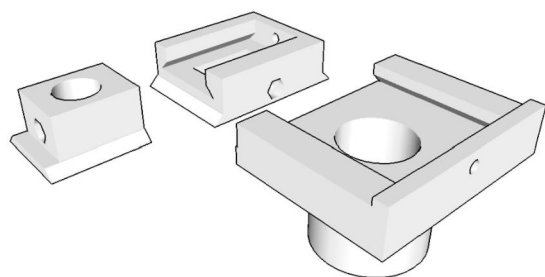


Figura 23 – Peças que formam a base do detector.

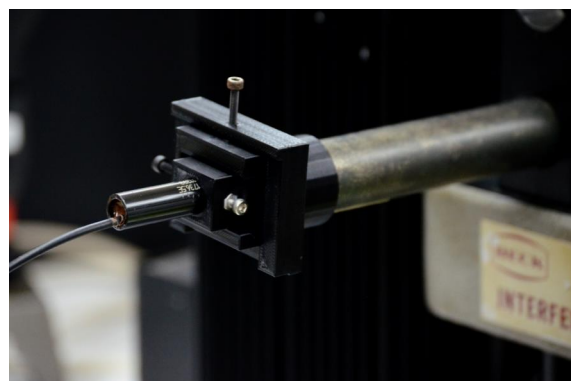


Figura 24 – Fotodiodo, seu suporte e telescópio montados no interferômetro, pronto para realizar medidas.

Alinhadores

Além das peças mencionadas acima, mais algumas peças foram projetadas para garantir o alinhamento do feixe ao longo de seu caminho no interferômetro. Isso foi feito principalmente para garantir o posicionamento da fonte luminosa e a sobreposição dos feixes para que houvesse interferência.

O interferômetro tem um suporte para filtros e outros elementos óticos, além de alguns furos (que podem ser vistos na Figura 8) para elementos óticos ao longo do caminho dos feixes separados. Assim, os alinhadores foram projetados para serem encaixados nestes locais.

Os alinhadores são compostos por duas partes: uma base que se encaixa no suporte ou nos furos do interferômetro e discos que se encaixam nessas bases e permitem a passagem do feixe. Os discos têm furos diferentes e podem ser trocados dependendo da situação. Existem três tipos de disco: um com um furo centrado de 10 mm de diâmetro, um com um furo centrado de 5 mm de diâmetro e um com um furo deslocado 1 mm do centro com 5 mm de diâmetro. Os discos com o furo deslocado também têm linhas de guia para que a sua posição em relação ao centro seja identificada. Estas linhas de guia

também estão presentes nas bases dos alinhadores. As bases e os discos com diferentes furos estão apresentados na Figura 25. Na Figura 26, um dos alinhadores está inserido em um dos furos da base do interferômetro, no caminho do segundo feixe.



Figura 25 – Alinhadores em suas peças separadas. Da esquerda para a direita: base montada com disco de furo desalinhado, base sem disco, base do suporte em frente à fonte sem disco, discos de diferentes furos.

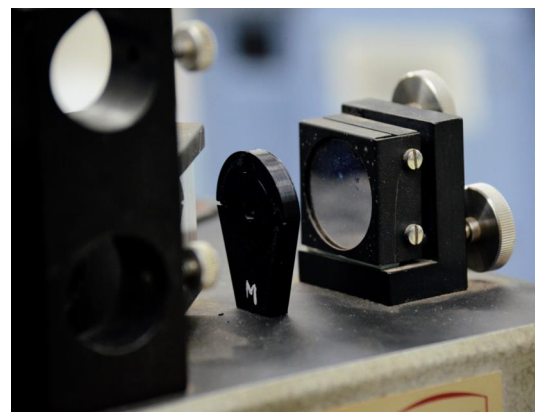


Figura 26 – Alinhador posicionado na frente do segundo espelho, inserido no furo da base do interferômetro.

2.2 Comunicação eletrônica

A comunicação completa entre cada uma das partes eletrônicas é uma parte fundamental do projeto. Para isso, o Arduino é utilizado e controlado em tempo real por um computador externo.

O programa escrito para o controle e a comunicação do equipamento está apresentado no anexo A. Seu objetivo principal é permitir que o usuário controle o motor e a aquisição de dados. Para isso, comandos devem ser enviados para o Arduino e os dados devem ser recebidos e guardados em um documento. Para que essa comunicação ocorresse de uma forma efetiva, a biblioteca LVP foi utilizada.

LVP é a sigla para *Labels and Values Protocol*, ou Protocolo de Rótulos e Valores em português. Esta é uma biblioteca desenvolvida pelo Rodrigo Barbosa Nunes e cedida pela Dra. Gabriela Pôssa para a utilização nesse projeto. A biblioteca permite uma comunicação com a porta serial do Arduino, admitindo a chamada de funções e a modificação de parâmetros do programa.

Para salvar os dados, o *freeware* Terminal disponível em [Br@y++ \(2018\)](#) foi utilizado. Ele é capaz de servir como a porta serial do Arduino e salvar tudo que é escrito nela em um arquivo de texto.

Com essas duas ferramentas em mente, foi possível desenvolver o programa e facilitar toda forma de comunicação com o equipamento. Nesta seção, as [ferramentas](#) serão

descritas em um pouco mais de detalhe, além das possibilidades de controle do equipamento.

Terminal e LVP

A Figura 27 mostra a interface gráfica do Terminal. O Terminal permite escolher uma porta de comunicação (COM Port) e conectar-se a ela (Connect). É importante garantir que a Baud rate corresponde àquela estabelecida no programa (no caso 9600) antes de iniciar a conexão.

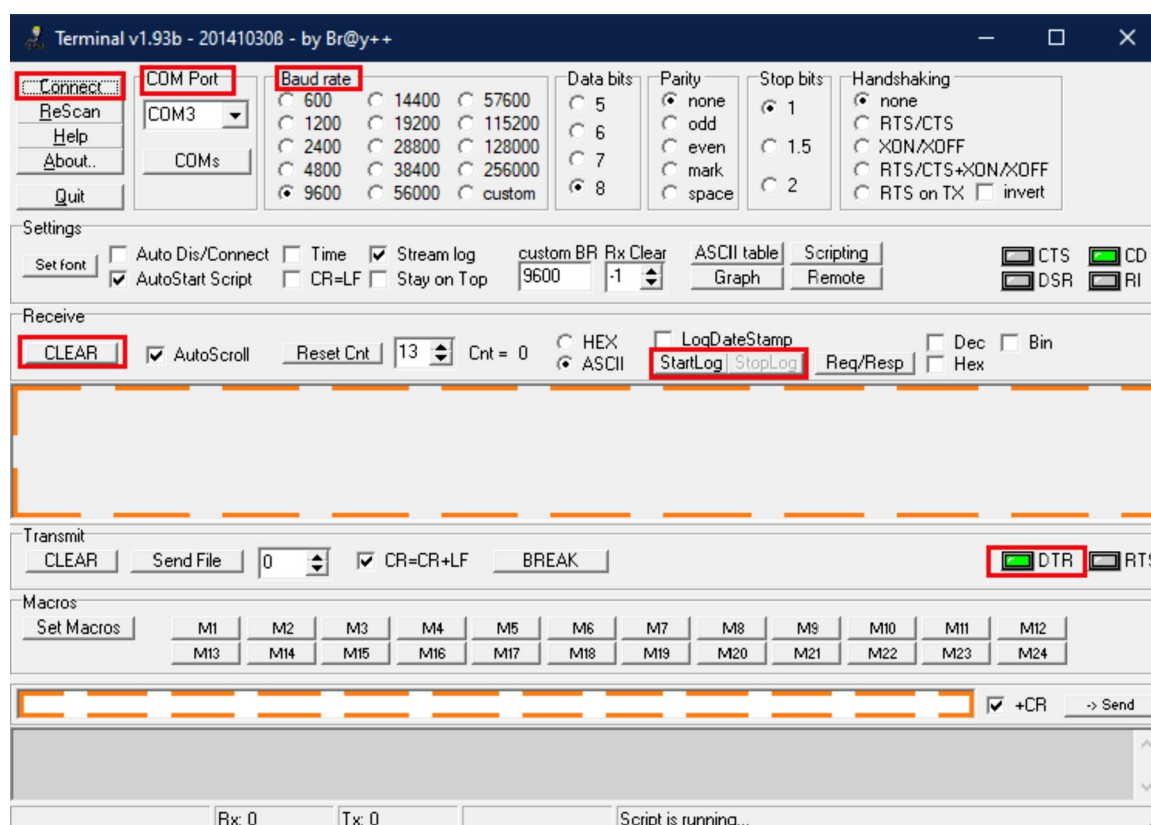


Figura 27 – Interface gráfica do programa Terminal. Os elementos relevantes estão indicados por retângulos coloridos em vermelho e laranja tracejado.

Ao se conectar com a porta serial, comandos podem ser enviados pela barra de comando, destacada por um retângulo tracejado laranja na parte inferior da Figura 27. A conexão pode ser verificada ao pressionar um botão rotulado DTR⁹.

As informações e os dados são impressos no corpo principal do Terminal, tracejado em laranja no centro da Figura 27. Se necessário, todas as informações impressas podem ser excluídas ao apertar o botão CLEAR.

Quando o usuário quiser iniciar o registro dos dados em um arquivo, basta clicar em StartLog. Isso permite o usuário criar um arquivo de texto num diretório de sua escolha e iniciar a escrita no arquivo dos dados que forem chegando no Terminal. O arquivo é

⁹ *Data Terminal Ready* em inglês, ou Terminal Pronto, em português.

fechado e a escrita encerrada ao pressionar `StopLog`. Após a coleta de dados, o arquivo pode ser acessado facilmente para analisar os dados da maneira desejada.

A biblioteca LVP auxilia o usuário a enviar comandos ao Arduino e modificar parâmetros sem ter de recompilar o programa. Ela exige uma inicialização no `void setup()`¹⁰ do programa principal e de duas funções adicionais (linhas 255-280 do código). Uma dessas funções, `void initializeLVP()`, contém as informações de quais parâmetros podem ser modificados e das funções que podem ser chamadas no Terminal. A outra, `void serialEvent()`, verifica se tem um comando sendo enviado.

Ao inicializar o LVP em `void setup()`, ele já inicializa a porta serial¹¹ e o programa imprime a mensagem “Setup ok” na porta para indicar que a inicialização foi concluída. Finalmente, o comando `quiet_connect`¹² deve ser enviado pela barra de comando para que o Arduino seja controlado pelo Terminal.

Para modificar uma variável pelo Terminal, o comando `set(var,*)` é utilizado. Deve-se escrever, no lugar de `var`, o nome da variável a ser modificada, e no lugar de `*` o valor novo dela. Para chamar uma função, seu nome pode ser chamado diretamente na barra de comando do Terminal. Uma variável ou função só pode ser modificada ou chamada quando uma função não estiver rodando, já que o LVP só processa os comandos enviados enquanto estiver no ambiente `void loop()`. Isso pode ser um problema se o usuário quiser interromper uma função antes dela terminar de rodar, mas uma solução foi encontrada e será descrita adiante.

Com essas ferramentas, o programa desenvolvido para o equipamento é flexível em relação a tudo que o usuário pode querer fazer com o espectrômetro. As opções de comandos estão descritos a seguir.

Controle do motor

É essencial que o usuário consiga controlar o motor e a coleta de dados. Para isso, o programa deve permitir que o usuário controle a direção e a velocidade de movimento do motor, além de quando ele quer que ele pare ou comece a rodar. Ainda mais, ele deve ser capaz de controlar quantos dados são adquiridos, de que maneira e com que frequência.

Para o controle do motor, o usuário é capaz de modificar a direção de rotação do motor com um parâmetro chamado `dir`. Ele aceita dois valores: 0 ou 1. Se seu valor for 0, o micrômetro gira no sentido horário, empurrando a alavanca conectada a `E1`. Se

¹⁰ Um dos ambientes obrigatórios de todo programa para Arduino. O outro é `void loop()` e ambos devem ser escritos depois de todas as outras funções.

¹¹ Geralmente feito com o comando `Serial.begin(baud_rate)` no `void setup()` de um programa, indicando o *baud rate* escolhido.

¹² O comando `manual_connect` também pode ser utilizado, mas ele imprime mensagens de confirmação toda vez que uma variável é modificada ou uma função é chamada. Isso tem suas vantagens, mas pode encher a porta serial de informações desnecessárias.

o seu valor for 1, o contrário ocorre. Se, por acaso, um valor diferente de 0 ou 1 for inserido uma mensagem de erro aparece e o motor não anda. A direção também pode ser invertida chamando a função `invert` (`void inv_dir()` nas linhas 244-252 do programa) no terminal.

O motor pode ser movimentado na direção indicada por `dir` por uma quantidade de meio-passos do motor ao chamar a função `andar`. O valor de meio-passos é indicado pela variável `and`. A velocidade do motor pode ser controlada pela variável `vel`, que indica quantos microsegundos devem se passar entre cada meio-passo do motor. Assim, quanto maior o valor, mais baixa será a velocidade real do motor. O valor de `vel` não pode ser menor que 570, senão o motor acaba travando.

Para parar o motor, a variável `stop` pode ser chamada. Como mencionado antes, o programa não é capaz de reconhecer um comando enquanto uma função está rodando. Assim, se o motor estivesse andando devido à função `andar`, o usuário não conseguiria parar o motor antes dele ter andado todos os passos indicados anteriormente, a não ser que ele desconectasse o Arduino. Para resolver esse problema, uma nova variável foi criada: `oq`, uma abreviação de “o que fazer”. Com ela, ao chamar a função `andar` (`void andar()` nas linhas 235-241 do programa) o motor não fica preso em uma função, mas a variável `oq` recebe um novo valor e o programa volta ao ambiente `void loop()`. Quando isso ocorre, o motor anda por conta de uma condição do tipo `if` centrada na variável `oq` (linhas 310-336 do programa). Dentro dessa condição, outra função chamada `void passo()` (linhas 40-97 do código) faz com que o motor ande um meio-passo e volte ao `void loop()`. A condição continua sendo aceita e o motor continua andando até o número de meio-passos ser atingido, quando `oq` é modificada de valor. Assim, o programa está sempre voltando para o ambiente `void loop()` e é capaz de perceber quando uma variável é modificada, ou a função `stop` é chamada.

