



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

ANDRÉ JOSÉ DE CARVALHO SILVA

Desenvolvimento de dispositivos moduladores ópticos para o estudo de nanofios magnéticos

Cabo de Santo Agostinho - PE

2025

ANDRÉ JOSÉ DE CARVALHO SILVA

Desenvolvimento de dispositivos moduladores ópticos para o estudo de nanofios magnéticos

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Área de Concentração: Engenharias

Orientador: Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior

Cabo de Santo Agostinho - PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Lorena Teles – CRB-4 1774

S586d Silva, André José de Carvalho.
Desenvolvimento de dispositivos moduladores ópticos para o estudo de nanofios magnéticos / André José de Carvalho Silva. - Cabo de Santo Agostinho, 2025.
79 f.; il.

Orientador(a): José Holanda da Silva Júnior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Bacharelado em Engenharia Eletrônica, Cabo de Santo Agostinho, BR-PE, 2025.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Engenharia (Sistemas de Controle e Automação Industrial). 2. Kerr, Efeito de. 3. Eletrostática. 4. Óptica 5. Polarização (Luz). I. Júnior, José Holanda da Silva, orient. II. Título

CDD 621.3

ANDRÉ JOSÉ DE CARVALHO SILVA

Desenvolvimento de dispositivos moduladores ópticos para o estudo de nanofios magnéticos

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Aprovado em: 19/02/2025.

Banca examinadora

Prof. Dr. José Holanda da Silva Júnior, UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Elias Marques Ferreira de Oliveira, UFRPE
Examinador

Prof. Dr. Sergio Vladimir Barreiro Degiorgi, UFRPE
Examinador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, cuja presença constante ilumina meu caminho, me fortalecendo e guiando para superar os desafios diários, sempre cuidando e abençoando minha trajetória.

À minha família, expresso minha profunda gratidão pelo esforço incansável e pelo apoio incondicional, mesmo diante das adversidades, que me proporcionou a chance de estudar e me desenvolver. Vocês são a motivação que me impulsiona a buscar um futuro promissor e a viver momentos inesquecíveis.

Agradeço também a todas as pessoas que cruzaram meu caminho nesta jornada, pelos abraços, incentivos e palavras de apoio que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, sou profundamente grato aos amigos e irmãos que conquistei ao longo do curso, especialmente Adrielson, Ayron, Semaías e Maria Clara, cuja colaboração e companheirismo foram essenciais.

Agradeço à UFRPE, à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho e a todos os professores que compartilharam seus conhecimentos comigo, contribuindo para a formação que moldou minha percepção e pensamento, essenciais para meu crescimento pessoal e profissional.

Meu reconhecimento especial vai para o professor Holanda, meu orientador, que me apoiou de maneira exemplar durante minha trajetória acadêmica. Mesmo diante dos desafios pessoais, escolares e profissionais, seu apoio, conselhos e orientações foram decisivos para que eu superasse os obstáculos e me tornasse o profissional que almejo ser.

Por fim, agradeço ao Núcleo de Optoeletrônica e Spintrônica/UACSA pela oportunidade de aprendizado e pelo desenvolvimento pessoal proporcionado ao longo desta jornada, em especial aos membros Adrielson, Maria Clara, José Araújo, Kevin, Luana, Monalisa e Laurentino, bem como a todos os demais que contribuíram para enriquecer esse percurso.

RESUMO

Neste trabalho de monografia, foram desenvolvidos dispositivos para a modulação óptica utilizando chaves ópticas e choppers para controlar a emissão de luz. Esses moduladores geraram pulsos de luz branca, que foram empregados para excitar e manipular as propriedades optoeletrônicas e spintrônicas de materiais. Em particular, foram investigados os efeitos da modulação da luz em nanofios magnéticos de níquel, com ênfase no efeito magneto-óptico Kerr. Para o controle e desenvolvimento das técnicas, foi utilizado um Arduino Uno, que gerou os pulsos e se comunicou com um computador via interface serial em Python. As chaves ópticas realizaram modulações em tempos de segundos a dezenas de segundos, enquanto os choppers efetuaram modulações em milissegundos. A luz modulada foi analisada antes e depois da reflexão nos nanofios, variando-se o ângulo entre os pulsos incidentes e refletidos na amostra. Esse procedimento permitiu investigar a fase do sinal modulado e os efeitos da interação com campos magnéticos. Os dados experimentais foram processados utilizando o software Origin, possibilitando uma análise detalhada dos comportamentos ópticos e magneto-ópticos em resposta à modulação da luz.

Palavras-chave: controle PID; efeito magneto-óptico Kerr; luz modulada; optoeletrônica.

ABSTRACT

In this thesis, devices for optical modulation were developed using optical shutters and choppers to control light emission. These modulators generated pulses of white light, which were employed to excite and manipulate the optoelectronic and spintronic properties of materials. In particular, the effects of light modulation on nickel magnetic nanowires were investigated, with an emphasis on the magneto-optical Kerr effect. An Arduino Uno was used for controlling and developing the techniques, generating the pulses and communicating with a computer via a serial interface in Python. The optical shutters performed modulations over time intervals ranging from seconds to tens of seconds, while the choppers achieved modulations on the order of milliseconds. The modulated light was analyzed both before and after reflection from the nanowires, with the angle between the incident and reflected pulses being varied. This procedure allowed for the investigation of the phase of the modulated signal and the effects of interaction with magnetic fields. The experimental data were processed using Origin software, enabling a detailed analysis of the optical and magneto-optical behaviors in response to light modulation.

Keywords: PID control; Kerr magneto-optic effect; modulated light; optoelectronics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema ilustrativo de diferentes tipos de polarizações.	15
Figura 2 – Diagrama esquemático do funcionamento do Efeito Faraday.	16
Figura 3 – As três configurações geométricas do efeito Kerr.	17
Figura 4 – Ilustração de como funciona o Efeito Kerr.	17
Figura 5 – Diagrama de operação de um chopper mecânico.	18
Figura 6 – Nanofios de níquel.	19
Figura 7 – Diagrama de bloco de um controlador PID aplicado a um sistema (Planta).	19
Figura 8 – Placa eletrônica programável Arduíno Uno.	22
Figura 9 – Servo motor Tower Pro, modelo SG90.	23
Figura 10 – Motor DC 12V modelo CZ021-60028.	23
Figura 11 – Sensor de velocidade F249.	24
Figura 12 – Diagrama do sensor de velocidade F249.	24
Figura 13 – Diagrama de blocos exemplificando a comunicação entre computador e arduíno.	25
Figura 14 – Chave óptica.	26
Figura 15 – Chopper óptico.	27
Figura 16 – Disco dentado no formato de hélice com 4 janelas.	27
Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema de controle PID implementado no chopper óptico.	28
Figura 18 – Esquema de ligação dos componentes do chopper mecânico.	28
Figura 19 – Conexão entre componentes.	29
Figura 20 – Montagem dos eletroímãs.	30
Figura 21 – Diagrama de conexão dos eletroímãs a uma fonte de alimentação com tensão V_{cc}	30
Figura 22 – a) Configuração interna do gerador de luz. b) Saída de luz. c) Vista superior da caixa metálica fechada.	31
Figura 23 – Potência para cada comprimento de onda, de acordo com a tensão que é proporcional a intensidade luminosa.	31
Figura 24 – a) Vista superior. b) Vista lateral da bobina eletromagnética.	32
Figura 25 – Bobina não-Helmholtz, posicionada em um suporte para disposição de amostras.	33
Figura 26 – Circuito RLC que permite maximizar a geração de campo magnético.	33
Figura 27 – Simulação da resposta em frequência utilizando o par de bobinas.	34

Figura 28 – Espectroscopia do laser, mostrando que o laser possui um comprimento de onda próximo de 670 nm.	35
Figura 29 – Diagrama de montagem do experimento.	36
Figura 30 – Experimento montado no laboratório.	36
Figura 31 – Diagrama de montagem do experimento, com o ângulo de reflexão sendo $\theta = 10^\circ$	36
Figura 32 – Experimento montado no laboratório com o laser refletindo na amostra de GaAs.	36
Figura 33 – Gráfico mostrando os sinais obtidos a partir da reflexão em uma amostra de GaAs e sem ser refletido, ambos para uma modulação de 10 s.	37
Figura 34 – Fit gerado no Origin a partir dos dados experimentais do sinal não refletido na amostra de GaAs.	38
Figura 35 – Fit gerado pelo Origin a partir dos dados experimentais do sinal refletido na amostra de GaAs.	39
Figura 36 – Gráfico mostrando os sinais obtidos a partir da reflexão em uma amostra de GaAs e sem ser refletido, ambos para uma modulação de 20 s.	39
Figura 37 – Fit gerado no Origin a partir dos dados experimentais do sinal sem ser refletido na amostra de GaAs. Modulação em 20 s	40
Figura 38 – Fit gerado pelo Origin a partir dos dados experimentais do sinal refletido na amostra de GaAs.	41
Figura 39 – Gráfico mostrando os sinais obtidos a partir da reflexão em uma amostra de GaAs e sem ser refletido, ambos para uma modulação de 30 s.	41
Figura 40 – Fit gerado no Origin, a partir dos dados experimentais do sinal sem ser refletido na amostra de GaAs. Modulação em 30 s.	42
Figura 41 – Fit gerado pelo Origin a partir dos dados experimentais do sinal refletido na amostra de GaAs.	43
Figura 42 – Esquema aplicado para testar o dispositivo gerador de luz branca.	44
Figura 43 – a) Chopper modulando a uma taxa de 90 Hz. b) Largura do pulso.	44
Figura 44 – Posicionamento da ponta de prova do gaussímetro para medir a intensidade do campo.	45
Figura 45 – Vista superior do posicionamento da ponta de prova do gaussímetro.	45
Figura 46 – Intensidade do campo gerado pelo eletroímã.	46
Figura 47 – Diagrama experimental.	47
Figura 48 – Porta amostra detalhado.	47

Figura 49 – a) Vista superior. b) Acima a bobina que gera campo magnético CC e logo abaixo a luz incidindo na amostra. c) Posicionamento do fotodiodo. d) Vista superior com ênfase na bobina, mostrando a posição do porta amostra.	48
Figura 50 – Ângulo de 10° e modulação de 10 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) .Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	49
Figura 51 – Ângulo de 10° e modulação de 20 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) .Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	50
Figura 52 – Ângulo de 10° e modulação de 30 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) .Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	50
Figura 53 – Dependência do deslocamento de fase em relação à largura do pulso de modulação para um ângulo de incidência de 10° entre os pulsos de luz incidente e refletido.	51
Figura 54 – Ângulo de 20° e modulação de 10 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) .Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	51
Figura 55 – Ângulo de 20° e modulação de 20 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) .Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	52
Figura 56 – Ângulo de 20° e modulação de 30 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) .Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	52
Figura 57 – Dependência do deslocamento de fase em relação à largura do pulso de modulação para um ângulo de incidência de 20° entre os pulsos de luz incidente e refletido.	53

Figura 58 – Ângulo de 30° e modulação de 10 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	53
Figura 59 – Ângulo de 30° e modulação de 20 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	54
Figura 60 – Ângulo de 30° e modulação de 30 s. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	54
Figura 61 – Dependência do deslocamento de fase em relação à largura do pulso de modulação para um ângulo de incidência de 30° entre os pulsos de luz incidente e refletido.	55
Figura 62 – Pulso gerado pelo chopper, modulando a uma taxa de 120 Hz. Largura de pulso de 0,5 ms.	56
Figura 63 – Para o ângulo de 10°. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	56
Figura 64 – Para o ângulo de 20°. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	57
Figura 65 – Para o ângulo de 30°. a) Sem campo aplicado. b) Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. c) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. d) Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.	57
Figura 66 – Dependência do deslocamento de fase em relação à variação angular entre os pulsos de luz incidente e refletido.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas relacionadas a reflexão da luz na amostra sem modulação.	48
Tabela 2 – Deslocamento de fase em relação a configuração sem campo para o ângulo de 10 graus.	50
Tabela 3 – Deslocamento de fase em relação a configuração sem campo para o ângulo de 20 graus.	52
Tabela 4 – Deslocamento de fase em relação a configuração sem campo para o ângulo de 30 graus.	54
Tabela 5 – Deslocamento de fase para cada ângulo e configuração.	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	EFEITOS MAGNETO-ÓPTICOS	15
2.1.1	Efeito magneto-óptico Faraday	16
2.1.2	Efeito magneto-óptico Kerr	16
2.2	MODULADORES DE INTENSIDADE DA LUZ	18
2.3	NANOFIOS DE NÍQUEL	18
2.4	CONTROLE PID	19
2.4.1	Representação na Transformada de Laplace	20
2.4.2	Desenvolvimento dos Termos Individuais	20
2.4.3	Sintonia do Controlador PID	21
3	METODOLOGIA	21
3.1	COMPONENTES/DISPOSITIVOS UTILIZADOS	22
3.1.1	Arduino Uno	22
3.1.2	Servo motor	22
3.1.3	Motor DC	23
3.1.4	Sensor de velocidade	23
3.1.5	Outros componentes	24
3.2	PROGRAMAS E COMUNICAÇÃO	25
3.2.1	IDE do Arduíno	25
3.2.2	Comunicação serial com Arduino utilizando Python	25
3.3	CHAVE ÓPTICA	26
3.4	CHOPPER ÓPTICO	26
3.4.1	Desenvolvimento do chopper óptico.	27
3.5	ELETROÍMÃS	29
3.6	GERADOR DE LUZ BRANCA	31
3.7	BOBINA ELETROMAGNÉTICA	32
3.8	BOBINAS NÃO-HELMHOLTZ	32
4	RESULTADOS	35
4.1	TESTES DOS DISPOSITIVOS	35
4.1.1	Testes utilizando a chave óptica	35
4.1.2	Chopper óptico	43

4.1.3	Intensidade do campo magnético gerado pelo par de eletroímãs	45
4.2	EXPERIMENTO UTILIZANDO NANOFIOS DE NÍQUEL	46
4.2.1	Modulando a luz com a chave óptica	47
4.2.2	Modulando a luz com o chopper	55
	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A - CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA CONTROLE DA CHAVE ÓPTICA	64
	APÊNDICE B - CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA O CONTROLE DO CHOP- PER UTILIZANDO ALGORITMO PID	69

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a miniaturização e o aprimoramento das técnicas de fabricação permitiram avanços significativos no estudo dos nanomateriais, revelando propriedades físicas e magnéticas que fogem do comportamento dos materiais macroscópicos. Em particular, os nanofios magnéticos se destacam por sua estrutura quase unidimensional, onde o movimento dos elétrons e dos spins fica restrito a dimensões extremamente pequenas. Esse fenômeno de confinamento intensifica as interações internas, resultando em anisotropias magnéticas mais pronunciadas, como demonstrado em estudos recentes sobre interações em interfaces ferro/antiferromagnéticas (Ferro *et al.*, 2024) e arranjos de nanofios (Silva *et al.*, 2023a). Tais características únicas abrem caminho para aplicações inovadoras, que vão desde sistemas de armazenamento de dados de alta densidade até dispositivos spintrônicos e sensores magnéticos com alta sensibilidade (Bader, 2006; Parkin; Hayashi; Thomas, 2008), complementadas por investigações sobre magnetoresistência Rashba-Edelstein em materiais 2D (Mendes; Rezende; Holanda, 2021).

Paralelamente, o desenvolvimento de dispositivos moduladores ópticos tem revolucionado a forma como interagimos com a luz. Tais moduladores são capazes de controlar, dinamicamente, parâmetros essenciais da luz, como intensidade, fase e polarização. Essa capacidade de modulação é particularmente útil na área de magneto-óptica, onde os efeitos de Faraday e Kerr fornecem métodos não destrutivos para investigar estados magnéticos em materiais (Faraday, 1845; Kerr, 1877). Trabalhos recentes, como os de (Hildever *et al.*, 2024a; Hildever *et al.*, 2024b; Hildever *et al.*, 2024c), exploraram a detecção de interações magneto-ópticas em nanoestruturas, enquanto (Silva *et al.*, 2023b) analisaram a influência magnética nessas interações, reforçando a relevância da modulação óptica como ferramenta de caracterização. A integração desses dispositivos com sistemas nanométricos permite a realização de medidas de alta resolução temporal e espacial, fundamentais para a análise dos processos dinâmicos envolvidos nos nanofios magnéticos (Thomaschewski *et al.*, 27 set. 2023), corroborada por estudos experimentais sobre efeitos de interface magnética (Silva; Degiorgi; Holanda, 2023).

Além disso, a convergência entre óptica e magnetismo abre novas perspectivas para a investigação de interações spin-ótica, onde a modulação óptica pode ser empregada para excitar e detectar variações nos estados magnéticos. A integração de tecnologias de fotônica integrada (como aquelas desenvolvidas em plataformas de silício) com experimentos de magneto-óptica tem demonstrado ser uma abordagem promissora para explorar fenômenos quânticos e para o desenvolvimento de dispositivos híbridos que combinam características ópticas e magnéticas (Pavesi; Lockwood, 2004). Nesse contexto, avanços recentes em controle PID aplicado a moduladores (Hildever *et al.*, 2024a) e na análise de correntes de spin (Silva *et al.*, 2023c) oferecem subsídios técnicos para o desenvolvimento de sistemas de controle precisos, como os implementados nesta

pesquisa com Arduino e Python.

A modulação da luz branca, gerada por fontes como lâmpadas de xenônio ou LEDs broadband, é de extrema importância nesse contexto. A luz branca, por possuir um amplo espectro de comprimentos de onda, possibilita a análise de respostas magnéticas em diferentes regiões espectrais, aprimorando a caracterização dos efeitos magneto-ópticos. Esse aspecto se mostra especialmente relevante na investigação dos efeitos de Faraday e Kerr, os quais já demonstraram, desde os estudos clássicos (Faraday, 1845; Kerr, 1877), a sensibilidade dos sistemas ópticos às variações de campo magnético. Estudos como os de (Holanda *et al.*, 2021; Rezende *et al.*, 2021) sobre bombeamento de fônons por correntes de spin magnônicas destacam o papel crítico da interação luz-matéria em escalas nanométricas, enquanto investigações sobre amortecimento magnético térmico (Holanda; Santos; Rezende, 2021) fornecem insights para o controle térmico em dispositivos práticos.

Este trabalho tem como finalidade desenvolver dispositivos moduladores ópticos para o estudo de nanofios magnéticos, alinhando-se a esforços recentes na área (Holanda, 2021). A pesquisa busca investigar os efeitos magneto-ópticos de Kerr e Faraday nesses materiais, com ênfase na análise da modulação da luz incidente e refletida, possibilitando o desenvolvimento de moduladores optoeletrônicos controláveis por campo magnético e/ou por luz. Pretende-se, assim, compreender as interações entre luz e magnetismo em escalas nanométricas, identificando os principais efeitos magneto-ópticos, especialmente os de Kerr e Faraday. Para atingir esse objetivo, serão elaborados dispositivos moduladores, como chaves ópticas em forma de cancela e choppers, que serão programados para controle via computador. Uma etapa fundamental consiste em incidir luz modulada (pulsos de luz) sobre amostras de nanofios magnéticos submetidas à influência de campos magnéticos, analisando a luz antes e após sua interação com a amostra e variando o ângulo entre o feixe de luz e os campos, abordagem similar à empregada por (Hildever *et al.*, 2024b) na transferência de características ópticas para materiais magnéticos. Por fim, serão realizados ensaios experimentais com o uso de osciloscópios, detectores, espectrômetros e medidores de tensão elétrica para quantificar os efeitos da modulação.

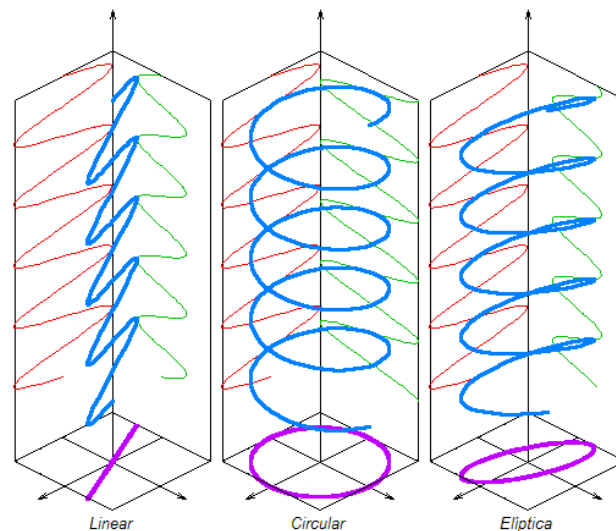
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EFEITOS MAGNETO-ÓPTICOS

O experimento feito por Faraday foi um dos primeiros estudos que indicava a relação entre o campo magnético e a luz. Faraday estava estudando como a força magnética poderia interagir com uma onda eletromagnética e com isso descobriu o efeito magneto-óptico que ganhou seu nome posteriormente (Silva, 2019). Segundo a abordagem apresentada, uma onda eletromagnética transversal pode ser linearizada ou elíptica/circularmente polarizada. Em uma polarização linear, a luz é uma onda com o campo elétrico oscilando em uma determinada direção, perpendicular à direção de propagação. Na polarização elíptica, o campo elétrico rotaciona durante a propagação, descrevendo uma elipse em um plano perpendicular à direção de propagação, quando um círculo é descrito, é chamada de polarização circular (Haider, 2017).

