

ROTEIRO PARA ELABORAÇÃO DE RELATÓRIO FINAL DE ATIVIDADES DO ALUNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (IC) PIBIC/UFPE/CNPq

(Refere-se às atividades realizadas no período de agosto 2019 a agosto de 2020)

Identificação

Nome do Orientador: Sergio Machado Rezende

Nome do Aluno: Matheus Sobreira Farias

Título do Projeto: Construção de um amplificador sensível à fase (Lock-in amplifier) para o sistema de magnetometria ótica por efeito Kerr (MOKE), a ser utilizado na investigação de propriedades magnéticas em filmes finos

Resumo do Trabalho

No século XXI, a física da matéria condensada perpassa por medições elétricas em ordens de grandeza menores que o próprio ruído. No estudo do magnetismo e das propriedades magnéticas dos materiais é relevante a capacidade de caracterizar efeitos físicos através dessa medição, como por exemplo o efeito Kerr magneto-óptico (MOKE), onde é possível classificar o comportamento da magnetização do material através de medições elétricas indiretas. No presente trabalho é confeccionado um amplificador sensível à fase (Lock-in) para o sistema MOKE em configuração longitudinal, sendo possível avaliar o comportamento da magnetização num filme fino de IrMn/Py bem como a medição do seu campo de *exchange bias*, através de sua curva de histerese.

Sumário

1. Introdução	2
2. Objetivos	3
3. Metodologia do Trabalho	4
3.1 Projeto do Dispositivo Lock-in	4
3.1.1. Diagrama do Pré-amplificador diferencial	4
3.1.2. Diagrama do Deslocador de Fase	5
3.1.3. Diagrama do Multiplicador	5
3.1.4. Diagrama do Filtro e Amplificador Final	6
3.1.5. Diagrama do Circuito de Alimentação	7
3.2. Preparação do Arranjo MOKE	8
4. Resultados e Discussão	10
4.1. Confeção do Dispositivo Lock-in	10
4.1.1. Placa de circuito do Pré-amplificador diferencial	10
4.1.2. Placa de circuito do Deslocador de Fase	11
4.1.3. Placa de circuito do Multiplicador	12
4.1.4. Placa de circuito do Lock-in	12
4.2. Medições Experimentais no MOKE	13
5. Conclusões	14
Referências Bibliográficas	15
Dificuldades Encontradas	16
Atividades Paralelas Desenvolvidas pelo Aluno	16

1. Introdução

Medições experimentais de sinais elétricos têm um papel essencial no desenvolvimento do conhecimento físico pela comunidade científica, sendo importante não só para se obter informações sobre características eletromagnéticas do material analisado[1], mas também podendo ser utilizado para análises mecânicas[2] e ópticas[3]. Com o avanço da tecnologia, principalmente na área da física da matéria condensada, a necessidade de se estudar materiais menores, da ordem de micrômetros, ou até de nanômetros, foi se destacando, e conseqüentemente se necessitando de uma instrumentação cada vez mais robusta.

Um dos fenômenos ópticos interessantes para se obter análises qualitativas acerca de características magnéticas do material de prova é o MOKE[4]. Esse efeito descreve a mudança do ângulo de polarização da luz incidida em uma superfície magnetizada após sua reflexão, sendo possível inferir propriedades como o tipo de magnetização presente no material[5], sendo classificada como ferromagnética, antiferromagnética ou paramagnética. Dentre os arranjos experimentais utilizados para observação do fenômeno, é possível destacar-se três. A configuração polar[6], onde o vetor magnetização da amostra é perpendicular à superfície de reflexão e paralela ao plano de incidência do feixe luminoso, a configuração transversal[7], onde o vetor magnetização do filme fino é perpendicular ao plano de incidência e paralelo à superfície, nessa configuração, usualmente se mede a refletividade do feixe luminoso, e por fim, a configuração longitudinal[8], onde o vetor magnetização é paralelo tanto em relação à superfície de reflexão como ao plano de incidência.

Nos três arranjos, a medição do MOKE é realizada de maneira indireta, através de equipamentos de instrumentação eletrônica, e diante disso surge a dificuldade da captação do sinal associado ao fenômeno físico. Tal sinal elétrico é caracterizado por uma amplitude abaixo do nível de ruído, por volta de μV ou nV . Este sinal necessita de um tratamento específico, um amplificador usual faria com que os ruídos também fossem amplificados e portanto dificultaria a análise desejada. Partindo disso, a necessidade de construção de um amplificador sensível a fase Lock-in[9] torna-se expressiva, uma vez que nesse tipo de amplificador se consegue selecionar e amplificar um sinal de uma frequência desejada.

Sendo assim, o presente trabalho busca desenvolver o amplificador Lock-in, de sua concepção ao instrumento final, para que se faça medições do MOKE, caracterizando características magnéticas intrínsecas dos filmes finos no laboratório do Grupo de Magnetismo e Materiais Magnéticos da UFPE.

2. Objetivos

- Estudar a teoria sobre o amplificador sensível à fase, desenvolver o circuito eletrônico, assim como esquemas eletrônicos e construir todo o circuito, resultando no instrumento Lock-in, que deverá ser construído para que tenha total compatibilidade com a técnica MOKE.
- Realizar a instalação do amplificador para assistir a montagem do instrumento de magnetometria ótica por efeito Kerr, otimizando-o a fim de obter o melhor sinal possível para as medidas no MOKE.
- Realizar medidas em amostras de filmes finos utilizando o instrumento MOKE, caracterizando as propriedades magnéticas intrínsecas (dependentes da estrutura eletrônica e cristalina do material).

Supondo que o sinal de entrada é dado por $x_e(t) = A_e \cos(\omega_e t)$ e o sinal de referência por $x_r(t) = A_r \cos(\omega_r t + \phi_r)$, ao realizar a multiplicação desses dois sinais, é possível obter-se o sinal resultante $x_s(t)$:

$$x_s(t) = \frac{A_e A_r}{2} (\cos((\omega_e - \omega_r)t - \phi_r) + \cos((\omega_e + \omega_r)t + \phi_r)) ,$$

como a frequência da referência é igual à frequência do sinal de entrada, tem-se $\omega_e = \omega_r = \omega$, e portanto:

$$x_s(t) = \frac{A_e A_r}{2} \cos(\phi_r) + \frac{A_e A_r}{2} \cos(2\omega t + \phi_r) .$$

Com o deslocador de fase, se ajusta o sinal de saída até que a componente DC se anule, resultando no sinal desejado

$$x_s'(t) = -\frac{A_e A_r}{2} \sin(2\omega t) .$$

Para desenvolver o circuito eletrônico associado a esta etapa, foi utilizado o chip AD630, um modulador robusto que possui capacidade de operar na frequência de 50 kHz sem problemas, sendo também comumente utilizado em aplicações de circuitos de amplificador sensível a fase de baixo custo. O circuito é mostrado na Figura 3.1.3.1.

