



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BERNARDO CAIO NUNES DE OLIVEIRA LIMA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL PARA
APLICAÇÕES EM DETECÇÃO HARMÔNICA DE LINHAS ESPECTRAIS**

Recife
2021

BERNARDO CAIO NUNES DE OLIVEIRA LIMA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL PARA
APLICAÇÕES EM DETECÇÃO HARMÔNICA DE LINHAS ESPECTRAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fontana.

Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Ataíde de Lima.

Recife

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB4-2222

- L732i Lima, Bernardo Caio Nunes de Oliveira.
Implementação de um amplificador lock-in digital para aplicações em
detecção harmônica de linhas espectrais / Bernardo Caio Nunes de
Oliveira Lima. 2021.
73 f., figs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Eduardo Fortana.
Coorientador: Prof. Dr. Ricardo Ataíde de Lima.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Recife, 2021.
Inclui referências.
1. Energia elétrica. 2. Amplificador lock-in. 3. Espectroscopia de
modulação de comprimento de onda. 4. Microcontrolador. I. Fontana,
Eduardo (Orientador). II. Lima, Ricardo Ataíde de (Coorientador). III.
Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022-207

BERNARDO CAIO NUNES DE OLIVEIRA LIMA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL PARA
APLICAÇÕES EM DETECÇÃO HARMÔNICA DE LINHAS ESPECTRAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco
como requisito parcial para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 17/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Fontana (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ricardo Ataíde de Lima (Coorientador)
Universidade de Pernambuco

Prof. Dr. Marco Aurélio Benedetti Rodrigues (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Oliveira Cavalcanti (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

*Dedico esse trabalho aos meus pais, José Aloísio Nunes de Lima e Margarete
Gomes de O. Nunes*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho jamais teria sido realizado se não houvesse ao meu redor uma base extremamente sólida de pessoas pacientes, dedicadas e que amam o que fazem. Agradeço ao meu Orientador, Prof. Dr. Eduardo Fontana, ao meu Coorientador Prof. Dr. Ricardo Ataíde de Lima pelo incondicional apoio durante a pesquisa. Agradeço também ao Prof. José Otávio por toda cooperação e experiência compartilhada.

Agradeço à minha esposa Agda, pelo apoio durante todo o desenvolvimento da pesquisa, e à minha filha Mariana, que chegou nesse período para abrilhantar nossas vidas e me motivou a seguir em frente. Agradeço à minha mãe e aos meus irmãos Felipe Caio e Anastássia. E agradeço especialmente ao meu pai, José Aloísio, que nos deixou no meio dessa caminhada e agora encontra-se próximo de Deus. Foi ele quem sempre me motivou a ser pesquisador.

RESUMO

Pesquisadores do Laboratório de Sensores e Instrumentação da UFPE (LSI-UFPE) e do Laboratório de Optoeletrônica da UPE (LOPEL-UPE) vêm desenvolvendo um módulo eletro-óptico que é parte de um sistema sensor capaz de detectar a presença de cinco diferentes tipos de moléculas dissolvidas em óleo de transformador. A presença dessas moléculas é relacionada com a existência de potenciais falhas. Normas internacionais estipulam as concentrações aceitáveis para indicar uma operação normal do transformador. Para a detecção das moléculas o sistema sensor em desenvolvimento no LSI usa uma técnica conhecida como WMS – Espectroscopia de Modulação de Comprimento de Onda. Ela é necessária devido às concentrações diminutas das moléculas que devem ser detectadas. Um dispositivo fundamental para a aplicação desta técnica é o Amplificador lock-in. Os amplificadores lock-in comerciais apresentam um custo elevado e geralmente possuem muito mais funcionalidades do que o necessário para o sistema sensor. Sendo assim, esse trabalho teve como foco o desenvolvimento de um amplificador lock-in digital dedicado utilizando microcontroladores comerciais de baixo custo, e que é capaz de ser facilmente integrado ao sistema sensor em desenvolvimento. Experimentos realizados mostraram que o lock-in desenvolvido foi capaz de detectar concentrações aproximadas de 1% (11000 ppm) de Monóxido de Carbono. Apesar do correto funcionamento a sensibilidade de detecção ainda precisa ser melhorada para aplicações que requerem um grau de sensibilidade mais alto, conforme exigido para a detecção de concentrações de gás ultrabaixas.

Palavras-chave: amplificador lock-in; espectroscopia de modulação de comprimento de onda; microcontrolador.

ABSTRACT

Researchers from LSI-UFPE and LOPEL -UPE are developing an electro-optic module that is part of a sensor system that is able to detect the presence of 5 different molecules dissolved in the transformer oil. The presence of those molecules is related with probable problems in the transformer oil. International norms determine the acceptable concentration of these molecules under normal operation of the transformer. The sensor system uses a technique called WMS — *wavelength modulation spectroscopy* — to detect the presence of a given molecule. It is necessary to use this approach due to the small concentration of the species to be detected. An essential dispositive to apply this technique is the lock-in amplifier. Commercial lock-in amplifiers are expensive, and, in general, they have much more capacity than needed for system. Therefore, this work focused on the development of a dedicated digital lock-in amplifier using low-cost commercial microcontrollers, which is capable of being easily integrated into the sensor system under development. Experiments performed showed that the lock-in developed was able to detect concentrations of approximately 1% (11,000 ppm) of Carbon Monoxide. Despite correct operation, detection sensitivity still needs to be improved for applications that require a higher degree of sensitivity, as required for detection of ultra-low gas concentrations.

Keywords: lock-in amplifier; wavelength modulation spectroscopy; microcontroller.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Função de distribuição para uma linha lorentziana.....	19
Figura 2 –	Configuração Básica de um sistema de Espectroscopia Direta.....	19
Figura 3 –	Configuração Básica de um sistema de detecção harmônica do espectro	22
Figura 4 –	Forma de onda esperada para o componente de 1° harmônico.....	23
Figura 5 –	Forma de onda esperada para o componente de 2° harmônico.....	23
Figura 6 –	a) Sistema experimental de espectroscopia. b) Incorporação do bloco detector síncrono.....	26
Figura 7 –	Bloco detector síncrono.....	27
Figura 8 –	Diagrama de blocos de um amplificador lock-in de duas fases.....	28
Figura 9 –	Experimento com função de transferência quadrática.....	30
Figura 10 –	Arquitetura de um Sistema DDS básico.....	32
Figura 11 –	Formato do sinal de 2KHz obtido com Osciloscópio.....	36
Figura 12 –	Formato do sinal de 2KHz obtido com Arduino.....	36
Figura 13 –	Setup experimental: equipamentos usados	37
Figura 14 –	Diagrama esquemático do laser DFB usado.....	38
Figura 15 –	Comprimento de onda x Corrente de injeção.....	39
Figura 16 –	Potência Luminosa x Corrente de injeção.....	39
Figura 17 –	Célula Espectrométrica usada nos Experimentos.....	40
Figura 18 –	Setup do Experimento de Absorção Direta.....	41
Figura 19 –	Algoritmo usado na leitura dos 30 pontos de corrente DC...	42
Figura 20 –	Resultado obtido no experimento de Absorção Direta.....	43
Figura 21 –	Configuração Experimental do Amplificador Lock-in com referência interna.....	45
Figura 22 –	Tabela para geração de sinal com a técnica DDS.....	46
Figura 23 –	Geração do Sinal Analógico Senoidal.....	47
Figura 24 –	Estrutura da Tabela que realiza o processamento lock-in...	51