A Figura 1 mostra os diferentes tipos de polarização que uma onda eletromagnética pode adotar.

Figura 1 – Esquema ilustrativo de diferentes tipos de polarizações.



Fonte: WIKIPÉDIA, 2021.

https://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Polariza%C3%A7%C3%A3o_eletromagn%C3%A9tica&oldid=60243434

A descoberta do efeito magneto-óptico em 1845 por Michael Faraday, marcou como sendo a primeira observação da interação da luz com o magnetismo, além do início da magneto-óptica (Haider, 2017). A interação entre a radiação eletromagnética e materiais magneticamente polarizados resulta em efeitos magneto-ópticos. Por outro lado, John Kerr, examinando a polarização da luz, conseguiu observar um efeito semelhante ao de Faraday, através da reflexão da onda eletromagnética. Os efeitos magneto-ópticos podem ser explicados de forma microscópica através da teoria quântica ou podendo ser apresentados de forma macroscópica pela teoria dielétrica (Ferreira,

2018). Abaixo é descrito as principais características dos efeitos Faraday e Kerr.

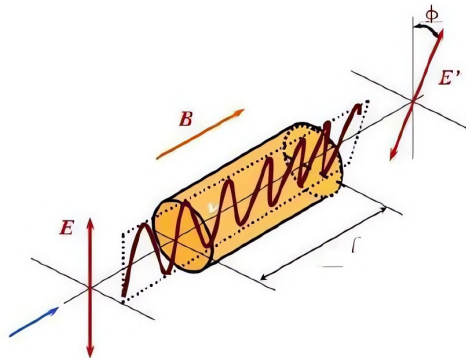
2.1.1 Efeito magneto-óptico Faraday

Faraday mostrou que uma onda linearmente polarizada sofre uma rotação do plano de polarização ao passar por um campo magnético paralelo ao plano de propagação. Na forma mais simples, a rotação ϕ presente na equação (1), é proporcional a força do campo magnético B e ao comprimento da amostra em que a onda eletromagnética atravessa.

$$\phi = V \int_0^l B dl = V l B \quad (1)$$

V é chamado de constante de Verdet, a qual depende das propriedades do meio. Se a onda eletromagnética é refletida de volta através do meio, o efeito é cancelado, $\phi \rightarrow -\phi$. A condição necessária para a geração do efeito Faraday é que parte do campo magnético externo e a propagação da onda estejam na mesma direção, de modo que o sentido de propagação da onda eletromagnética não altera o efeito (Silva, 2019). A Figura 2 demonstra o funcionamento do efeito Faraday, onde uma onda eletromagnética linearmente polarizada com componente de campo elétrico predominante E , passa por um meio com a presença de campo magnético B , sofrendo uma rotação em seu plano de polarização ϕ .

Figura 2 – Diagrama esquemático do funcionamento do Efeito Faraday.



Fonte: Haider, 2017.

2.1.2 Efeito magneto-óptico Kerr

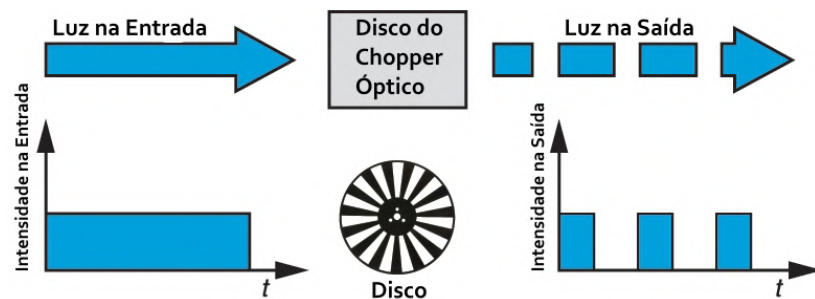
O efeito magneto-óptico Kerr (MOKE) foi descoberto em 1877, este efeito ocorre quando uma onda eletromagnética linearmente polarizada é refletida na superfície de um metal na presença de um campo magnético. A polarização da onda refletida torna-se elíptica e a rotação desta polarização é proporcional à magnetização e espessura da superfície. Existem três configurações geométricas do MOKE, sendo elas: Polar (PMOKE), longitudinal (LMOKE) e transversal (TMOKE).

2.2 MODULADORES DE INTENSIDADE DA LUZ

O chopper óptico é um instrumento científico que é utilizado para modular a intensidade de um feixe de luz, essa modulação acontece interrompendo a incidência da luz periodicamente. Essa modulação é importante para investigar as propriedades elétricas e ópticas em materiais semicondutores nanoestruturados e dispositivos optoeletrônicos. A taxa com que ocorre essa modulação é um dos principais parâmetros em moduladores ópticos, isso se deve ao fato de que, quanto mais rápido ocorre essa interrupção da luz, menores serão os pulsos. Há diferentes formas de modular a intensidade de um feixe de luz, e um *chopper* mecânico é a maneira mais simples na ordem de até 100 Hz. Para altas frequências pode ser utilizados *choppers* eletro-ópticos ou acústico-óptico para frequências de MHz a GHz (Oakberg; Wang, 1995).

O protótipo de uma chave óptica funciona de forma semelhante a um chopper mecânico com disco, sendo que a diferença principal é a taxa de modulação (velocidade de interrupção da luz), enquanto a chave é focada em criar pulsos de luz com duração longa, o chopper mecânico com disco pode criar feixes na ordem de ms a μ s. Na Figura 5, é mostrado como funciona um chopper mecânico, a luz passa por um disco rotativo, no qual possui espaços que possibilitam a passagem da luz, e também barreiras que bloqueia a luz. Este disco é responsável por modular a luz em feixes cada vez menores a medida que a velocidade de rotação do disco aumenta.

Figura 5 – Diagrama de operação de um chopper mecânico.



Fonte: THORLABS, 2025.

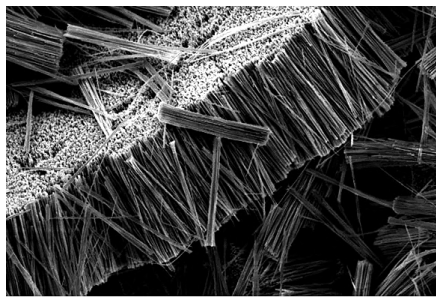
https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Optical_Chopper_D1-600.jpg

2.3 NANOFIOS DE NÍQUEL

Os nanofios de níquel (Figura 6) são estruturas que possuem propriedades magnéticas e ópticas importantes, desempenhando um papel essencial em várias aplicações tecnológicas. A anisotropia magnética, uma das principais características, é a variação das propriedades magnéticas conforme a orientação espacial dos nanofios. Esta propriedade é moldada pela geometria específica dos nanofios, como diâmetro e comprimento, influenciando a coercividade e a remanência sob diferentes condições ambientais, como variações de temperatura e a aplicação de campos magnéticos.

Os nanofios de níquel (Ni) têm características únicas como um sistema unidimensional de confinamento eletrônico. O sistema de nanofios de níquel é interessante devido às suas propriedades estruturais e magnéticas sintonizáveis (Pratama *et al.*, 2018). O comportamento magnético dos nanofios de níquel possui relação com o tamanho, onde a diminuição das dimensões afeta as propriedades magnéticas, diferentemente dos materiais em escala maior. Este efeito é evidente em fenômenos como a magnetoresistência gigante, que é fundamental para o desenvolvimento de sensores magnéticos com alta sensibilidade.

Figura 6 – Nanofios de níquel.



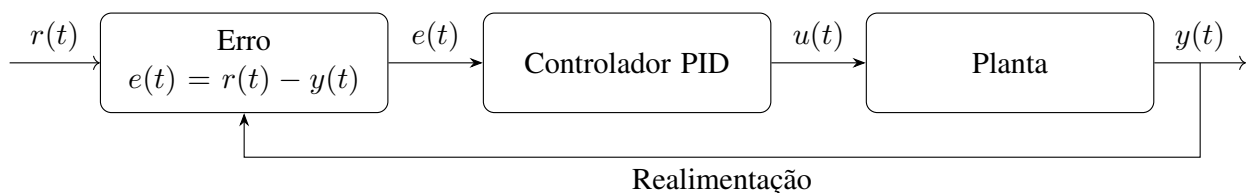
Fonte: NISE Network, 2014.

<https://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-nickel-nanowires>

2.4 CONTROLE PID

A técnica de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) é amplamente utilizada na engenharia para a regulação de sistemas dinâmicos, pois combina três ações de controle que, em conjunto, minimizam o erro entre o valor desejado e a saída real do sistema. O diagrama de blocos apresentado na Figura 7 exemplifica a aplicação do controle PID na regulação de diferentes tipos de sistemas dinâmicos, também conhecidos como plantas. O controle PID pode ser empregado em controle de velocidade de motores, sistemas de aquecimento, processos químicos, robôs industriais e aeronaves, proporcionando ajustes precisos para otimizar o desempenho e garantir maior estabilidade e eficiência.

Figura 7 – Diagrama de bloco de um controlador PID aplicado a um sistema (Planta).



Adaptado de Ogata, 2010.

Seja

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (2)$$

o erro instantâneo, onde $r(t)$ é o sinal de referência e $y(t)$ a saída do sistema. A lei de controle PID em domínio do tempo é dada por:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

onde: $u(t)$ é a ação de controle que, quando aplicada ao sistema (Planta), influencia sua saída; K_P é o ganho proporcional, que gera uma ação de controle proporcional ao erro corrente; K_I é o ganho integral, que acumula o erro ao longo do tempo, corrigindo desvios persistentes; K_D é o ganho derivativo, que reage à taxa de variação do erro, antecipando a resposta do sistema e ajudando a reduzir oscilações.

2.4.1 Representação na Transformada de Laplace

Aplicando a Transformada de Laplace (assumindo condições iniciais nulas), a equação PID se converte na forma algébrica:

$$U(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) E(s) \quad (4)$$

Ou, de maneira compacta, definindo a função de transferência do controlador PID como:

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (5)$$

A representação mostrada na equação (5), mostra como cada termo afeta a resposta do sistema no domínio da frequência.

2.4.2 Desenvolvimento dos Termos Individuais

1. **Termo Proporcional (K_P):** A ação proporcional é expressa por:

$$u_P(t) = K_P e(t) \quad (6)$$

Esse termo proporciona uma resposta imediata ao erro, porém, um ganho muito elevado pode levar a um comportamento instável ou com sobreimpulso.

2. **Termo Integral (K_I):** A ação integral acumula o erro ao longo do tempo:

$$u_I(t) = K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

Em termos da Transformada de Laplace, o operador de integração é representado por $1/s$. Esse termo é fundamental para eliminar o erro estacionário.

3. **Termo Derivativo (K_D):** A ação derivativa responde à variação do erro:

$$u_D(t) = K_D \frac{d}{dt} e(t) \quad (8)$$

A diferenciação é representada por s na Transformada de Laplace. Esse termo ajuda a reduzir oscilações e melhora o amortecimento da resposta do sistema.

2.4.3 Sintonia do Controlador PID

Em situações onde o modelo matemático da planta é desconhecido, controles PID são frequentemente usados devido à sua eficácia em proporcionar um controle satisfatório quando métodos analíticos são inviáveis, conforme mencionado em (Ogata, 2010).

A correta sintonização dos ganhos K_P , K_I e K_D é um fator determinante para um desempenho ideal do controlador. Métodos empíricos, como os propostos por Ziegler-Nichols, são frequentemente utilizados para determinar valores iniciais, os quais podem ser ajustados posteriormente (Åström; Hägglund, 1995).

3 METODOLOGIA

Nossa metodologia se fundamenta no uso da modulação óptica como uma ferramenta crucial na investigação das propriedades optoeletrônicas e spintrônicas de materiais magnéticos. Nosso objetivo foi empregar moduladores, como a chave óptica em forma de cancela e o chopper, para estimular e manipular essas propriedades em nanofios magnéticos. Para isso, utilizamos a chave óptica para modular a luz em intervalos de tempo variando de segundos a dezenas de segundos, enquanto o chopper foi empregado para modular a luz em tempos da ordem de milissegundos. Analisamos a luz modulada tanto antes quanto após sua reflexão nas amostras de nanofios. Para realizar o controle e a detecção da luz, empregamos osciloscópios, detectores, espectrômetros e medidores de tensão elétrica. A fase do sinal modulado foi analisada antes e depois da reflexão na amostra. O campo elétrico foi gerado por uma corrente contínua da ordem de micro a miliampères, que fluiu nas amostras de nanofios. O campo magnético foi produzido por uma bobina. Nesse contexto, variamos o ângulo entre o feixe de luz e analisamos a reflexão da luz na amostra, utilizamos um fotodiodo como detector, que permitiu converter a intensidade de luz em níveis de tensão,

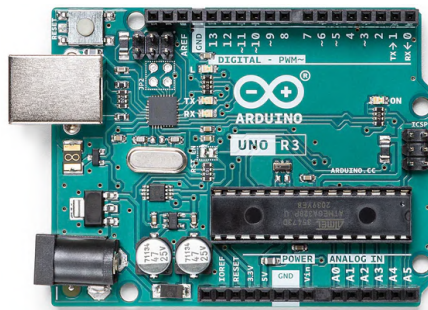
sendo possível visualizar os sinais em um osciloscópio. Os dados resultantes da modulação da luz sobre as amostras foram analisados utilizando o software Origin.

3.1 COMPONENTES/DISPOSITIVOS UTILIZADOS

3.1.1 Arduino Uno

O Arduino Uno é uma placa eletrônica programável baseada no microcontrolador ATmega328P. Ela possui entradas e saídas digitais e analógicas que podem ser utilizadas para controlar componentes eletrônicos como sensores, atuadores, motores, LEDs, entre outros dispositivos. Esta placa pode ser programada utilizando o software IDE Arduino, a partir deste software, foi desenvolvido o código que foi compilado e transferido para a placa eletrônica. A placa eletrônica utilizada no projeto da chave óptica e do chopper pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 – Placa eletrônica programável Arduino Uno.



Fonte: Arduino, 2025.

<https://store-usa.arduino.cc/collections/boards-modules/products/arduino-uno-rev3>

3.1.2 Servo motor

Os servo motores são dispositivos que convertem um sinal elétrico em movimento mecânico preciso e controlado. Eles são compostos por um motor de corrente contínua, engrenagens, um circuito de controle e um potenciômetro. O circuito de controle, juntamente com o potenciômetro, forma um sistema de feedback que permite o controle preciso da posição do eixo do motor (Tannus, 2018). São amplamente utilizados em sistemas de controle de posição e movimento em diversas aplicações, incluindo robótica, automação industrial, aeromodelismo, entre outras. Eles são valorizados por sua precisão e resposta rápida, o que permite seu uso em tarefas que exigem movimento preciso e controlado.

Alguns servo motores possuem um limite de rotação angular que geralmente varia entre 0° e 180°, dependendo do modelo. Devido à precisão e ao controle fácil a partir de microcontroladores, o modelo escolhido para a montagem da chave óptica é o servomotor SG90 (Figura 9). Este modelo

pode variar a rotação do seu eixo de 0° a 180° e pode ser alimentado por uma tensão de 4,8V a 6V, possuindo um torque de 1,8 kg/cm em 4,8V e 2,4 kg/cm em 6V.

Figura 9 – Servo motor Tower Pro, modelo SG90.



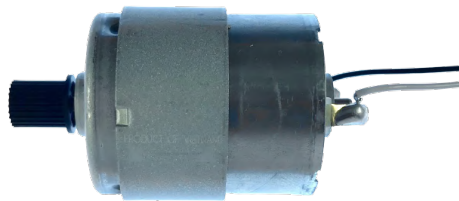
Fonte: Murky Robot, 2024.

<https://www.murkyrobot.com/catalogo/servo-motor-sg90-1-5kg>

3.1.3 Motor DC

Um motor PMDC (motor de corrente contínua com ímã permanente), a rotação é produzida por um eletroímã (armadura) interagindo com um ímã fixo (carcaça). A corrente elétrica é aplicada através de terminais, alimentando as bobinas e gerando um campo magnético que faz a armadura girar quando interage com os ímãs na carcaça (Standard [...], 2011). O motor DC selecionado para desenvolver o dispositivo é o CZ021-60028 que pode ser visto na Figura 10, é um motor de baixa tensão que pode opera em 12V, podendo chegar a uma velocidade de aproximadamente 6000 Rpm.

Figura 10 – Motor DC 12V modelo CZ021-60028.



Fonte: Adaptado de INEEDPARTS, 2025.

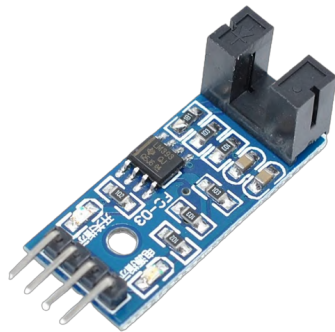
<https://ineedparts.eu/products/drive-motor-hp-3830-printer-cz021-60028>

3.1.4 Sensor de velocidade

O sensor em forma de "U" detecta objetos que passam pelo seu slot interno usando um diodo emissor de infravermelho (IR) e um fototransistor. Quando o objeto interrompe o feixe de

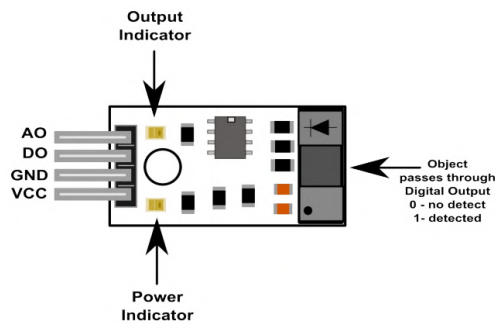
infravermelho, o fototransistor detecta essa interrupção. Esse tipo de sensor, conhecido como opto-switch, pode ser usado para detectar a velocidade de rotação e a posição do eixo de um motor, bem como para detectar qualquer tipo de objeto que interrompa o feixe. Um módulo com essas características é o sensor de velocidade F249, que pode ser utilizado em uma tensão DC de 3.3 a 5 V. Este sensor pode ser visualizado na Figura 11. Também é possível visualizar um diagrama na Figura 12 que mostra os pinos de conexão e o sensor que detecta a interrupção.

Figura 11 – Sensor de velocidade F249.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 12 – Diagrama do sensor de velocidade F249.



Fonte: E-Gizmo, 2017.

<https://e-gizmo.net/oc/kits%20documents/IR%20Speed%20Sensor/IR%20Speed%20sensor.pdf>

3.1.5 Outros componentes

Para o desenvolvimentos dos dispositivos, além dos elementos básicos, foram utilizados componentes como:

- Protoboard: importante para montagens e testes dos circuitos;
- Transistor: elemento que serviu como uma espécie de chave, ligando e desligando rapidamente o motor CC, fazendo o controle de rotação de forma mais eficiente;
- Resistores, capacitores: utilizados na montagem do circuito;
- Cabos e jumpers: utilizados para fazer as conexões entres os componentes dos dispositivos e também para medidas utilizando osciloscópio e multímetro;
- Outros itens: Display 16x2, cola quente, pequenas chapas de metal, ferro de solda, etc.

3.2 PROGRAMAS E COMUNICAÇÃO

3.2.1 IDE do Arduino

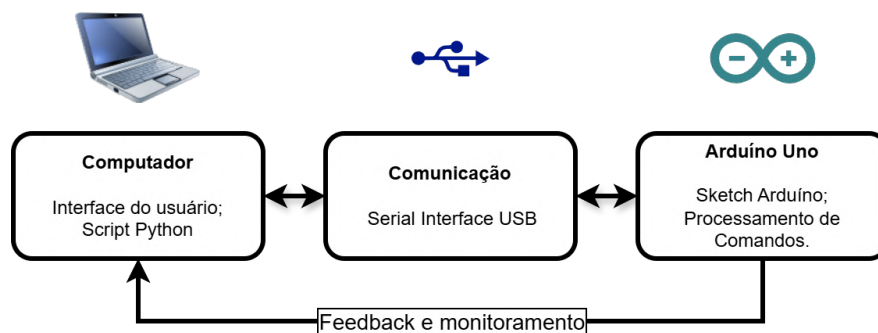
A IDE do Arduino (Integrated Development Environment) é um software gratuito e de código aberto que permite programar microcontroladores da família Arduino, como o Arduino Uno, Mega, Nano, entre outros. A IDE do Arduino possui uma interface simples e intuitiva, com diversas ferramentas para programação, depuração, compilação e transferência de código compilado para o microcontrolador. Ela é baseada em linguagem de programação C++, mas possui algumas simplificações e abstrações que facilitam o processo de programação.

3.2.2 Comunicação serial com Arduino utilizando Python

A comunicação serial entre um computador e o Arduino ocorre através de uma conexão física (normalmente via cabo USB) e de um protocolo de comunicação que permite a troca de dados em tempo real. No computador, um programa (escrito em Python com a biblioteca PySerial) abre uma porta serial e envia comandos, que podem ser sequências de caracteres formatadas conforme o protocolo adotado. Esses comandos são enviados para o Arduino, que, por meio de seu sketch (programa em C++), utiliza funções como `Serial.read()` para ler os dados, interpretá-los e executar as ações correspondentes como ligar ou desligar um LED, controlar um motor, etc.