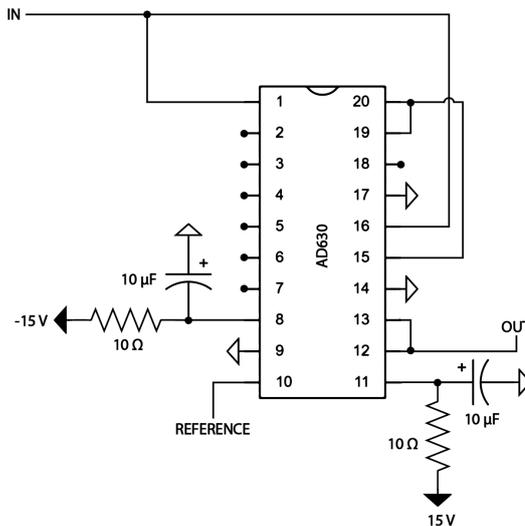


Figura 3.1.3.1: Diagrama de circuito eletrônico associado à etapa de multiplicação.

3.1.4 Filtro e Amplificador Final

Por fim, de posse do sinal de saída da etapa de multiplicação, é aplicado um filtro passa baixa que tem função garantir a robustez da filtragem da componente DC pós multiplicação, bem como extrair ruídos de baixa frequência do resultado final. Como o Lock-in tem como objetivo amplificar sinais

de até μV para essa aplicação, nesse momento também é adicionada uma etapa secundária de amplificação, totalizando um amplificador de ganho até 2000 vezes.

Para a elaboração do diagrama do circuito eletrônico, foi utilizada a topologia Sallen-Key de filtragem ativa. No diagrama mostrado na Figura 3.4.1 é possível observar que o Lock-in elaborado tem como possibilidade de escolha várias frequências de corte em seu filtro passa baixas, para simplificação da confecção, foi utilizado apenas um capacitor de $1\ \mu\text{F}$, suficiente numa análise a $50\ \text{kHz}$.

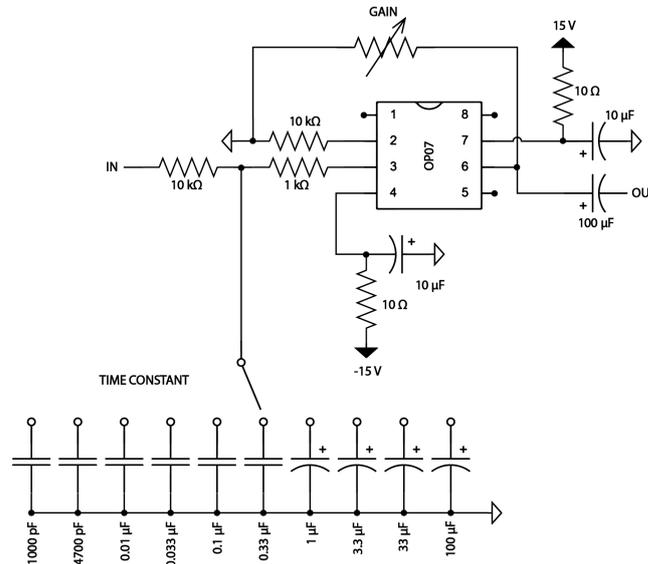


Figura 3.1.4.1: Diagrama de circuito eletrônico associado ao estágio final de filtragem e amplificação do Lock-in.

3.1.5 Circuito de Alimentação

Além da elaboração do circuito do Lock-in, foi necessário elaborar o circuito da fonte de alimentação simétrica de $15\ \text{V}$, que consiste em transformar o sinal da rede com amplitude $220\ \text{V}$ e frequência de $60\ \text{Hz}$, passando por etapas de retificação e regulação com diodos e os chips LM7815 e LM7915, mostrado na Figura 3.1.5.1.

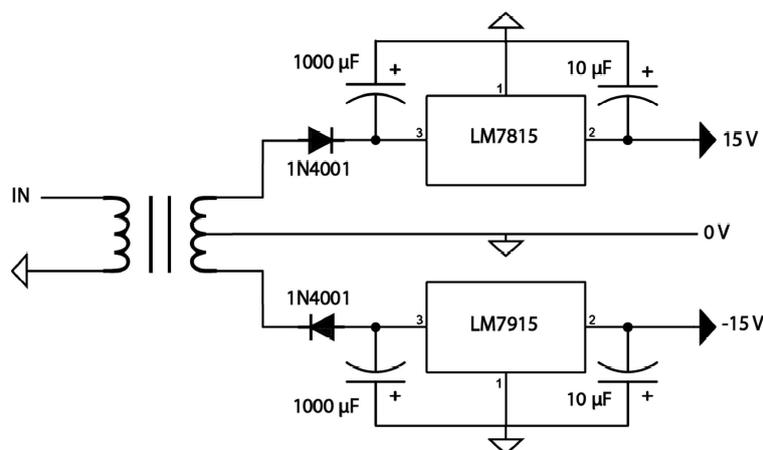


Figura 3.1.5.1: Diagrama da fonte de alimentação simétrica de $15\ \text{V}$ utilizada como circuito de alimentação para o amplificador

Para a realização do projeto de todos os circuitos, foram utilizados os softwares de EDA Sprint Layout e KiCAD, e como software de simulação o LTSpice. Todos os circuitos foram confeccionados no laboratório de eletrônica do Departamento de Física da UFPE, sob auxílio do técnico Daniel de Albuquerque Melo.

3.2 Preparação do arranjo MOKE

Para a preparação do arranjo experimental, foram necessários os seguintes componentes:

- Laser de He/Ne
- Bancada óptica
- Polarizador
- Modulador Fotoelástico
- Eletroímã
- Filme fino do composto IrMn/Py
- Analisador
- Detector
- Gaussímetro

Todos os componentes foram fornecidos pelo Grupo de Magnetismo e Materiais Magnéticos para serem utilizados no laboratório BLS do Prof. Sergio Rezende. Dentre os arranjos experimentais possíveis mostrados na Figura 3.2.1, o arranjo escolhido para implementação foi o longitudinal.