A variável `oq` pode ser modificada por outras funções do programa, desencadeando outras condições e funções sem perder a comunicação com o Terminal. A utilização dessa variável exige mais linhas de código e faz o programa demorar mais tempo para rodar, mas a diferença não é considerável e o usuário é capaz de interromper um processo a qualquer momento. A variável pode ser modificada diretamente pelo Terminal, ou ao chamar uma função específica.

Aquisição de dados

O sinal do detector amplificado e a tensão gerada, proporcional a esse sinal, é lida por um conversor analógico-digital do Arduino e enviada para a porta serial dele. As medidas são feitas com o motor estacionário, com a possibilidade do usuário escolher a sua frequência. Isso é feito modificando o valor da variável `dist`, que indica a quantos meio-passos de distância uma medida deve estar da outra. Sugerimos utilizar o valor de

1 para que a resolução das medidas seja maior.

É possível tirar uma média do sinal recebido, fazendo vários registros de sinal seguidos, calculando sua média e enviando ela para a porta serial. Isso pode reduzir o ruído dos dados coletados. Quantos registros são feitos antes de tirar uma média é controlado pela variável `m`. Se uma média não for desejada, o valor da variável pode ser definido como 1. O tempo de aquisição dos dados é mais influenciado por esta variável, mesmo que pouco, e não é necessário estabelecer um tempo de espera entre os dados para que o motor não trave se `m` for acima de 20.

Além disso, a variável `dtot` indica quantos dados serão registrados no total. Esta variável, junto com `dist`, acaba indicando a distância que o micrômetro irá percorrer durante a coleta de dados. O valor `dist×dtot` indica quantos meio-passos serão dados.

A função que inicia a coleta de dados é chamada `medida`. Ela modifica o valor de `oq` para que a condição das linhas 295-308 do programa seja satisfeita. Quando isso ocorre, o motor anda e os dados são coletados e impressos no Terminal, que salva eles em um arquivo de texto.

Outras funções chamáveis são `teste` e `print`. A função `teste` rapidamente coleta 50 dados para que o usuário possa verificar se tudo está funcionando bem antes de fazer uma medida longa. A função `print` imprime uma lista das funções chamáveis e das variáveis editáveis com seus valores atuais para que o usuário possa verificar seus nomes e valores.

|||

3 Testes e perspectivas futuras

Vários testes foram feitos para verificar o funcionamento do equipamento. Os **primeiros testes** foram feitos com um laser de HeNe. Como o interferograma dele é simples e o seu comprimento de onda bem-conhecido, é possível **calibrar** o equipamento e identificar inconsistências no espectro com facilidade.

Além do laser, o equipamento foi testado com três fontes **policromáticas**: duas lâmpadas de mercúrio (Hg) de média pressão e uma lâmpada **incandescente**. As lâmpadas de Hg eram da **PHYWE** - modelo 08147.00 - e da **PASCO** - modelo OS-9286A.

As análises de todos os dados foram feitas com auxílio do programa QtiPlot, que tem uma forma de calcular facilmente a DFT de um conjunto de dados.

Para fazer os testes, cada fonte luminosa era posicionada para que a luz passasse pelos alinhadores e criasse um padrão de interferência na ocular. Este alinhamento inicial era feito manualmente, ajustando ambos os espelhos, a fonte e os alinhadores até que todo o equipamento estivesse nas posições ideais. Para as fontes policromáticas, a posição de igual comprimento dos 2 braços do interferômetro era identificada para que as medidas fossem feitas em torno dela.

Após o alinhamento, o detector era posicionado em seu suporte na ocular. Para encontrar o ponto exato do foco, o sinal recebido pelo detector era lido na saída do amplificador com um multímetro (Figura 28). O espelho móvel era deslocado para um máximo no padrão interferométrico e o detector era movimentado até encontrar o ponto em que estivesse registrando o maior valor de tensão. Para garantir que as oscilações do sinal eram perceptíveis, o espelho era deslocado brevemente. O sinal registrado no multímetro também ajudava no momento de ajustar o ganho do amplificador de forma a não exceder 5V, que é a tensão máxima lida pelo Arduino.

Depois de garantir o posicionamento do detector, a posição do motor era ajustada. A engrenagem do motor deve ser empurrada levemente contra a engrenagem do micrômetro e o eixo dela alinhado.

A saída do sinal do amplificador era fornecida para a entrada analógica A0 do Arduino, enquanto as saídas digitais 8, 9, 10 e 11 do Arduino foram conectadas ao driver do motor (Figura 14). O Arduino era conectado a um computador externo pela porta USB e o programa enviado ao microcontrolador.

Após abrir o Terminal (Figura 27) e iniciar a comunicação com o Arduino, a função **teste** era chamada para verificar se mais algum ajuste do equipamento era necessário. Qualquer ajuste de variáveis era feito nesse momento e o motor era levado ao ponto de

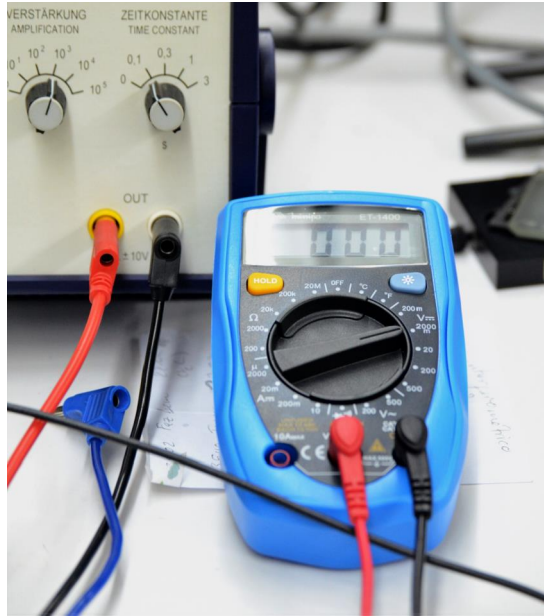


Figura 28 – Multímetro conectado à saída do amplificador.

partida desejado para a aquisição de dados com a função `andar`. Com tudo pronto para a medição, a saída do Terminal era esvaziada com o botão `CLEAR` e um arquivo era criado com `StartLog`. Esvaziar a saída do terminal antes de abrir um arquivo e iniciar uma medida garante que as informações contidas no arquivo serão referentes somente à coleta de dados, facilitando a leitura ao acessá-los no QtiPlot posteriormente.

O arquivo de dados contém informações sobre a medição, como a quantidade de dados coletados, quantos dados foram registrados antes de tirar uma média deles, a distância em meio-passos entre os dados, a direção do motor e o tempo total da medida. Ao terminar a medida, o arquivo é fechado manualmente no Terminal ao pressionar `StopLog`.

3.1 Laser

Para os primeiros testes, um laser de Hélio-Neônio vermelho M1508-0 da PHYWE foi usado como uma fonte (Figura 29). Ele é monocromático, com um comprimento de onda de $\lambda_{HeNe} = 632,8$ nm, então se espera que seu interferograma tenha um formato senoidal com o mesmo λ_{HeNe} . Ao aplicar uma transformada de Fourier discreta (DFT) aos dados, o espectro encontrado deve ter um pico distinto em torno de $1,58 \cdot 10^4$ cm^{-1} .

Os primeiros testes feitos já mostraram alguns problemas com o equipamento. O eixo da engrenagem do motor não estava alinhada com a do micrômetro, e ela continuava se soltando quando ajustada. A resposta foi modificar o desenho da peça e imprimí-la novamente para que ela se acomodasse melhor no eixo chanfrado do motor.



Figura 29 – Laser de HeNe da PHYWE pronto para ser utilizado como fonte em uma medida.

Segundo teste

Após substituir a engrenagem do motor, a segunda leva de testes foi feita. Nela, 5000 dados foram coletados, um a cada meio-passo do motor. Em uma das medidas, uma média de 10 dados foi feita para cada registro (Figura 30) e em outra, uma média de 100 dados foi feita (Figura 31). Os valores nos eixos dos gráficos ainda estão nas unidades arbitrárias que representam o número de meio-passos percorridos pelo motor e a intensidade do sinal registrado pelo Arduino.

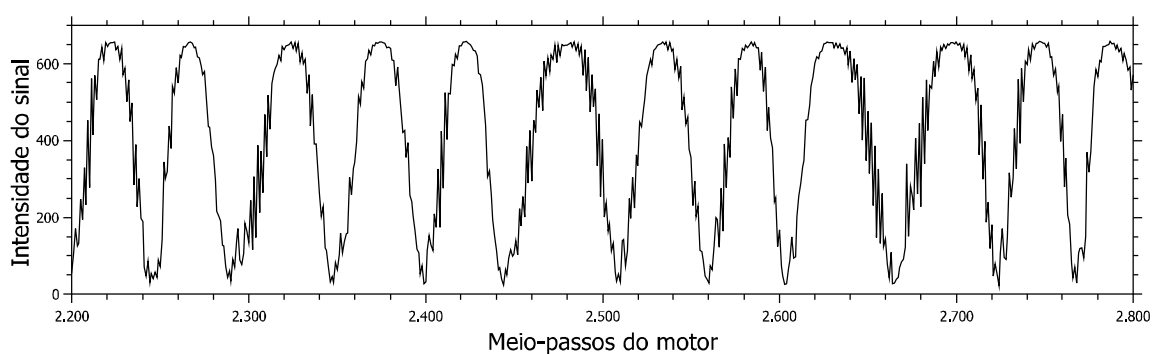


Figura 30 – Trecho do interferograma coletado durante a segunda rodada de testes. O valor de cada ponto é a média de 10 registros de sinal.

De imediato, é possível ver pelas Figuras 30 e 31 que tirando uma média de mais registros prove um sinal menos ruidoso. Além disso, o interferograma não tem um formato senoidal, mas sim cristas arredondadas e vales estreitos. Outra característica do sinal são uns picos mais largos que outros, aparecendo a aproximadamente cada 3 comprimentos

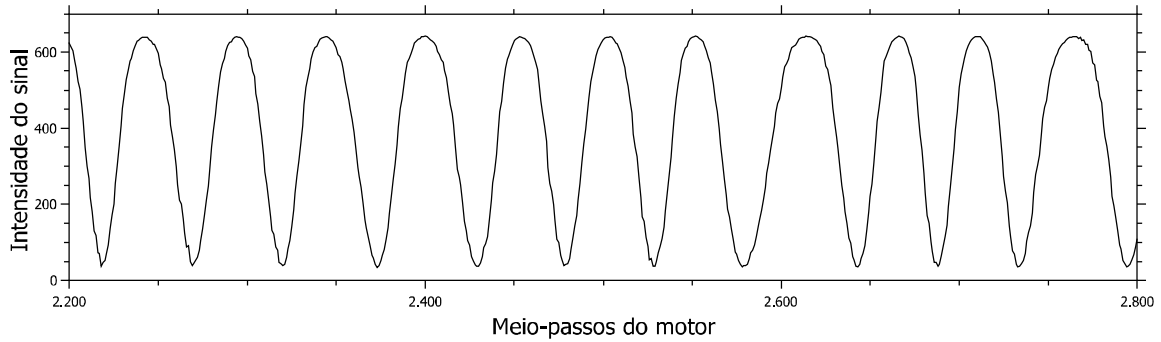


Figura 31 – Trecho do interferograma coletado durante a segunda rodada de testes. O valor de cada ponto é a média de 100 registros de sinal.

de onda¹.

É difícil calibrar o equipamento e ajustar os valores dos dados com um sinal que possui essas características. Assim, a análise feita nesta etapa não se utilizou dos valores reais dos dados.

Ao aplicar uma DFT ao sinal com uma média da 100 registros, o espectro encontrado também mostrou ser inesperado. Com uma fonte monocromática, o esperado é um pico só, representando o inverso do comprimento de onda do sinal. No entanto, o que é observado na Figura 32 é um pico principal rodeado por muitos outros. Existem pelo menos duas famílias de picos, assinalados pelas letras **a** (vermelho) e **b** (ciano). Estas famílias têm um grupo de picos principal cada, indicados pelo número 1, que são rodeados por grupos satélites, indicados por números mais altos. Cada um desses grupos de picos têm pelo menos 5 picos: um central e mais 4 satélites, assinalados somente para o grupo 1a.

O pico 1a do espectro se encontra em torno do ponto $0,0192$ meio-passos⁻¹, que corresponde a um comprimento de onda de $\lambda_{1a} \approx 52,1$ meio-passos. Observando o sinal do interferograma (Figura 31), podemos ver que esse é o comprimento de onda principal, de fato.

Utilizando as reduções estimadas para o sistema micrômetro-espelho, podemos ver se esse valor se aproxima ao do comprimento de onda real do laser λ_{HeNe} . Um meio-passo do motor corresponde a $2\Delta a \approx 12,207$ nm no feixe, então $52,1$ meio-passos corresponderiam a $2\Delta a \approx 635,98$ nm, um valor muito próximo de $\lambda_{HeNe} = 632,8$ nm. Como o sinal não está sendo considerado definitivo, esses dados não foram utilizados para a calibração do equipamento.

A distância entre os picos **1a** e **1b** é de $\approx 0,02$ meio-passos⁻¹, ou $1/0,02 = 50$ meio-passos. Isso indica uma modulação do sinal a cada 50 meio-passos (ou $\approx \lambda_{1a}$), talvez gerada

¹ Que pode ser observado claramente no trecho do sinal na Figura 31, além de em muitas outras partes do resto do espectro.

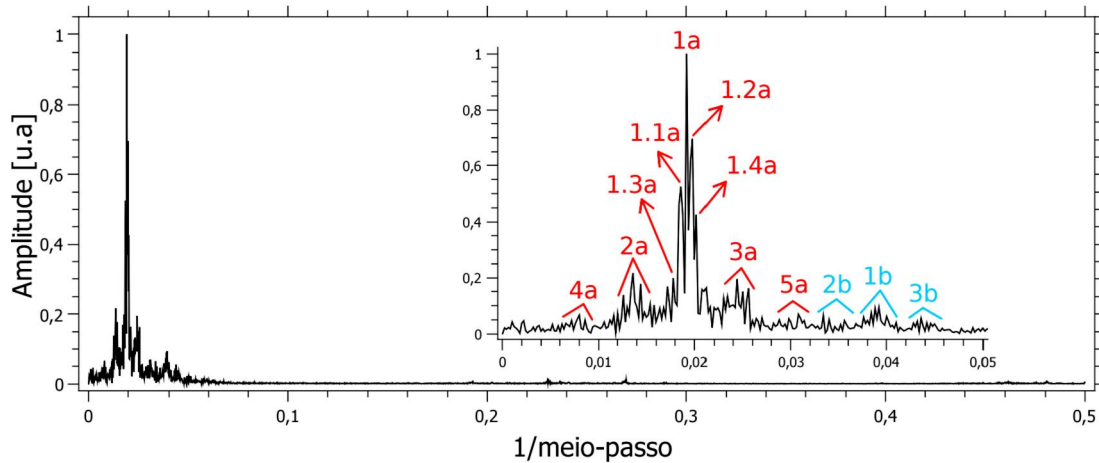


Figura 32 – DFT do sinal com uma média de 100 registros, com a amplitude normalizada. O Espectro inteiro está representado no gráfico principal. Inserido à direita está um trecho do mesmo espectro, focalizando nos picos mais proeminentes. Os diferentes picos e grupos de picos foram sinalizados.

por algum efeito eletrônico ou mecânico a cada comprimento de onda, possivelmente o que causa o formato arredondado das cristas e o estreitamento dos vales do sinal. Esse formato pode ser gerado por uma saturação do sinal no detector.