Figura 25 –	Fluxograma do Experimento com Referência Interna.....	52
Figura 26 –	Setup do Experimento com Referência Externa.....	54
Figura 27 –	Obtenção do Sinal de Referência Externo.....	55
Figura 28 –	Sinal de Referência Obtido Externamente.....	56
Figura 29 –	Fluxograma do Experimento com Referência Externa.....	57
Figura 30 –	Simulação de experimento de WMS para concentrações de 700000, 350000 e 87500 ppm.....	59
Figura 31 –	Simulação de experimento de WMS para concentrações de 87500, 21000 e 11000 ppm.....	59
Figura 32 –	Simulação do Módulo do 2º Harmônico para uma concentração de 11.000ppm e ADC de 10 bits.....	60
Figura 33 –	Simulação do Módulo do 2º Harmônico para uma concentração de 11.000ppm e ADC de 16 bits.....	61
Figura 34 –	Simulação do 1º Harmônico para uma concentração de 11.000 ppm.....	61
Figura 35 –	Módulo do 2º Harmônico para vários valores de concentração.....	63
Figura 36 –	Intensidade do 1º Harmônico para vários valores de concentração.....	64
Figura 37 –	Módulo do 2º Harmônico para 700.00ppm de CO.....	64
Figura 38 –	Intensidade do 1º Harmônico para 700.00ppm de CO.....	65
Figura 39 –	Módulo do 2º Harmônico para 11.00ppm de CO.....	65
Figura 40 –	Intensidade do 1º Harmônico para 11.00ppm de CO.....	66
Figura 41 –	Valor de Pico 2º Harmônico x Concentração de Gás	67
Figura 42 –	Proposta para trabalhos futuros.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Concentração dos gases dissolvidos.....	17
Tabela 2 –	Configuração do Clock do ADC.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	15
2	DGA E WMS: ASPECTOS GERAIS.....	16
2.1	DGA – DISSOLVED GAS ANALYSIS.....	16
2.2	DETECÇÃO HARMÔNICA DO ESPECTRO.....	18
3	AMPLIFICADORES LOCK-IN.....	25
3.1	RECUPERAÇÃO E FILTRAGEM.....	25
3.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	27
3.3	AMPLIFICADOR LOCK-IN DE UMA E DE DUAS FASES.....	28
3.4	DETECÇÃO DE HARMÔNICAS.....	30
3.5	SINAL DE REFERÊNCIA.....	31
4	SETUP EXPERIMENTAL E REQUISITOS DO AMPLIFICADOR LOCK-IN.....	34
4.1	ARDUINO E LOCK-IN.....	34
4.1.1	Capacidade de ler Sinais Analógicos.....	34
4.1.2	Tensão de Referência do ADC.....	34
4.2	SETUP DO EXPERIMENTO: EQUIPAMENTOS USADOS.....	34
4.3	TESTE DO SISTEMA DE GÁS: ABSORÇÃO DIRETA.....	40
5	IMPLEMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL.....	44
5.1	IMPLEMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL COM REFERÊNCIA INTERNA.....	44
5.1.1	Geração do Sinal Senoidal.....	45
5.1.1.1	Frequência do Sinal Senoidal Gerado.....	47
5.1.2	Leitura do Sinal de Interesse.....	47
5.1.3	Transferência do Sinal para o PC.....	49
5.1.4	O experimento do Amplificador Lock-in com Referência Interna.....	50
5.2	AMPLIFICADOR LOCK-IN COM REFERÊNCIA EXTERNA.....	52
5.2.1	Leitura do Sinal de Interesse.....	53
5.2.2	Leitura do Sinal de Referência.....	53
5.2.3	Transferência para o PC.....	54

5.2.4	O experimento do amplificador lock-in de referência externa.....	54
6	RESULTADOS OBTIDOS.....	57
6.1	RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES EM SOFTWARE.....	57
6.2	RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS PRÁTICOS.....	60
6.3	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	65
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	68
	REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de alta tensão, em geral com potência maior que 20KVA, são construídos de tal forma que suas partes internas são submersas em um óleo mineral, cuja finalidade é fornecer refrigeração e isolamento (MILASCH, 1984), (COGO; OLIVEIRA; ABREU, 1984). A degradação e o envelhecimento do óleo mineral existente no transformador contribuem para a formação de algumas moléculas específicas. Essas moléculas, encontradas dissolvidas no óleo, estão relacionadas com possíveis problemas no equipamento (IEEE, 2019). A verificação programada e continuada do estado desse óleo mineral faz parte das medidas de manutenção preventiva adotadas por concessionárias de energia (SAHA, 2003).

A técnica denominada DGA – (*Dissolved Gas Analysis*), consiste na análise das moléculas dissolvidas no óleo do transformador. Ela é regida por uma norma internacional que especifica como cada procedimento deve ser realizado, desde a retirada de uma amostra do óleo até a análise (IEEE, 2019). A verificação do estado de degradação do óleo é feita por cromatografia gasosa, em laboratórios específicos, o que pode ser um inconveniente quando se trata de transformadores presentes em subestações localizadas em locais distantes. (LIMA, 2015).

Pesquisadores do Laboratório de Sensores e Instrumentação – LSI do Grupo de Fotônica – Dep. de Eletrônica e Sistemas – UFPE e do Laboratório de Optoeletrônica – LOPEL do Instituto de Inovação Tecnológica – IIT, vêm desenvolvendo um sistema sensor de monitoração óptica remota do estado operacional de transformadores de alta tensão. Ele tem como parte principal um Módulo de Controle e Aquisição (MCA) que é responsável por automatizar a operação do sistema. Fazem parte do MCA cinco (5) lasers do tipo DFB (*Distributed Feedback Laser*), fibras ópticas multimodo, acopladores ópticos, multiplexador óptico e fotodetector. O módulo em desenvolvimento será capaz de monitorar a presença de 5 moléculas diferentes de maneira contínua e transmitir esses dados via internet.

O funcionamento do sistema sensor é baseado na técnica chamada de detecção harmônica do espectro, ou espectroscopia de modulação do comprimento de onda (do inglês WMS). Essa técnica consiste em aplicar um sinal modulado a uma frequência f na entrada de um sistema experimental e observar o comportamento das componentes harmônicas na saída do sistema (REID; LABRIE, 1981) (KLUCZYNSKI et al., 2001) (SCHILF et al., 2003). Um dos equipamentos necessários à aplicação

dessa técnica é o amplificador lock-in, pois é ele o responsável por extrair as componentes harmônicas do sinal obtido na saída do sistema além de atenuar fortemente ruídos eletrônicos (LIMA et al., 2019).