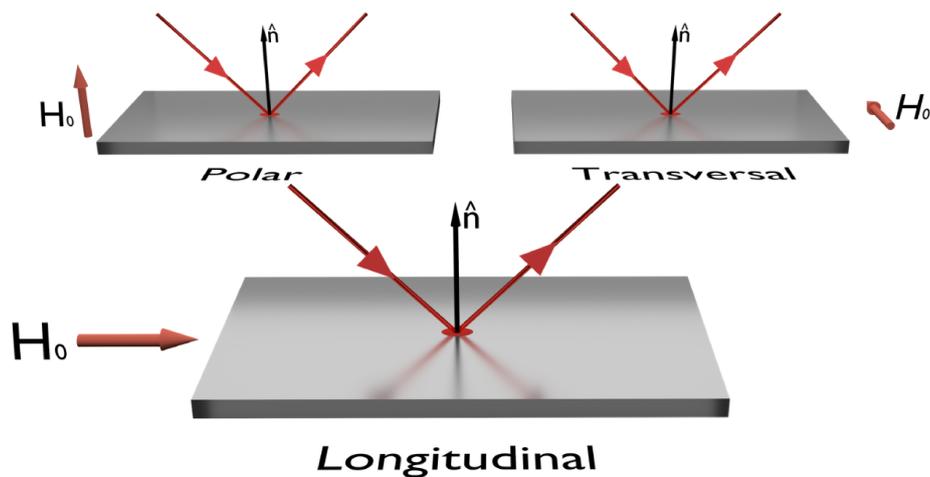


Figura 3.2.1: Possíveis arranjos experimentais do MOKE

Dessa forma, o arranjo final foi construído baseado na Figura 3.2.2 para posterior implementação no laboratório.

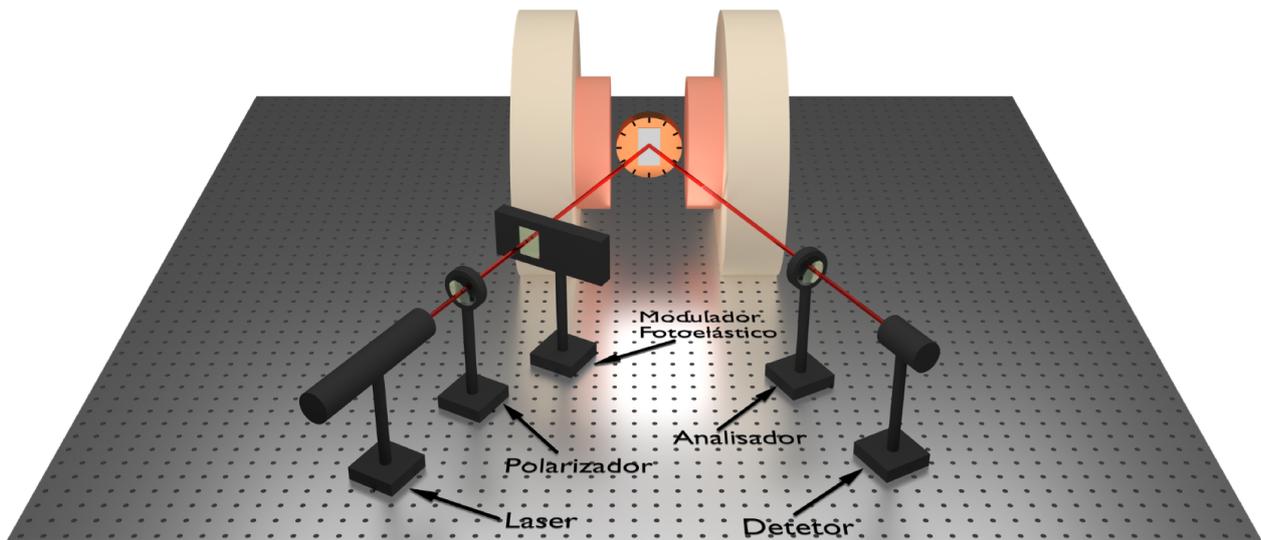


Figura 3.2.2: Arranjo experimental do MOKE longitudinal

O laser é incidido primeiramente num polarizador, onde é filtrado componentes de polarização que serviriam como ruídos para a análise do resultado. Uma vez polarizado, esse feixe luminoso passa por um modulador fotoelástico, essa etapa é relevante pois o modulador fotoelástico funciona como um transdutor fotoelétrico, e portanto o sinal de referência é definido nessa etapa, com a excitação do modulador fotoelástico provocada pelo laser de He/Ne. Posteriormente, o laser é incidido na amostra de IrMn/Py confeccionada com o uso de um sputtering, é importante observar pela Figura 3.2.2 que o eletroímã é posicionado de modo que o vetor de magnetização da amostra configure o arranjo longitudinal da Figura 3.2.1. Após a incidência na amostra, o feixe refletido passa por um analisador, em que é possível observar a mudança na polarização do feixe, e por um detector, que funciona como o sinal de entrada para o Lock-in. Paralelamente, um gaussímetro foi utilizado para medir o campo magnético incidido na amostra a cada intervalo de medição. O alinhamento óptico é garantido com segurança pela bancada óptica, uma vez que cada componente é parafusado na mesma.

Os instrumentos de medição utilizados no laboratório são mostrados na Figura 3.2.3.

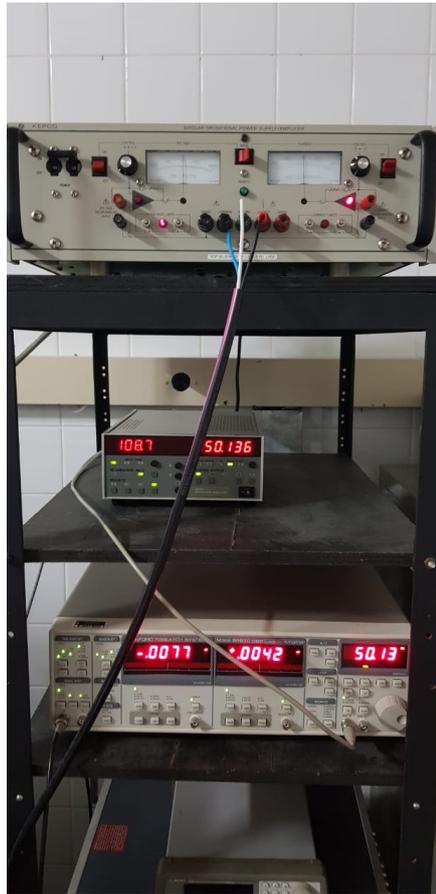


Figura 3.2.3: Instrumentos de medição para o arranjo MOKE, respectivamente fonte de corrente para o eletroímã, fonte do modulador fotoelástico e Lock-in.