A resposta de um fotodiodo é majoritariamente linear em função da intensidade da fonte, mas existe um ponto, chamado de limite de saturação, em que ele deixa de ser linear. Quando a intensidade de uma fonte atinge o limite de saturação, a resposta do diodo se aproxima de um valor máximo constante. Esse comportamento acaba afetando o formato do interferograma. (Thorlabs (S/D))

Ajustando uma função senoidal $f(x)$ (equação (3.1)) aos dados, um comprimento de onda médio de $\lambda = 51,32$ meio-passos foi encontrado. Para simular o efeito da saturação do detector, outra função $g(x)$ foi ajustada aos dados. Ela está apresentada na equação (3.2). Nas equações (3.1) e (3.2), A , B , δ , λ , C e I_S são parâmetros livres. δ representa a fase da função, λ seu comprimento de onda e I_S a saturação do sinal.

$$f(x) = A + B \cdot \cos \left[\frac{2\pi(x - \delta)}{\lambda} \right] \quad (3.1)$$

$$g(x) = C \cdot \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-f(x)}{I_S} \right] \right\} \quad (3.2)$$

Na Figura 33, um trecho do sinal com ambos os ajustes é apresentado. É possível ver o efeito que a saturação pode ter em um sinal, de fato arredondando as cristas e estreitando os vales de uma senoide. Além disso, a Figura deixa claro que o sinal nem sempre está em fase com os ajustes, indicando a possibilidade de outros problemas no equipamento.

Para verificar o efeito que a saturação terá no espectro do sinal, uma DFT da função (3.2) ajustada foi feita. Ela, em conjunto com a DFT do sinal, está apresentada na Figura 34, onde é possível ver que as famílias de picos 1a e 2a identificadas na Figura 32 coincidem com os picos da DFT da função de ajuste.

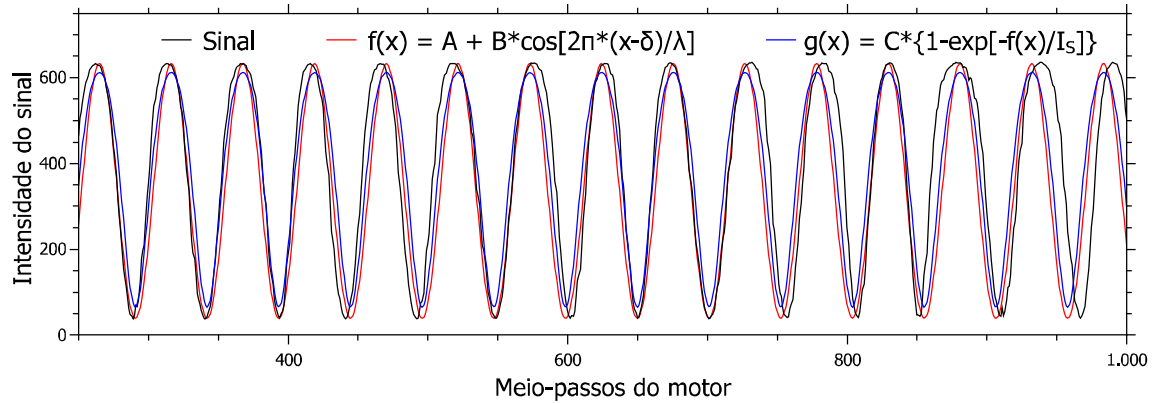


Figura 33 – Trecho do sinal (em preto) sobreposto com dois ajustes para uma função senoidal (em vermelho) e uma com saturação da mesma função (em azul).

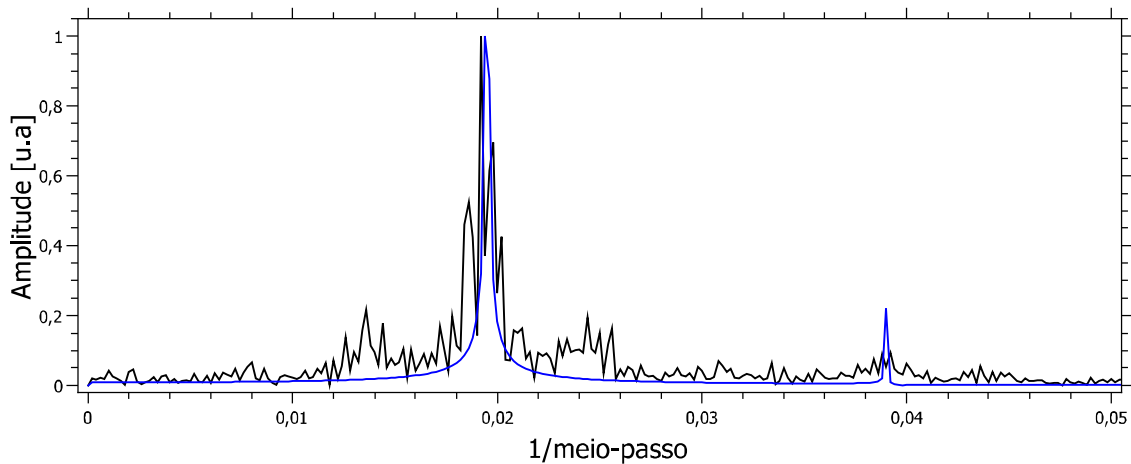


Figura 34 – Trecho da DFT do sinal (em preto) e da função com saturação ajustada (em azul). Ambas as intensidades foram normalizadas.

Infelizmente, o efeito da saturação não explica os grupos de picos satélites ou os picos que rodeiam o principal em seu grupo. Para ter uma ideia do que poderia causar a aparição destes grupos e picos é interessante identificar as distâncias entre eles e o pico principal 1a. As posições dos picos e grupos de picos identificados na Figura 32 e suas distâncias do pico principal estão apresentados na Tabela 1. Para os grupos de picos, o pico central foi escolhido como referência.

Os valores da segunda coluna da Tabela 1 indicam que existe um padrão com o distanciamento entre os grupos de picos. Os grupos 2a e 3a estão a $\approx 0,0054$ meio-passos⁻¹ do pico principal e, respectivamente, dos grupos 4a e 5a. Isso pode indicar uma modulação a cada $1/0,0054 \approx 185,2$ meio-passos, ou em termos de λ_{1a} , $3,61\lambda_{1a}$.

Pico ou grupo de picos	Posição no espectro (meio-passos ⁻¹)	Distância do pico 1a (meio-passos ⁻¹)
1a	0,0192	
2a	0,0136	0,0056
3a	0,0244	0,0052
4a	0,0081	0,0111
5a	0,0298	0,0106
1.1a	0,0186	0,0006
1.2a	0,0198	0,0006
1.3a	0,0178	0,0014
1.4a	0,0202	0,001

Tabela 1 – Tabela com valores da posição dos picos do sinal medido e sua distância do pico principal.

Algo parecido ocorre com os picos do grupo 1a que rodeiam o pico principal, e se repete para os outros grupos. 1.1a e 1.2a estão a $\approx 0,0006$ meio-passos⁻¹ do pico principal e, respectivamente, de 1.3a e 1.4a. Isso pode indicar uma modulação a cada $1/0,0006 \approx 1666,6$ meio-passos, ou em termos de λ_{1a} , $32,46\lambda_{1a}$.

Como os picos mais largos que aparecem no sinal medido ocorrem a aproximadamente 3 ou 4 λ_{1a} , a primeira modulação mencionada pode aparecer por conta dessa irregularidade no sinal. É possível que a causa desse alargamento seja um problema mecânico, talvez uma breve modificação na velocidade angular da engrenagem no micrômetro. Como o sinal é medido em termos do movimento do motor, se houver algum problema na conexão entre ele e o micrômetro, o sinal é modificado.

Para ver se essa modulação está relacionada de alguma forma com as engrenagens, uma estimativa do deslocamento provido pela passagem de um dente da engrenagem a outro foi feito. O deslocamento do feixe equivalente à passagem de 1 dente da engrenagem grande de 80 dentes (considerando as reduções estimadas para o sistema micrômetro-espelho) é de $2\Delta a \approx 0,00125$ mm. Em relação ao comprimento de onda do laser, isso causaria uma diferença de caminho no feixe de $\approx 3,95\lambda_{HeNe}$. Como este valor é bastante próximo ao da primeira modulação mencionada, de $3,61\lambda_{1a}$, é possível que ele seja devido a alguma inconsistência do movimento na passagem de um dente a outro. Uma possibilidade é que o contato entre os dentes acabe variando em altura, causando mudanças leves na velocidade angular do micrômetro.

A fonte exata da outra modulação não é clara. É possível que seja devido à resolução de impressão das peças. A impressora tem uma resolução de 0,1 mm nos eixos horizontais, que significa que a impressão pode gerar um erro de 0,2 mm em relação ao desenho original. Como a distância entre dentes é de $\approx 1,57$ mm, o erro na impressão pode gerar um erro de $0,2/1,57 \approx 0,13$, ou $13\% \times 3,95\lambda_{HeNe} = 0,5\lambda_{HeNe}$ nos dados. Por as engrenagens ter seus dentes repetindo em torno dela, padrões do desenho serão repetidos

ao longo da impressão. Como as faces das engrenagens têm um ângulo de 40° com o raio da engrenagem, isso pode gerar um padrão a cada $40/4,5 = 8,8$ dentes na engrenagem do micrômetro. Na outra engrenagem, esse padrão ocorreria a cada $40/18 = 2,2$ dentes. Estas ainda são meras conjecturas do que possivelmente esteja causando estes picos, e ainda não foram verificados.

Terceiro teste

Com as informações encontradas nos resultados do [segundo teste](#), um terceiro teste foi planejado. Para não ter o efeito da saturação do detector, um filtro de atenuação foi posicionado entre a fonte do laser e o interferômetro (Figura 35). Para diminuir o ruído devido às engrenagens, a do motor foi coberta com um tubo de silicone e a do micrômetro com uma liga de borracha, tornando-as um conjunto de roletes que se movimentariam por atrito (Figura 36).

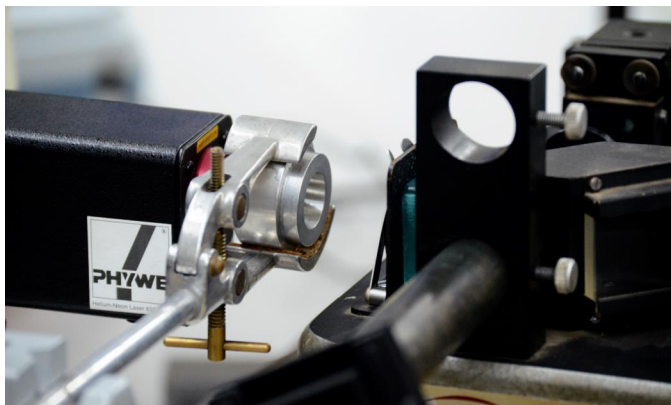


Figura 35 – Filtro de atenuação de 10^2 posicionado entre a fonte e o interferômetro.



Figura 36 – Engrenagens cobertas com borracha para servir como roletes.

Primeiro, vários filtros de densidade neutra calibrados foram testados para encontrar o que impedisse a saturação do detector com a menor perda de sinal. Para isso, foi necessário verificar se ao atenuar ainda mais o sinal a resposta se mantinha linear. A atenuação foi verificada utilizando um multímetro conectado ao amplificador. O filtro ideal foi identificado como o de atenuação de 100 vezes.

Um trecho do sinal das primeiras medidas com as engrenagens como roletes está apresentado na Figura 37. A cada volta da engrenagem do motor (4096 meio-passos) existe um padrão no sinal, que pode ser visto no trecho da Figura. Se o eixo da engrenagem do motor não estiver perfeitamente alinhado com o eixo do micrômetro ou do motor em si, ela acaba se aproximando ou se afastando do micrômetro a cada volta. Como as engrenagens

são rígidas e movimentadas pelo entrelaçamento dos dentes, esse efeito só é perceptível se eles acabarem perdendo contato. No entanto, como os roletes são feitos de borracha e são comprimíveis, uma aproximação reduz a velocidade angular do micrômetro, enquanto um afastamento a aumenta. Em alguns momentos o afastamento é grande o suficiente para o micrômetro parar de se movimentar enquanto o motor continua, causando os intervalos anômalos no sinal na Figura 37.

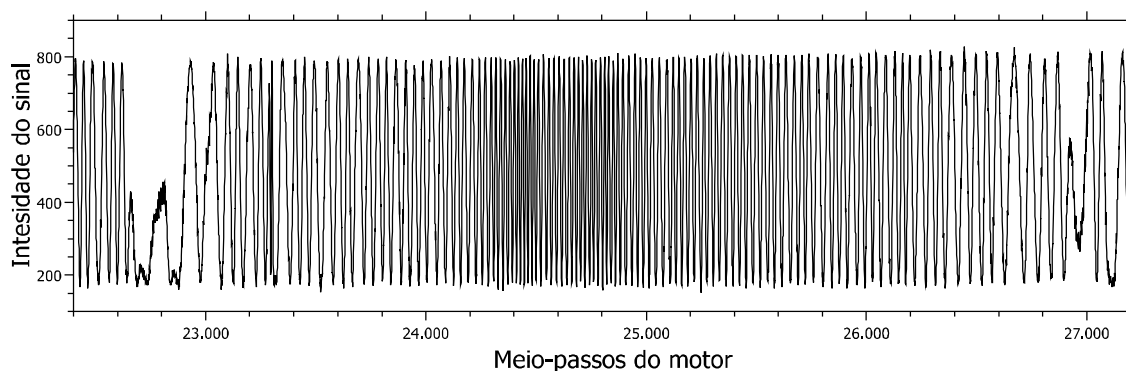


Figura 37 – Trecho do sinal medido para o laser de HeNe utilizando os roletes ao invés das engrenagens.