No atual estado de desenvolvimento do MCA os experimentos têm sido feitos com um amplificador *lock-in* de bancada existente no LSI. Esse equipamento tem custo elevado, é robusto e apresenta uma enorme capacidade de processamento. Para aplicações em campo é necessário um amplificador lock-in compacto, de baixo custo e que seja capaz de se integrar facilmente ao MCA. Nas duas últimas décadas, em meio à onda da internet das coisas, uma ampla variedade de plataformas microcontroladas e microprocessadas, compactas e acessíveis, surgiram e viabilizaram a implementação de circuitos e aplicações eletrônicas que antes eram inviáveis de se desenvolver devido ao alto custo envolvido. Dessa maneira, o foco dessa dissertação é fazer uso dessas plataformas para implementar o protótipo inicial de um amplificador lock-in digital capaz de extrair o primeiro e o segundo harmônico de um sinal modulado, e que seja capaz de se integrar ao Módulo de Controle e Aquisição (MCA) que vem sendo desenvolvido pelos pesquisadores do LSI/LOPEL.

Trabalhos publicados na comunidade científica internacional relatam a implementação de amplificadores lock-in digitais para diversas aplicações usando as mais variadas plataformas de desenvolvimento, como por exemplo, FPGAs (ZHANG et al., 2020), (GERVASONI; CARMINATI; FERRARI, 2016) e placas DSPs (ZHANG et al., 2020). Placas desse tipo possuem maior capacidade de processamento e memória. A vantagem de se usar essas plataformas é que já possuem conjuntos de instruções específicas para operações com a Transformada Rápida de Fourier (FFT), convolução e filtragem digital, o que facilita o desenvolvimento de projetos que necessitem trabalhar com aquisição de sinais analógicos (VIEIRA, 2013). A desvantagem é que possuem um preço mais elevado em comparação aos microcontroladores mais simples disponíveis no mercado.

Há também na literatura trabalhos que usam microcontroladores com capacidade inferior se comparada às primeiras citadas, como descrito em (RAHMANNURI; RIVAI; SARDJONO, 2017), (IMMANUEL; BHASKAR; PARVATHI, 2013), (WENN, 2007), (SCHULTZ, 2016). O presente trabalho utiliza a ideia proposta por (SCHULTZ, 2016) no qual se usa um microcontrolador Atmega328P da ATMEL, presente na plataforma de desenvolvimento Arduino Uno, para realizar experimentos de detecção sensível à fase em circuitos com amplificadores operacionais. O mesmo

método usado por (SCHULTZ, 2016) foi adaptado e proposto nessa dissertação para aplicações de detecção harmônica do espectro.

Para esse tipo de aplicação, a plataforma usada para se implementar o amplificador lock-in deve possuir, no mínimo, a capacidade de ler sinais analógicos através de conversores analógico-digitais (ADC), de gerar sinais analógicos através de conversores digital-analógicos (DAC) ou de portas PWM e a de armazenar os dados referentes às leituras analógicas e ao processamento. Além disso, uma atenção especial deve ser dada ao número de bits do conversor ADC, ao tamanho da memória de armazenamento de dados e à frequência máxima de operação da plataforma. Esses itens podem limitar a capacidade de operação do amplificar lock-in.

Neste trabalho foi escolhido para o desenvolvimento do amplificador lock-in digital o microcontrolador ATmega2560 presente na plataforma Arduino Mega, pois além de ter um custo relativamente baixo, possui uma grande comunidade de usuários que compartilham projetos e experiências, o que torna mais fácil o desenvolvimento da pesquisa. Esse microcontrolador possui um núcleo de apenas 8 bits, um ADC de 10 bits, e 8 KB de memória RAM, além de portas gerais de entrada e saída digitais.

Com essas configurações foi possível operar o amplificador lock-in desenvolvido a uma frequência aproximada de 200Hz. O tempo médio estimado para uma varredura completa foi de 5 minutos. Frequências maiores, na faixa dos 20KHz, podem ser atingidas com modificações no algoritmo desenvolvido.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está organizada em 7 capítulos, incluindo a introdução. O Capítulo 2 descreve sobre o estado operacional de transformadores de potência relacionado com a presença de gases dissolvidos no óleo e também sobre a técnica de WMS. O Capítulo 3 descreve sobre a técnica lock-in. O Capítulo 4 relata sobre testes de desempenho para validar a técnica lock-in. O Capítulo 5 disserta sobre o desenvolvimento do amplificador lock-in utilizado neste trabalho. No Capítulo 6 tem-se os resultados obtidos em um experimento de detecção harmônica do espectro de Monóxido de Carbono. Por último, no Capítulo 7, tem-se a conclusão e a previsão de trabalhos futuros.

2 DGA E WMS: ASPECTOS GERAIS

A análise dos gases dissolvidos em óleo de transformador é uma das técnicas usadas na manutenção preventiva de transformadores presentes em subestações de energia ao redor do mundo. Os principais pontos desta técnica e sua relação com o sistema sensor em desenvolvimento no LSI/LOPEL são abordados nesse capítulo. Além disso, este capítulo também aborda os principais pontos da espectroscopia de modulação do comprimento de onda, que é a técnica usada especificamente pelo sistema sensor para detectar concentrações dos gases de interesse.

2.1 DGA – DISSOLVED GAS ANALYSIS

O sistema sensor em desenvolvimento por pesquisadores do LSI – UFPE e do LOPEL – IIT tem a finalidade de detectar moléculas de gases dissolvidos em óleo de transformador de alta tensão. Os transformadores são constituídos basicamente por um núcleo magnético e por enrolamentos primários e secundários. Quando se trata de transformadores de alta potência, em geral maior do que 20KVA, há também no dispositivo um óleo mineral cuja finalidade é refrigeração e isolamento entre as partes internas do equipamento. Para que o isolamento e a refrigeração sejam bem feitos é necessário que o óleo esteja em perfeitas condições, livre de umidade e contaminantes (MILASCH, 1984) (COGO; OLIVEIRA; ABREU, 1984).

A degradação e o envelhecimento do óleo existente no transformador resultam na produção de determinadas moléculas de gás. É possível relacionar a presença dessas moléculas com falhas na operação desses equipamentos, de forma que observar e quantificar a presença dessas moléculas é a primeira indicação de mau funcionamento (IEEE, 2019).

As principais moléculas geradas relacionadas com possíveis falhas nos transformadores de alta tensão são moléculas de Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Etano (C₂H₆), Etileno (C₂H₄), Acetileno (C₂H₂) e Hidrogênio (H₂) (GIORGIO, 2013). O Monóxido de Carbono, por exemplo, surge no óleo isolante como consequência de pequenas descargas elétricas no interior do transformador. O Acetileno surge de falhas relacionadas com a alta temperatura, próximo dos 1000°C, e com a possível existência de arcos elétricos internos (IEEE, 2019).