O Arduino, por sua vez, pode enviar respostas ou informações de volta para o computador, permitindo um feedback imediato. Essa troca bidirecional possibilita que o operador monitore o comportamento do sistema e ajuste os comandos conforme necessário. O processo de comunicação é geralmente estruturado em etapas, que incluem a inicialização da conexão serial, a transmissão dos dados, a interpretação dos comandos no Arduino e a recepção dos dados no computador. A Figura 13 mostra o fluxo de comunicação entre os dispositivos.

Figura 13 – Diagrama de blocos exemplificando a comunicação entre computador e arduino.

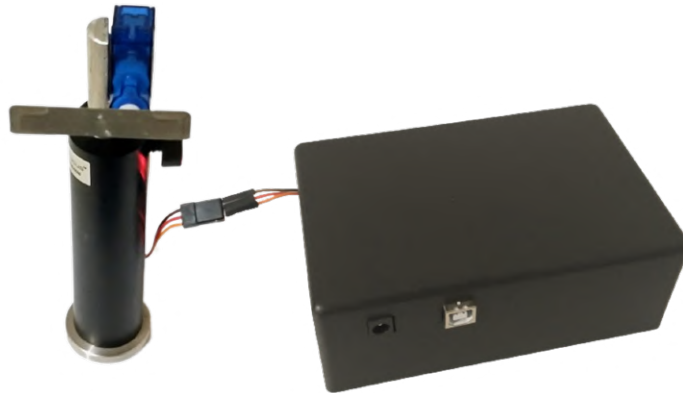


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.3 CHAVE ÓPTICA

A chave óptica (Figura 14) é um dispositivo que utiliza um servo motor para movimentar uma barra metálica que faz o controle da intensidade da luz. O servo motor, controlado por um Arduino Uno, move a barra metálica entre duas posições: 0° e 90° . Quando a barra está em 0° , o feixe de luz passa sem obstrução. No entanto, quando a barra está em 90° , a luz é completamente bloqueada. O período de tempo, no qual, ocorre a alternância entre essas duas posições, é definida pelo usuário. Utilizando a IDE do Arduino e a biblioteca <servo.h>, é possível gerar um código que controla o servo motor via comunicação serial com Python. Isso permite definir parâmetros essenciais no projeto da chave óptica, como o ângulo máximo alcançado pela barra retangular metálica e o tempo de transição necessário para controlar a largura dos pulsos de luz.

Figura 14 – Chave óptica.

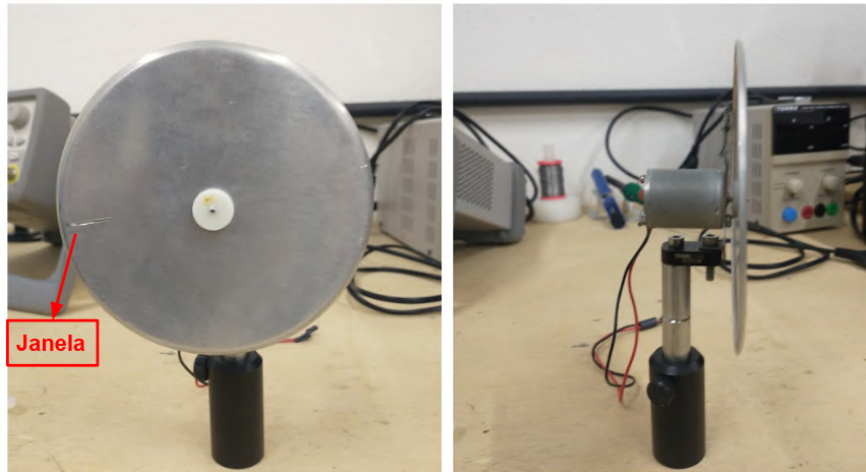


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.4 CHOPPER ÓPTICO

O chopper óptico (Figura 15) é um dispositivo utilizado para modular a intensidade de um feixe de luz em intervalos regulares. Ele é composto por um motor CC (Corrente Contínua) que aciona um disco equipado com janelas de dimensões na ordem de milímetros, as quais interrompem a passagem da luz, permitindo que ela seja transmitida apenas através dessas aberturas. O design do disco pode variar em formato e número de janelas, o que confere flexibilidade na geração de pulsos. A rotação do disco é controlada por um Arduino Uno, que emprega um controle PID em conjunto com um sensor de velocidade para regular com precisão o movimento. Dessa forma, o chopper óptico tem como principal objetivo gerar pulsos curtos de luz, na ordem de milissegundos.

Figura 15 – Chopper óptico.

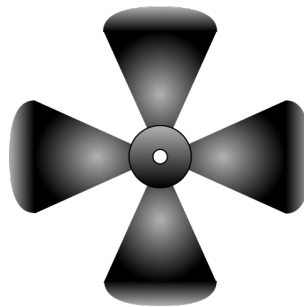


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.4.1 Desenvolvimento do chopper óptico.

Para desenvolver o dispositivo que atenda aos requisitos estabelecidos, utilizou-se o motor CZ021-60028, responsável por acionar um disco acoplado em seu eixo. Inicialmente foi utilizado um disco, com aproximadamente 5 cm de diâmetro e quatro janelas (conforme ilustrado na Figura 16), permitindo a geração de pulsos com uma frequência até quatro vezes superior à rotação do motor.

Figura 16 – Disco dentado no formato de hélice com 4 janelas.

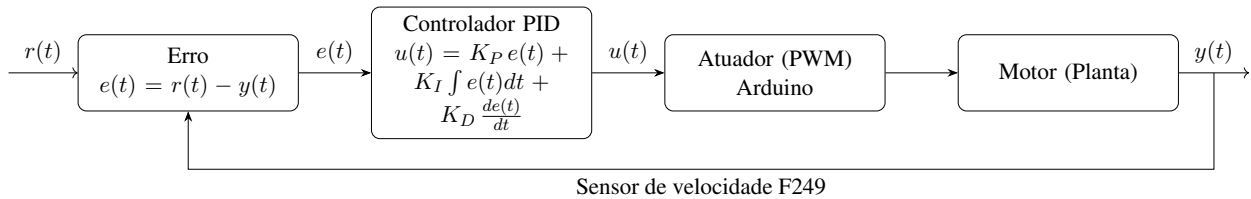


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A velocidade de rotação do disco foi medida com o sensor de velocidade F249. O controle do sistema foi feito com um Arduino Uno, utilizando um algoritmo de controle PID (Apêndice B). Esse algoritmo ajusta a rotação do disco dentado com precisão, através de um potenciômetro ou comunicação serial, mantendo a velocidade de referência estável. A Figura 17 mostra o diagrama

da implementação, onde $r(t)$ é a velocidade de referência em RPM e $y(t)$ é a velocidade efetiva medida, que retorna ao sistema para que o controlador PID mantenha a velocidade desejada.

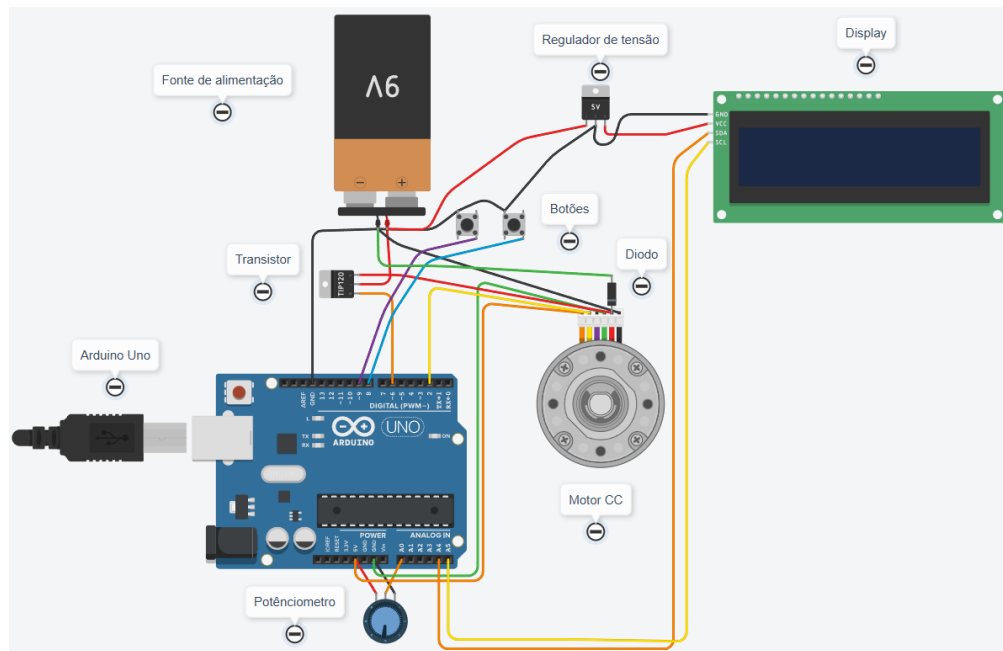
Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema de controle PID implementado no chopper óptico.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

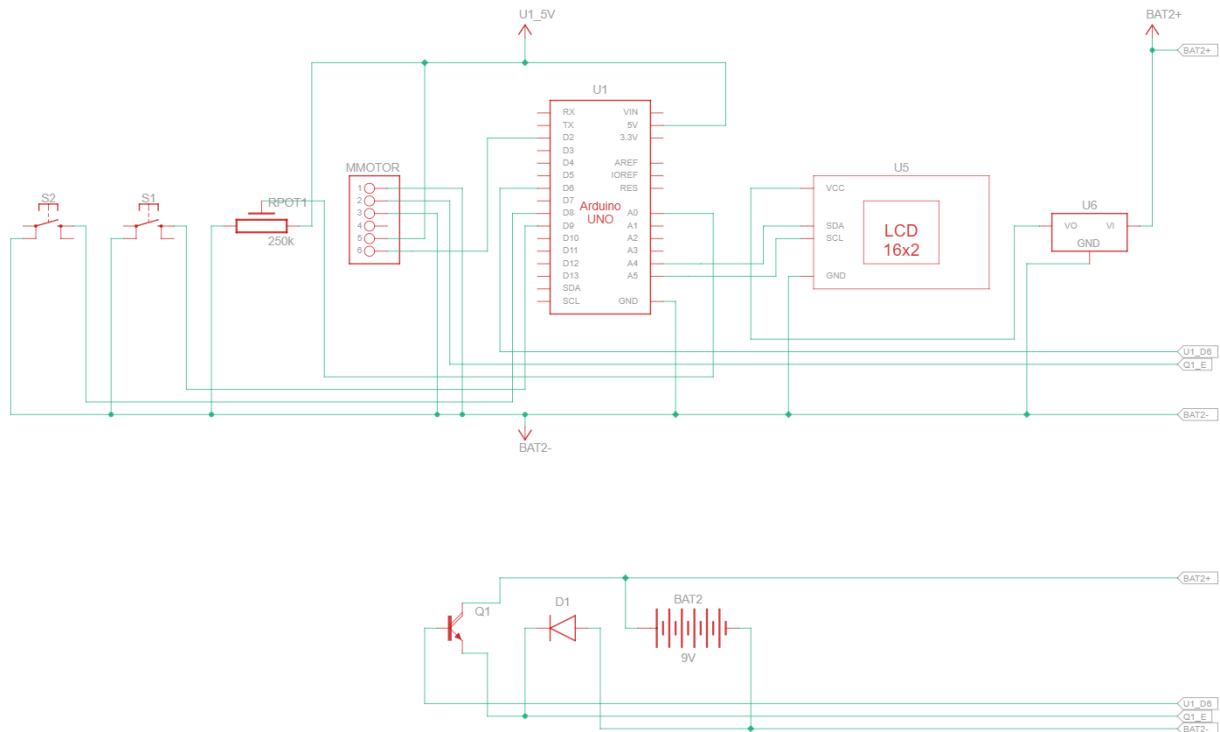
O esquema de ligação dos componentes foi feito utilizando o Tinkercad, que é uma plataforma de uso livre. Esses esquemas podem ser vistos nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Esquema de ligação dos componentes do chopper mecânico.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 19 – Conexão entre componentes.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

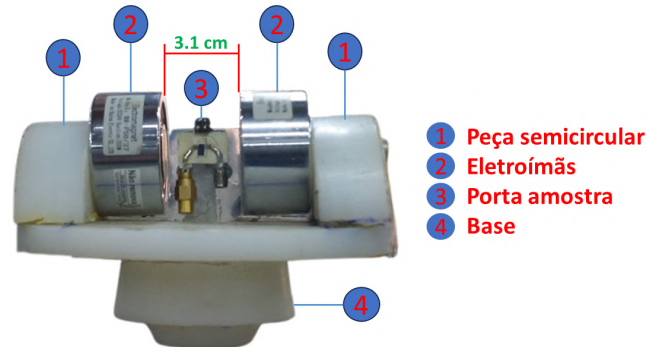
É utilizado um diodo invertido em paralelo com o motor, servindo como proteção para o transistor, este é responsável pelo acionamento do motor, por meio de PWM (Pulse Width Modulation) gerado pelo Arduino. Um regulador de tensão é usado para regular a tensão de entrada (12V ou 9V) para 5V, logo, essa tensão regulada serve para alimentar o Arduino Uno e para gerar uma tensão de referência no potenciômetro. Essa tensão de referência é usada para definir o valor de rotação, com o controle PID fazendo com que se aproxime dessa velocidade definida no potenciômetro. Outra forma de controle de velocidade de rotação do disco, é a partir de um computador, que comunica-se com o Arduino via serial.

3.5 ELETROÍMÃS

Os eletroímãs são dispositivos magnéticos que empregam corrente elétrica para criar campos magnéticos temporários. Possuem uma bobina de fio condutor enrolada em torno de um núcleo ferromagnético. Quando a corrente elétrica percorre a bobina, é gerado um campo magnético ao redor do núcleo. O princípio fundamental de operação dos eletroímãs está fundamentado nas leis do eletromagnetismo, como a lei de Ampère e a lei de Biot-Savart. A corrente elétrica fluindo pelo fio condutor origina um campo magnético ao seu redor. O núcleo ferromagnético potencializa esse campo, concentrando as linhas de força em sua direção. A Figura 20, apresenta o eletroímã que foi

utilizado para desenvolver os experimentos.

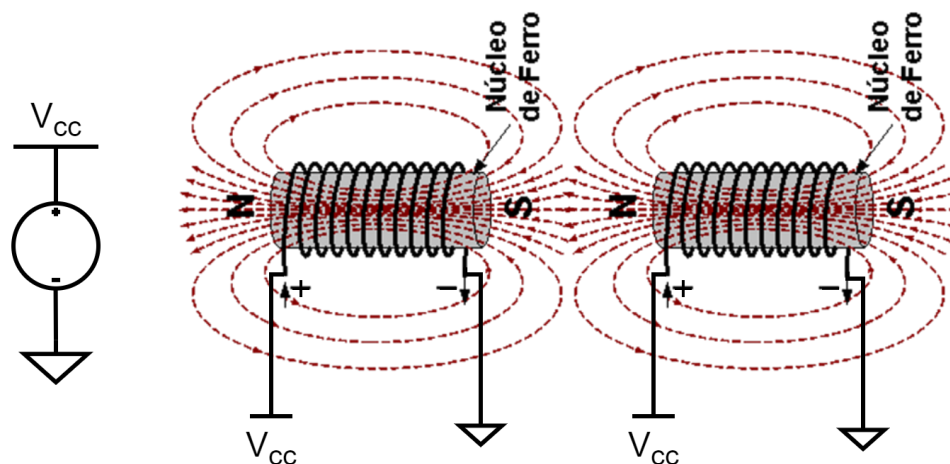
Figura 20 – Montagem dos eletroímãs.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O esquema de ligação em uma fonte de tensão e a representação dos eletroímãs, é mostrada na Figura 21. O objetivo dessa configuração dos eletroímãs conectados em paralelo, foi fazer com que o campo gerado pelo conjunto de eletroímãs se intensifique. Um parâmetro importante para que essa intensidade do campo aumente ou diminua, é a distância entre os dois eletroímãs. Quanto mais próximos os eletroímãs, maior será a intensidade do campo entre eles.

Figura 21 – Diagrama de conexão dos eletroímãs a uma fonte de alimentação com tensão V_{cc} .



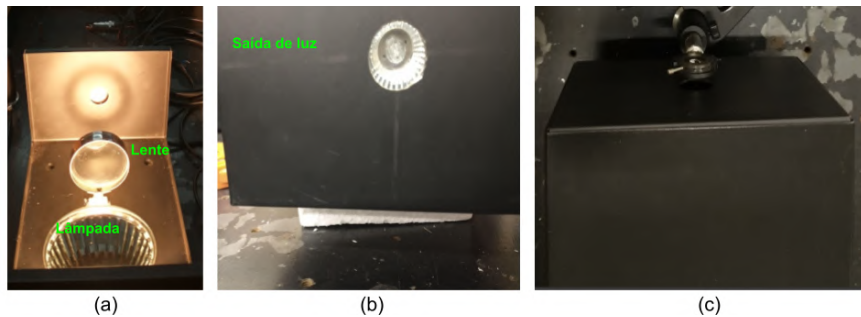
Fonte: Adaptado de CMM, 2025.

https://www.cmm.gov.mo/por/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_2_4_MagneticSuction.html

3.6 GERADOR DE LUZ BRANCA

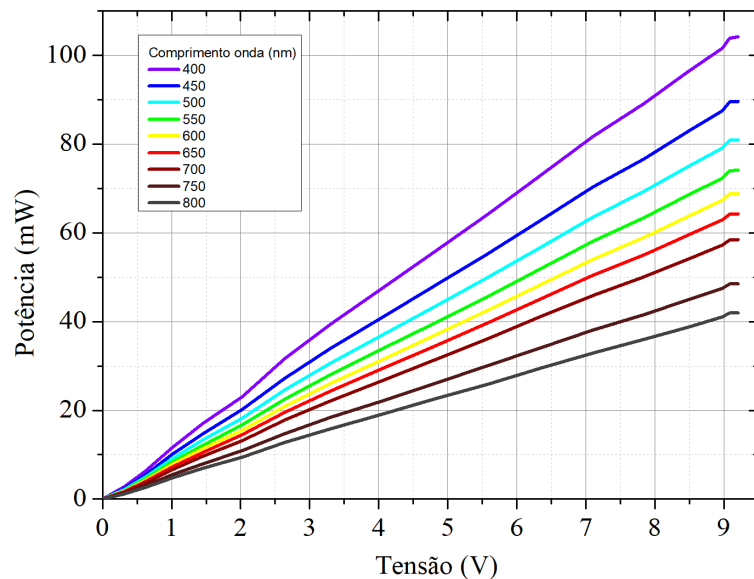
O gerador de luz branca, consiste de uma caixa metálica, com uma abertura circular de 2 cm de diâmetro, por onde sai a luz. Internamente, possui uma lâmpada halógena com potência de 75 W em conjunto com uma lente, que permite focar a luz em uma direção (Figura 22). Utilizando esta lâmpada, foi possível montar um dispositivo, que permitisse gerar um feixe de luz, contendo os diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético visível e também do infravermelho. A Figura 23 mostra a potência para cada comprimento de onda, relacionando com a tensão (obtida a partir de um fotodiodo) que é proporcional a intensidade luminosa.

Figura 22 – a) Configuração interna do gerador de luz. b) Saída de luz. c) Vista superior da caixa metálica fechada.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 23 – Potência para cada comprimento de onda, de acordo com a tensão que é proporcional a intensidade luminosa.

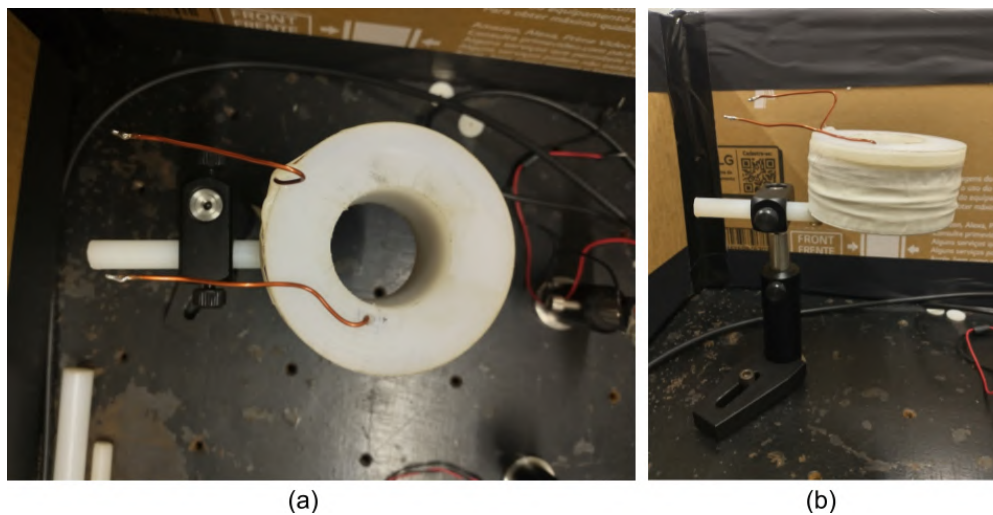


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.7 BOBINA ELETROMAGNÉTICA

Quando a corrente elétrica passa por um fio, é gerado um campo magnético ao seu redor. Se este fio é enrolado várias vezes, formando diversas espiras, este campo magnético é ampliado. A bobina com núcleo de ar, mostrada na Figura 24, foi construída utilizando fio esmaltado AWG 16. Este fio possui a capacidade de suportar uma corrente de 3,7 A, sem perder a isolamento. A bobina possui 215 voltas podendo gerar um campo magnético CC de aproximadamente 100 Oe, ao aplicar uma tensão de 2,2 V.