Mesmo que as engrenagens pareçam afetar o sinal na passagem de um dente a outro, os roletes acabam afetando as medidas muito mais. Mesmo que o eixo da engrenagem do motor estivesse perfeitamente alinhada, uma mudança de pressão afetaria as medidas e elas seriam diferentes cada vez que o motor ou seu suporte fosse levemente movimentado. Assim, os roletes foram descartados como alternativa para as engrenagens.

3.1.1 Calibração

Para calibrar o equipamento, várias medidas foram feitas com o laser como fonte, testando os efeitos que modificações dos parâmetros de medida teriam no sinal. O filtro de atenuação de 10^2 vezes foi utilizado, junto com um ganho de 10^2 no amplificador. Com estes dados, é possível ver que o parâmetro que mais afeta o sinal é o que controla a média. Se a média de 100 registros for tomada para cada dado, existe um bom equilíbrio entre a qualidade do sinal e o tempo que leva para finalizar a medida.

Para cada grupo de medidas, foi feito um ajuste da DFT normalizada do sinal por uma Lorentziana. Na Figura 38, um exemplo de um dos espectros está apresentado junto com a função ajustada. O espectro é de um conjunto de dados com 28000 pontos, que permite observar qualquer efeito que um movimento longo pode ter no sinal. Cada dado coletado veio da média de 100 registros. Por conta do número alto de dados, a DFT tem uma resolução maior que a que foi apresentada na Figura 32.

Como se pode ver na Figura 38, os grupos satélites ao pico principal continuam aparecendo. Para que esta modulação não ocorra mais, é provável que engrenagens novas

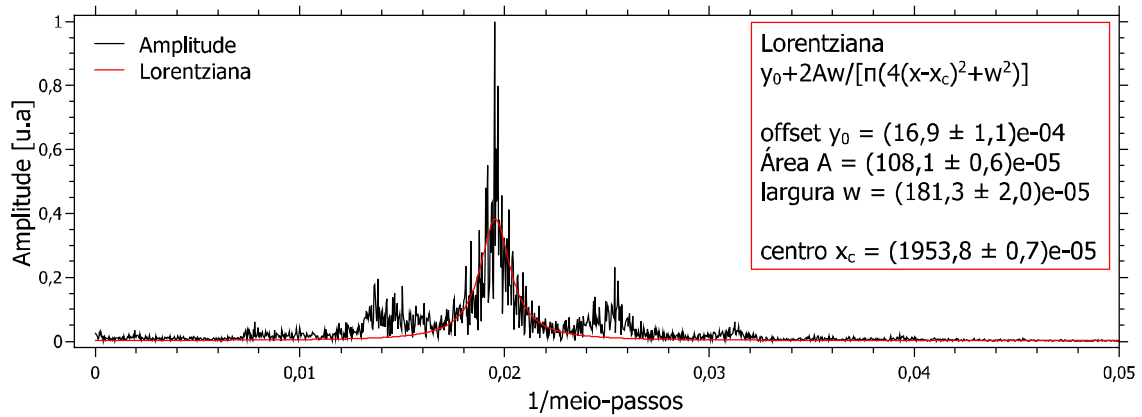


Figura 38 – DFT de um interferograma feito com o laser de HeNe como fonte. Sobreposto ao espectro está um ajuste por uma função Lorentziana, em vermelho. À direita do pico, a expressão da função, em conjunto com os parâmetros encontrados para ela, está apresentado.

sejam necessárias. A forma como o contato entre as engrenagens é feito precisa ser investigado para encontrar possíveis soluções. Outra alternativa é modificar a forma como o movimento do motor é transmitido ao micrômetro.

Ajustando uma Lorentziana em cada um dos espectros encontrados, uma média ponderada x_c pode ser feita de cada centro encontrado, com seu erro sendo dado pela média das larguras dos picos w . Ao final, $x_c = (1,9 \pm 0,3) \cdot 10^{-2}$ meio-passos $^{-1}$, que corresponde a $\lambda_{1a} = 52 \pm 8$ meio-passos. Assim, cada meio-passo prove um deslocamento de

$$2\Delta a \approx 12,2 \pm 1,9 \text{ nm}$$

no feixe, um valor muito próximo dos $\approx 12,207$ nm calculados pelas reduções esperadas.

Além de calibrar o deslocamento, a intensidade do sinal precisa ser convertida para a voltagem registrada. O Arduino atribui um valor entre 0 e 1023 para voltagens entre 0 e 5 V que ele mede em sua entrada. Assim, a escala da intensidade do sinal pode ser ajustada por um fator de $5/1023 \approx 0,0049$ V, sem considerar o ganho dado pelo amplificador. Como a intensidade do sinal é relativa, essa conversão não é essencial, mas ela fornece um valor em unidades no SI e permite comparar as intensidades relativas das fontes.

3.2 Lâmpadas Policromáticas

Com o equipamento calibrado, os testes com lâmpadas policromáticas foram iniciados. Para estes testes, três lâmpadas diferentes foram utilizadas: duas de mercúrio (Hg) de média pressão e uma *incandescente*. As três lâmpadas oscilam em 120 Hz, o dobro da oscilação da rede local, então uma constante de tempo de 0,1 s foi aplicada ao sinal saindo do amplificador.

Para cada lâmpada, o ponto central do interferômetro (onde a distância dos espelhos ao divisor de feixes é igual) era encontrado antes de cada medida. Isso permite movimentar o motor para que o sinal medido tenha o ponto de maior coerência no seu centro. O centro do equipamento se encontra em torno da marca de $15,65 \pm 0,05$ mm no micrômetro.

O espectro da lâmpada de mercúrio tem 7 linhas na faixa visível, apresentadas na Tabela 2. Além disso, existe uma linha muito intensa na faixa do ultravioleta (UV) próximo, em 365,483 nm, que é bloqueada parcialmente pela maioria das lâmpadas de Hg (PASCO (1990)). As linhas violetas e amarelas são extremamente próximas e, no caso das amarelas, formam um dubleto.

Cor	Comprimento de onda (nm)	Número de onda onda (10^{-7} cm^{-1})	Intensidade (a: alta; m : média; b: baixa.)
violeta 1	404,656	0,002471	m
violeta 2	407,781	0,002452	m
azul	435,781	0,002294	a
turquesa	491,604	0,002034	b
verde	546,074	0,001831	a
amarelo 1	576,959	0,001733	a
amarelo 2	579,065	0,001727	a

Tabela 2 – Linhas do espectro do mercúrio na faixa do visível. Baseado em Jenkins e White (2018).

O espectro da lâmpada incandescente é contínuo, respeitando a lei de Planck, em que a radiância espectral $R(\lambda, T)$ é dada pela equação (1.5). Ela geralmente é centrada na faixa do infravermelho (IV).

3.2.1 Lâmpada de Hg (PHYWE - 08147.00)

A primeira lâmpada policromática que foi testada foi uma lâmpada de vapor de mercúrio de média pressão 08147.00 da PHYWE (Figura 39). Antes de medir o espectro inteiro, um teste foi feito com um filtro verde 46837 da PHYWE. Medir uma faixa estreita significa que o espectro terá uma visibilidade maior, já que não há uma sobreposição de franjas. Por conta da intensidade baixa da fonte, foi necessário amplificar o sinal em 10^4 vezes.

Nas primeiras tentativas de medir a linha verde desta lâmpada, o sinal parecia estar muito ruidoso e não estar registrando as oscilações da linha verde. Isso pode ser observado em um exemplo dado nas Figuras 40 e 41, que apresentam um registro inteiro de um sinal e o espectro dele, respectivamente. Na Figura 41, alguns picos são percebíveis, mas eles se encontram em uma parte do espectro no qual o fotodiodo não é capaz de detectar um



Figura 39 – Lâmpada de Hg de média pressão da PHYWE pronta para ser utilizada como fonte em uma medida.

sinusoidal. O pico mais alto se encontra em torno de $0,0307 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$, ou $\lambda = 32,55 \text{ nm}$ percorridos a cada dois pontos e meio.

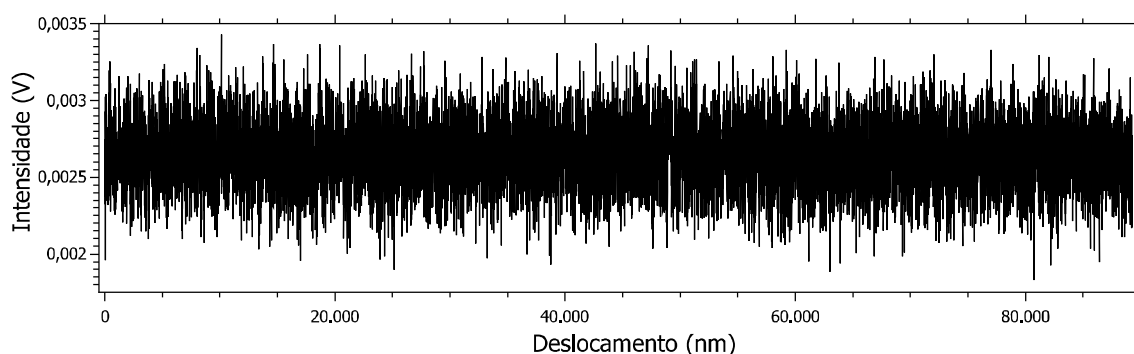


Figura 40 – Interferograma da lâmpada de Hg da PHYWE com um filtro verde.

Na Figura 41, o trecho destacado engloba parte do espectro no infravermelho, o espectro visível e o ultravioleta próximo (ao todo, $\lambda \approx 1500 \rightarrow 350 \text{ nm}$). Nesse trecho, o único pico presente se encontra em torno de $0,001 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$, que corresponde a um comprimento de onda de 1000 nm , na faixa do infravermelho.

Todas as outras medidas iniciais feitas com esta lâmpada e o filtro verde apresentam picos diferentes, mas nenhum na faixa do visível. Assim, podemos concluir que os picos principais vêm de alguma modulação aleatória do sinal, especialmente por ela mudar de uma medida a outra.

Observando o sinal, a visibilidade dele estava bastante baixa, com os picos pouco definidos. Para aumentar a visibilidade, o ponto em que os espelhos estão à mesma distância do [divisor de feixe](#) e, portanto, sofrendo interferência completamente construtiva

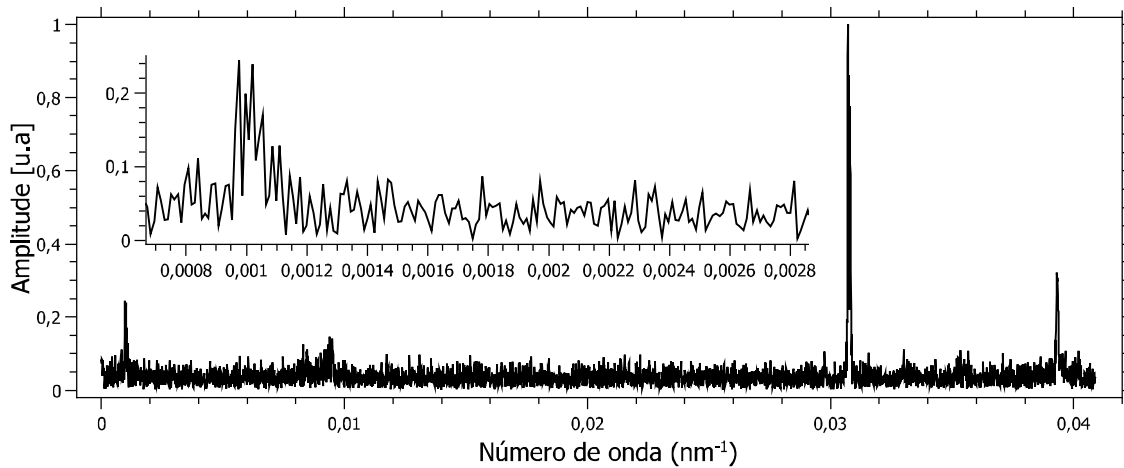


Figura 41 – Espectro do interferograma da Figura 40. A parte destacada é uma faixa que percorre desde o IV próximo ao UV próximo.

para todos os λ , foi identificado. Isso foi feito primeiramente localizando a região em que o interferograma ocupa o campo visual inteiro e depois, com auxílio da lâmpada incandescente, lentamente varrendo a posição do espelho até localizar o ponto de interferência construtiva.

Novas medidas foram feitas, garantindo que esse ponto único estivesse aproximadamente no centro do interferograma. Além disso, um filtro que bloqueia o IV foi utilizado². A radiação infravermelha de espectro largo é produzida pela própria lâmpada, que trabalha com temperatura elevada. Isso é captado pelo detector, prejudicando a visibilidade das franjas de interferência no visível. Na Figura 42, um dos interferogramas está apresentado. Ele continua com um comportamento alcatório, mas na faixa central apresenta uma oscilação mais intensa, que se espera. O seu espectro está apresentado na Figura 43, com o mesmo trecho da Figura 41 em destaque.

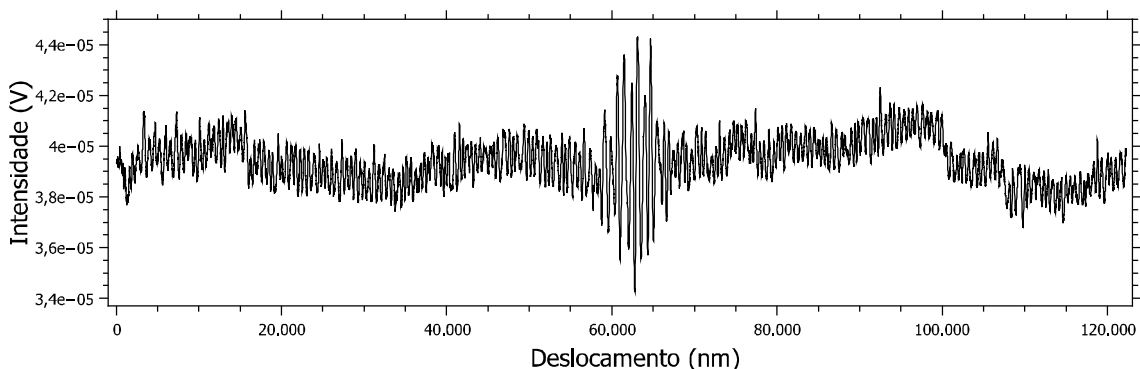


Figura 42 – Interferograma completo da lâmpada de Hg da PHYWE passando pelo ponto central do interferômetro. Um filtro verde e um que bloqueia IV foram utilizados.