A detecção e análise contínua dessas moléculas dissolvidas no óleo isolante do transformador é uma das maneiras de se observar o estado de funcionamento do equipamento (SAHA, 2003). Concessionárias de energia adotam tais procedimentos como parte da manutenção preventiva. Essa técnica de analisar os gases dissolvidos recebe o nome de DGA (*Dissolved Gas Analysis*) e possui uma norma internacional que detalha os procedimentos que devem ser adotados desde o uso de equipamentos móveis e fixos para detecção ou coleta de uma amostra do óleo até a análise propriamente dita (IEEE, 2019).

Um dos requisitos mostrados na norma é a concentração mínima das moléculas dissolvidas no óleo isolante para que se possa dar um diagnóstico de problema no transformador. A Tabela 1 relaciona a concentração em partes por milhão (ppm) dos principais gases de interesse com as condições de operação do transformador.

Tabela 1 – Concentração em ppm dos gases dissolvidos

Status	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	CO
Condição 1	≤100	≤120	≤35	≤50	≤350
Condição 2	101-700	121-400	36-50	51-100	351-570
Condição 3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	571-1400
Condição 4	>1800	>1000	>80	>200	>1400

Fonte: Adaptada da Norma IEEE-C57

As Condições 1 a 4 indicam o nível de degradação do óleo e quais procedimentos tomar. A Condição 1 indica que o equipamento está operando em condições normais e nada mais urgente precisa ser feito, além de o equipamento ser acompanhado anualmente. As Condições 2 e 3 indicam que os níveis de gás já estão acima do normal e requerem um cuidado maior, com verificações mensais e semanais respectivamente. A Condição 4 significa que há um nível de degradação excessivo e, a depender do histórico do equipamento, a continuidade da operação do transformador pode danificá-lo permanentemente. Nesse nível indica-se verificação diária do equipamento (IEEE, 2019).

Com base na Tabela 1 é possível inferir que o sistema sensor deve ser capaz de detectar no mínimo 350 ppm de Monóxido de Carbono para que atenda ao requisito estabelecido pela norma.

O sistema sensor em desenvolvimento consiste de um módulo eletro-óptico capaz de detectar a presença de 5 gases diferentes: CO, CO₂, C₂H₄, CH₄, H₂O. O sistema, que é baseado no princípio da absorção óptica, usa lasers com comprimentos de onda específicos na região do infravermelho próximo. Nessa região do espectro há uma maior disponibilidade comercial de dispositivos ópticos, tais como detectores, fibras ópticas e lasers, o que torna o desenvolvimento do sensor mais barato. Por outro lado, essa é uma região onde a detecção dos gases é mais difícil devido à intensidade das linhas de absorção apresentada pelos gases na região, necessitando assim de técnicas de detecção mais sensíveis (LIMA et al., 2019), (LIMA; FONTANA, 2017).

Os experimentos realizados neste trabalho, cujo objetivo era implementar um amplificador lock-in baseado num microcontrolador Atmega2560, usaram o gás Monóxido de Carbono.

2.2 DETECÇÃO HARMÔNICA DO ESPECTRO – WMS

Quando um feixe de radiação se propaga através de um meio gasoso onde existam átomos ou moléculas livres, uma determinada quantidade dessa radiação é absorvida sempre que o comprimento de onda da radiação corresponder a uma linha de absorção do referido meio gasoso (FONTANA. E., 2018) (BASS. M.,1995). A intensidade da radiação transmitida, S , pode ser relacionada com a intensidade de radiação que incide no meio gasoso, S_0 , através de uma expressão matemática bastante conhecida na literatura:

$$S = S_0 \cdot e^{-\sigma L N}, \quad (1)$$

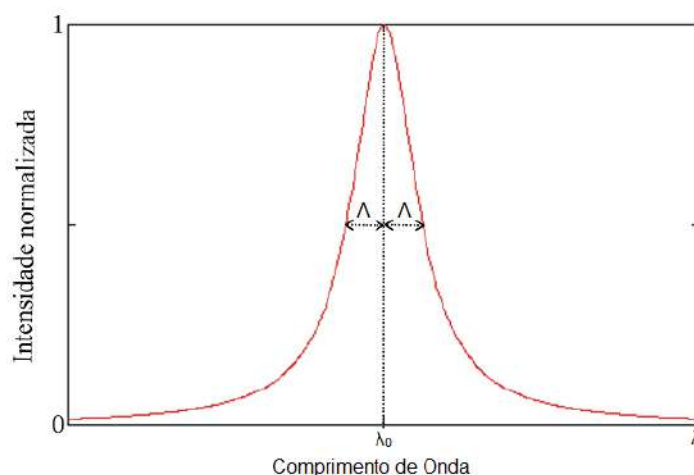
onde as variáveis σ , L e N representam a seção transversal de absorção, o comprimento do meio absorvedor e a densidade do gás respectivamente. Essa equação é referida na literatura como lei de Beer-Lambert (SALEH; TEICH, 1991), (KLUCZYNSKI et al., 2001), (BASS. M.,1995).

A seção transversal de uma dada linha isolada de absorção molecular apresenta dependência com o comprimento de onda e pode ser modelada por uma função de distribuição lorentziana (DEMTRODER, 2008)

$$\sigma(\lambda) = \frac{\sigma_0 \cdot \Lambda^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \Lambda^2}, \quad (2)$$

em que σ_0 , é a seção transversal de absorção no centro da linha, Λ é a meia largura de linha (HWHM — sigla inglesa para half-width-at-half-maximum) e λ_0 é o comprimento de onda no centro da linha. Como pode ser observado, por inspeção de (2.2), essa função atinge seu valor máximo para $\lambda = \lambda_0$ e seu valor diminui à metade para $\lambda = \lambda_0 \pm \Lambda$. A Figura 1 mostra uma função de distribuição para uma linha lorentziana e sua dependência do comprimento de onda.

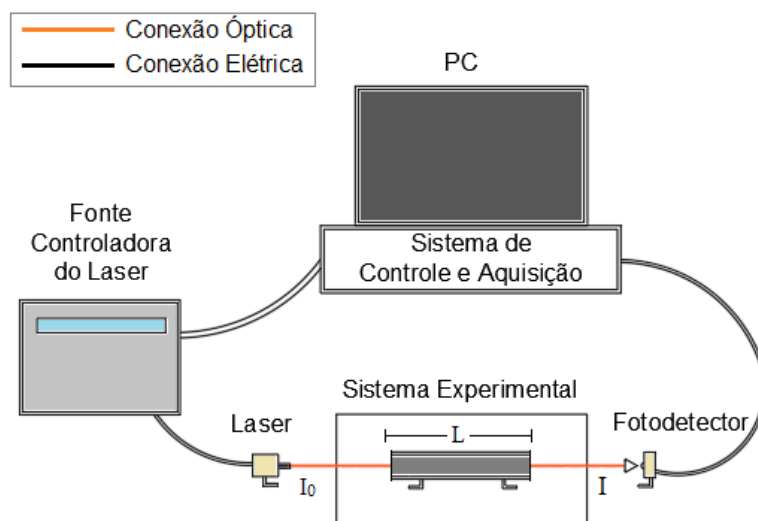
Figura 1 – Função de distribuição para uma linha lorentziana



Fonte: Adaptada de Ricardo Ataíde de Lima (LIMA, 2016)

A Figura 2 mostra uma configuração genérica para a aplicação da espectroscopia direta para detecção de gás em uma célula espectrométrica.