O sistema montado visa a determinação da característica de magnetização da amostra analisada, uma análise qualitativa importante no estudo das propriedades da composição e que podem ser observadas a partir da curva de histerese do material, construindo o gráfico da razão da intensidade da magnetização no material pela sua intensidade de magnetização de saturação, em relação ao campo magnético incidido no mesmo. Devido à interação intrínseca entre as camadas de domínios magnéticos de direções opostas, se ocorre o surgimento de um campo de *exchange bias*, caracterizado por um deslocamento horizontal do gráfico. Exemplos de curva de histerese para materiais antiferromagnéticos e não-antiferromagnéticos são mostrados na Figura 3.2.4.

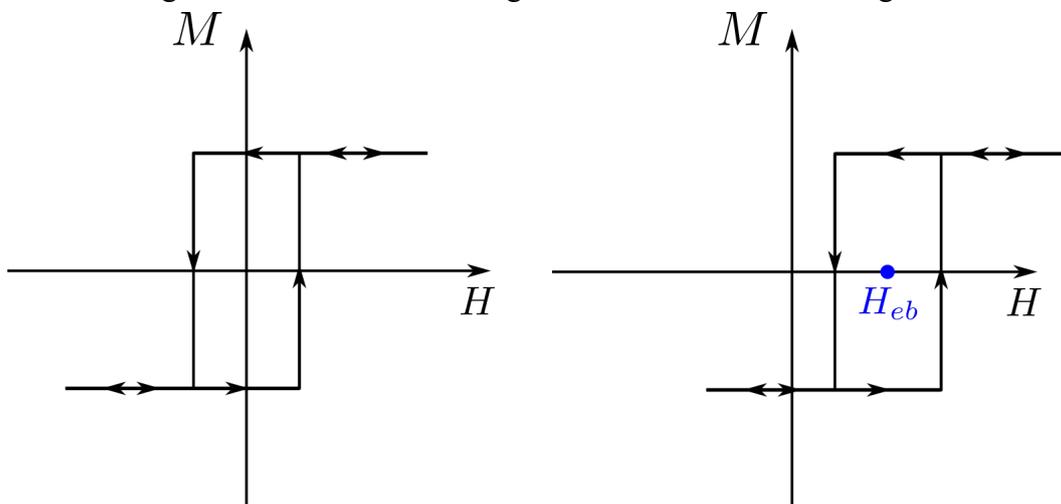


Figura 3.2.4: Curvas de histerese de campo magnético para materiais a) não-antiferromagnéticos b) antiferromagnéticos

4. Resultados e Discussão

Os resultados do trabalho se dividem na confecção do dispositivo Lock-in e das medidas experimentais do arranjo MOKE no laboratório.

4.1 Confeção do Dispositivo Lock-in

São apresentados os resultados da confecção do dispositivo Lock-in seguindo a ordem apresentada na Figura 3.1.1

4.1.1 Pré-amplificador Diferencial

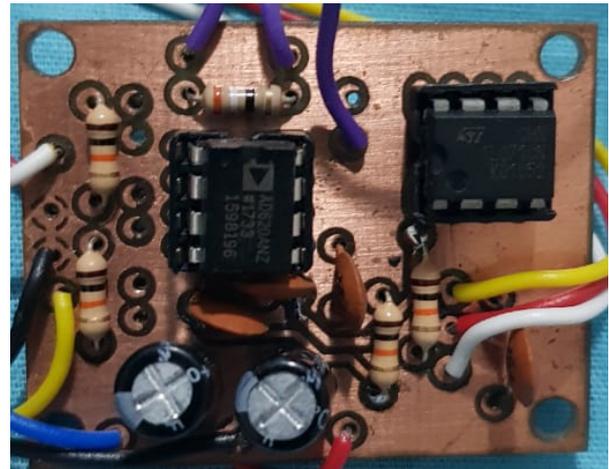
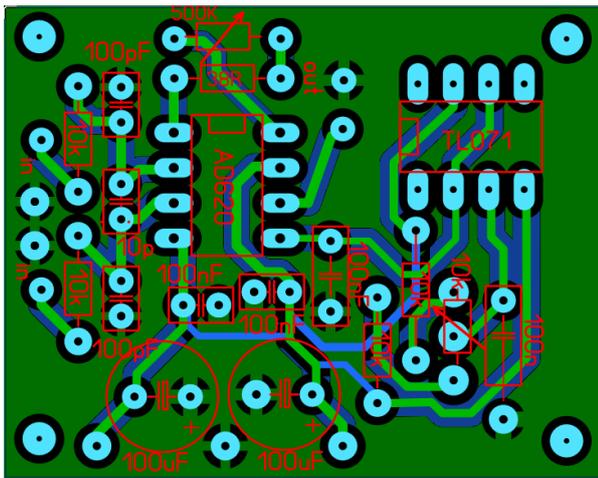


Figura 4.1.1.1: Respectivamente desenho do circuito de pré-amplificador diferencial no Sprint Layout e placa de circuito montada

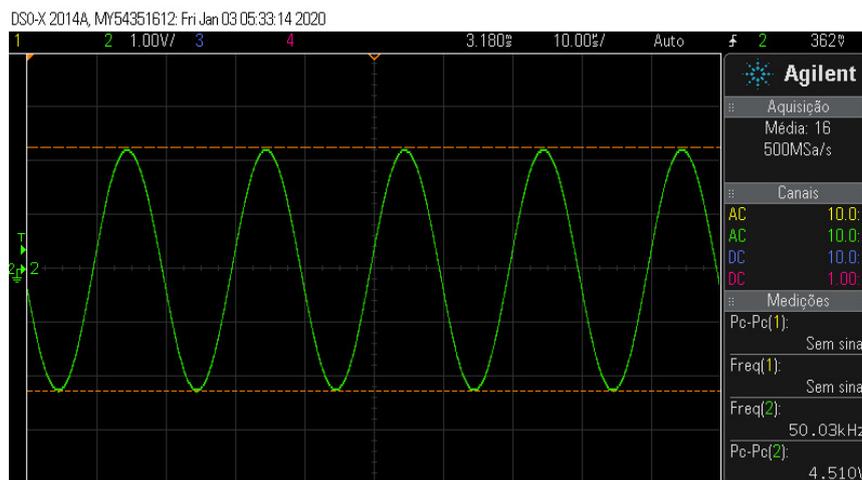


Figura 4.1.1.2: Resultado de amplificação de um sinal de 25 mV a uma frequência de 50 kHz pelo circuito de pré-amplificador diferencial

Pela Figura 4.1.1.2 é possível observar que o circuito de pré-amplificador atinge, sem corte ou saturação, um ganho de pelo menos 180 vezes.