² Colocar ele próximo da lâmpada significa que ele absorve muito calor. É necessário tomar cuidado para não se queimar ao manuseá-lo. Aprendi isso da pior forma possível.

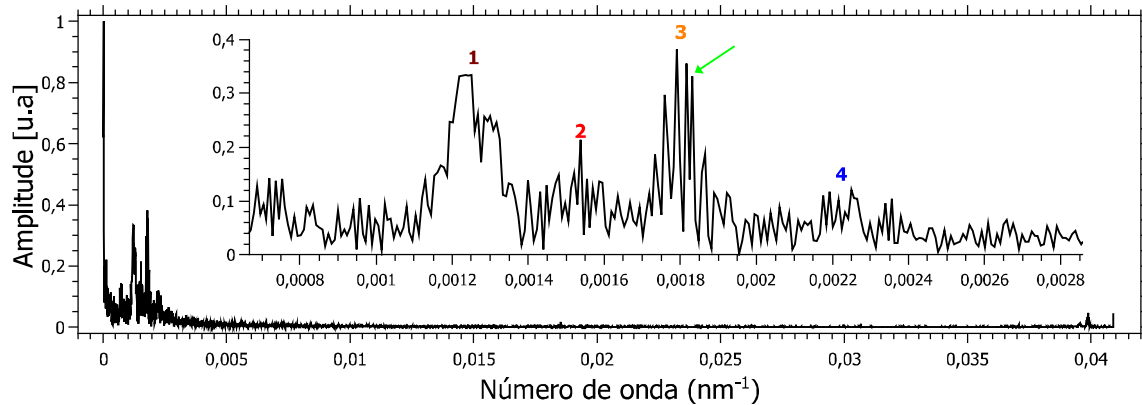


Figura 43 – Espectro do interferograma da Figura 42. A parte destacada é uma faixa que percorre desde o IV próximo ao UV próximo. Alguns picos ou grupos de picos estão indicados por números. A posição em que o pico correspondendo ao da luz verde estaria está identificado por uma seta verde.

Observando o espectro destacado na Figura 43 alguns picos chamam atenção. O primeiro (1) é um pico largo na faixa do IV, que possivelmente não foi bloqueado pelo filtro IV. Note que esse pico largo se encerra logo abaixo de 1 micrometro, justamente onde o detector tem um corte na sua sensibilidade (veja a curva de resposta do detector na Figura 22) O segundo (2) está na faixa do vermelho e o grupo indicado por 4 está na faixa do azul. O grupo indicado por 3 tem vários picos distintos, na faixa do amarelo e verde. A seta indica a posição em que o pico do verde do espectro do Hg deveria estar se sobrepondo a todos os outros, considerando as condições do experimento.

Encarando estes dados pouco conclusivos, mas com a esperança de que o problema poderia estar na lâmpada ou na utilização dos filtros, a lâmpada incandescente foi a próxima a ser testada.

3.2.2 Lâmpada Incandescente

Uma lâmpada de filamento de tungstênio de 12 V conectada a uma fonte externa foi utilizada para testar o equipamento (Figura 44). Ela foi utilizada com 7 V e 1,35 A e um difusor foi inserido entre a fonte e o divisor de feixe. Por conta do difusor, um ganho de 10^3 foi necessário para registrar o sinal. A lâmpada incandescente usada é a mesma utilizada no experimento da Lei de Stefan-Boltzmann usada na disciplina de Laboratório de Física Moderna na UnB. Nessas condições de tensão e corrente, estima-se que a temperatura do filamento esteja em torno de 1600 K. O pico da radiação de corpo negro associado a essa temperatura encontra-se em torno de 1800 nm.

Como o espectro de uma lâmpada incandescente é contínuo, o seu comprimento de coerência é pequeno e a interferência entre os comprimentos de onda só é visível perto do ponto central do interferômetro. Assim, os dados foram coletados em torno deste ponto.

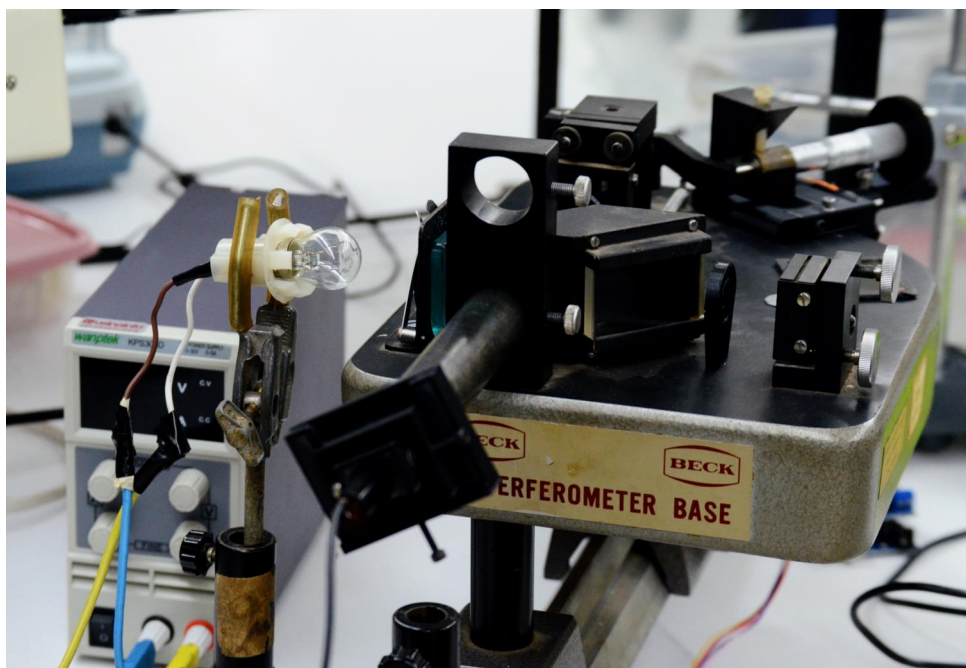


Figura 44 – Lâmpada incandescente pronta para ser utilizada como fonte em uma medida.

Um dos interferogramas está apresentado na Figura 45, e seu espectro na Figura 46. É possível observar que as oscilações do sinal só ocorrem em torno do ponto central. Isso permite medir o comprimento de coerência do sinal, algo que não era possível antes, com as fontes monocromáticas.

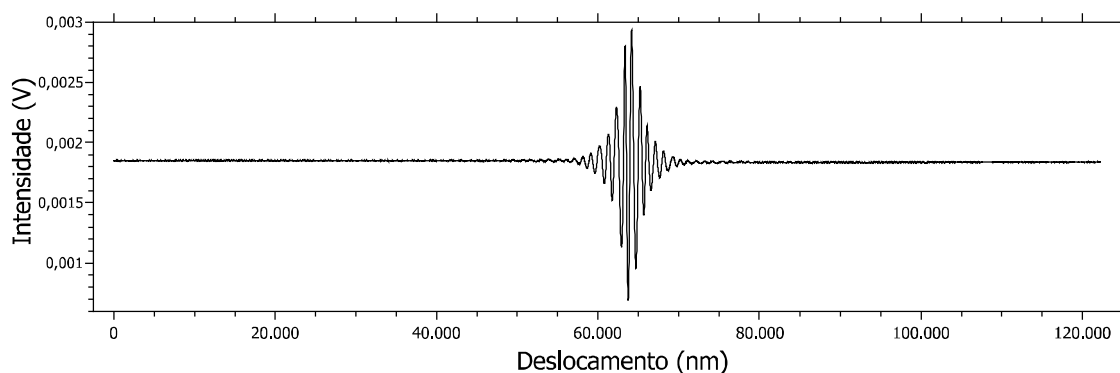


Figura 45 – Interferograma da lâmpada incandescente.

Observando o espectro correspondente ao interferograma da Figura 45, fica evidente que o sinal é majoritariamente composto por luz presente na faixa do IV e do visível. O pico principal (1) se encontra em torno de $0,00101 \text{ nm}^{-1} \rightarrow \lambda \approx 986 \text{ nm}$, na faixa do IV. O segundo pico principal (2) corresponde a $0,00147 \text{ nm}^{-1} \rightarrow \lambda \approx 679 \text{ nm}$, na faixa do vermelho. O pico³ 3 se encontra em torno de $0,00191 \text{ nm}^{-1} \rightarrow \lambda \approx 522 \text{ nm}$, na faixa do verde. O pico 4 se encontra em torno de 1600 nm , uma região em que o detector não deveria estar respondendo. Como ela surge não está claro, mas pode ser algum artifício

³ Que está mais para uma protuberância leve.

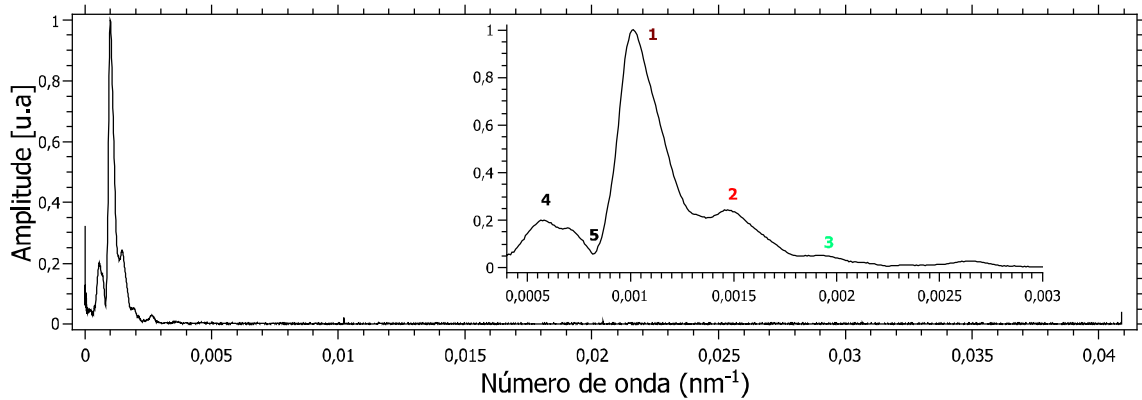


Figura 46 – Espectro do interferograma da Figura 45. Em destaque está uma porção do espectro que cobre do IV ao UV próximo. Cinco pontos estão indicados.

da movimentação mecânica. O vale indicado por **5** está em torno de 1200 nm, justamente onde a curva de resposta do detector (Figura 22) indica que a resposta é cortada.

Com auxílio de um espectrômetro CCD CSS200 da Thorlabs, o espectro da lâmpada foi registrado, para auxiliar numa comparação com o espectro encontrado a partir do interferograma. A Figura 47 tem ambos os espectros, com o medido pelo interferograma ajustado para que seus valores no eixo horizontal sejam dados em termos do comprimento de onda. Isso foi feito pois o espectro medido a partir do espectrômetro CCD está expresso dessa forma. Além disso, o espectro medido pela CCD foi normalizado para que seu pico ficasse com a mesma amplitude do pico **2**, para que a comparação do formato do espectro fosse mais fácil.

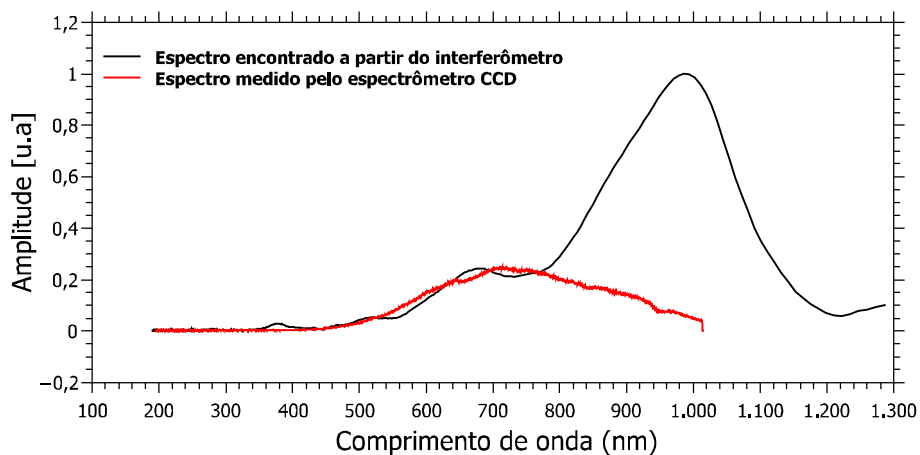


Figura 47 – Espectro da lâmpada incandescente em termos do comprimento de onda medida de duas formas distintas.

A CCD corta próximo de 1000 nm, com sua curva decrescendo lentamente entre o pico e este ponto. Possivelmente isso é devido à atenuação da fibra ótica utilizada no equipamento. A fibra ótica é de sílica fundida, com uma atenuação em 900 nm. O interessante é que o máximo do espectro obtido pela CCD (≈ 710 nm) quase coincide

com o pico **2** do espectro do interferômetro.

Como o espectro todo da fonte está contido em uma faixa estreita do interferograma (Figura 45), qualquer erro de alinhamento no equipamento pode fazer o resultado da FFT variar. As similaridades entre as DFTs das diferentes medidas feitas com o espectrômetro de transformada de Fourier podem ser por ter varrido o espelho sem nenhum ajuste sendo feito ao alinhamento.

Mesmo que o espectro encontrado com o equipamento construído não encaixe exatamente com o esperado, ele mostra que o equipamento é capaz de fazer medidas de fontes policromáticas mais complexas. Assim, mais testes foram feitos com uma lâmpada de Hg diferente da anterior.

3.2.3 Lâmpada de Hg (PASCO - OS-9286A)

Para fazer mais testes do equipamento com uma lâmpada de vapor, uma lâmpada de vapor de Hg OS-9286A da PASCO de média pressão foi utilizada (Figura 48). Essa lâmpada está contida dentro de um *housing* metálico com uma fenda de saída pela qual a luz emitida pode passar. O *housing* foi projetado para que outros acessórios possam ser utilizados com ele, por exemplo uma grade de difração para espectroscopia dispersiva ou filtros coloridos para isolar diferentes linhas. Esta é uma lâmpada utilizada na disciplina de Laboratório de Física Moderna para realização do experimento do efeito fotoelétrico.