Figura 2 – Configuração Básica de um sistema de espectroscopia direta



Fonte: O autor, 2021.

Conforme ilustrado na Figura 2, os instrumentos e equipamentos necessários são um laser, a fonte controladora do laser, a célula contendo o gás a ser analisado, um fotodetector e um sistema de controle para comandar o laser e interpretar o sinal obtido no fotodetector.

Quando se trata de detectar concentrações diminutas de gases é necessário fazer uso de uma técnica de espectroscopia um pouco diferente da espectroscopia convencional. Essa técnica, chamada de espectroscopia de modulação do comprimento de onda, é usada no desenvolvimento do sistema sensor do LSI com a finalidade de se conseguir detectar as quantidades mínimas exigidas por DGA, e assim ser aplicável na prática (REID; LABRIE, 1981) (KLUCZYNSKI et al., 2001) (SCHILF et al., 2003). (LIMA et al., 2019), (LIMA; FONTANA, 2017). Outros nomes também são encontrados na literatura para descrever essa técnica: detecção harmônica do espectro e WMS – (*Wavelength Modulation Spectroscopy*).

O princípio de funcionamento da técnica WMS pode ser descrito em três pontos fundamentais (REID; LABRIE, 1981), (KLUCZYNSKI et al., 2001):

- O comprimento de onda da radiação é modulado a uma frequência f em torno de um comprimento de onda central com uma certa amplitude de modulação.
- A radiação se propaga através de um reservatório onde está presente o gás ou substância a ser detectada devido à absorção de uma fração da radiação.

- A radiação chega até um receptor/fotodetector que converte esse sinal óptico em elétrico e o entrega para o amplificador lock-in, que é responsável por extrair a n -ésima componente harmônica do sinal (nf).

Os lasers usados nesse tipo de técnica normalmente são do tipo DFB, pois esses dispositivos possuem uma largura espectral muito menor do que aquela da linha de absorção, emitem, em condições ideais, apenas um modo de cavidade, na faixa de operação tanto da temperatura e da corrente de injeção (FONTANA, 2007). Além disso, tais lasers podem ser chaveados a frequências da ordem de dezenas de GHz (OGITA, 1991). Esses lasers são controlados por uma corrente de injeção. Ao se alterar o valor da corrente de injeção, a potência e o comprimento de onda da radiação emitida também são alterados. Sendo assim, assume-se uma corrente de injeção dada por

$$I(t) = I_{dc} + I_{ac} \cos(2\pi ft), \quad (3)$$

com I_{dc} representando o valor médio da corrente injetada, I_{ac} a amplitude da corrente AC de modulação e f a frequência de modulação do sinal. Como consequência dessa corrente de injeção modulada, o comprimento de onda da radiação emitida pelo laser pode ser descrito por

$$\lambda(t) = \lambda_{dc} + \lambda_{ac} \cos(2\pi ft), \quad (4)$$

e a potência luminosa por

$$S(t) = S_{dc} + S_{ac} \cos(2\pi ft). \quad (5)$$

As equações (2.3), (2.4) e (2.5) mostram que se a corrente de injeção possui uma modulação senoidal, então o comprimento de onda e a potência da radiação emitida também possuem uma modulação senoidal.

A equação que modela a função de transferência do experimento é obtida a partir das equações (2.1) e (2.2) e é descrita por

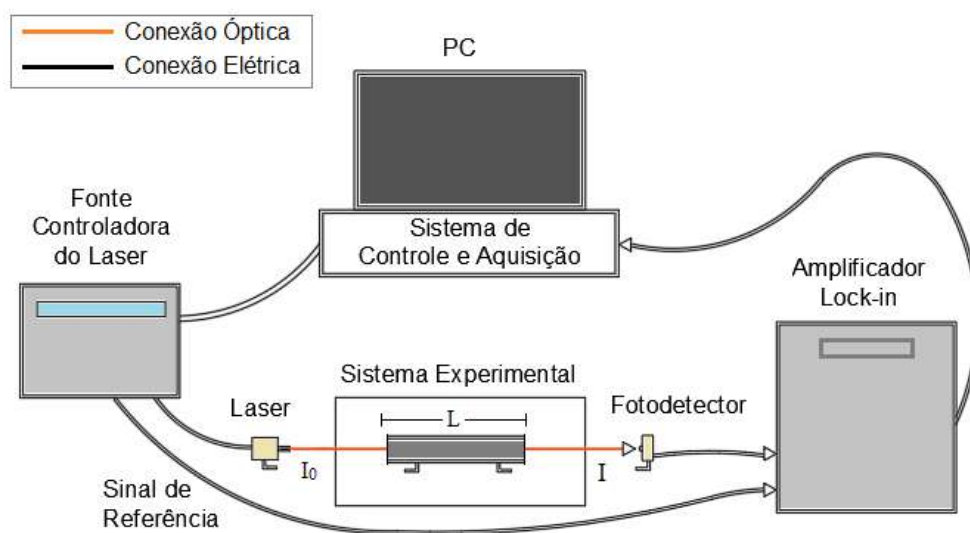
$$S_{out}(t) = S_{in} \exp \left[\frac{-N\sigma\gamma^2}{(\lambda - \lambda_0)^2 + \gamma^2} L \right], \quad (6)$$

em que o valor N representa densidade de moléculas no meio absorvedor, que é o valor que se deseja encontrar nos experimentos realizados neste trabalho.

No denominador da função exponencial há dependência quadrática do comprimento de onda. E como se sabe, o comprimento de onda é uma função modulada por uma senoide. Devido a esse fato o sinal $S_{out}(t)$ possui componentes de primeiro e de segundo harmônico. São essas componentes que servem como base para a validação do sistema sensor.

A Figura 3 mostra a configuração básica de um sistema de detecção harmônica do espectro usado na detecção de gases. Os instrumentos e equipamentos necessários são: um laser DFB, um controlador do laser, a célula espectrométrica onde está contido o gás em análise, um fotodetector, e um amplificador lock-in, além do sistema de controle e aquisição que está representado pelo PC. A principal diferença em relação aos experimentos de espectroscopia convencional é a incorporação do amplificador lock-in, que é necessária ao experimento, como parte essencial para a aplicação da técnica WMS.

Figura 3 – Configuração Básica de um sistema de detecção harmônica do espectro



Fonte: O Autor (2021).