Figura 24 – a) Vista superior. b) Vista lateral da bobina eletromagnética.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

3.8 BOBINAS NÃO-HELMHOLTZ

Uma bobina de Helmholtz, caracteriza-se por duas bobinas semelhantes e paralelas. Essas bobinas são separadas por uma distância igual ao raio das mesmas. A corrente aplicada, pode ser CC (Corrente Contínua) ou CA (Corrente Alternada). Essa corrente passa com o mesmo sentido nas duas bobinas, gerando campos magnéticos que se somam, permitindo a geração de um campo magnético quase uniforme. Na configuração não-Helmholtz, pode ser qualquer bobina que não siga essa configuração descrita anteriormente, como mostra a Figura 25, onde a distância entre as bobinas não é a mesma que o raio das bobinas, com a distância entre elas de 3,3 cm, raio de 0,5 cm e 16 voltas de fio AWG 16 em cada uma delas. Essa configuração, permite gerar um campo magnético CC uniforme entre as bobinas de 8 Oe.

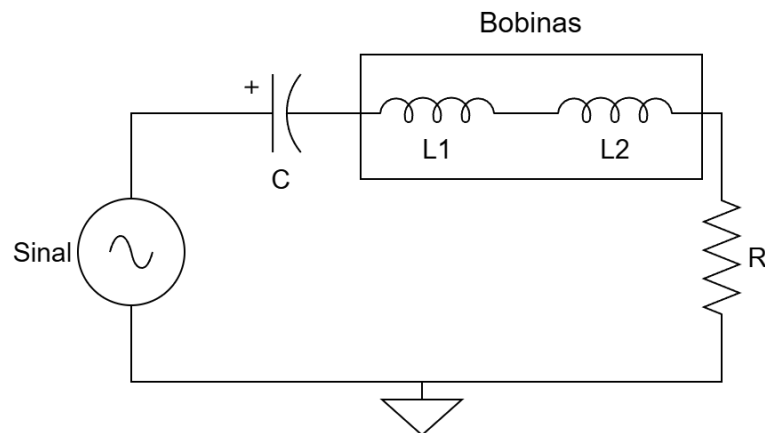
Figura 25 – Bobina não-Helmholtz, posicionada em um suporte para disposição de amostras.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a bobina da Figura 25 possuir um melhor rendimento na geração de campos magnéticos CA, é utilizada uma configuração de circuito RLC, com o objetivo de cancelar a reatância da bobina a partir da frequência de ressonância do circuito (Figura 26). Nesta frequência, o circuito adquire a forma de um circuito resistivo. Com isso é possível maximizar o campo gerado aplicando sinais CA.

Figura 26 – Circuito RLC que permite maximizar a geração de campo magnético.

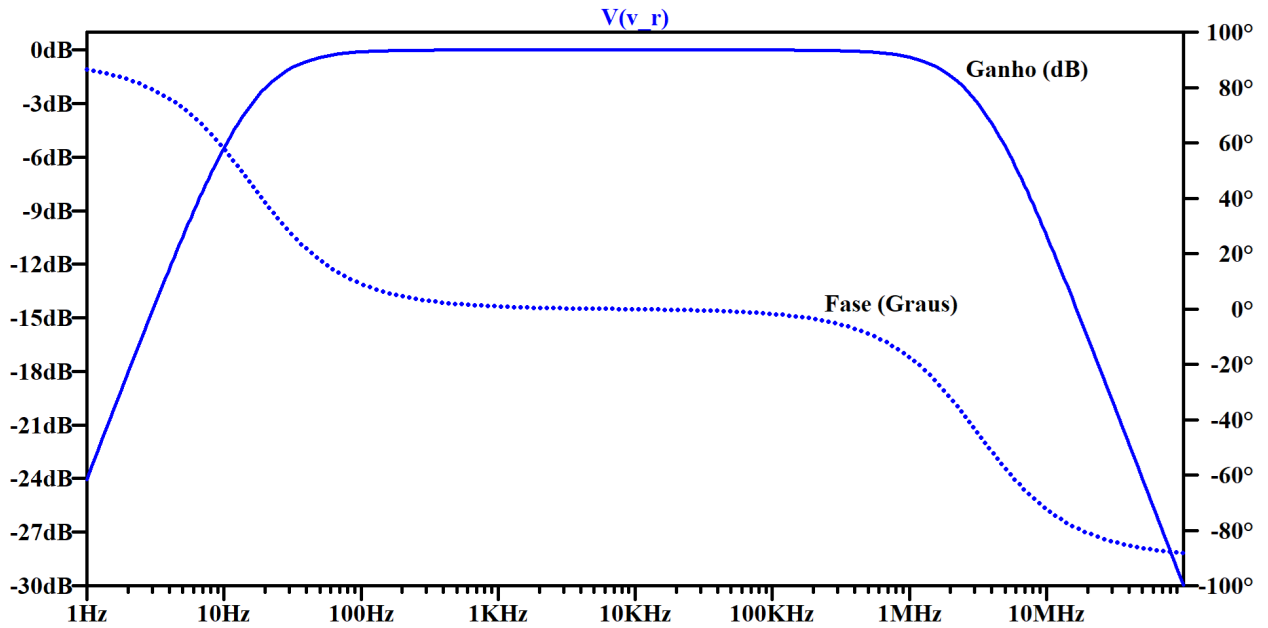


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A indutância das duas bobinas conectadas em série, obtida de forma experimental, é de $5 \mu\text{H}$. A Figura 27, mostra a resposta em frequência, utilizando um sinal senoidal com amplitude

de 1 V, indutância das bobinas de $5 \mu\text{H}$, capacitância de $100 \mu\text{F}$ e uma resistência de 100Ω . É interessante notar, que o circuito possui uma banda de ressonância ampla, na ordem de 2,7 MHz.

Figura 27 – Simulação da resposta em frequência utilizando o par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4 RESULTADOS

4.1 TESTES DOS DISPOSITIVOS

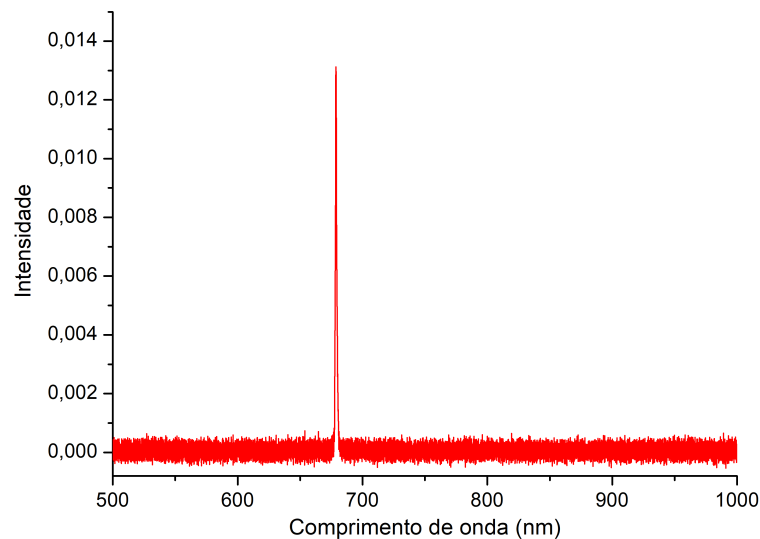
Para cada dispositivo, foi feita a montagem utilizando os componentes descritos anteriormente e em seguida os testes para obter os dados de operação/comportamento dos dispositivos.

4.1.1 Testes utilizando a chave óptica

Para testar a chave óptica, foi feita duas montagens no laboratório visando verificar o funcionamento da chave, para isso foi utilizado um laser vermelho com comprimento de onda de 670 nm e potência máxima de 5 mW, um fotodiodo que detecta o sinal luminoso do laser e converte de forma proporcional para níveis de tensão, com isso, foi possível utilizar o osciloscópio para verificar a intensidade luminosa do laser. Na montagem também foi utilizada uma íris, com o propósito de gerar um feixe de luz mais preciso, a chave óptica para modular o feixe de luz gerado pelo laser e uma amostra de Arseneto de Gálio (GaAs).

Nos experimentos, o laser foi configurado com uma potência de 4 mW, à uma temperatura ambiente de 24,4°C. A espectroscopia do laser pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – Espectroscopia do laser, mostrando que o laser possui um comprimento de onda próximo de 670 nm.

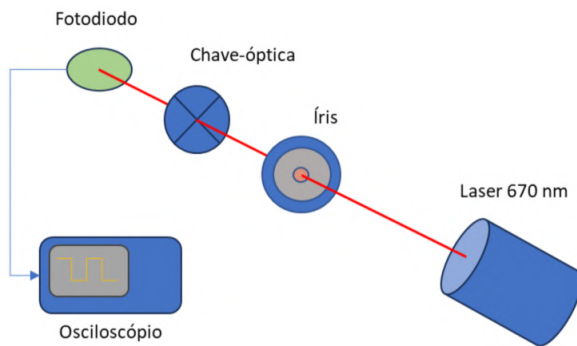


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O diagrama e a montagem podem ser observados nas Figuras 29 e 30, respectivamente, correspondentes à 1ª montagem. Esta etapa teve como objetivo verificar o nível de tensão gerado pelo laser ao incidir diretamente no fotodiodo. Na 2ª montagem (Figuras 31 e 32), o laser é refletido na amostra de GaAs com um ângulo de incidência de 10°. Nas duas montagens, a chave óptica controlada pelo Arduino foi configurada para gerar pulsos longos de 10 s, 20 s e 30 s.

• 1ª montagem

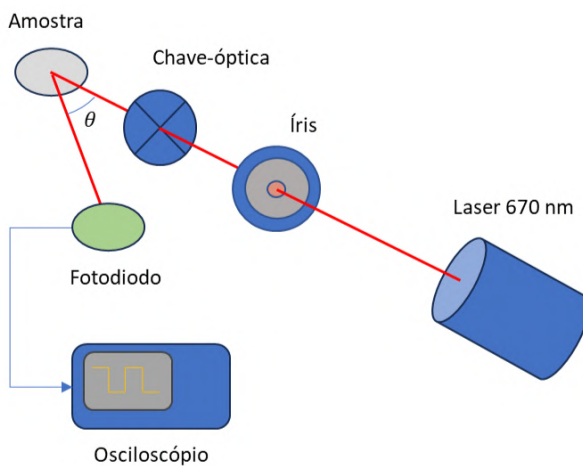
Figura 29 – Diagrama de montagem do experimento.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

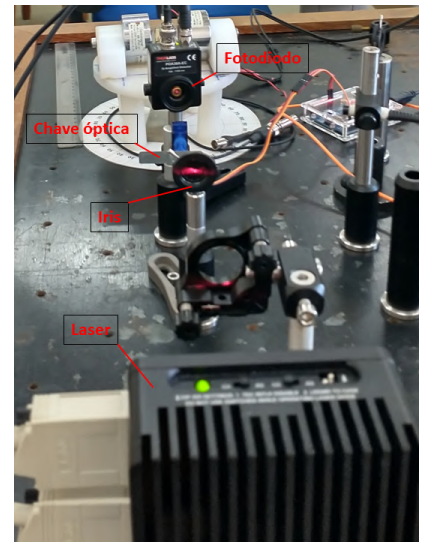
• 2ª montagem

Figura 31 – Diagrama de montagem do experimento, com o ângulo de reflexão sendo $\theta = 10^\circ$.



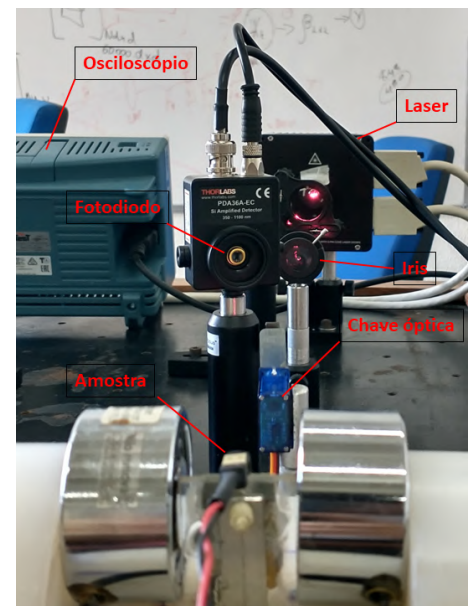
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 30 – Experimento montado no laboratório.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 32 – Experimento montado no laboratório com o laser refletindo na amostra de GaAs.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

• Dados obtidos

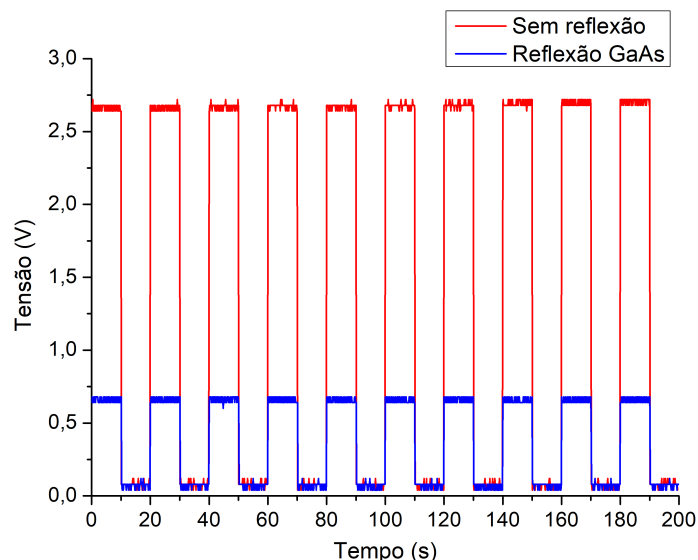
Utilizando o fotodiodo juntamente com o osciloscópio, foi possível adquirir informações sobre o funcionamento da chave. Em seguida, esses dados foram processados utilizando o software Origin. Esses dados foram obtidos utilizando as configurações mostradas nas Figuras 29 e 31, e separados de acordo com o tempo de modulação da chave óptica, 10, 20 e 30 segundos. Utilizando o Origin e sua ferramenta de *fitting*, que é o ajuste de dados experimentais a partir de funções matemáticas, foi feita uma aproximação senoidal junto dos dados experimentais, com objetivo de obter a diferença de fase entre o sinal da reflexão na amostra de GaAs no fotodiodo, e o sinal que obtido incidindo diretamente a luz do laser modulado no fotodiodo. A equação base para fazer o fit dos dados experimentais, é a equação senoidal (9), sendo assim, é possível obter os parâmetros y_0 (nível CC), A (Amplitude da senoide), x_c (constante relacionada a fase) e w (metade do período do sinal). Com esses parâmetros obtidos a partir do Origin é possível aproximar a função matemática aos dados experimentais.

$$y = y_0 + A \sin \left(\pi \frac{x - x_c}{w} \right) \quad (9)$$

• Modulação em 10 s

Com base nos dados que foram utilizados para produzir a Figura 33, foi possível obter a diferença de fase entre os dois sinais, utilizando o Origin.

Figura 33 – Gráfico mostrando os sinais obtidos a partir da reflexão em uma amostra de GaAs e sem ser refletido, ambos para uma modulação de 10 s.

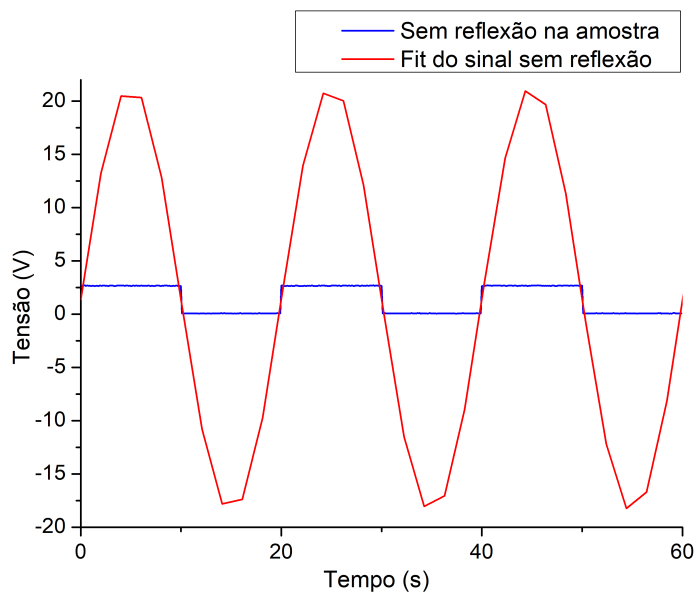


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Inicialmente, foi feito o fit do sinal sem reflexão na amostra de GaAs. Neste caso, o parâmetro x_c na equação (9) foi fixado em 0, restando os parâmetros y_0 , A e w a serem definidos pelo Origin. Ao realizar o fit dos dados experimentais, o valor encontrado de w , foi $w = 10,00334$, que é metade do período da senoide. Em seguida, ajustes foram feitos, atualizando os outros dois parâmetros para $y_0 = 1,39034$ e $A = 20$, assim, permitindo que a senoide se ajustasse melhor aos dados experimentais. Substituindo essas informações na equação (9), foi obtida a função senoidal em (10). Na Figura 34 é possível visualizar o fit realizado empregando o Origin.

$$y = 1,39034 + 20 \sin(0,31405x) \quad (10)$$

Figura 34 – Fit gerado no Origin a partir dos dados experimentais do sinal não refletido na amostra de GaAs.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

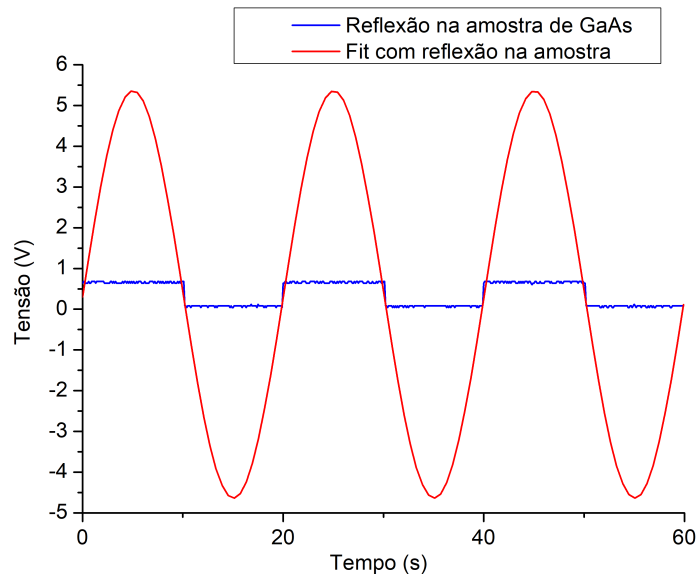
Com $w = 10,00334$ encontrado no fit anteriormente, é possível fixar esse valor no fit do sinal obtido a partir da reflexão na amostra de GaAs, com esse parâmetro fixado, pode-se obter a diferença de fase entre os dois sinais, já que eles vão possuir a mesma frequência. Após fazer o fit para o sinal refletido na amostra, o parâmetro $x_c = 0,03683$ foi encontrado, os outros dois parâmetros foram encontrados, porém ajustados, de forma que seguisse o sinal e melhorasse a visualização, assim, os seguintes valores foram fixados $y_0 = 0,36$ e $A = 5$. Novamente substituindo os parâmetros definidos e encontrados na equação (9), chegamos na equação (11).

$$y = 0,36 + 5 \sin(0,31405x - 0,01157) \quad (11)$$

Observando os parâmetros dentro do argumento da senoide na função (11) e comparando

com o argumento da função senoidal em (10), observa-se um atraso de fase de 0,01157 radianos ou aproximadamente 0,66291 graus. O fit do sinal obtido a partir da reflexão na amostra de arseneto de gálio (GaAs) é mostrado na Figura 35.

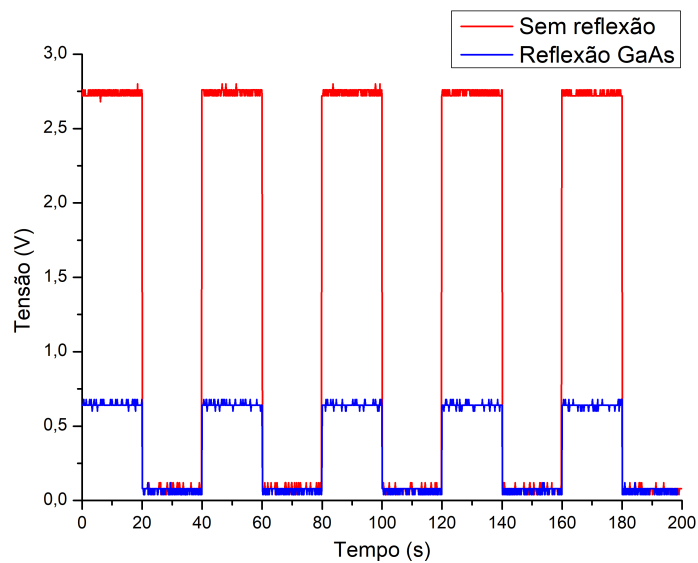
Figura 35 – Fit gerado pelo Origin a partir dos dados experimentais do sinal refletido na amostra de GaAs.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

• Modulação em 20 s

Figura 36 – Gráfico mostrando os sinais obtidos a partir da reflexão em uma amostra de GaAs e sem ser refletido, ambos para uma modulação de 20 s.