4.1.2 Deslocador de Fase

Pelas Figuras 4.1.2.2, 4.1.2.3 e 4.1.2.4, é possível observar que o circuito deslocador de fase atinge seu objetivo de deslocar a fase de um sinal em relação a outro a uma frequência de 50 kHz sem perdas no sinal.

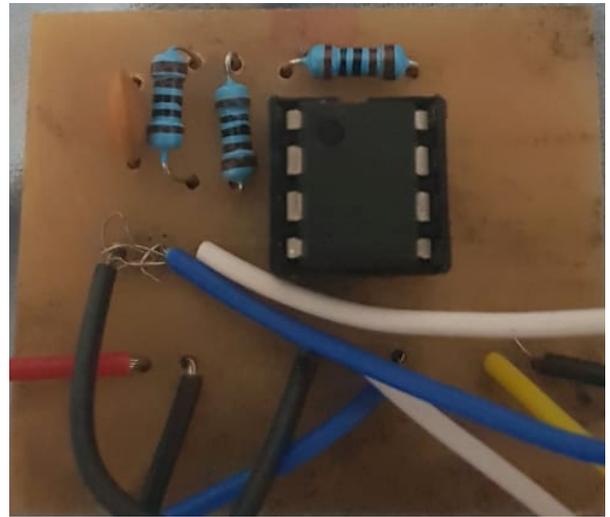
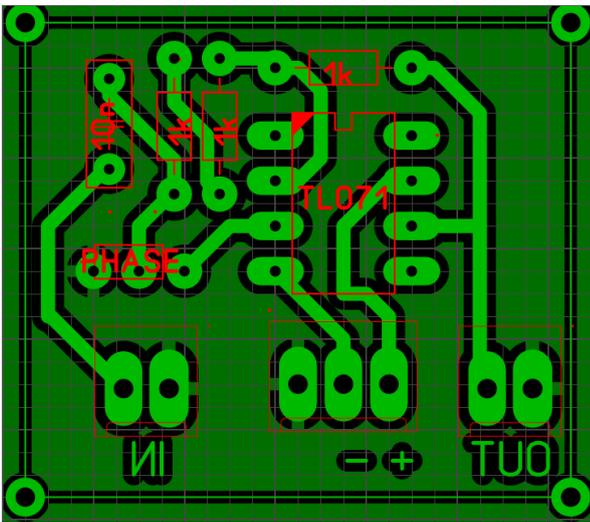


Figura 4.1.2.1: Respectivamente desenho do circuito de deslocador de fase no Sprint Layout e placa de circuito montada