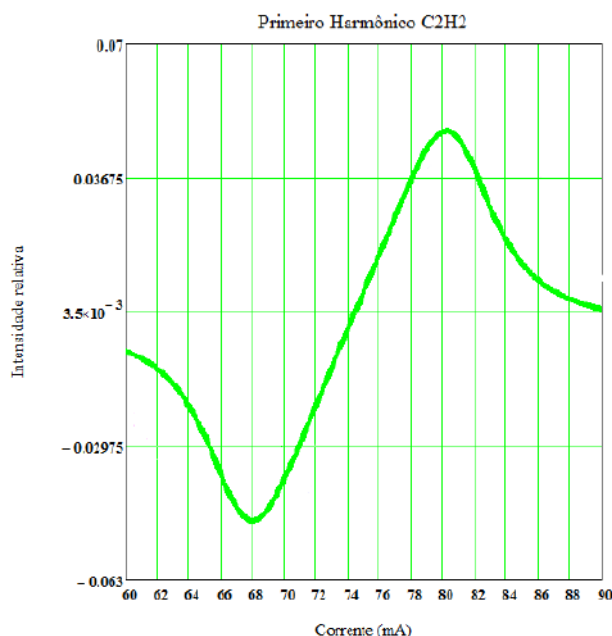
Um ponto importante a ser observado é que o amplificador lock-in recebe em seus terminais dois sinais. Um vem diretamente da fonte controladora e é chamado de sinal de referência e o outro é entregue pelo fotodetector e recebe o nome de sinal de interesse, conforme ilustrado na Figura 3.

O controlador do laser é responsável por controlar a corrente de injeção e a temperatura do laser, e assim determinar as características da radiação emitida. O controle da temperatura é fundamental quando se usa lasers DFB, pois alterações na temperatura causam forte influência no comprimento de onda emitido (NETO et al., 2020).

Os resultados esperados em um experimento de detecção harmônica modelado pela Equação (2.6) estão mostrados nas Figuras 4 e 5.

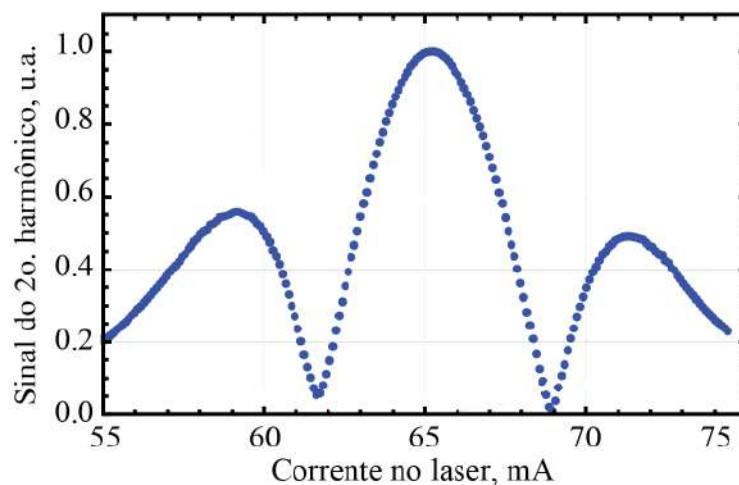
A Figura 4 ilustra o resultado de um experimento de WMS realizado por (SOARES, 2010) usando o gás Acetileno (C_2H_2). A magnitude do sinal do primeiro harmônico está representada no eixo vertical e a intensidade da corrente de injeção DC que alimenta o laser está representada no eixo horizontal. A Figura 5 mostra a forma esperada para o componente de 2º harmônico. Esse resultado foi obtido por (SOARES, 2020) em experimentos de detecção harmônica do espectro feitos em laboratório com Acetileno (C_2H_2) em uma célula com comprimento de interação de 25,4cm.

Figura 4 – Forma de onda esperada para o componente de 1º harmônico



Fonte: Adaptado de Vladimir Homobono Soares (SOARES, 2010)

Figura 5 – Forma de onda esperada para o componente de 2º harmônico



Fonte: Adaptado de Vladimir Homobono Soares (SOARES, 2020).

No gráfico do segundo harmônico o valor de pico a pico se relaciona com a concentração N do gás. Quanto maior a concentração do gás em análise, maior será o pico obtido nos gráficos. Há uma proporcionalidade entre essas grandezas. O desafio é detectar a menor concentração de gás possível.

Nos experimentos realizados neste trabalho um laser foi alimentado, inicialmente, com um valor de corrente DC de 60 mA, somado uma corrente de modulação senoidal (AC) de 5 mA. O valor DC foi variado em intervalos de 1 mA até chegar em 90 mA. Para cada valor de corrente DC era obtido a partir do amplificador lock-in o valor de primeiro e de segundo harmônico correspondente à corrente injetada. Ao final do processo o programa de automação e aquisição do experimento tinha 30 valores de módulo do segundo harmônico.

3 AMPLIFICADORES LOCK-IN

Amplificadores lock-in são instrumentos comumente empregados para medições de pequenos sinais. Sua variedade de aplicações em medições de grandezas físicas o torna um instrumento essencial no desenvolvimento de experimentos e pesquisas no campo da óptica. Alguns experimentos que usam o amplificador lock-in são a espectroscopia de absorção e de fluorescência, espectroscopia fotoacústica, interferometria, efeito magneto-óptico, radiometria fototérmica e magnetostricção (KLOOS, 2018).

O principal objetivo do amplificador lock-in é recuperar sinais que estão inseridos em ambientes de grandes quantidades de ruído. Com o uso deste tipo de amplificador é possível recuperar inclusive sinais nos quais o nível de ruído é superior ao nível do próprio sinal. O termo “recuperar” sugere que há um conhecimento prévio do sinal de interesse. Na técnica lock-in é preciso conhecer previamente a modulação aplicada à excitação do sinal de interesse para que seja possível sua recuperação. (MEADE, 2013).