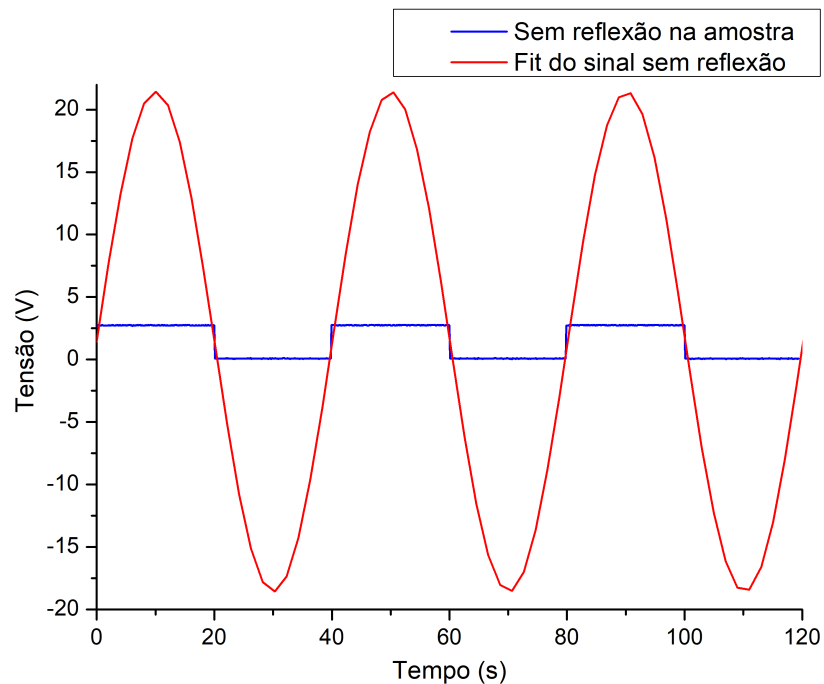
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Seguindo os mesmos passos que foram realizados para a modulação em 10 segundos, com

a finalidade de obter a diferença de fase entre os dois sinais, o ajuste senoidal para o sinal sem reflexão e com uma fase de 0 rad , representado pela equação (12). A Figura 37 mostra o ajuste sem a reflexão do laser na amostra.

$$y = 1,42061 + 20 \sin(0,15686x) \quad (12)$$

Figura 37 – Fit gerado no Origin a partir dos dados experimentais do sinal sem ser refletido na amostra de GaAs. Modulação em 20 s

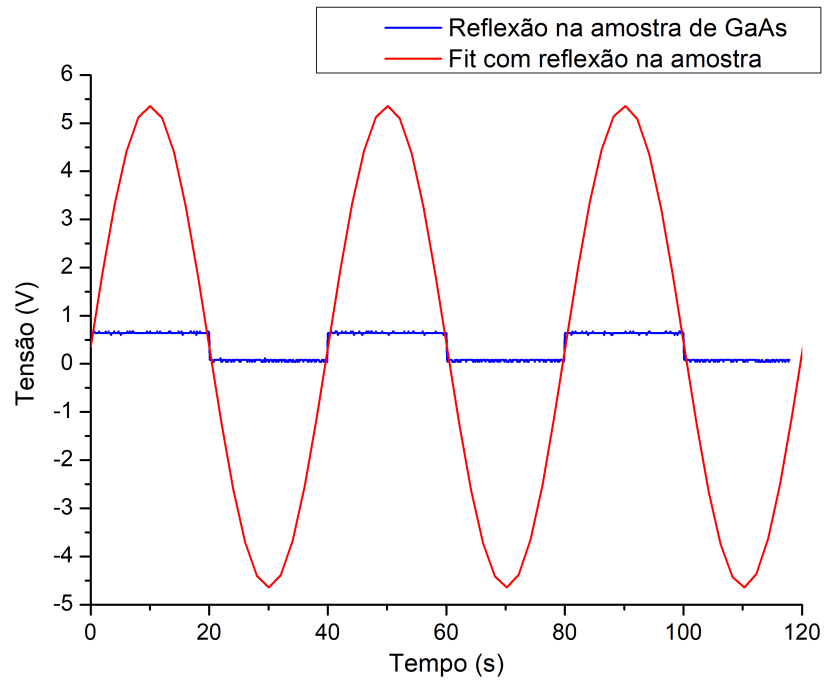


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para o sinal obtido a partir da reflexão na amostra de GaAs, o ajuste senoidal assumiu a forma da equação (13). Na Figura 38, é possível visualizar o ajuste senoidal. Ao comparar as equações (12) e (13), foi possível obter a diferença de fase, que é de $0,001630$ radianos ou $0,09339$ graus.

$$y = 0,35829 + 5 \sin(0,15686x - 0,00163) \quad (13)$$

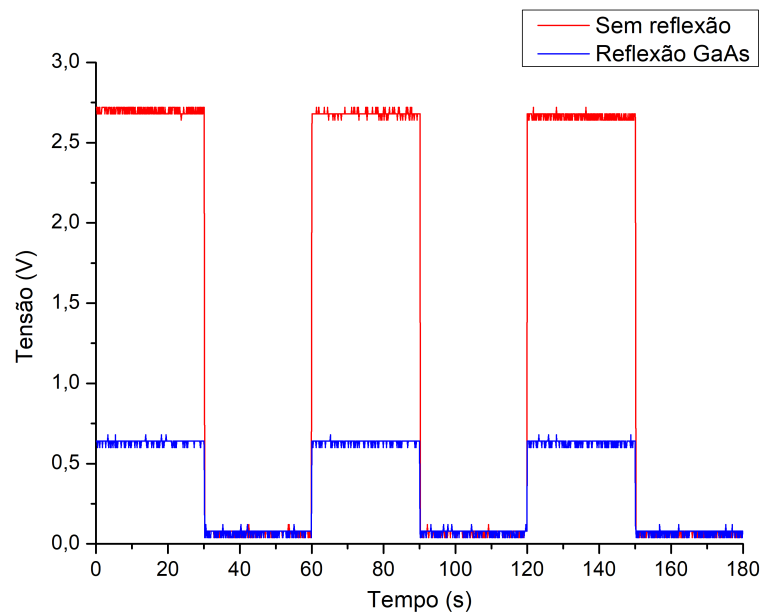
Figura 38 – Fit gerado pelo Origin a partir dos dados experimentais do sinal refletido na amostra de GaAs.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

• Modulação em 30 s

Figura 39 – Gráfico mostrando os sinais obtidos a partir da reflexão em uma amostra de GaAs e sem ser refletido, ambos para uma modulação de 30 s.

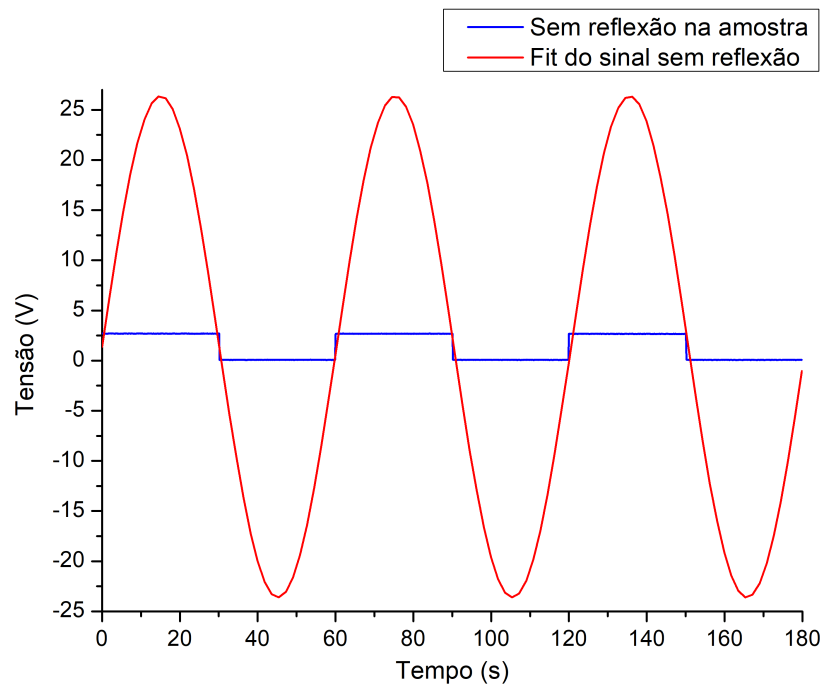


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Para a modulação em 30 segundos, o ajuste senoidal no sinal sem reflexão na amostra e com uma fase de 0 rad , é representado pela equação (14). A Figura 40 mostra o ajuste sem a reflexão do laser na amostra.

$$y = 1,37930 + 25 \sin(0,10424x) \quad (14)$$

Figura 40 – Fit gerado no Origin, a partir dos dados experimentais do sinal sem ser refletido na amostra de GaAs. Modulação em 30 s.

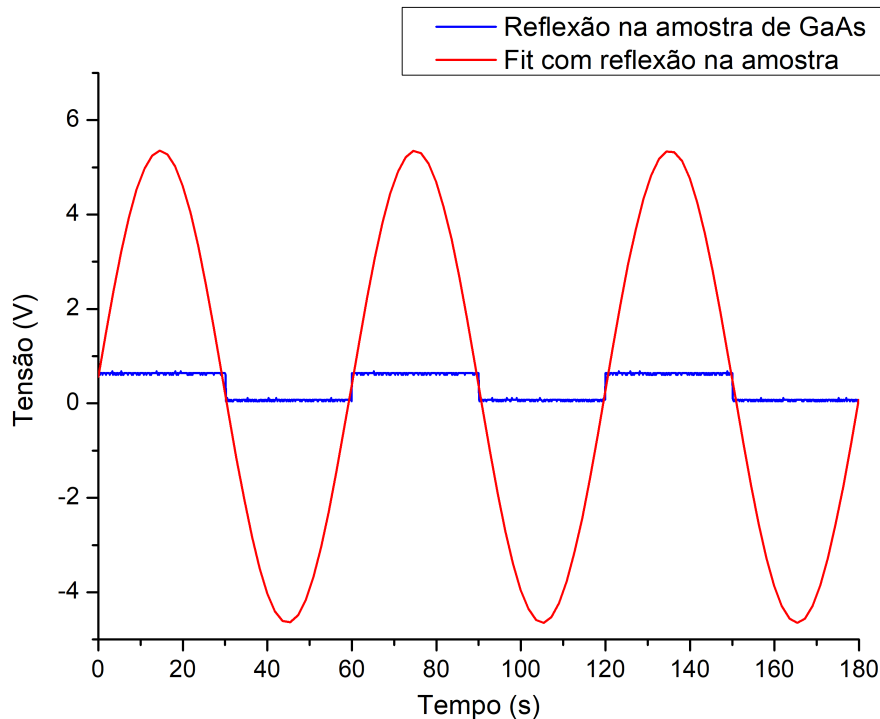


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

No caso do sinal derivado da reflexão na amostra de GaAs, na modulação em 30 s, o ajuste senoidal adota a forma descrita pela equação (15). Na Figura 41, é possível visualizar o ajuste senoidal da reflexão na amostra. Comparando as equações (14) e (15), pode-se obter a diferença de fase, que é de $0,0414$ radianos ou $2,372$ graus.

$$y = 1,37930 + 25 \sin(0,10424x - 0,04140) \quad (15)$$

Figura 41 – Fit gerado pelo Origin a partir dos dados experimentais do sinal refletido na amostra de GaAs.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nesse experimento, verificou-se que o funcionamento da chave está de acordo com o que foi proposto. O tempo de bloqueio da incidência de luz pode ser controlado por meio da programação para gerar pulsos longos de luz. Além disso, foi observado que o feixe do laser modulado pela chave óptica, refletindo em uma amostra de arseneto de gálio, é percebido o deslocamento do sinal, ou seja, um atraso é observado entre o sinal que não foi refletido na amostra e o sinal que é refletido. Observa-se uma diminuição da intensidade, que no caso foi em torno de 76%, considerando o valor máximo sem reflexão em 2,72 V e o refletido em 0,64 V, para o ajuste de potência de 4 mW.

4.1.2 Chopper óptico

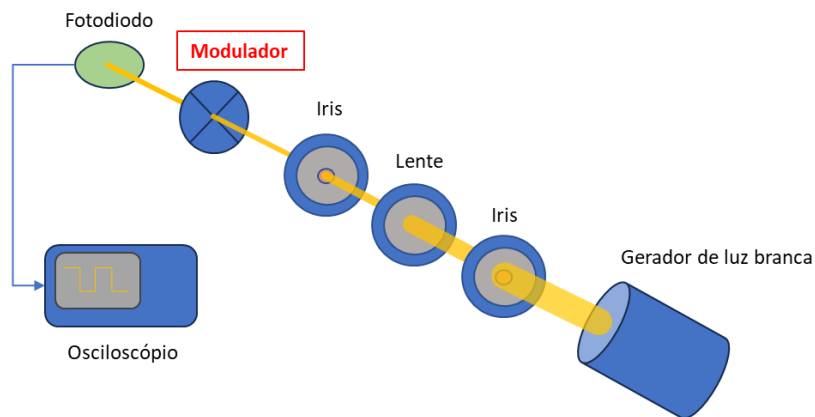
O chopper óptico-mecânico, funciona similarmente à chave óptica, porém, a frequência de modulação é muito maior, podendo chegar a centenas de Hertz.

• Testes experimentais utilizando o chopper

Para testar o chopper, foram realizadas duas montagens experimentais, com a finalidade de testar o dispositivo. A Figura 42, mostra o esquema utilizado para testes, onde o modulador é o chopper. Nessa montagem foi utilizado um gerador de luz branca, onde a luz gerada (representada em amarelo) passa por uma íris e depois por uma lente convergente no formato biconvexa, que

focaliza a luz em outra íris. Em seguida, a luz é modulada pelo chopper, gerando pulsos curtos, até chegar no fotodiodo, onde a luz é detectada e convertida em níveis de tensão para ser observado no osciloscópio.

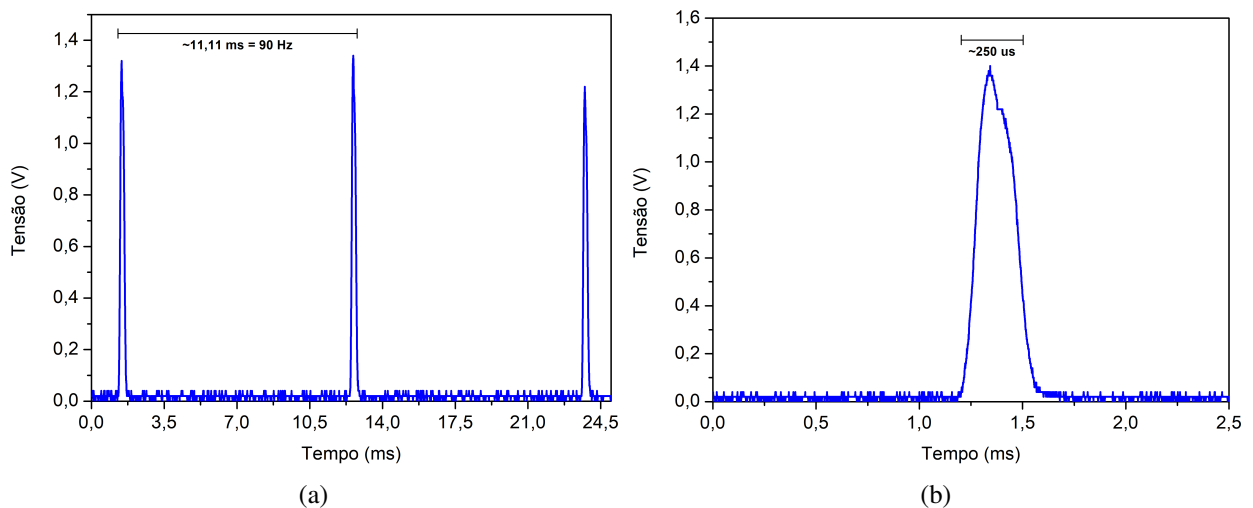
Figura 42 – Esquema aplicado para testar o dispositivo gerador de luz branca.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A partir do esquema da Figura 42, foi medida a potência da luz no local onde se encontra o fotodiodo, a qual foi de 26 mW para um comprimento de onda de 400 nm. A taxa de modulação configurada no chopper foi de 90 Hz. O gráfico obtido pode ser visualizado na Figura 43. Nessa figura é possível observar que a tensão máxima se aproxima dos 1,4 V. O chopper opera como esperado, gerando pulsos curtos na ordem de milissegundos.

Figura 43 – a) Chopper modulando a uma taxa de 90 Hz. b) Largura do pulso.

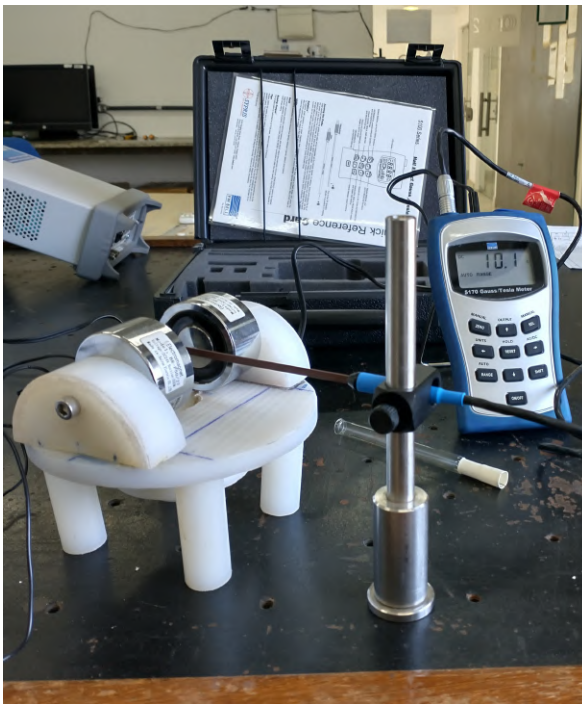


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.1.3 Intensidade do campo magnético gerado pelo par de eletroímãs

Após a montagem do par de eletroímãs, foram realizados testes, a fim de obter a intensidade de campo gerado ao variar a tensão. Com isso, a tensão na fonte de alimentação, foi sendo variada em um intervalo de 2 V em 2 V, sendo o valor mínimo 0 V e o valor máximo 23,5 V. Assim, foram feitos um conjunto de 4 medidas da intensidade do campo magnético, utilizando um gaussímetro. Com os dados coletados, foi possível trata-los no Origin, fazendo a média dos valores e obtendo a tabela de erros. Essa tabela de erro foi obtida, observando o maior valor da intensidade do campo em uma determinada tensão e subtraindo do menor valor, o valor obtido foi dividido por 2. Isso foi feito para todos os valores de tensão que variava de 2 V em 2 V até 23,5 V. Nas Figuras 44 e 45 é mostrado o uso do gaussímetro para obter os valores de intensidade de campo em O_e à medida que a tensão de alimentação do par de eletroímãs variava.

Figura 44 – Posicionamento da ponta de prova do gaussímetro para medir a intensidade do campo.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 45 – Vista superior do posicionamento da ponta de prova do gaussímetro.