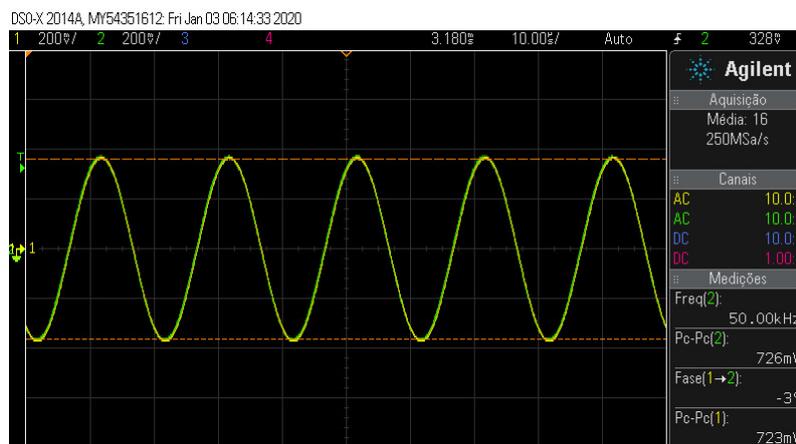


Figura 4.1.2.2: Dois sinais na frequência de 50 kHz a uma defasagem de 0°

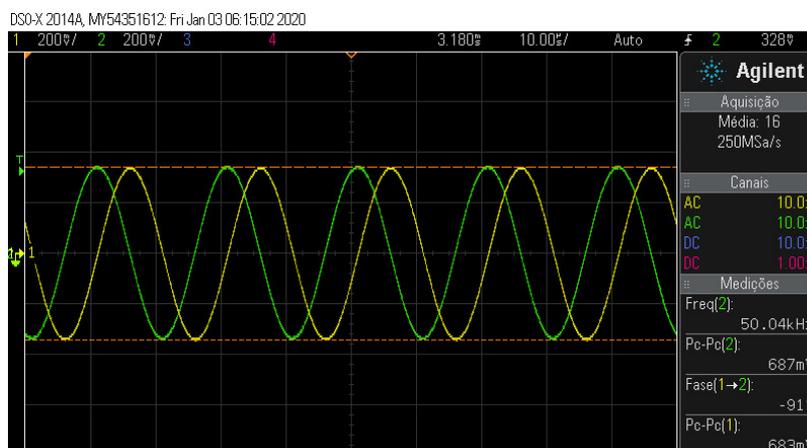


Figura 4.1.2.3: Dois sinais na frequência de 50 kHz a uma defasagem de 90°

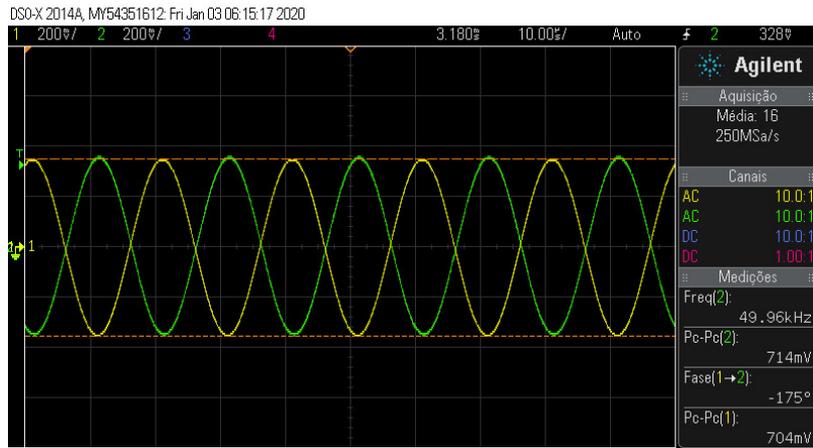


Figura 4.1.2.4: Dois sinais na frequência de 50 kHz a uma defasagem de 180°

4.1.3 Multiplicador

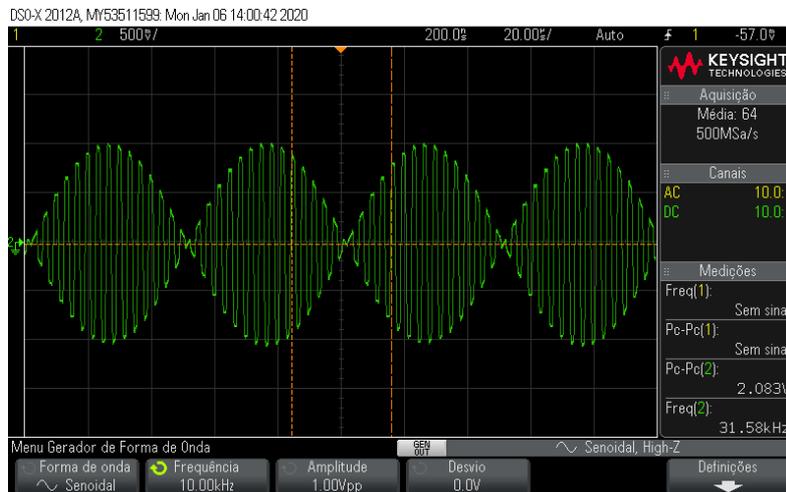
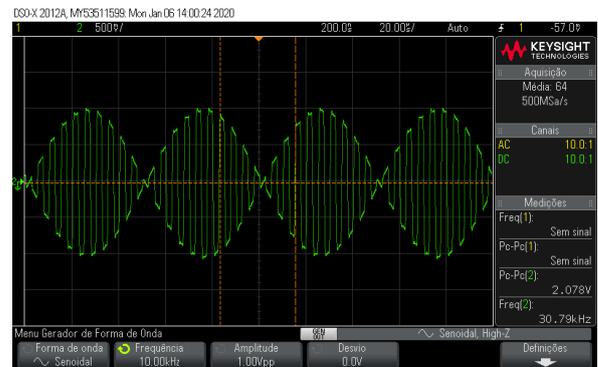
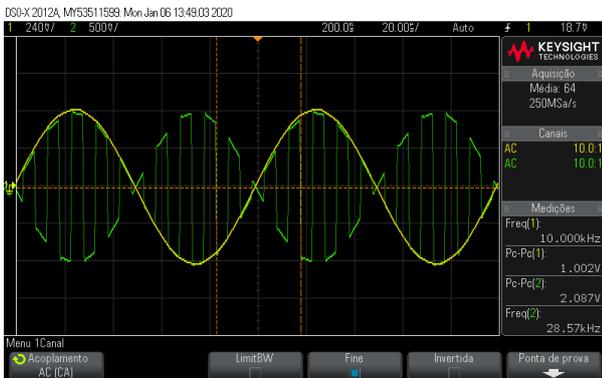


Figura 4.1.3.1: Resultado da modulação feita pelo circuito elaborado para um sinal digital

Através dos resultados mostrados na Figura 4.1.3.1, é possível observar a robustez do circuito de modulação confeccionado, observando sua resposta para um sinal digital que assume valores periódicos +Vcc e -Vcc.

4.1.4 Circuito final do Lock-in

Por conta da simplicidade do filtro final com amplificação, foi decidido implementar o circuito final diretamente, que compõe todos módulos unidos em uma só placa, mostrado na Figura 4.1.4.1 e Figura 4.1.4.2.