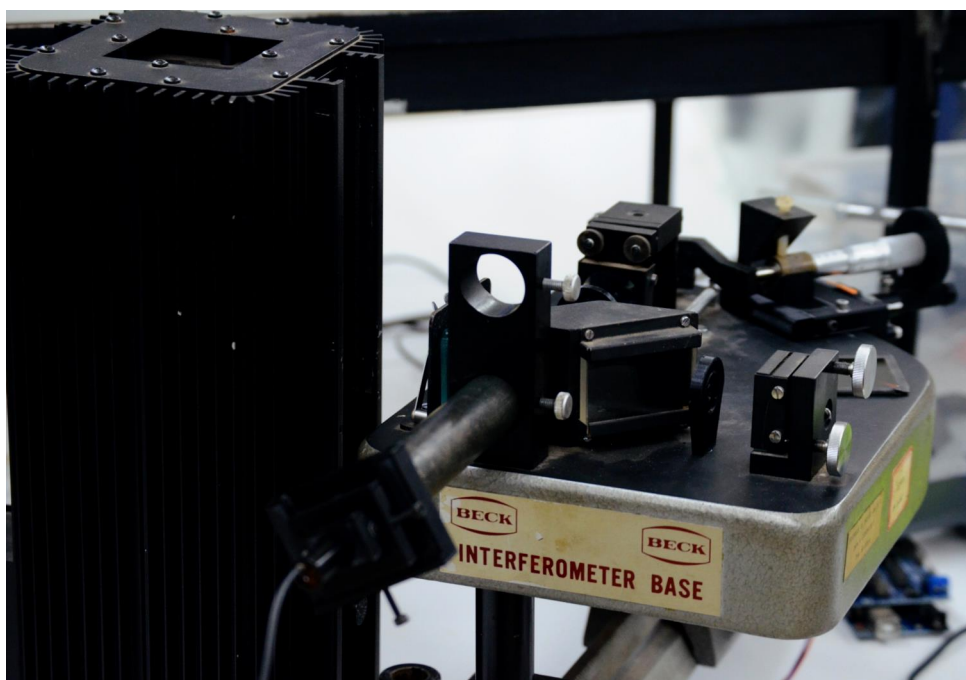


Figura 48 – Lâmpada de Hg da PASCO pronta para ser utilizada como fonte em uma medida.

Essa lâmpada foi escolhida pela possibilidade e facilidade na utilização de uma grade de difração, ao invés de um filtro, com ela. O objetivo do equipamento é conseguir

medir o espectro completo das lâmpadas, é claro, mas é importante ter certeza do seu funcionamento para sinais menos complexos, em especial para o duplete do amarelo. Posteriormente, descobrimos que ela também tem uma visibilidade melhor que a da lâmpada de Hg da PHYWE.

Inicialmente, a grade de difração de 600 linhas/mm foi utilizada com a lâmpada. Com as linhas espectrais separadas espacialmente, a lâmpada foi posicionada para que a linha verde fosse a única entrando no sistema do interferômetro. O equipamento foi alinhado e algumas medidas feitas. Para todas as medidas nesta subseção, o ganho utilizado no amplificador foi de 10^4 . Um trecho de um dos interferogramas e seu espectro estão apresentados nas Figuras 49 e 50, respectivamente.

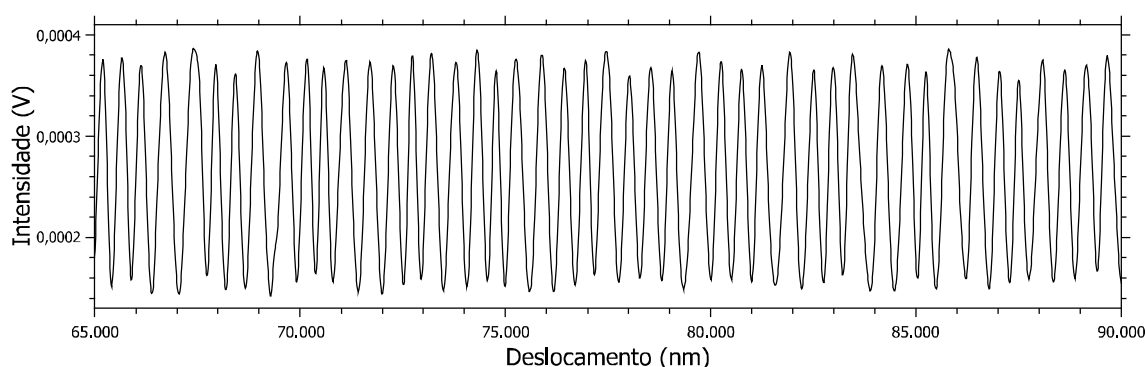


Figura 49 – Trecho de um interferograma feito utilizando a linha de emissão verde do Hg.

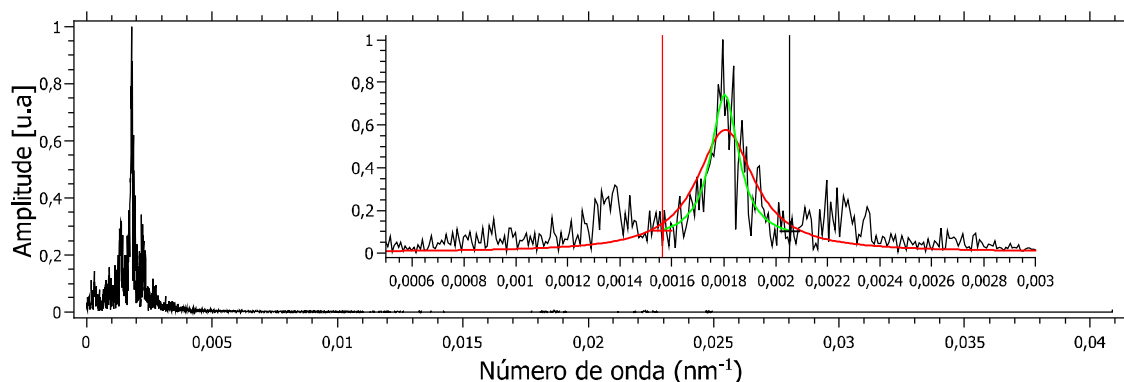


Figura 50 – DFT do sinal da Figura 49. O trecho em destaque percorre do IV próximo ao UV próximo, onde o pico principal se encontra. Duas distribuições Lorentzianas foram ajustadas ao pico. Uma, em vermelho, considera o espectro todo; a outra, em verde, somente o trecho delimitado pelas linhas pontilhadas.

Pelo trecho na Figura 49, pode se ver que o interferograma é monocromático de fato, com o mesmo tipo de modulação de fase vista no sinal do laser. Esta modulação também está presente no espectro, como se pode ver com os picos satélites na Figura 50.

Mesmo contendo os picos satélites e bastante ruído, o pico principal do espectro é

bastante claro. Ajustando uma Lorentziana ao espectro todo, o centro encontrado⁴ é de $x_c = (18,1 \pm 2,7) \cdot 10^{-4} \text{ nm}^{-1} \rightarrow \lambda_{Hg_{verde}} = (550 \pm 80) \text{ nm}$.

Ajustando outra Lorentziana, desta vez restrita aos pontos entre 0,0016 e 0,0021 nm^{-1} , o centro encontrado não varia muito, mas a largura, sim. O centro é dado por $x_c = (18,0 \pm 1,3) \cdot 10^{-4} \text{ nm}^{-1} \rightarrow \lambda_{Hg_{verde}} = (560 \pm 40) \text{ nm}$. Ele está mais distante do valor esperado de $\lambda_{Hg_{verde}} = 546,074 \text{ nm}$ que o centro do primeiro ajuste.

Ainda utilizando a grade de difração, e com a adição de um filtro IV, a lâmpada foi repositada para que a linha amarela estivesse sendo transmitida pelo interferômetro (Figura 51). Para medir o efeito de batimento que o dubleto tem no interferograma, muitos dados devem ser adquiridos. O primeiro teste, com 10000 dados, foi utilizado para sondar um valor aproximado de dados que deveriam ser coletados para observar pelo menos 4 batimentos no interferograma. Concluiu-se que 60000 dados seriam suficientes e as medidas reais foram iniciadas.

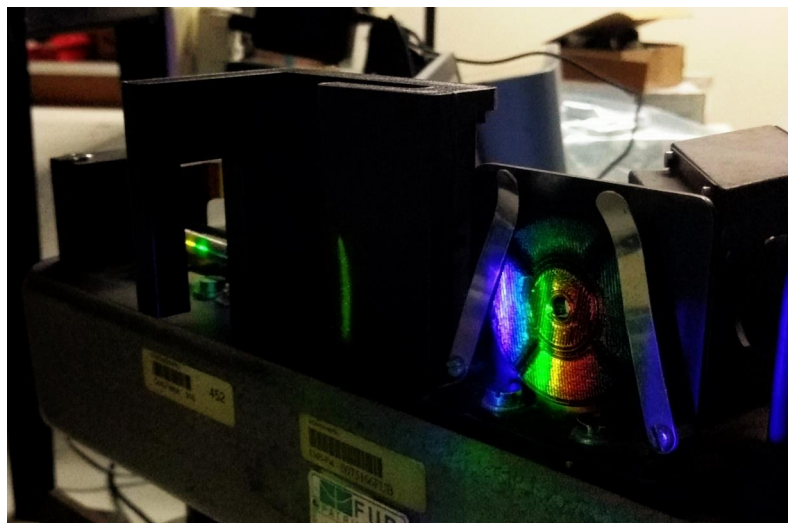


Figura 51 – Espectro de frequências da lâmpada de Hg projetado sobre o alinhador da fonte. É possível ver que a linha amarela é a única que passa pelo furo. A linha vermelha que pode ser vista provavelmente é gerada pela proteção metálica na lâmpada, utilizada para impedir a emissão no UV.

Ao total, dois interferogramas foram coletados das linhas amarelas. O primeiro continha bastante ruído por conta de uma movimentação irregular do motor. Com o motor repositado, outra medida foi feita, com um interferograma mais claro. Infelizmente, o ponto central não estava no centro da medida, que auxilia na análise e deve sempre ser feito para as fontes policromáticas. As duas medidas, em conjunto com seus espectros, estão apresentadas na Figura 52.

Uma coisa extremamente peculiar destas medidas foi que o interferograma interrompido pelo movimento do motor gerou um espectro mais próximo ao esperado do que

⁴ Novamente, calculado a partir de uma média ponderada. Neste caso o erro utilizado foi o valor da largura do pico.

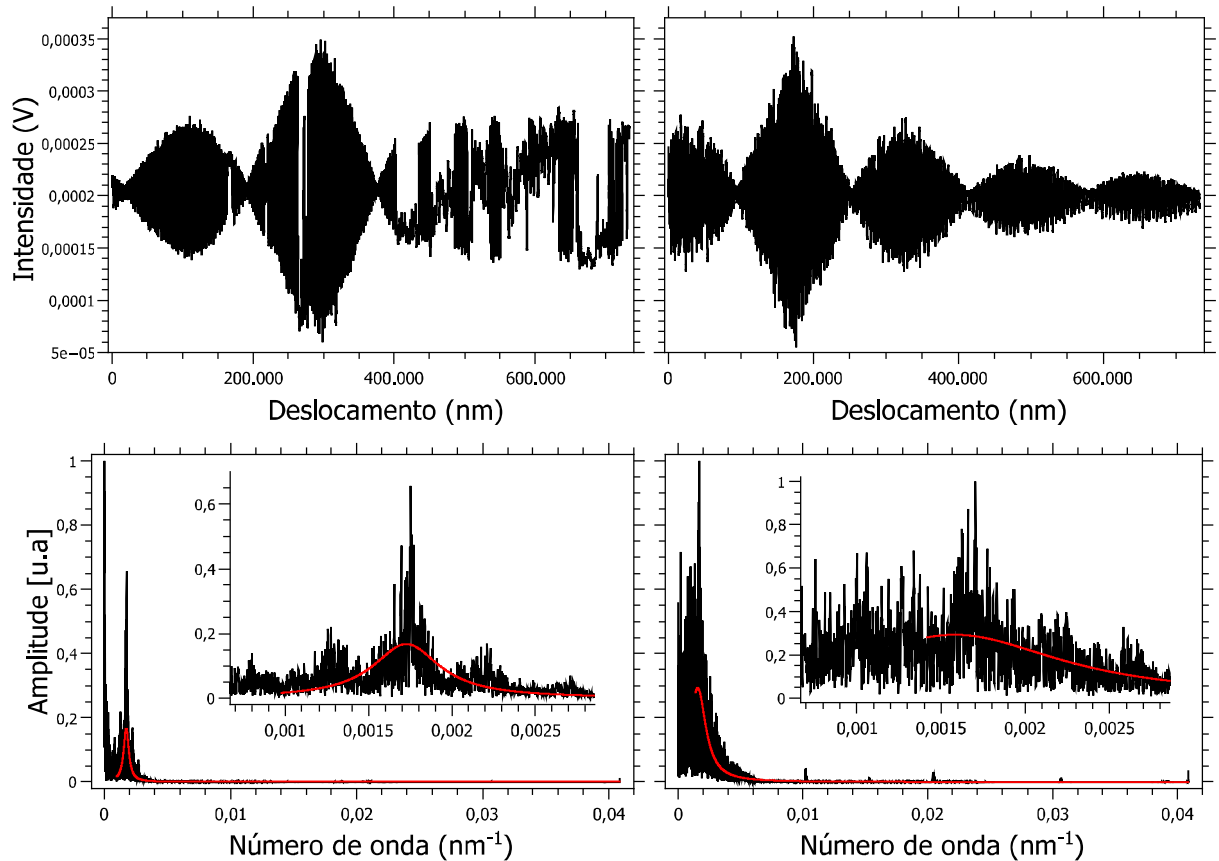


Figura 52 – Figura com quatro gráficos. Os gráficos superiores são interferogramas medidos com as linhas amarelas do Hg e compartilham da mesma escala no eixo das ordenadas (**Intensidade (V)**). Abaixo de cada interferograma está seu espectro completo e a parte dele que vai do IV próximo ao UV próximo destacado. Novamente, os espectros compartilham da mesma escala no eixo das ordenadas (**Amplitude [u.a.]**). Cada espectro foi ajustado com uma Lorentziana, mostrada em vermelho.

o interferograma mais consistente. Em ambos os espectros, um pico em torno do amarelo aparece, mas no espectro da primeira medida ele está mais nítido e ainda apresenta os picos satélites devido à modulação dos dentes da engrenagem. No segundo espectro, o sinal é muito mais ruidoso e o pico se perde entre muitos outros.