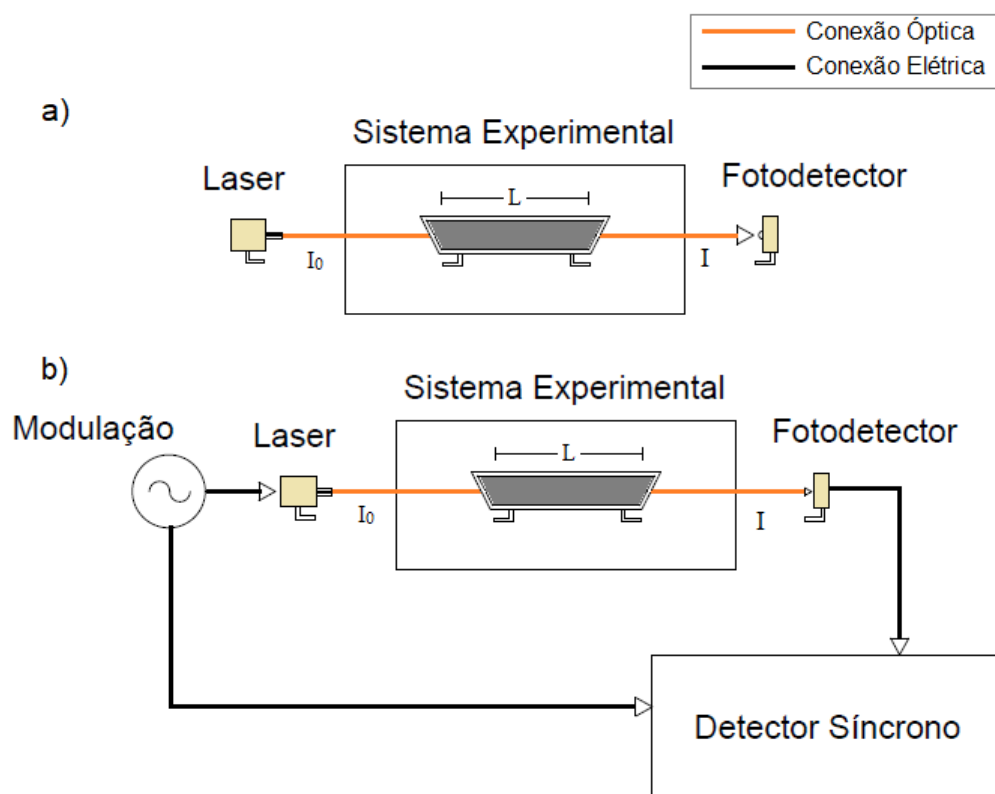
A Figura 6a ilustra a configuração básica de um sistema experimental de espectrometria de absorção. Nela há um laser, uma célula espectrométrica preenchida com determinada quantidade de um gás conhecido e um fotodetector. A Figura 6b mostra uma configuração similar. A diferença é que agora há uma modulação no sinal emitido pelo laser e houve a incorporação de um bloco chamado detector síncrono. O bloco detector síncrono recebe o sinal do fotodetector e uma derivação do sinal de modulação denominado de sinal de referência. Como as características do sinal de referência são previamente conhecidas, o bloco detector síncrono é capaz de recuperar o sinal de interesse comparando o sinal recebido do fotodetector com o sinal de referência.

O Amplificador lock-in é um instrumento que utiliza o detector síncrono. Ou seja, o bloco detector síncrono e o sinal de referência são a base de funcionamento do amplificador lock-in (KLOOS, 2018).

3.1 RECUPERAÇÃO E FILTRAGEM

Recuperar o sinal significa separá-lo do ruído existente. Uma maneira de se fazer isso é utilizando filtros, que podem ser analógicos ou digitais. Esses filtros podem

Figura 6 – a) Sistema experimental de espectroscopia. b) Incorporação do bloco detector síncrono



Fonte: O autor, 2021.

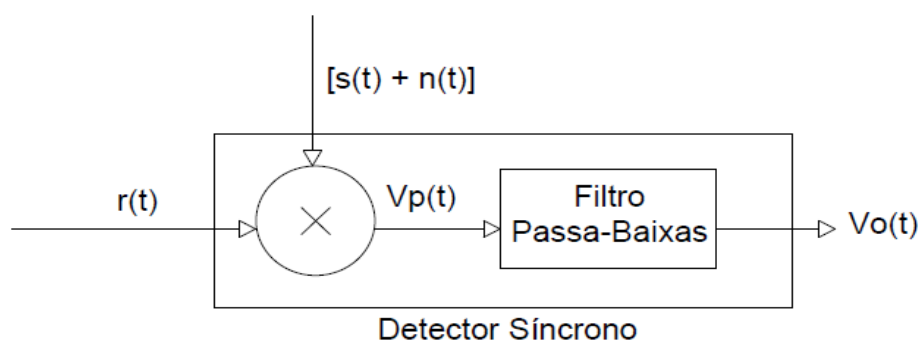
ser do tipo passa-baixas, passa-altas, passa-faixa e rejeita-faixa. Esses filtros geralmente são projetados de maneira a eliminar determinada parte do espectro de frequências do sinal onde está concentrado o ruído. Nesse caso é dito que houve uma redução de ruído através de uma redução de largura de banda do sinal em análise. Em muitas situações esse procedimento é suficiente. Porém, em outros casos, onde se deseja otimizar a questão sinal-ruído antes da demodulação, a redução da largura de banda pode não ser benéfica. O procedimento de filtragem nesses casos poderá exigir filtros cujas seletividades sejam cada vez maiores, o que torna dispendioso do ponto de vista de projeto (MEADE, 2013), (SANTOS, 2002).

Existem também os casos em que a frequência do ruído se assemelha à frequência do sinal de interesse. Aplicar uma filtragem nesse caso pode eliminar parte do sinal de interesse. Situações como essas exigem outras maneiras de tratamento do sinal de interesse.

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A técnica usada pelos amplificadores lock-in para a recuperação do sinal é chamada de detecção sensível à fase, detecção síncrona ou detecção coerente. Essa técnica consiste basicamente de um processo de multiplicação e filtragem. O nome da técnica indica que o processamento lock-in vai descartar qualquer sinal que não estiver sincronizado com o sinal de referência. Ou seja, sinais que não apresentem uma coerência com o sinal de referência são descartados. A Figura 7 ilustra os blocos funcionais da detecção síncrona.

Figura 7 – Bloco detector síncrono



Fonte: O autor, 2021.

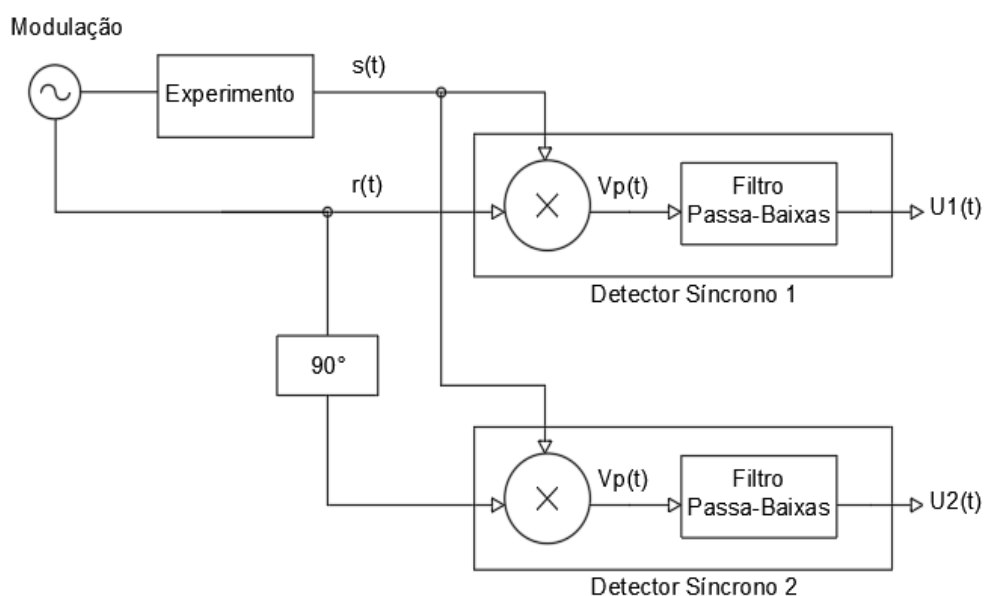
O bloco é composto por um multiplicador e por um filtro passa-baixas. O detector síncrono recebe em suas entradas os sinais $[s(t) + n(t)]$, que é o sinal de interesse contaminado com ruído, e o sinal de referência $r(t)$. É importante destacar que os sinais de interesse e de referência foram gerados pela mesma fonte e, consequentemente, possuem a mesma frequência. Além disso, o sinal de ruído $n(t)$ é considerado randômico e, portanto, não possui a mesma modulação dos sinais de interesse e de referência. (KLOOS, 2018).