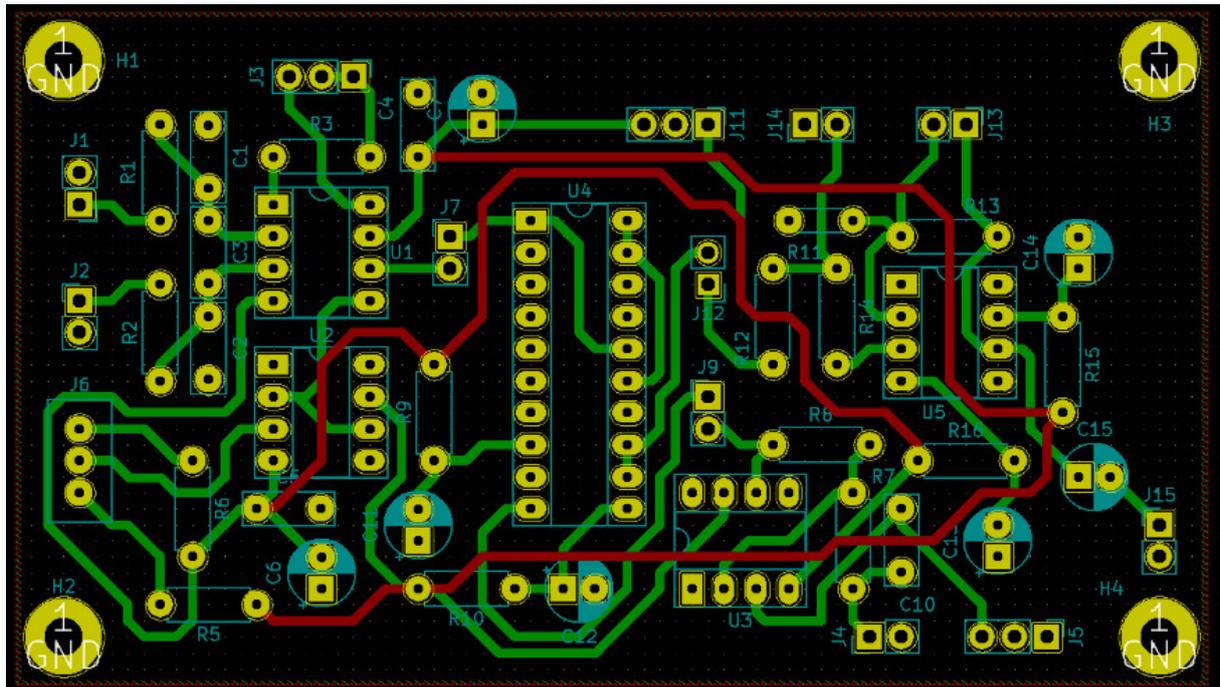


Figura 4.1.4.1: Diagrama do circuito final do Lock-in

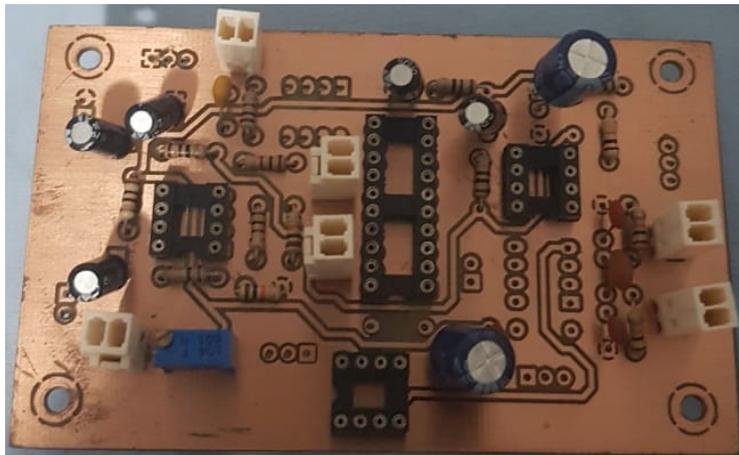


Figura 4.1.4.2: Circuito final Lock-in

4.2 Medições no MOKE

O arranjo do MOKE na configuração longitudinal foi montado no laboratório seguindo a Figura 3.2.2, mostrado na Figura 4.2.1.

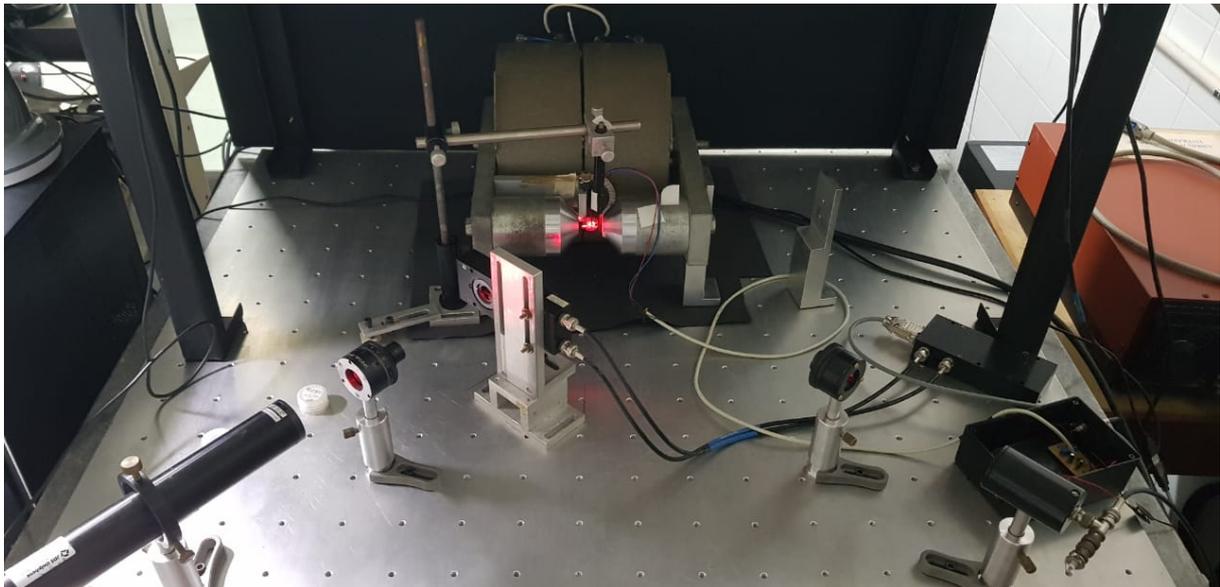


Figura 4.2.1: Configuração experimental de arranjo longitudinal do MOKE

Como não foi possível dar continuidade ao trabalho devido à pandemia do coronavírus, foi utilizado o Lock-in do laboratório para realizar as medições experimentais.

Sendo assim, foram obtidos gráficos da curva de histerese para o filme fino confeccionado de IrMn/Py, pelo comportamento da curva, é possível confirmar que o filme é composto por um material antiferromagnético, devido ao deslocamento do centro de sua curva de histerese em relação ao eixo horizontal do gráfico de um valor de aproximadamente 150 Oe (campo de *exchange bias*), e simétrico ao rotacionar 180°, resultado esperado de acordo com sua confecção no sputtering.

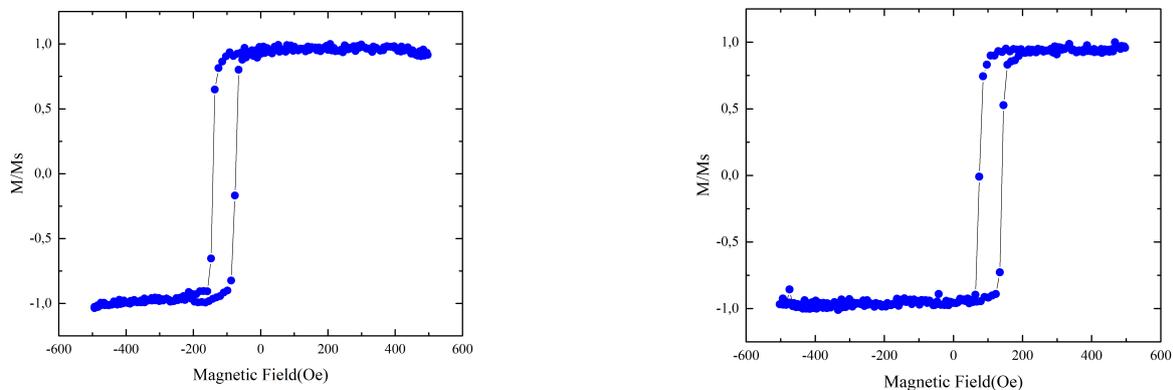


Figura 4.2.2: Medição da curva de histerese de um filme fino de IrMn/Py através do arranjo MOKE
a) Em 0°, b) Em 180° em relação à medida anterior

5. Conclusões

Através deste trabalho de iniciação científica, foi possível aprender conceitos importantes de magnetismo e visualizá-los na prática, como a interação entre os domínios magnéticos de um material e sua curva de histerese. A experiência em desenvolver um procedimento experimental, desde seu projeto até a elaboração é parte fundamental da física, que tem por sua natureza o método científico. No presente trabalho, foi estudado o arranjo experimental do MOKE, onde foi possível aprender com profundidade cada etapa e sua relevância, de forma a dominar a técnica.