Ao observar um trecho dos interferogramas, no entanto, é possível observar que as oscilações presentes no primeiro interferograma são mais consistentes. Então, mesmo que o sinal tenha falhas, que afetam o espectro, as oscilações que representam aquelas do comprimento de onda médio do dubleto ainda foram suficientes para que o pico aparecesse.

Uma distribuição Lorentziana foi ajustada em ambos os espectros, restringindo os dados considerados para que os grandes picos no IV não influenciassem o ajuste. Para o primeiro espectro, o centro da Lorentziana foi bastante próximo do valor esperado de $1730,07 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$: $x_c = (1726,1 \pm 1,5) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$. Infelizmente, o dubleto

não é distinguível como tal, mas x_c pode ser tomado como um valor médio ($1/\bar{\lambda}$) e, em conjunto com a distância l_c de cada batimento, a separação do dubleto pode ser calculada a partir da equação (1.21).

Infelizmente, para encontrar a distância de cada batimento, um interferograma mais limpo, como o da direita na Figura 52, teria de ser utilizado. Calculando as distâncias dos batimentos no segundo interferograma, o valor encontrado é de $l_c \approx 160 \mu\text{m}$, próximo do valor esperado de $l_c = 158,64 \mu\text{m}$.

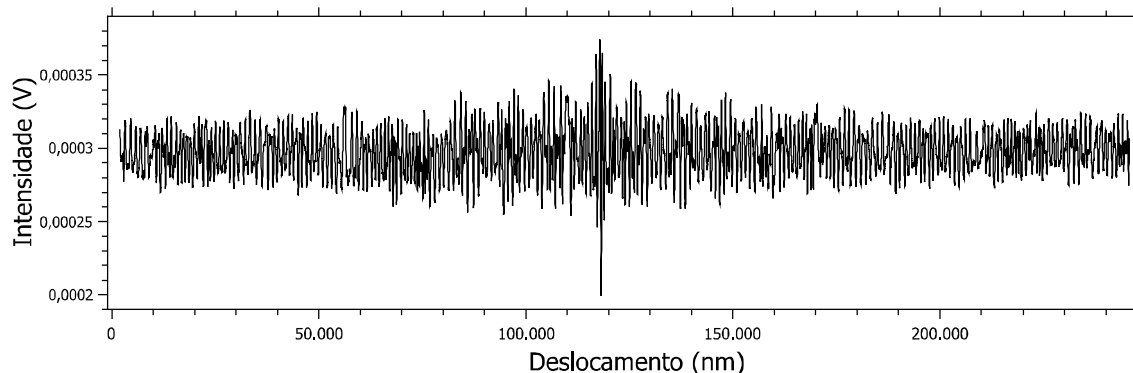


Figura 53 – Interferograma medido com a lâmpada de Hg como fonte.

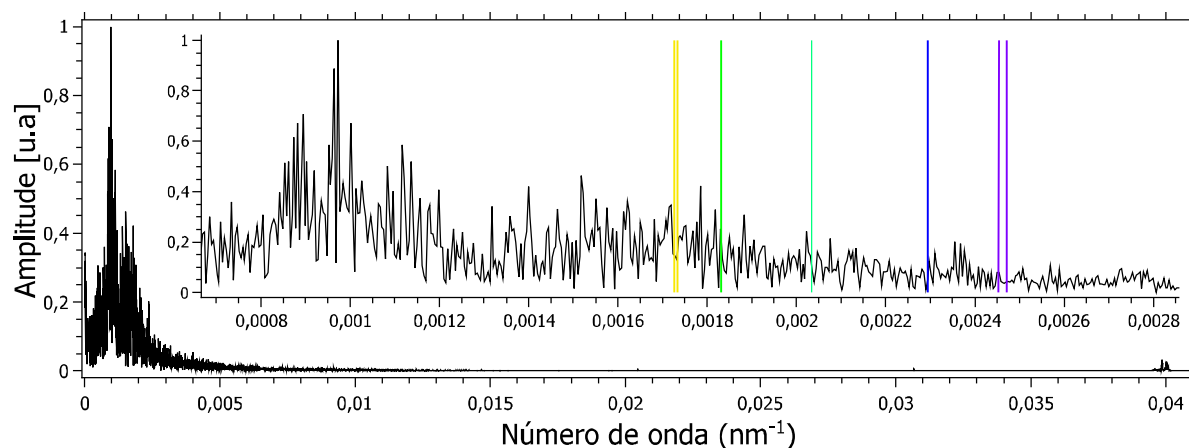


Figura 54 – DFT do sinal da Figura 53. Destacado está a faixa do espectro entre o IV próximo e o UV próximo, com as posições das linhas de emissão do Hg na faixa visível marcadas por linhas coloridas representando suas cores correspondentes. A grossura das linhas também representa a intensidade relativa de cada linha como dada em Jenkins e White (2018).

A inconsistência entre as medidas, evidenciada por estas duas em especial, representa um grande problema para tornar o equipamento utilizável em sala de aula. As medidas do espectro completo da lâmpada de Hg só reafirmam este problema.

A rede de difração e o filtro IV foram retirados da lâmpada de Hg, e o equipamento foi realinhado para fazer algumas medidas do seu espectro inteiro. Ao todo, 6 interferogramas foram adquiridos, variando a média de registros ou a quantidade de dados coletados.

Os interferogramas pareciam condizer com o esperado, mas ao tirar uma DFT de cada um, os espectros não revelaram informações confiáveis. Um exemplo está apresentado nas Figuras 53 e 54.

O único “pico” presente no espectro é um na faixa do IV. Na Figura 54, as posições em que as linhas reais do espectro de emissão do Hg deveriam ocupar estão indicadas.

3.3 Perspectivas Futuras

Os diferentes testes feitos com o equipamento mostram que ele ainda não está pronto para uso em sala de aula.

O principal problema é a modulação no sinal possivelmente causada pelo deslocamento das engrenagens na passagem de um dente a outro. Adicionado a isso, a engrenagem acaba se desacoplando do micrômetro em alguns momentos, interferindo na coleta de dados. Mesmo com parafusos e uma base mais robusta, isso ainda ocorre. É possível que um novo sistema de acoplamento entre o motor e o micrômetro seja necessário. Isso pode significar a fabricação de novas engrenagens com dentes diferentes ou um sistema completamente novo.

Uma possibilidade é utilizar um motor com uma redução maior e acoplá-lo diretamente ao cixo do micrômetro. Para isso, seria necessário projetar uma base nova, que sustentasse e movesse o motor junto com o micrômetro.

Outra alternativa é modificar o sistema de movimentação do espelho por completo. Em espectroscopia Mössbauer, um sistema de movimentação extremamente preciso é utilizado. Existe a possibilidade de incorporar o mesmo sistema no nosso equipamento.

Além disso, os interferogramas das lâmpadas são bastante ruidosos. Isso pode ser devido às oscilações da rede elétrica. Para evitar qualquer problema causado por isso, um amplificador com um circuito do tipo *sample and hold*, que está em fase com a rede e só envia um sinal por oscilação, poderia ser utilizado. Um amplificador com ganho ajustável continuamente, em vez de ajustes fixados em fatores de 10, também seria muito útil, já que um ganho em potências de 10 é bastante restritivo.

O suporte do detector ainda é ajustado de uma forma muito manual, dificultando o processo de encontrar o foco do sinal. Um desenho novo para a base, baseado em um sistema com molas, já foi projetado, em parte. Infelizmente, a restrição temporal do projeto não permitiu a implementação efetiva desse suporte novo. Além disso, a inclusão de um pinhole no sistema de detecção restringiria o plano do padrão interferométrico que chega ao detector. Isso significaria que o sinal detectado teria menos ruído, garantindo que só uma franja estivesse sendo detectada por vez.

Conclusão

O objetivo deste trabalho era de construir um equipamento que pudesse ser utilizado em sala de aula. Ao final, ele não foi concluído por completo: apesar de ter construído um espectrômetro de transformada de Fourier, ele não está pronto para uso em sala de aula.

Os testes feitos com diferentes fontes luminosas mostram que os acessórios ainda precisam ser modificados. Principalmente, as engrenagens utilizadas para movimentar um dos espelhos do interferômetro estão afetando as medidas negativamente. Elas poderiam ser substituídas por outras engrenagens, ou o sistema de movimentação poderia ser modificado por completo.

Além disso, o suporte do detector ainda está subdesenvolvido. Ele ainda não permite uma movimentação fina do detector, dificultando o alinhamento. O foco da lente telescópica é difícil de encontrar e muitas vezes o campo de visão do padrão interferométrico não está centralizado. Isso significa que máximos e mínimos podem ser detectados simultaneamente, diminuindo a confiabilidade das medidas. A inserção de um *pinhole* na ocular pode auxiliar ao restringir a porção detectável do sinal.

No que diz respeito à parte eletrônica, o desenvolvimento de uma interface própria para o experimento foi proposta, mas não houve tempo de fazê-la. A ideia era de não só salvar os dados coletados automaticamente, mas criar um gráfico dos dados em tempo real. Isso exige o desenvolvimento de outro programa, possivelmente em python, algo que não houve tempo de fazer.

Além disso, é interessante fazer uma análise diferente dos dados, a partir da DFT deles. Se várias medidas tiverem a mesma quantidade de dados em seu sinal, uma média dos espectros de várias medidas pode ser feita, melhorando a identificação de picos. No entanto, nem sempre é possível fazer essa média, por algumas medidas terem falhas e precisarem de cortes. Quando o equipamento mecânico estiver mais estável, será uma ideia a se explorar mais.

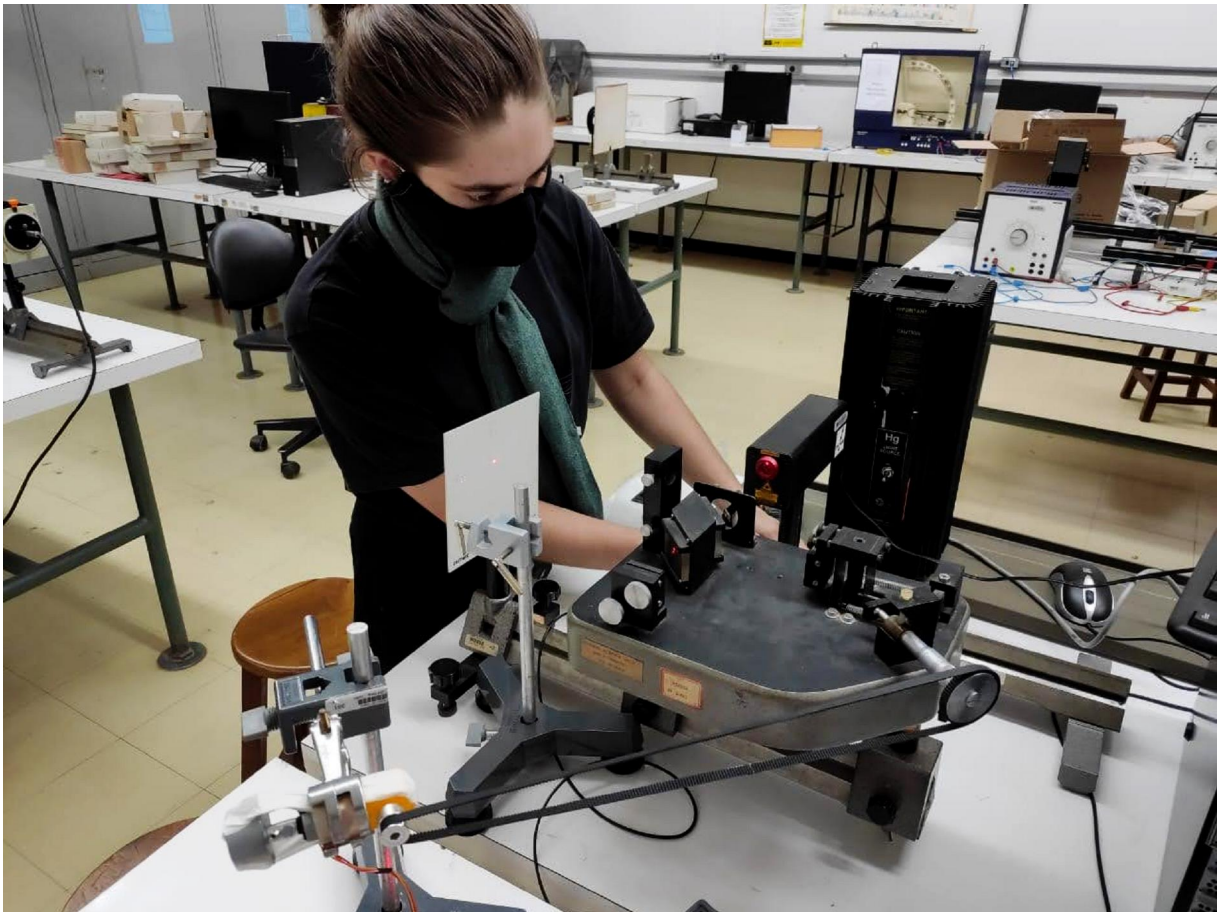
Ao medir o sinal, muito ruído é detectado, mesmo com o espelho imóvel. Isso ocorre principalmente quando as lâmpadas de Hg são utilizadas. É possível que isso seja gerado por dilatação térmica da base do interferômetro, ou até oscilações do sinal. O amplificador poderia ser substituído por um que esteja em fase com a rede elétrica para diminuir estes efeitos, além de aumentar a distância entre o equipamento e as fontes luminosas.

Outro problema diz respeito à visibilidade do feixe, que é prejudicada por o divisor de feixe não ser de 50%. Isso seria resolvido ao modificar o divisor de feixe e com a

incorporação de um pinhole.

O projeto está longe de ser apresentado para utilização em sala de aula. No entanto, grande progresso foi feito no desenvolvimento do equipamento e na medição de espectros policromáticos. Todo o processo permitiu uma boa revisão de conceitos apresentados ao longo do curso de Bacharelado em Física, em especial aqueles referentes à instrumentação científica.

A cada medida e a cada teste feito com o equipamento, mais chegamos a entender sobre ele. Neste sentido, o aprendizado não acaba. Minha esperança é de continuar trabalhando com ele por um tempo, ou pelo menos deixá-lo em condições de ser continuado por outro. Gostaria de pensar que um dia este experimento possa ser incorporado no currículo obrigatório das matérias do IF, e que vários alunos se divirtam com ele tanto quanto eu.