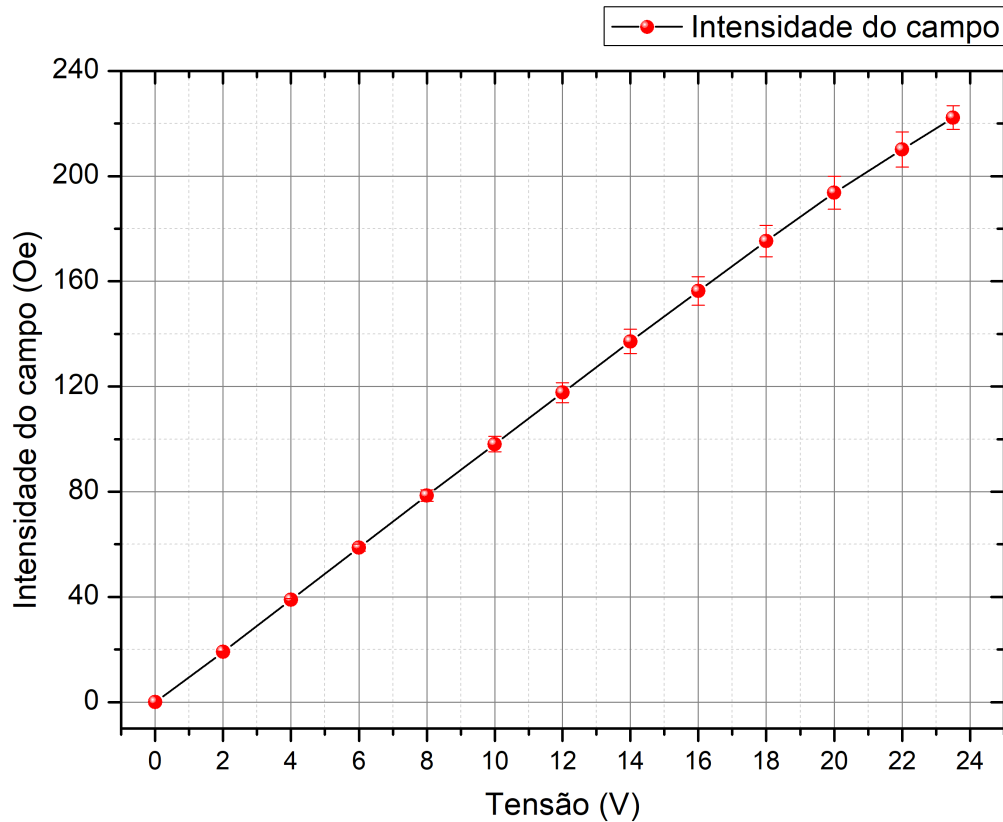


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Depois de obter os dados e tratá-los utilizando o Origin, foi obtido o gráfico da Figura 46, que mostra a intensidade do campo à medida que a tensão aumenta. Pode-se observar que o campo aumenta de forma linear, aproximando muito de uma reta com coeficiente linear positivo. É mostrado também a barra de erro, assim, o campo pode sofrer uma pequena variação. A intensidade

máxima do campo gerado pelo eletroímã, foi de aproximadamente 220 Oe.

Figura 46 – Intensidade do campo gerado pelo eletroímã.



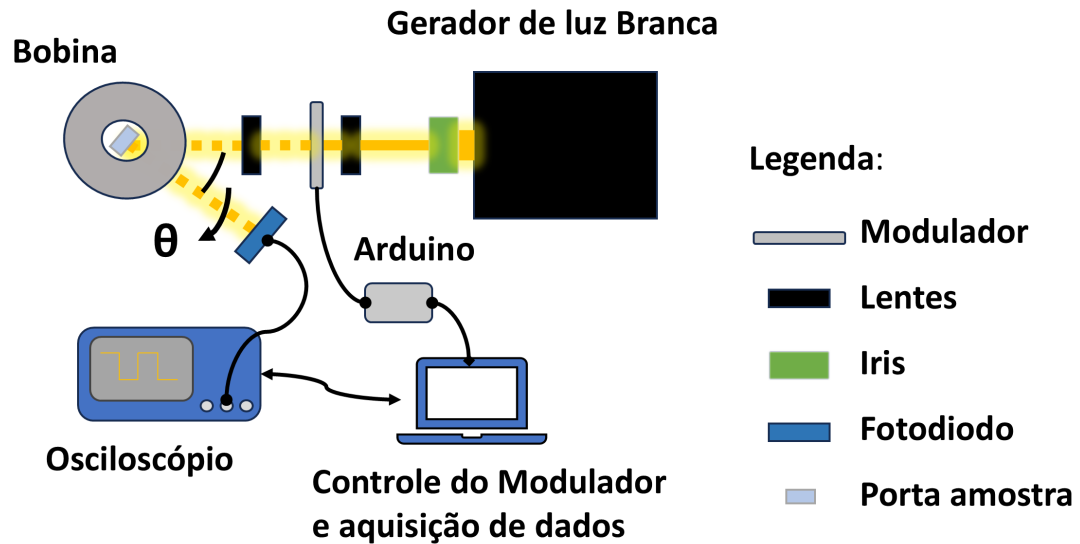
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2 EXPERIMENTO UTILIZANDO NANOFIOS DE NÍQUEL

Nestes experimentos, foram utilizados os dispositivos moduladores (chave óptica e chopper) para modular a luz branca que incide em uma amostra de nanofios de níquel (uma amostra magnética). Essa amostra foi inserida em uma plataforma (porta amostra), de forma que o feixe de luz incidisse diretamente, de modo, que fosse possível rotacionar a amostra em relação ao feixe de luz de 10, 20 e 30 graus. A amostra de nanofio possui formato retangular, com 4 mm de altura e a base de 5 mm. Inicialmente, o experimento foi feito utilizando a chave óptica como modulador e em seguida o chopper. A Figura 47, mostra como foi montado o experimento, onde foi utilizada lentes biconvexas, com distância focal de 50 mm. A íris é utilizada para controlar a intensidade de luz que chega até a amostra, o fotodiodo tem a função de detectar a reflexão da luz modulada na amostra, de acordo com o ângulo entre o feixe de luz incidente e o refletido. Um computador é utilizado para enviar comandos para um Arduino que controla os moduladores (chave óptica e chopper) e também para salvar as formas de ondas mostradas no osciloscópio. A Figura 48, mostra a disposição da amostra, onde é utilizada a configuração geométrica MOKE transversal, em relação

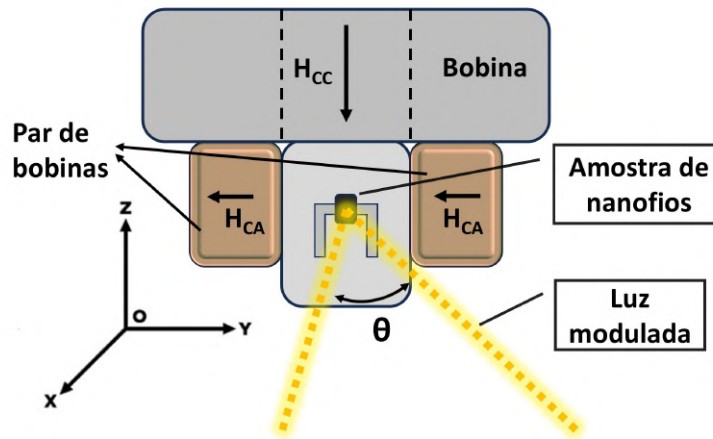
a amostra e a bobina. Outra configuração utilizada, é a MOKE longitudinal, associada ao par de bobinas e o material magnético.

Figura 47 – Diagrama experimental.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 48 – Porta amostra detalhado.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

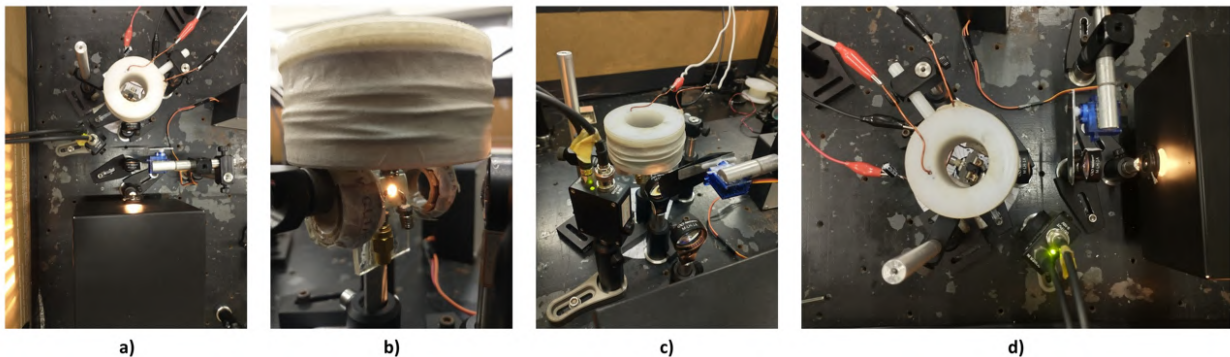
4.2.1 Modulando a luz com a chave óptica

Neste experimento, a chave óptica foi utilizada para modular pulsos na ordem de 10, 20 e 30 segundos, com período de chaveamento de 60 segundos. A amostra foi rotacionada de 10, 20 e

30 graus utilizando o esquema mostrado anteriormente na Figura 47, onde o modulador é a chave óptica. Na Figura 49, é mostrada a montagem experimental em laboratório. As medidas foram feitas utilizando 4 configurações:

- 1) Sem campo;
- 2) Com um campo de 50 Oe gerado pela bobina;
- 3) Com um campo de 50 Oe gerado pela bobina + pulsos aplicados no par de bobinas com frequência de 1 MHz, com tensão de $10 V_{pp}$ e largura de pulso de 20 ns;
- 4) Semelhante a configuração anterior, porém, o pulso aplicado no par de bobinas é amplificado por um amplificador de RF, com ganho de 20 dB.

Figura 49 – **a)** Vista superior. **b)** Acima a bobina que gera campo magnético CC e logo abaixo a luz incidindo na amostra. **c)** Posicionamento do fotodiodo. **d)** Vista superior com ênfase na bobina, mostrando a posição do porta amostra.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

As medidas iniciais, foram feitas sem modular a luz, com objetivo de verificar o nível de tensão proporcional a intensidade de luz detectada pelo fotodiodo. Essas medidas foram feitas para as 4 configurações, como mostra a Tabela 1. Nesta, podemos notar que a variação de tensão média teve mais impacto, quando o pulso no par de bobinas foi amplificado.

Tabela 1 – Medidas relacionadas a reflexão da luz na amostra sem modulação.

Ângulo (Graus)	Sem campo (V)	Com campo de 50 Oe na bobina (V)	Pulso no Par de bobinas (V)	Pulso no par de bobinas + Amplificador (V)
10	4,14	4,14	4,15	4,13
20	3,16	3,16	3,16	3,15
30	2,29	2,28	2,28	2,28

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

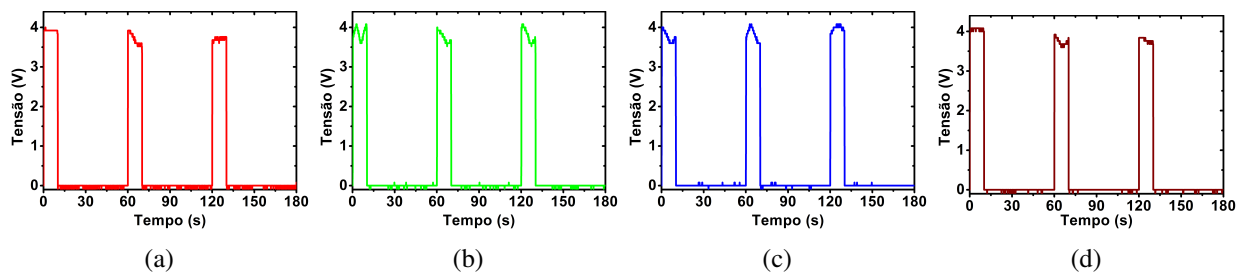
Depois de realizar essas medidas iniciais, iniciaram-se as medidas para os ângulos de 10, 20 e 30 graus, relacionados a luz incidente e a refletida. Já a chave óptica, foi configurada para modular a luz, gerando pulsos com largura de 10, 20 e 30 segundos. Essa modulação se refere ao tempo em que a chave permite a passagem da luz e incide na amostra, sendo o período de sinal de 60 segundos. A finalidade dessas medidas, teve como intenção, verificar se ocorre um deslocamento de fase, referenciando sempre a configuração onde não é aplicado nenhum campo. Para obter o deslocamento de fase, foi aplicado o mesmo método utilizado no item 4.1.1 (Testes utilizando a chave óptica).

Ângulo de 10°

A diferença mais notável está nos picos dos sinais, apresentados nas Figuras 50 a 52 em todas configurações. Isso se deve ao sinal senoidal da rede elétrica, ao qual alimenta a lâmpada que gera a luz branca, gerando pequenas oscilações. Comparando cada uma das configurações para cada uma das modulações 10, 20 e 30 segundos, a diferença de fase é sutil, sendo observada a partir do fit de sinais. A Figura 53, mostra a diferença de fase à medida que a configuração e a modulação da chave óptica são alteradas. Sendo que a modulação em 30 segundos, foi a que apresentou a maior diferença de fase, tanto em atraso, quanto em adiantamento do sinal.

Modulação 10 s

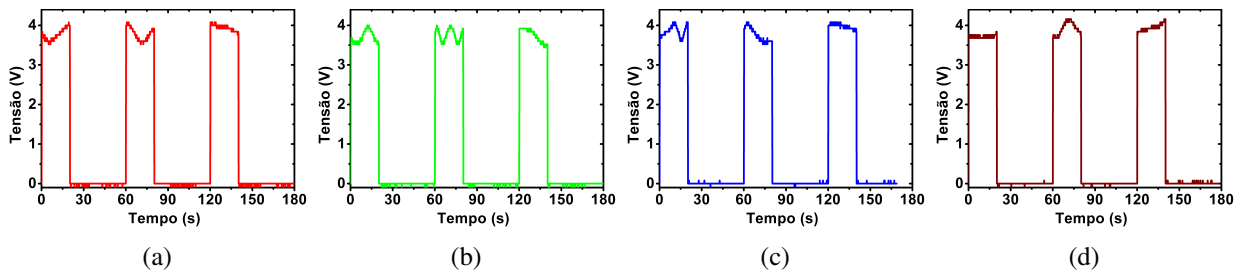
Figura 50 – Ângulo de 10° e modulação de 10 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modulação 20 s

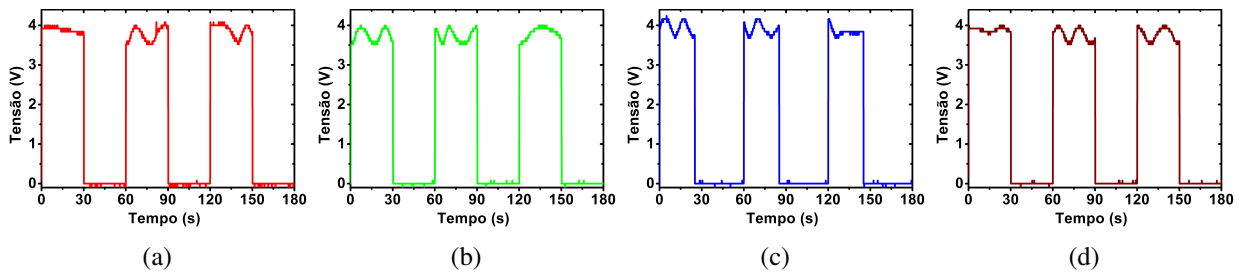
Figura 51 – Ângulo de 10° e modulação de 20 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modulação 30 s

Figura 52 – Ângulo de 10° e modulação de 30 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



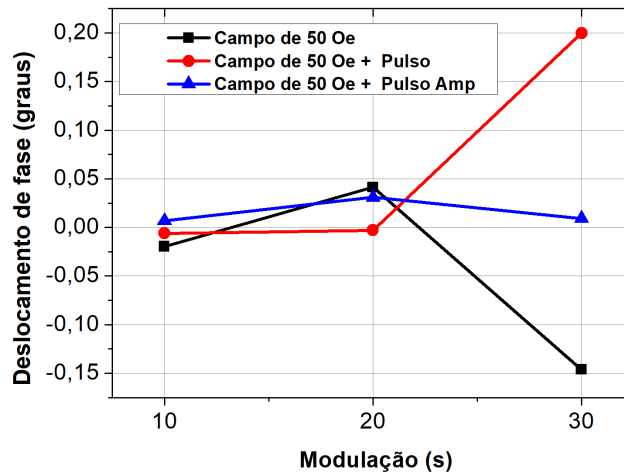
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 2 – Deslocamento de fase em relação a configuração sem campo para o ângulo de 10 graus.

Modulação (s)	Sem campo (Graus)	Com campo de 50 Oe (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso amplificado (Graus)
10	0	-0,0198	-0,0061	0,0067
20	0	0,0412	-0,0030	0,0309
30	0	-0,1462	2,6177	0,0092

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 53 – Dependência do deslocamento de fase em relação à largura do pulso de modulação para um ângulo de incidência de 10° entre os pulsos de luz incidente e refletido.



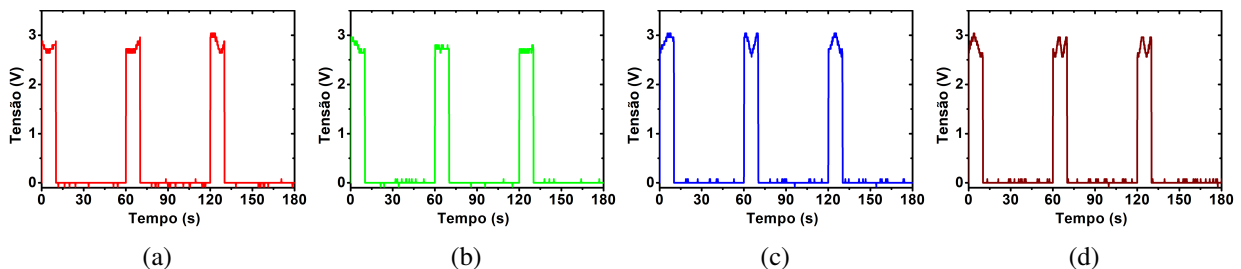
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ângulo de 20°

Neste caso, à medida que a largura de pulso aumentou (modulação de 10, 20 e 30 s), observou-se que a maior diferença de fase ocorreu na modulação de 20 segundos, quando um campo de 50 Oe foi aplicado à amostra, conforme ilustrado na Figura 57, obtida ao plotar os dados da Tabela 3.

Modulação 10 s

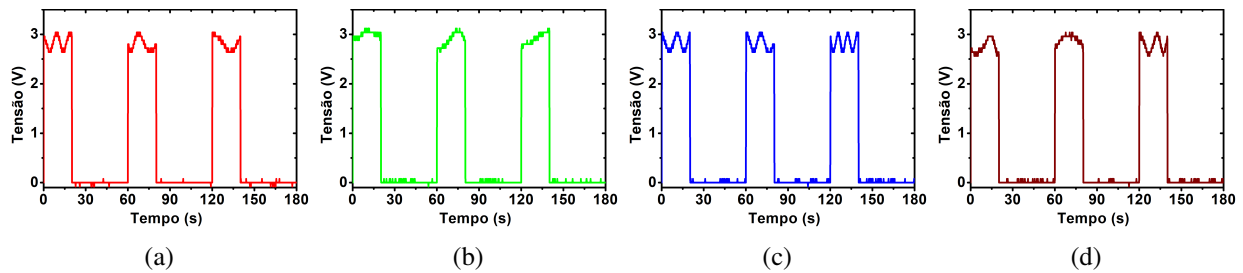
Figura 54 – Ângulo de 20° e modulação de 10 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modulação 20 s

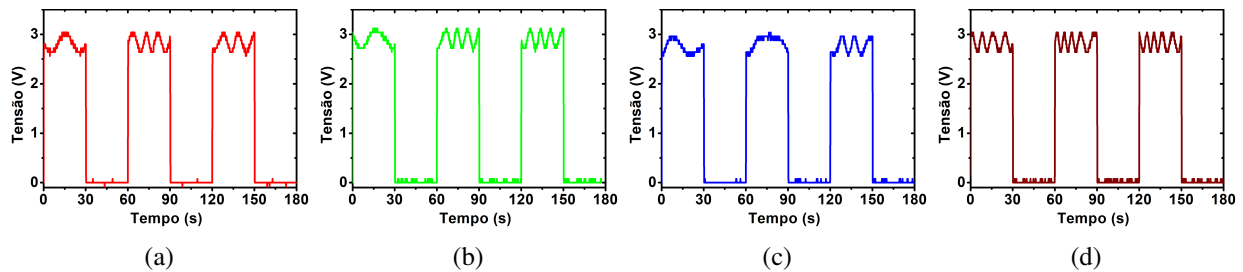
Figura 55 – Ângulo de 20° e modulação de 20 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modulação 30 s

Figura 56 – Ângulo de 20° e modulação de 30 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



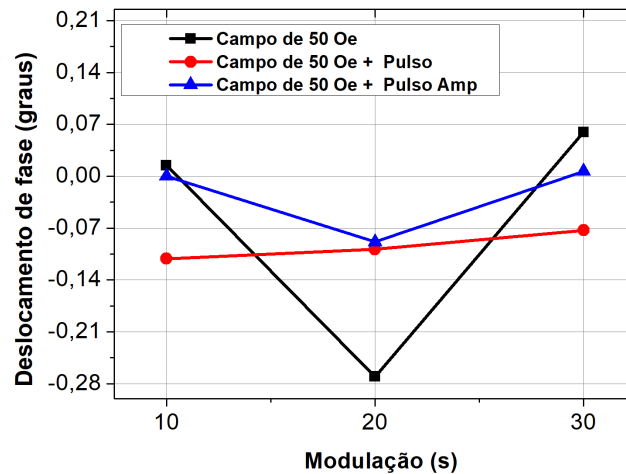
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 3 – Deslocamento de fase em relação a configuração sem campo para o ângulo de 20 graus.

Modulação (s)	Sem campo (Graus)	Com campo de 50 Oe (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso amplificado (Graus)
10	0	0,0145	-0,1114	-0,0002
20	0	-0,2705	-0,0986	-0,0887
30	0	0,0593	-0,0729	0,0065

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 57 – Dependência do deslocamento de fase em relação à largura do pulso de modulação para um ângulo de incidência de 20° entre os pulsos de luz incidente e refletido.