Também foi possível desenvolver um projeto de instrumentação eletrônica desde sua concepção, com a confecção de um circuito eletrônico de amplificador sensível a fase Lock-in, equipamento indispensável em laboratórios de física da matéria condensada. Neste projeto do amplificador, foi importante entender cada etapa do seu funcionamento e também todo o processo de elaboração de um projeto robusto de eletrônica, adquirindo bastante aprendizado prático no laboratório de eletrônica do Departamento de Física da UFPE.

Por fim, foi possível observar resultados práticos previamente discutidos teoricamente com o orientador, como por exemplo a presença de campo de *exchange bias* e a natureza do seu surgimento, através das medições feitas em laboratório.

Referências Bibliográficas

[1] Liu, P., Yao, Z., Zhou, J., Yang, Z., and Kong, L. 2016. Small magnetic Co-doped NiZn ferrite/graphene nanocomposites and their dual-region microwave absorption performance. *J. Mater. Chem. C*, 4, p.9738-9749.

[2] Chen, Z., Wang, Z., Li, X., Lin, Y., Luo, N., Long, M., Zhao, N., and Xu, J.B. 2017. Flexible Piezoelectric-Induced Pressure Sensors for Static Measurements Based on Nanowires/Graphene Heterostructures. *ACS Nano*, 11(5), p.4507-4513.

[3] Ding, S., Yi, J., Li, J. et al. Nanostructure-based plasmon-enhanced Raman spectroscopy for surface analysis of materials. *Nat Rev Mater* 1, 16021 (2016). <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.21>

[4] Higo, T., Man, H., Gopman, D.B. et al. Large magneto-optical Kerr effect and imaging of magnetic octupole domains in an antiferromagnetic metal. *Nature Photon* 12, 73–78 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41566-017-0086-z>

[5] Balk, A., Sung, N., Thomas, S., Rosa, P., McDonald, R., Thompson, J., Bauer, E., Ronning, F., and Crooker, S. 2019. Comparing the anomalous Hall effect and the magneto-optical Kerr effect through antiferromagnetic phase transitions in Mn₃Sn. *Applied Physics Letters*, 114(3), p.032401.

[6] Avazpour, L., Toroghinejad, M., and Shokrollahi, H. 2016. Enhanced magneto-optical Kerr effect in rare earth substituted nanostructured cobalt ferrite thin film prepared by sol-gel method, *Applied Surface Science*, 387.

[7] Hayek JN, Herreño-Fierro CA, Patiño EJ. Enhancement of the transversal magnetic optic Kerr effect: Lock-in vs. hysteresis method. *Rev Sci Instrum.* 2016 Oct;87(10):103113. doi: 10.1063/1.4966250. PMID: 27802732.

[8] Arregi, J., Riego, P., and Berger, A. 2017. What is the longitudinal magneto-optical Kerr effect?. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50, p.03LT01.

[9] De Marcellis, A., Ferri, G., and D'Amico, A. 2016. One-Decade Frequency Range, In-Phase Auto-Aligned 1.8 v 2 mW Fully Analog CMOS Integrated Lock-In Amplifier for Small/Noisy Signal Detection. *IEEE Sensors Journal*, 16, p.5690-5701.

Dificuldades Encontradas

Devido à pandemia do COVID, não foi possível concluir o dispositivo final Lock-in, bem como fazer medidas experimentais com o mesmo. As medidas obtidas foram realizadas com um Lock-in comercial, a caráter preliminar, a fim de testar o alinhamento do equipamento e a qualidade da amostra antes de março de 2019, essas medidas seriam usadas como referência para a comparação com o Lock-in proposto (seriam feitas muito mais medidas).

Desde lá, a universidade e em particular os laboratórios do Departamento de Física estão com restrição de acesso, e por segurança, evitou-se a ida para lojas de componentes eletrônicos e outros laboratórios possíveis, respeitando as medidas de saúde protocoladas pelo Ministério da Saúde do Brasil.

Atividades Paralelas Desenvolvidas pelo Aluno

Ao longo do semestre 2018.2 o aluno cursou o oitavo período do curso de Engenharia Eletrônica da UFPE, tendo cursado cinco disciplinas obrigatórias, que são Eletrônica 3, Microcomputadores, Processamento Digital de Sinais, Sistemas Probabilísticos 1 e Tecnologia dos Materiais, bem como uma disciplina eletiva ofertada pelo Departamento de Eletrônica e Sistemas, a disciplina Filtragem Adaptativa.

Além das disciplinas desse semestre, o aluno realizou um trabalho em conjunto com o Departamento de Eletrônica e Sistemas e o Centro de Informática da UFPE, confeccionando um projeto de sistema de geolocalização por som chamado iOwIT: Sound Geolocalization System, projeto esse que foi submetido para a competição InnovateFPGA 2019 de desenvolvimento de FPGA com inteligência artificial. O aluno obteve as premiações de Community Award (projeto mais votado como melhor dentre as Américas, entre 40 equipes), Silver Award na final regional entre as Américas (segundo lugar entre 40 equipes) e Silver Award na grande final que ocorreu em Tianjin, na China (segundo lugar entre 270 equipes) durante a IEEE 2019 International Conference on Field-Programmable Technology.

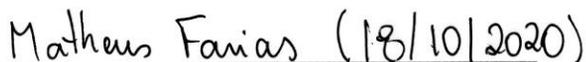
Ao longo do semestre 2019.1 o aluno cursou o início do nono período do curso de Engenharia Eletrônica na UFPE, tendo cursado três disciplinas obrigatórias, que são Segurança no Trabalho, Engenharia Econômica e Conversão de Energia, até que a pandemia começou.

Durante o período de pandemia, o aluno trabalhou no desenvolvimento do artigo Optimization of Hardware Parameters on a Real-Time Sound Localization System, relacionado ao projeto iOwIT: Sound Geolocalization System, que vinha trabalhando no semestre 2018.2.



(19/10/2020)

Data e assinatura do orientador



Data e assinatura do aluno