Referências

- BAKKER, B. de. *28BYJ-48 Stepper Motor with ULN2003 Driver and Arduino Tutorial*. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://www.makerguides.com/28byj-48-stepper-motor-arduino-tutorial/>. Citado na página 44.
- BAUGH, J. et al. Precision stark spectroscopy of sodium 2 p and 2 d states. *Physical Review A*, APS, v. 58, n. 2, p. 1585, 1998. Citado na página 27.
- BELL, R. *Introductory Fourier transform spectroscopy*. [S.l.]: Elsevier, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 38.
- BR@Y++. 2018. Disponível em: <https://www.narom.no/undervisningsressurser/the-cansat-book/the-primary-mission/using-the-radio/terminal-program/>. Acesso em: 4.5.2021. Citado na página 52.
- BURNS, K.; ADAMS, K. B.; LONGWELL, J. Interference measurements in the spectra of neon and natural mercury. *JOSA*, Optical Society of America, v. 40, n. 6, p. 339–344, 1950. Citado na página 27.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei, and particles*. [S.l.: s.n.], 1985. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- FOWLES, G. R. *Introduction to modern optics*. [S.l.]: Courier Corporation, 1989. Citado 4 vezes nas páginas 28, 30, 35 e 38.
- JENKINS, F. A.; WHITE, H. E. *Fundamentals of optics*. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 19, 20, 28, 68 e 78.
- KAIMARTIN, P. D. 2009. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6625679>. Acesso em: 25.4.2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 50.
- KIATRONICS. *Datasheet for stepper motor 28BYJ-48 5V DC*. [S.l.], S/D. Disponível em: <https://datasheetspdf.com/pdf/1006817/Kiatronics/28BYJ-48/1>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 44.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: Ótica e Física Moderna*. [S.l.]: São Paulo: Edgar Blücher, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 24, 28 e 30.
- PASCO. 1990. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjFrprs6L3wAhWyBtQKHWjEDQoQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fdemolab.phys.virginia.edu%2Fdemos%2Fdocuments%2FPASCO_Mercury_Vapor_Light_Source_OS-9286A.pdf&usq=AOvVaw3AcPOooZ4AGYjoU7IQ0imb. Acesso em: 4.5.2021. Citado na página 68.
- RODRIGUES, N. A. S. *Lasers: notas de aula*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 27, 28, 30 e 43.

TEXAS-INSTRUMENTS. *Datasheet for ULN2003 Darlington transistor array*. [S.l.], S/D. Disponível em: https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Uln2003%20datasheet&gclid=CjwKCAiAkan9BRAqEiwAP9X6UcNgkMPLPldotzdpY1GOl39UpuHACA8-QivjEYRWOBugXWeF_nqBoCczQQAvD_BwE. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 45.

THORLABS. S/D. Disponível em: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3482. Acesso em: 10.5.2021. Nenhuma citação no texto.

THORLABS. S/D. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwja0v70_7XwAhVkJrkGHTkRBjkQFjABcgQIAxAD&url=https%3A%2F%2Fwww.thorlabs.com%2Fimages%2FTabImages%2FPhotodetector_Lab.pdf&usg=AOvVaw31mUCpqHKkXEj8Y4TTqjml. Acesso em: 29.4.2021. Citado na página 62.

VILLATE, P. D. 2012. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=22008996>. Acesso em: 25.4.2021. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 29.

Anexos

ANEXO A – Programa Arduino

```

1 //original source is http://www.geeetech.com/wiki/index.php/
  Stepper_Motor_5V_4-Phase_5-Wire_%26
  _ULN2003_Driver_Board_for_Arduino
2 //Update by Ahmad Shamshiri for RoboJax.com
3 //Published on March 27, 2017 in Aajx, ON, Canada.
4 /* * This code is "AS IS" without warranty or liability. Free
  to be used as long as you keep this note intact.
5 /* This code has been download from Robojax.com
6 //This program is free software: you can redistribute it and/or
  modify it under the terms of the GNU General Public License as
  published by the Free Software Foundation, either version 3 of
  the License, or (at your option) any later version.
7 //This program is distributed in the hope that it will be useful,
  but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
  MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
  GNU General Public License for more details.
8
9 //Further updated by Mariana Casement on May 3, 2021.
10
11 //global variables
12
13 //Pins that control motor
14 byte Pin1 = 8;
15 byte Pin2 = 9;
16 byte Pin3 = 10;
17 byte Pin4 = 11;
18
19 int _step = 0; // half-step counter
20
21 byte dir = 0; // direction delimiter: 0=clockwise, 1=counter
  clockwise
22 unsigned long vel = 570; // delay between measurements, minimum
  570 so there isn't a problem
23 const long max_step_val = 650000L; //maximum number of steps so
  that micrometer does not get to end of course (if started at
  beginning)
24
25 byte pare = 0; //if it's 0, the motor will stop

```

```
26
27 byte dist_dados = 1; //quantos _step entre cada registro de um
    dado
28 int media = 100; //quantas medidas tomar antes de tirar media a
    cada dado
29 unsigned long count = 0UL; //numero de steps andados
30
31 unsigned long num_dados = 0UL; //numero de dados registrados
    durante a varredura
32 unsigned long total_dados = 10000UL; //quantos dados a tomar a
    cada varredura
33 unsigned long andar_dados = 5000UL;
34
35 unsigned long time_i = 0UL;
36 unsigned long time_f = 0UL;
37 float t_medid = 0;
38
39 //code that comands motor at each half-step
40 void passo() {
41     switch(_step){
42         case 0:
43             digitalWrite(Pin1, LOW);
44             digitalWrite(Pin2, LOW);
45             digitalWrite(Pin3, LOW);
46             digitalWrite(Pin4, HIGH);
47             break;
48         case 1:
49             digitalWrite(Pin1, LOW);
50             digitalWrite(Pin2, LOW);
51             digitalWrite(Pin3, HIGH);
52             digitalWrite(Pin4, HIGH);
53             break;
54         case 2:
55             digitalWrite(Pin1, LOW);
56             digitalWrite(Pin2, LOW);
57             digitalWrite(Pin3, HIGH);
58             digitalWrite(Pin4, LOW);
59             break;
60         case 3:
61             digitalWrite(Pin1, LOW);
62             digitalWrite(Pin2, HIGH);
63             digitalWrite(Pin3, HIGH);
```

```
64     digitalWrite(Pin4, LOW);
65     break;
66     case 4:
67     digitalWrite(Pin1, LOW);
68     digitalWrite(Pin2, HIGH);
69     digitalWrite(Pin3, LOW);
70     digitalWrite(Pin4, LOW);
71     break;
72     case 5:
73     digitalWrite(Pin1, HIGH);
74     digitalWrite(Pin2, HIGH);
75     digitalWrite(Pin3, LOW);
76     digitalWrite(Pin4, LOW);
77     break;
78     case 6:
79     digitalWrite(Pin1, HIGH);
80     digitalWrite(Pin2, LOW);
81     digitalWrite(Pin3, LOW);
82     digitalWrite(Pin4, LOW);
83     break;
84     case 7:
85     digitalWrite(Pin1, HIGH);
86     digitalWrite(Pin2, LOW);
87     digitalWrite(Pin3, LOW);
88     digitalWrite(Pin4, HIGH);
89     break;
90     default:
91     digitalWrite(Pin1, LOW);
92     digitalWrite(Pin2, LOW);
93     digitalWrite(Pin3, LOW);
94     digitalWrite(Pin4, LOW);
95     break;
96 }
97 }
98
99 //function to print data at serial port.
100 void dado() {
101     int med = count % dist_dados; //resto da divisao: will be zero
        when count is a multiple of media
102     float result = 0;
103     if(med==0){
104         for(int m=1; m<=media; m++){ //tirando a media de #media
```

```
        valores com motor parado
105     result = result + float(analogRead(A0));
106     }
107     Serial.print(count); //imprime em qual _step (meio-passo)
        esta
108     Serial.print(" ");
109     Serial.println(result/media); //imprime dados de fato
110     num_dados++;
111 }else{
112     return;
113 }
114 }
115
116 //function for motor to move and data collected
117 void uma_varr(){
118     if(num_dados < total_dados){
119         //Se valor de pare for diferente de 0, count maior que
        limite ou programa para de rodar
120     if(count >= max_step_val){
121         pare = 0;
122         _step = 10;
123         passo();
124         return;
125     }
126     //entra com o numero do _step, coloca motor nas fases
        correspondentes
127     passo();
128     count++; //number of half-steps given
129     //aumenta ou diminui o valor de _step para que passe para a
        proxima posicao, que vai depender da direcao
        estabelecida
130     if(dir == 1){
131         _step++;
132     }else if(dir == 0) {
133         _step--;
134     }else{
135         Serial.println("Por favor insira um valor valido: 0 ou
            1.");
136         pare = 0;
137         _step = 10;
138         passo();
139         return;
```

```
140     }
141     //recomeca o valor de _step ao final de um ciclo
142     if(_step>7){
143         _step=0;
144     }
145     if(_step<0){
146         _step=7;
147     }
148     //entra com alguns valores, pega um valor do sinal, escreve
149     //na porta serial e retorna com novo num_dados
150     dado();
151     if(media <= 20){
152         delayMicroseconds(500); //pra nao travar
153     }
154 }
155
156 //roda e coleta dados por um curto periodo, como teste
157 void teste(){
158     num_dados=0;
159     count=0;
160     media=10;
161     while(num_dados<=50){
162         uma_varr();
163     }
164     _step = 10;
165     passo();
166 }
167
168 //imprime funcoes e variaveis editaveis
169 void _print(){
170     Serial.println(F("-Valores dos parametros editaveis"));
171     Serial.print(F("dir: "));
172     Serial.println(dir);
173     Serial.print(F("vel: "));
174     Serial.println(vel);
175     Serial.print(F("oq: "));
176     Serial.println(pare);
177     Serial.print(F("dist: "));
178     Serial.println(dist_dados);
179     Serial.print(F("m: "));
180     Serial.println(media);
```



```
181     Serial.print(F("dtot: "));
182     Serial.println(total_dados);
183     Serial.print(F("varr: "));
184     Serial.println(total_varr);
185     Serial.print(F("and: "));
186     Serial.println(andar_dados);
187
188     Serial.println(" ");
189
190     Serial.println(F("-Funcoes chamaveis:"));
191     Serial.println(F("medida"));
192     Serial.println(F("stop"));
193     Serial.println(F("andar"));
194     Serial.println(F("teste"));
195     Serial.println(F("print"));
196     Serial.println(F("invert"));
197 }
198
199 //Obrigada o motor a parar, interrompendo uma medida
200 void parar(){
201     pare = 0;
202     time_f = millis();
203     t_medid = (time_f - time_i) /1000.;
204     Serial.println("Medida interrompida.");
205     Serial.print("Tempo da medida:");
206     Serial.print(t_medid);
207     Serial.println("s");
208     _step = 10;
209     passo();
210 }
211
212 //Inicia coleta de dados utilizando uma_var()
213 void medias(){
214     pare = 1;
215     num_dados = 0;
216     count = 0;
217     Serial.println("Configuracoes da Medida de uma varredura:");
218     Serial.print("Quantidade de medidas: ");
219     Serial.println(total_dados);
220     Serial.print("Distancia entre dados (em meio-passos): ");
221     Serial.println(dist_dados);
222     Serial.print("Media de quantos dados: ");
```

```
223     Serial.println(media);
224     Serial.print("Direcao: ");
225     if(dir == 0){
226         Serial.println("Horario. Valor micrometro diminui");
227     }else if(dir == 1){
228         Serial.println("Antihorario. Valor micrometro aumenta");
229     }
230     time_i = millis();
231     Serial.println("Medida inicializada");
232 }
233
234 //inicia movimento do motor
235 void andar(){
236     pare = 2;
237     count = 0;
238     if(vel < 570){
239         vel = 570;
240     }
241 }
242
243 //inverte o sentido do motor
244 void inv_dir(){
245     if(dir == 0){
246         dir = 1;
247     }else if(dir == 1){
248         dir = 0;
249     }else{
250         dir = dir%2;
251     }
252 }
253
254 //parte de inclusao do LVP, deve vir antes do void setup e do
    void loop
255 #include <LVP.h>
256 const word baudRate = 9600;
257 const byte numEditableData = 7;
258 const byte numFunctions = 6;
259 LVP lvp(numEditableData, numFunctions, baudRate);
260
261 void initializeLVP(){
262     lvp.initialize();
263     lvp.addFunction("medida", &medias);
```

```
264     lvp.addFunction("stop", &parar);
265     lvp.addFunction("andar", &andar);
266     lvp.addFunction("teste", &teste);
267     lvp.addFunction("print", &_print);
268     lvp.addFunction("invert", &inv_dir);
269     lvp.addParameter("dir", &dir);
270     lvp.addParameter("vel", &vel);
271     lvp.addParameter("dtot", &total_dados);
272     lvp.addParameter("dist", &dist_dados);
273     lvp.addParameter("m", &media);
274     lvp.addParameter("oq", &pare);
275     lvp.addParameter("and", &andar_dados);
276 }
277
278 void serialEvent(){
279     lvp.getNewCommand();
280 }
281
282 //agora as partes obrigatoria do Arduino: void setup e void loop
283 void setup() {
284     pinMode(Pin1, OUTPUT);
285     pinMode(Pin2, OUTPUT);
286     pinMode(Pin3, OUTPUT);
287     pinMode(Pin4, OUTPUT);
288     pinMode(A0, INPUT);
289     initializeLVP(); //jah inicializa a porta Serial
290     Serial.println("Setup ok");
291 }
292
293 void loop() {
294     //condicao para movimentar motor e tomar dados
295     if(pare == 1){
296         uma_varr();
297         if(num_dados == total_dados){
298             Serial.println("Medida finalizada.");
299             time_f = millis();
300             t_medid = (time_f-time_i)/1000.;
301             Serial.print("Tempo da medida:");
302             Serial.print(t_medid);
303             Serial.println("s");
304             pare=0;
305             _step = 10;
```

```
306     passo();
307 }
308 }
309 //condicao para movimentar motor
310 if(pare == 2){
311     passo();
312     count++;
313     if(count == andar_dados || count >= max_step_val){
314         pare = 0;
315         _step = 10;
316         passo();
317     }
318     if(dir == 1){
319         _step++;
320     }else if(dir == 0) {
321         _step--;
322     }else{
323         Serial.println("Por favor insira um valor valido: 0 ou
324             1.");
325         pare = 0;
326         _step = 10;
327         passo();
328     }
329     if(_step>7){
330         _step=0;
331     }
332     if(_step<0){
333         _step=7;
334     }
335     delayMicroseconds(vel);
336 }
```