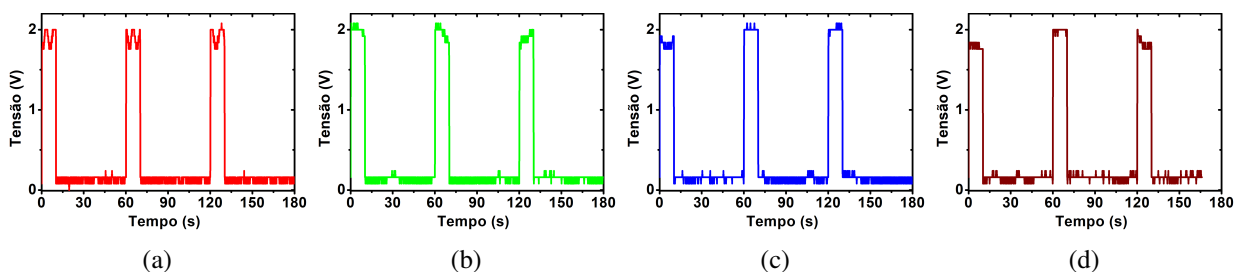
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ângulo de 30°

Observando a Figura 61, obtida a partir dos dados da Tabela 4 (baseados no ajuste de sinais das Figuras 58 a 60), nota-se que, com a modulação de 10 segundos e a configuração com uma bobina gerando um campo de 50 Oe com pulso amplificado, houve uma diferença de fase significativa em comparação com outras configurações de mesmo tempo de modulação. Com a modulação de 20 segundos, a maior diferença de fase ocorreu com o campo de 50 Oe gerado apenas pela bobina. Para 30 segundos de modulação, a maior diferença de fase foi observada na configuração com campo gerado pela bobina e pulso aplicado no par de bobinas.

Modulação 10 s

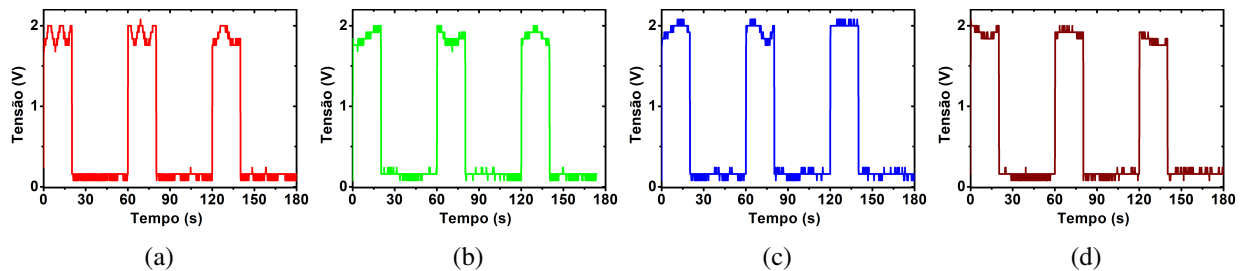
Figura 58 – Ângulo de 30° e modulação de 10 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modulação 20 s

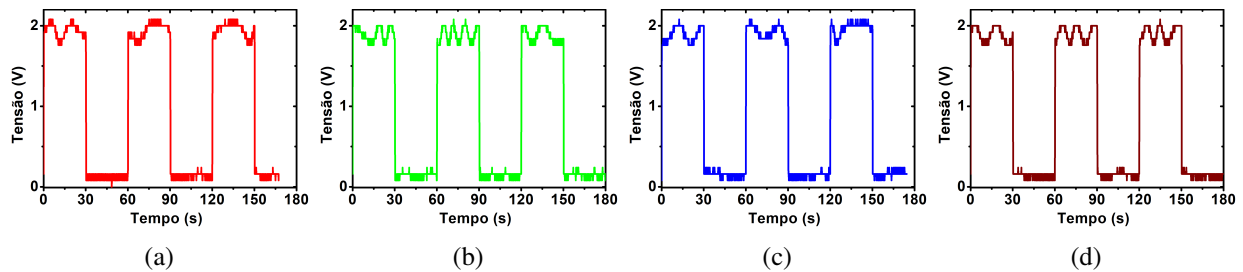
Figura 59 – Ângulo de 30° e modulação de 20 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Modulação 30 s

Figura 60 – Ângulo de 30° e modulação de 30 s. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



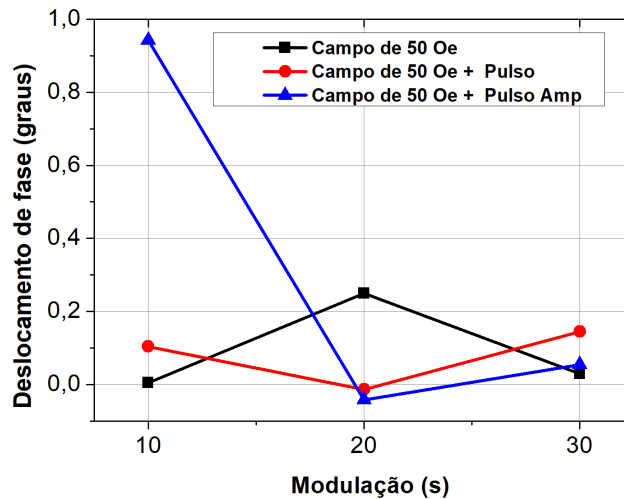
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 4 – Deslocamento de fase em relação a configuração sem campo para o ângulo de 30 graus.

Modulação (s)	Sem campo (Graus)	Com campo de 50 Oe (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso amplificado (Graus)
10	0	0,0046	0,1039	0,9423
20	0	0,2494	-0,0138	-0,0421
30	0	0,0295	0,1450	0,0543

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 61 – Dependência do deslocamento de fase em relação à largura do pulso de modulação para um ângulo de incidência de 30° entre os pulsos de luz incidente e refletido.



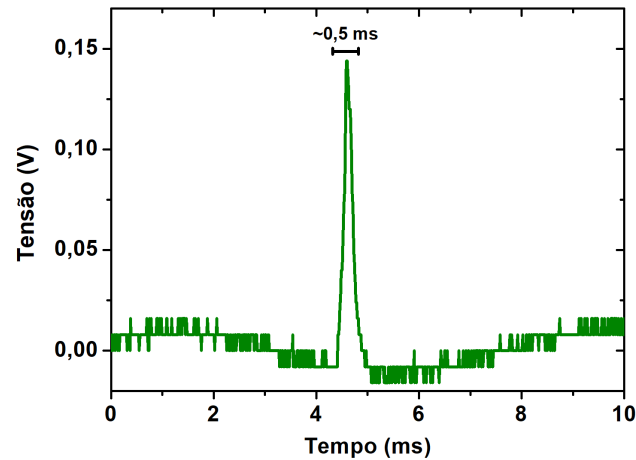
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

4.2.2 Modulando a luz com o chopper

Para esse experimento, a montagem foi semelhante a apresentada anteriormente, o que difere é o uso do chopper no lugar da chave óptica. O chopper óptico foi utilizado para gerar pulsos curtos na ordem de milissegundos, modulando à uma taxa de 120 Hz. Foram feitas medidas para os ângulos de 10, 20 e 30 graus, em relação ao feixe de luz branca incidente na amostra de nanofios de níquel. Para cada ângulo, foram feitas medidas utilizando as seguintes configurações:

- 1) Sem campo;
- 2) Com um campo de 50 Oe gerado pela bobina;
- 3) Com um campo de 50 Oe gerado pela bobina + pulsos aplicados no par de bobinas com frequência de 1 MHz, com tensão de $10 V_{pp}$ e largura de pulso de 20 ns;
- 4) Semelhante a configuração anterior, porém, o pulso aplicado no par de bobinas é amplificado por um amplificador de RF, com ganho de 20 dB.

Figura 62 – Pulso gerado pelo chopper, modulando a uma taxa de 120 Hz. Largura de pulso de 0,5 ms.

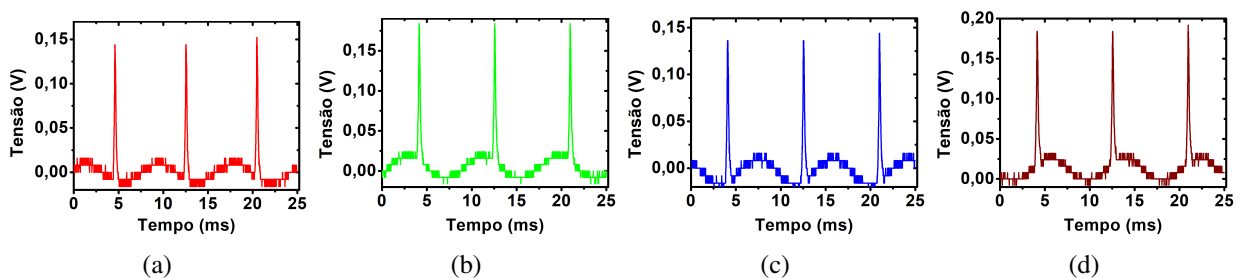


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A Figura 62 mostra um dos pulsos gerados pelo chopper, com uma largura de pulso de cerca de 0,5 ms, modulando a uma taxa de 120 Hz. Os próximos passos consistiram em obter as formas de onda utilizando um osciloscópio conectado ao fotodiodo e analisar a diferença de fase entre os sinais, comparando-os com o sinal obtido na configuração em que nenhum campo magnético foi aplicado. As Figuras 63 a 65 exibem as formas de onda para cada ângulo e configuração.

Ângulo de 10°

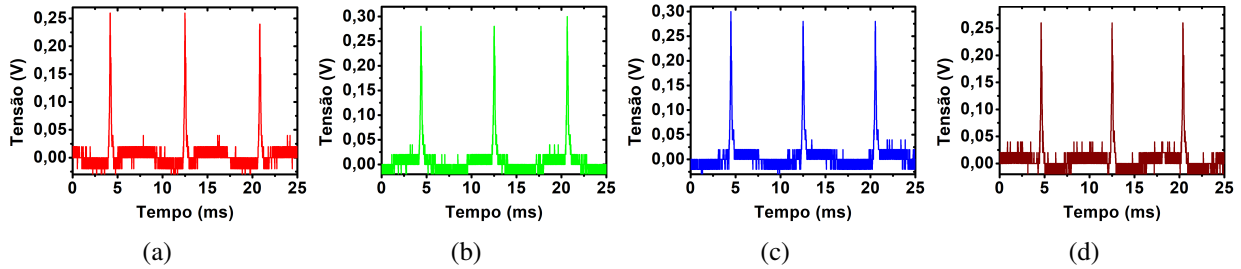
Figura 63 – Para o ângulo de 10° . **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ângulo de 20°

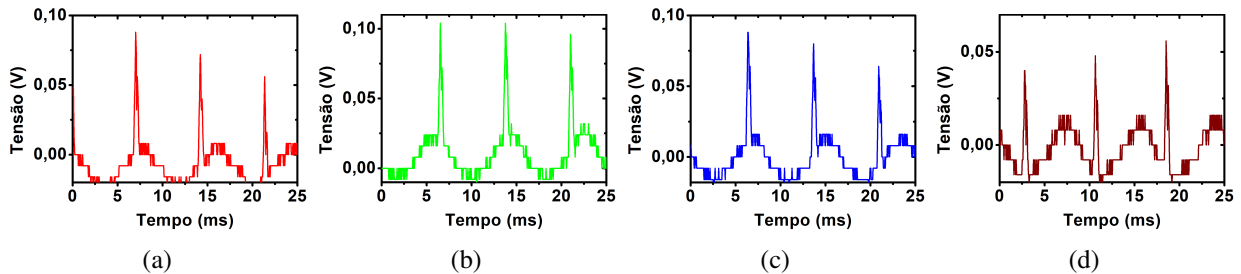
Figura 64 – Para o ângulo de 20°. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Ângulo de 30°

Figura 65 – Para o ângulo de 30°. **a)** Sem campo aplicado. **b)** Com campo de 50 Oe gerado pela bobina. **c)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso no par de bobinas. **d)** Campo de 50 Oe gerado pela bobina e pulso amplificado aplicado no par de bobinas.



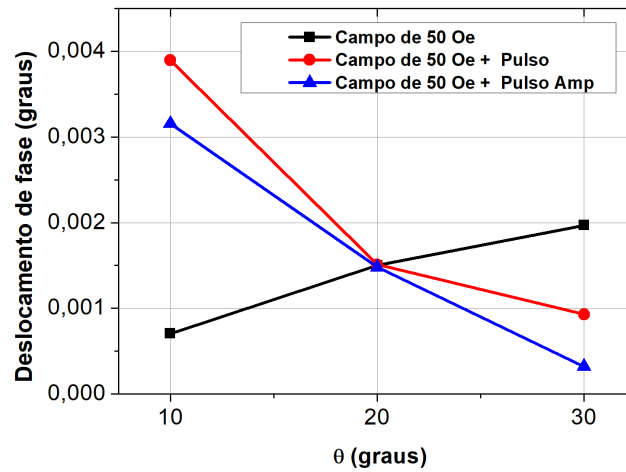
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Tabela 5 – Deslocamento de fase para cada ângulo e configuração.

Ângulo entre pulsos incidentes e refletidos (Graus)	Sem campo (Graus)	Com campo de 50 Oe (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso (Graus)	Com campo de 50 Oe + Pulso amplificado (Graus)
10	0	$704,951 \times 10^{-6}$	$3,895 \times 10^{-3}$	$3,155 \times 10^{-3}$
20	0	$1,500 \times 10^{-3}$	$1,510 \times 10^{-3}$	$1,480 \times 10^{-3}$
30	0	$1,970 \times 10^{-3}$	930×10^{-6}	320×10^{-6}

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Figura 66 – Dependência do deslocamento de fase em relação à variação angular entre os pulsos de luz incidente e refletido.



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

A partir da Tabela 5 foi plotada a Figura 66, mostrando a diferença de fase relacionada à configuração sem campo, é possível notar a ocorrência de uma diferença de fase maior para o ângulo de 10 graus, relacionada à intensidade de luz refletida, que é maior neste caso. Tanto o uso da chave óptica como o do chopper revelaram que ambos podem ser usados como moduladores de luz, para o estudo de materiais magnéticos, onde aqui usou-se nanofios.

CONCLUSÕES

O estudo dos efeitos magneto-ópticos Kerr e Faraday, foram importantes para entender o comportamento de uma onda eletromagnética, que ao passar por um meio que contenha um campo magnético ou elétrico, a interação destes campos com a luz, podem mudar algumas de suas propriedades, em específico a rotação de polarização da luz. A chave óptica, pode ser utilizada para modular a luz, criando feixes de luz modulados, os quais podem ser aplicados no estudo das propriedades de materiais. O desenvolvimento da chave ocorreu de forma satisfatória e seu funcionamento está de acordo com o esperado, podendo gerar pulsos com largura de pulsos superior a 1s.

O chopper mecânico, satisfaz os requisitos do projeto, conseguindo gerar pulsos da ordem de milissegundos. O controle PID integrado ao sistema, funciona de forma satisfatória, permitindo um controle maior da velocidade de rotação dos discos. O uso da chave óptica/chopper, junto do gerador de luz branca, mostrou que os dispositivos de modulação funcionam de forma adequada. O eletroímã que foi desenvolvido, gera um campo aceitável, mas que pode ser aumentado se os eletroímãs forem colocados mais próximos um do outro. A capacidade de gerar um campo magnético que pode ser variado aumentando ou diminuindo a tensão, torna o eletroímã bastante versátil para uso em experimentos utilizando materiais que interagem com campos magnéticos. As bobinas eletromagnéticas construídas, permitiram tanto gerar campos magnéticos CC e CA.

Com base nos resultados obtidos, os dispositivos de modulação óptica, incluindo a chave óptica e o chopper, mostraram-se eficazes nos experimentos envolvendo os nanofios magnéticos de níquel. Os testes realizados demonstraram que esses dispositivos funcionam conforme o esperado, gerando pulsos curtos e longos de luz adequados para a investigação das propriedades ópticas e magneto-ópticas desses materiais. A diferença de fase entre os sinais medidos nas 4 configurações, não seguiram um padrão, porém, de acordo com determinado ângulo e largura do pulso modulado, ocorre uma diferença de fase considerável. Todos os experimentos realizados demonstram que esses dispositivos podem ser usados para analisar propriedades optoeletrônicas e spintrônicas de materiais magnéticos. Os resultados indicaram que a luz modulada interage com os campos magnéticos aplicados, provocando um deslocamento de fase no sinal óptico refletido e evidenciando a sensibilidade dos nanofios magnéticos à modulação da luz.

Este trabalho explora a conexão entre óptica e magnetismo, fornecendo uma base experimental para pesquisas futuras em materiais nanoestruturados. Os sistemas desenvolvidos podem ser ajustados para estudar outros sistemas magnéticos ou aprimorar dispositivos optoeletrônicos, com aplicações em áreas como computação quântica, fotônica integrada e sensores de alta precisão.

REFERÊNCIAS

- ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **PID Controllers: Theory, Design, and Tuning**. [s. l.]: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995. ISBN 1-55617-516-7.
- BADER, S. D. Colloquium: Opportunities in nanomagnetism. **Reviews of Modern Physics**, [s. l.], v. 78, p. 1–15, jan. 2006. DOI: doi.org/10.1103/RevModPhys.78.1. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.78.1>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- FARADAY, Michael. On the magnetization of light and the different laws of magnetic action on light. **The Royal Society**, London, United Kingdom, v. 135, p. 1–20, 1845. DOI: doi.org/10.5479/sil.389644.mq591299. Disponível em: <https://library.si.edu/digital-library/book/onmagnetizationo01fara>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- FERREIRA, Daniel Souto Maior Pifano. **Estudo de fenômenos envolvendo ondas de spin e interfaces ferro-antiferromagnéticas**. Dissertação (Mestrado em Física) — Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32153>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- FERRO, Thiago; HILDEVER, Luana; JOSÉ, André; HOLANDA, José. Unraveling oscillations at ferro(para)magnetic and non-collinear antiferromagnetic interfaces. **The European Physical Journal B**, [s. l.], v. 97, n. 142, set. 2024. DOI: doi.org/10.1140/epjb/s10051-024-00789-y. Disponível em: <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-024-00789-y>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- HAIDER, Taskeya. A review of magneto-optic effects and its application. **International Journal of Electromagnetics and Applications**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 17–24, 2017. DOI: doi.org/10.5923/j.ijea.20170701.03. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijea.20170701.03.html>. Acesso em: 15 dez. 2024.
- HEIMBURGER, Matthew Scot. **A Magneto Optical Kerr Effect Study**. Monografia (Bacharelado em Física) — College of William and Mary, Williamsburg, VA, EUA, 2015. Disponível em: https://www.wm.edu/as/physics/documents/seniorstheses/class2016theses/heimburger_matthew.pdf. Acesso em: 16 dez. 2024.
- HILDEVER, Luana; FERRO, Thiago; DIAS, Adrielson; JOSÉ, André; ESTRADA, Francisco; HOLANDA, José. Detecting magneto-optical interactions in nanostructures. **Journal of Material Science and Technology Research**, [s. l.], v. 11, p. 68–74, set. 2024. DOI: doi.org/10.31875/2410-4701.2024.11.08. Disponível em: <https://doi.org/10.31875/2410-4701.2024.11.08>. Acesso em: 15 nov. 2024.
- HILDEVER, Luana; FERRO, Thiago; DIAS, Adrielson; HOLANDA, José. Transferring optical characteristics into magnetic matter through magneto-optical interactions. **Applied Optics**, [s. l.], v. 63, n. 17, p. 4518–4521, maio 2024. DOI: doi.org/10.1364/AO.522067. Disponível em: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-63-17-4518>. Acesso em: 15 nov. 2024.

HILDEVER, Luana; FERRO, Thiago; ESTRADA, Francisco; HOLANDA, José. Exploring the effects of ultraviolet radiation on the properties of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{PANI}$ nanostructures. **Next Materials**, [s. l.], v. 4, p. 100209, jul. 2024. ISSN 2949-8228. DOI: doi.org/10.1016/j.nxmte.2024.100209. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949822824001060>. Acesso em: 15 nov. 2024.

HOLANDA, José. Analyzing the magnetic interactions in nanostructures that are candidates for applications in spintronics. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [s. l.], v. 54, n. 24, p. 245004, mar. 2021. DOI: doi.org/10.1088/1361-6463/abeb40. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6463/abeb40>. Acesso em: 12 dez. 2024.

HOLANDA, José; MAIOR, Daniel S.; SANTOS, Obed Alves; AZEVEDO, Antonio; REZENDE, Sergio M. Evidence of phonon pumping by magnonic spin currents. **Applied Physics Letters**, [s. l.], v. 118, n. 2, p. 022409, jan. 2021. DOI: doi.org/10.1063/5.0035690. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/5.0035690>. Acesso em: 12 dez. 2024.

HOLANDA, José; SANTOS, O. Alves; REZENDE, Sergio M. Thermal control of the intrinsic magnetic damping in a ferromagnetic metal. **Phys. Rev. Appl.**, [s. l.], v. 16, p. 014051, Jul 2021. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevApplied.16.014051. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.16.014051>. Acesso em: 12 dez. 2024.

KERR, John. On rotation of the plane of polarization by reflection from the pole of a magnet. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, United Kingdom, v. 3, p. 321–343, maio 1877. DOI: doi.org/10.1080/14786447708639245. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14786447708639245>. Acesso em: 15 nov. 2024.

MENDES, J. B. S.; REZENDE, S. M.; HOLANDA, J. Rashba-edelstein magnetoresistance in two-dimensional materials at room temperature. **Physical Review B**, [s. l.], v. 104, p. 014408, jul. 2021. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevB.104.014408. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.104.014408>. Acesso em: 12 dez. 2024.

OAKBERG, Theodore; WANG, Baoliang. Chopping a light beam using a photoelastic modulator (pem). **PEM Applications Newsletter**, Hinds Instruments, Inc., Hillsboro, OR, USA, Fall, n. 3, p. 1–3, 1995. Disponível em: <https://www.hindsinstruments.com/wp-content/uploads/pem-3-Chopping.pdf>. Acesso em: 09 dez. 2024.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5ª. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. ISBN 978-8576058106.

PARKIN, Stuart S. P.; HAYASHI, Masamitsu; THOMAS, Luc. Magnetic domain-wall racetrack memory. **Science**, [s. l.], v. 320, n. 5873, p. 190–194, abr. 2008. DOI: doi.org/10.1126/science.1145799. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1145799>. Acesso em: 12 jan. 2025.

PAVESI, Lorenzo; LOCKWOOD, David J. **Silicon Photonics**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. v. 94. ISBN 978-3-540-21022-1.

PRATAMA, Sendi Nugraha; KURNIAWAN, Yudhi; MUHAMMADY, Shibghatullah; TAKASE, Kouichi; DARMA, Yudi. Structural and magnetic properties of nickel nanowires grown in porous anodic aluminium oxide template by electrochemical deposition technique. **Materials Research Express**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 034008, mar. 2018. DOI: doi.org/10.1088/2053-1591/aab6ea. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aab6ea>. Acesso em: 31 jan. 2025.

REZENDE, S. M.; MAIOR, D. S.; SANTOS, O. Alves; HOLANDA, J. Theory for phonon pumping by magnonic spin currents. **Phys. Rev. B**, [s. l.], v. 103, p. 144430, abr. 2021. DOI: doi.org/10.1103/PhysRevB.103.144430. Disponível em: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.103.144430>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SILVA, Allamys Allan Dias da. **Modelagem computacional de sensor de campo magnético à fibra óptica usando efeito magneto-óptico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34005>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; DEGIORGI, Sérgio V. B.; HOLANDA, José. Experimental observation of a magnetic interfacial effect. **Advanced Materials Interfaces**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 2202143, fev. 2023. DOI: doi.org/10.1002/admi.202202143. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/admi.202202143>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; DIAS, Adrielson de A.; RODRIGUES, Alexandre R.; CHÁVEZ, Francisco E.; OLIVEIRA, Rafael A. de; HOLANDA, José. An experimental analysis from the magnetic interactions in nanowire arrays. **Applied Nanoscience**, [s. l.], v. 13, p. 5559–5562, jan. 2023. DOI: doi.org/10.1007/s13204-023-02769-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13204-023-02769-7>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; HILDEVER, Luana M. C. S.; SANTOS, Maria C. G.; ESTRADA, Francisco; HOLANDA, José. Analyzing the magnetic influence on magneto-optical interactions. **Journal of Superconductivity and Novel Magnetism**, [s. l.], v. 36, p. 951–955, mar. 2023. DOI: doi.org/10.1007/s10948-023-06530-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10948-023-06530-7>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVA, Wibson W. G.; SILVA, André J. C.; DIAS, Adrielson de A.; RODRIGUES, Alexandre R.; HOLANDA, José. Unraveling the spin current hermiticity. **Journal of Materials Science**, [s. l.], v. 58, p. 12251–12257, ago. 2023. DOI: doi.org/10.1007/s10853-023-08807-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08807-7>. Acesso em: 12 dez. 2024.

STANDARD DC Series Motors. New Territories, Hong Kong: Johnson Electric Group, 2011. https://www.contact-evolution.ch/files/DC_motors.pdf. Acesso em: 12 de dez. de 2024.

TANNUS, Alexandre Moraes. **Arduino: Servomotores**. Anápolis, Goiás: Repositório Institucional AEE, 2018. Disponível em: <http://repositorio.aee.edu.br/bitstream/aee/1860/1/ARDUINO%20-%20SERVOMOTORES.pdf>. Acesso em: 15 de dez. 2024.

THOMASCHEWSKI, Martin; GUI, Yaliang; PATIL, Chandraman; WANG, Hao; MENG, Jiawei; DALIR, Hamed; SORGER, Volker J. High-speed plasmonic ito modulators. In: 2023 CONFERENCE ON LASERS AND ELECTRO-OPTICS (CLEO), 07-12 maio 2023, San Jose, CA, USA **Anais**[...]. San Jose, CA, USA: IEEE, 27 set. 2023. p. 1–2. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10258732>. Acesso em: 21 jan. 2025.

APÊNDICE A - CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA CONTROLE DA CHAVE ÓPTICA

Programa em C++

```

    // Autor: André Silva

// CÓDIGO PARA CONTROLE DA CHAVE ÓPTICA

#include <Servo.h>

unsigned long tempo0Graus = 0; // Tempo em milissegundos para 0
    ↪ graus
unsigned long tempo96Graus = 0; // Tempo em milissegundos para 96
    ↪ graus
unsigned long tempoAnterior = 0;
Servo s1;

int angS1;
bool controleAtivo = false; // Variável para controlar se o servo
    ↪ deve ser controlado pelo tempo
bool posicaoAtual = false; // Variável para controlar a posição
    ↪ atual do servo (false = 0 graus, true = 96 graus)

void confIniciais() {
    s1.attach(2); // Saída digital pino 2
    angS1 = 0;
    s1.write(angS1);
}

void confServo() {
    if (controleAtivo) { // Verifica se o controle está ativo
        unsigned long tempoAtual = millis();
        unsigned long tempoLimite = posicaoAtual ? tempo96Graus :
            ↪ tempo0Graus; // Determina o tempo limite baseado na
            ↪ posição atual
        if (tempoAtual - tempoAnterior >= tempoLimite) {

```

```

    angS1 = posicaoAtual ? 0 : 96; // Alterna entre 0 e 96
        ↪ graus
    s1.write(angS1);
    posicaoAtual = !posicaoAtual; // Inverte a posição atual do
        ↪ servo
    tempoAnterior = tempoAtual;
}
} else { // Se o controle não estiver ativo, mantém o servo na
    ↪ posição 0 graus
    s1.write(0);
}
}

void lerSerial() {
    // Verifica se há dados disponíveis para leitura na porta
    ↪ serial
    if (Serial.available() > 0) {
        // Lê a string da porta serial
        String strComando = Serial.readStringUntil('\n');

        // Verifica se o comando é para parar o servo
        if (strComando.equalsIgnoreCase("parar")) {
            controleAtivo = false;
            Serial.println("Movimento do servo parado.");
            return;
        }

        // Divide a string em dois valores separados por vírgula
        int posVirgula = strComando.indexOf(',');
        if (posVirgula != -1) {
            String strTempo0Graus = strComando.substring(0,
                ↪ posVirgula);
            String strTempo96Graus = strComando.substring(posVirgula +
                ↪ 1);

            // Converte as strings em números inteiros

```

```

tempo0Graus = strTempo0Graus.toInt() * 1000; // Multiplica
↳ por 1000 para converter segundos em milissegundos
tempo96Graus = strTempo96Graus.toInt() * 1000;

// Ativa o controle do servo pelo tempo
controleAtivo = true;
//Serial.println("Controle do servo ativado com novos
↳ tempos definidos.");
} else {
//Serial.println("Formato inválido. Use dois valores
↳ separados por vírgula (tempo0Graus,tempo96Graus) ou
↳ 'parar' para parar o servo.");
}
}
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  confIniciais();
}

void loop() {
  confServo();
  lerSerial();
}

```

Programa para controle via serial da chave óptica

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Thu Apr 18 13:51:42 2024

@author: andre
"""

```

```

import serial
import time

# Função para inicializar a comunicação serial
def iniciar_serial(porta_serial):
    ser = serial.Serial(porta_serial, 9600, timeout=1)
    time.sleep(2) # Espera 2 segundos para inicialização da
    ↪ porta serial
    return ser

# Função para enviar dados via serial
def enviar_dados_serial(valor, ser):
    # Envia o valor para o Arduino
    ser.write(f"{valor}\n".encode())

# Porta serial onde o Arduino está conectado
porta_serial = 'COM3' # Altere para a porta serial correta

# Inicializa a comunicação serial dentro do contexto 'with' para
↪ garantir o fechamento adequado
with iniciar_serial(porta_serial) as ser:
    try:
        # Loop para receber e enviar dados via serial
        ↪ continuamente
        while True:
            # Solicita ao usuário um valor para enviar via serial
            comando = input("Digite 'parar' para parar o servo ou
            ↪ os tempos para 0 e 96 graus (Exemplo: 20,10): ")

            # Verifica se o usuário deseja parar o servo
            if comando.lower() == 'parar':
                print("Enviando comando para parar o servo e
                ↪ encerrando o programa.")
                enviar_dados_serial("parar", ser)
                break # Sai do loop e encerra o programa

```

```

# Divide o comando em tempos para 0 e 96 graus
try:
    tempo0Graus, tempo96Graus = comando.split(',')
    tempo0Graus = int(tempo0Graus.strip())
    tempo96Graus = int(tempo96Graus.strip())

    # Verifica se os tempos estão dentro do intervalo
    ↪ válido
    if tempo0Graus < 1 or tempo96Graus < 1 or
    ↪ tempo0Graus > 60 or tempo96Graus > 60:
        print("Os tempos devem estar entre 1 e 60
        ↪ segundos.")
        continue

    # Envia os tempos via serial

    ↪ enviar_dados_serial(f"{tempo0Graus},{tempo96Graus}",
    ↪ ser)

except ValueError:
    print("Formato inválido. Use dois valores
    ↪ separados por vírgula
    ↪ (tempo0Graus,tempo96Graus) ou 'parar' para
    ↪ parar o servo.")
    continue

except serial.SerialException as e:
    print(f"Erro de comunicação com a porta serial: {e}")

# A porta serial será automaticamente fechada ao sair do bloco
↪ 'with'

```

APÊNDICE B - CÓDIGO DESENVOLVIDO PARA O CONTROLE DO CHOPPER UTILIZANDO ALGORITMO PID

```

/* Autor: André Silva
   CONTROLE DE VELOCIDADE DE UM MOTOR DC UTILIZANDO PID
*/

// =====
// Inclusão de Bibliotecas
// =====
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// =====
// Macros
// =====
#define SBIT(N) (1 << N)
#define RSBIT(N) ~(1 << N)

// =====
// Definições para o Display 16x2
// =====
#define endereco 0x3F // Endereços comuns: 0x27, 0x3F
#define colunas 16
#define linhas 2

// =====
// Instanciação do Objeto Display
// =====
LiquidCrystal_I2C lcd(endereco, colunas, linhas);

// =====
// Variáveis do PID
// =====
float kp = 0.00001; // Ganho Proporcional
float ki = 0.001; // Ganho Integral

```

```

float kd = 0.0;          // Ganho Derivativo (na prática, PID atua
↳ como PI)
float setpoint = 0;     // Velocidade desejada (0 a 6240 RPM)
float integral = 0.0;
float last_error = 0.0;

// =====
// Variáveis para Contagem e Controle
// =====
volatile unsigned int contador = 0; // Incrementa a cada
↳ interrupção causada pela helice de 4 janelas

// Controle de interface: false = controle por botões; true =
↳ controle via serial
bool controleSerial = false;

// Variáveis para intervalos
int aciona = 0;
int acionaLCD = 0;
int dispConv = 0;
int dispMq_est = 0;
unsigned int RPM = 0;

// =====
// Máquina de Estados (Botões)
// =====
#define PORT_LED PORTB
#define PINO_LED PORTB5
#define PORT_BOTAO_LIGAR PINB
#define PINO_BOTAO_LIGAR PINB0
#define PORT_BOTAO_DESLIGAR PINB
#define PINO_BOTAO_DESLIGAR PINB1

enum stLiga_desl_t { DESLIGADO, LIGADO };
enum stLiga_desl_t stLiga_desl = DESLIGADO;

```

```

// =====
// Funções de Configuração
// =====
void confP() { // Configura os pinos 2, 5, 8, 9, 13
    DDRD &= ~(SBIT(DDD2)); // pino 2 como entrada
    MCUCR &= ~SBIT(PUD); // Configura Pull-Up
    PORTD |= SBIT(PORTD2);

    DDRD |= SBIT(DDD6); // pino 5 para PWM (Timer1A)

    DDRB |= SBIT(DDB5); // pino 13 para LED (PB5)

    DDRB &= ~(SBIT(DDB0)); // pino 8 como entrada
    PORTB |= SBIT(PORTB0); // Habilita pull-up em pino 8
    DDRB &= ~(SBIT(DDB1)); // pino 9 como entrada
    PORTB |= SBIT(PORTB1); // Habilita pull-up em pino 9
}

void confTimer() {
    // Configuração do Timer1 em modo CTC com prescaler 256
    TCCR1A &= ~(SBIT(WGM11) | SBIT(WGM10));
    TCCR1B &= ~(SBIT(WGM13) | SBIT(CS11) | SBIT(CS10));
    TCCR1B |= SBIT(WGM12) | SBIT(CS12);

    OCR1A = 6249; // Contagem para 100 ms (10 Hz)
    TCNT1 = 0;
    TIMSK1 |= SBIT(OCIE1A); // Habilita a interrupção do Timer1
}

void confTimer0() {
    // Configuração do Timer0 para PWM Fast, prescaler 64
    TCCR0A |= SBIT(COM0A1);
    TCCR0A &= ~(1 << WGM00) & ~(1 << WGM01);
    TCCR0A &= ~(SBIT(COM0A0));
    TCCR0B |= SBIT(CS01) | SBIT(CS00);
    TCCR0B &= ~(SBIT(WGM02) | SBIT(CS02));
}

```

```

OCR0A = 25; // Valor inicial do PWM (0-255)
TCNT0 = 0;
TIMSK0 |= SBIT(TOIE0);
}

void ConfInt0 () {
    // Configura a interrupção externa no pino 2, borda de subida
    EICRA |= SBIT(ISC01) | SBIT(ISC00);
    EIMSK |= SBIT(INT0);
}

void cfgADC () {
    // Configuração do ADC: AVCC como referência, prescaler 128,
    ↪ trigger livre, canal A0
    ADMUX &= ~SBIT(REFS1);
    ADMUX |= SBIT(REFS0);
    ADCSRA |= SBIT(ADPS2) | SBIT(ADPS1) | SBIT(ADPS0);
    ADCSRB &= ~(SBIT(ADTS2) | SBIT(ADTS1) | SBIT(ADTS0));
    ADCSRA &= ~SBIT(ADSC);
    ADMUX &= ~(SBIT(MUX3) | SBIT(MUX2) | SBIT(MUX1) | SBIT(MUX0));
    // ADC começa desativado, habilitado apenas no estado LIGADO se
    ↪ controleSerial for false
    ADCSRA &= ~(SBIT(ADEN) | SBIT(ADIF));
}

// =====
// Rotinas de Interrupção
// =====

// Interrupção externa para contagem (sensor de RPM)
ISR(INT0_vect) {
    contador++;
}

// Interrupção do Timer1 (atualiza variáveis de tempo)

```

```

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    aciona++;
    acionaLCD++;
    dispConv++;
    dispMq_est++;
}

// Interrupção do ADC para atualização do setpoint via
↪ potenciômetro
volatile int valorADC = 0;
volatile byte cp = 0;
ISR(ADC_vect) {
    cli(); // Desabilita interrupções temporariamente
    valorADC = ADC;
    cp = 1;
    // Atualiza o setpoint somente se controleSerial estiver
    ↪ desativado
    if (!controleSerial) {
        setpoint = ((6240L * valorADC) / 1023);
        if (setpoint > 6200) {
            setpoint = 6200;
        }
    }
    sei(); // Habilita interrupções
}

// =====
// Funções do Sistema
// =====

void medirRPM() {
    if (aciona == 10) { // A cada 100 ms (10Hz)
        RPM = ((long)contador * 6240 / 1625);
        contador = 0;
        pid(); // Executa o controle PID
        aciona = 0;
    }
}

```

```
    }  
}  
  
// =====  
// PID númerico  
// =====  
  
void pid() {  
    int valor_atual = OCR0A;  
    float erro = setpoint - RPM;  
  
    float proporcional = kp * erro;  
    integral += ki * erro;  
  
    // Limitar a integral para evitar windup  
    if (integral > 255.0) integral = 255.0;  
    else if (integral < 0.0) integral = 0.0;  
  
    float derivativa = kd * (erro - last_error);  
  
    float output = proporcional + integral + derivativa;  
  
    if (output > 255.0) output = 255.0;  
    else if (output < 0.0) output = 0.0;  
  
    OCR0A = static_cast<uint8_t>(output);  
    last_error = erro;  
  
    Serial.print(setpoint);  
    Serial.print(" ");  
    Serial.print(RPM);  
    Serial.print(" ");  
    Serial.println(output);  
}
```

```

void disparoConv() {
    // Dispara a conversão do ADC a cada 1s somente se
    ↪ controleSerial for false
    if (!controleSerial && dispConv == 10) {
        ADCSRA |= SBIT(ADSC);
        dispConv = 0;
    }
}

// Máquina de estados: se controleSerial estiver ativo, ignora
↪ botões
void mqEtados() {
    if (controleSerial) return;

    int botaoLigar = (PORT_BOTAO_LIGAR & (1 << PINO_BOTAO_LIGAR));
    int botaoDesligar = (PORT_BOTAO_DESLIGAR & (1 <<
    ↪ PINO_BOTAO_DESLIGAR));

    switch (stLiga_desl) {
        case DESLIGADO:
            if (botaoDesligar == 0) {
                PORT_LED &= ~(1 << PINO_LED); // Desliga LED
                stLiga_desl = DESLIGADO;
            }
            else if (botaoLigar == 0) {
                stLiga_desl = LIGADO;
            }
            break;

        case LIGADO:
            if (botaoLigar == 0) {
                PORT_LED |= (1 << PINO_LED); // Liga LED
                stLiga_desl = LIGADO;
                // Habilita ADC somente se não estiver no modo serial
                if (!controleSerial) {
                    ADCSRA |= (SBIT(ADEN) | SBIT(ADIE));
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    TCCR0A |= (1 << WGM00) | (1 << WGM01); // Ativa Fast PWM
}
else if (botaoDesligar == 0) {
    stLiga_desl = DESLIGADO;
    PORT_LED &= ~(1 << PINO_LED);
    // Desativa ADC e PWM
    ADCSRA &= ~(SBIT(ADEN) | SBIT(ADIE));
    TCCR0A &= ~(1 << WGM00) & ~(1 << WGM01);
    setpoint = 0;
}
break;

default:
    stLiga_desl = DESLIGADO;
}
}

void lcdC() {
    if (stLiga_desl == LIGADO) {
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Setpoint: ");
        lcd.print(setpoint);
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("RPM Atual: ");
        if (acionaLCD == 10) {
            lcd.print(RPM);
            acionaLCD = 0;
            if (RPM == 0) {
                lcd.clear();
                lcd.setCursor(0, 1);
                lcd.print("RPM Atual: 0");
            }
        }
    }
}

else if (stLiga_desl == DESLIGADO) {

```

```

if (acionaLCD == 10) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("SISTEMA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("DESATIVADO");
    acionaLCD = 0;
}
}
}
// Processa comandos via comunicação serial
void processarSerial() {
    if (Serial.available() > 0) {
        String comando = Serial.readStringUntil('\n');
        comando.trim();

        // Ao receber um comando via serial, ativa o modo serial
        controleSerial = true;

        if (comando.startsWith("SP:")) {
            float novoSetpoint = comando.substring(3).toFloat();
            if(novoSetpoint > 6200) novoSetpoint = 6200; // Limita o
            ↪ setpoint a 6200 RPM
            setpoint = novoSetpoint;
            Serial.print("Setpoint atualizado: ");
            Serial.println(setpoint);
        }
        else if (comando.equalsIgnoreCase("ON")) {
            stLiga_desl = LIGADO;
            Serial.println("Estado alterado: LIGADO");
        }
        else if (comando.equalsIgnoreCase("OFF")) {
            stLiga_desl = DESLIGADO;
            Serial.println("Estado alterado: DESLIGADO");
        }
        else {

```

```

        Serial.print("Comando desconhecido: ");
        Serial.println(comando);
    }

    // Desativa o ADC para evitar conflito com o controle via
    // → serial
    ADCSRA &= ~(SBIT(ADEN) | SBIT(ADIE));
}
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    lcd.clear();

    confP();
    confTimer();
    confTimer0();
    ConfInt0();
    cfgADC();
}

void loop() {
    // Se não estiver no modo serial, processa os botões
    if (!controleSerial) {
        if (dispMq_est == 2) {
            mqEtados();
            dispMq_est = 0;
        }
    }
    medirRPM();
    disparoConv();
    lcdC();
    processarSerial();
}

```