Após a multiplicação dos sinais é obtido o sinal $V_p(t)$, que será processado em um filtro passa-baixas. Na saída do filtro há o sinal $V_o(t)$, que é relacionado com o sinal de interesse. Essas duas etapas são suficientes para eliminar as componentes indesejadas e realizar a recuperação do sinal (MEADE, 2013), (KLOOS, 2018).

3.3 AMPLIFICADOR LOCK-IN DE UMA E DE DUAS FASES

Os amplificadores lock-in podem ser de uma ou duas fases. É dito que o amplificador lock-in é de uma fase quando ele possui um único bloco “detector síncrono”. Nesse bloco ele recebe o sinal de referência e o sinal de interesse. Por outro lado, quando o amplificador lock-in possui dois blocos “detector síncrono” é dito que ele é de duas fases. No bloco “detector síncrono 1” ele recebe o sinal de interesse e o sinal de referência. Já no bloco “detector síncrono 2” ele recebe o sinal de interesse e o sinal de referência defasado em 90 graus. (KLOOS, 2018). A Figura 8 ilustra o diagrama de blocos de um amplificador lock-in de duas fases.

Figura 8 – Diagrama de blocos de um amplificador lock-in de duas fases



Fonte: O autor, 2021.

O amplificador lock-in de duas fases pode ser considerado a união de dois amplificadores de uma fase, onde o sinal de referência recebido por um está defasado 90 graus em relação ao sinal de referência recebido pelo outro.

Através do desenvolvimento das equações do amplificador lock-in é possível mostrar como as componentes indesejadas de sinal são descartadas e como o sinal de saída do bloco detector síncrono se relaciona com o sinal de interesse. No bloco “detector síncrono 1” o sinal de interesse $s(t)$ e o sinal de referência $r(t)$ são representados por:

$$s(t) = A \cos(\omega_s t + \theta) \quad (7)$$

e

$$r(t) = B \cos(\omega_r t + \varphi), \quad (8)$$

onde as variáveis ω_s e ω_r são as frequências angulares do sinal de interesse e do sinal de referência respectivamente e, θ e φ são as fases. Esses sinais são multiplicados entre si ao entrarem no bloco detector síncrono 1, resultando em

$$s(t)r(t) = AB \cos(\omega_s t + \theta) \cos(\omega_r t + \varphi). \quad (9)$$

Fazendo uso da seguinte identidade trigonométrica

$$\cos(x) \cos(y) = \frac{1}{2} [\cos(x - y) + \cos(x + y)], \quad (10)$$

chega-se a

$$s(t)r(t) = AB [\cos(\omega_s t + \theta - \omega_r t - \varphi) + \cos(\omega_s t + \theta + \omega_r t + \varphi)]. \quad (11)$$

Esta expressão pode ser posta na forma

$$s(t)r(t) = \frac{AB}{2} \{ \cos[(\omega_s - \omega_r)t + (\theta - \varphi)] + \cos[(\omega_s + \omega_r)t + (\theta + \varphi)] \}. \quad (12)$$

Como o processamento lock-in requer que a frequência do sinal de interesse e a frequência do sinal de referência sejam iguais, tem-se $\omega_s = \omega_r$, de tal modo que

$$s(t)r(t) = \frac{AB}{2} \{ \cos[\theta - \varphi] + \cos[2\omega_s t + (\theta + \varphi)] \}. \quad (13)$$

O sinal resultante é composto por uma componente DC e outra AC. Ele é dependente das amplitudes de $s(t)$ e $r(t)$, do cosseno da diferença entre as fases θ e φ , e do cosseno do dobro da frequência do sinal de interesse. Ao passar esse sinal por um filtro passa-baixas, tem-se como resultado

$$U_1 = \frac{AB}{2} \cos(\theta - \varphi). \quad (14)$$

No bloco “detector síncrono 2” os sinais de interesse e referência estão defasados em 90 graus. As operações matemáticas são similares e produzem na saída do bloco o valor

$$U_2 = \frac{AB}{2} \cdot \sin(\theta - \varphi). \quad (15)$$

Os valores U_1 e U_2 fornecem informações de magnitude e fase do sinal de interesse. A magnitude pode ser calculada de

$$M = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}. \quad (16)$$

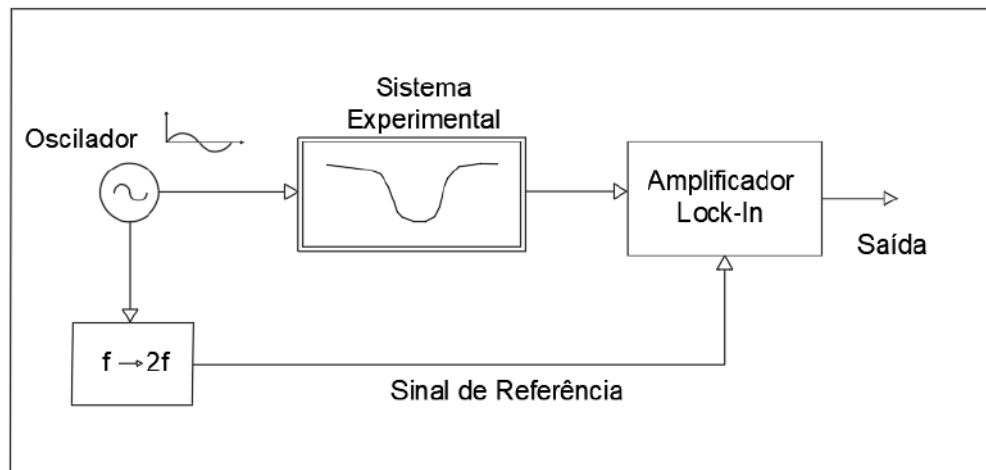
Já a fase pode ser calculada através de

$$F = \tan^{-1}\left(\frac{U_2}{U_1}\right). \quad (17)$$

3.4 DETECÇÃO DE HARMÔNICOS

Uma das capacidades que os amplificadores lock-in possuem é a de detectar componentes harmônicos do sinal de interesse. Os componentes harmônicos surgem quando a função de transferência do experimento é não linear. A Figura 9 ilustra a configuração básica de um experimento cuja função de transferência apresenta um comportamento quadrático.

Figura 9 – Experimento com função de transferência quadrática.



Fonte: O autor, 2021.

O sinal de excitação gerado pela fonte pode ser modulado por

$$s(t) = A \sin(\omega t), \quad (18)$$

onde $\omega = 2\pi f$.

A função de transferência do experimento pode ser representada por:

$$T = \alpha s^2. \quad (19)$$

$$T = \alpha s^2 = \alpha [A \sin(\omega t)]^2. \quad (20)$$

$$T = \alpha A^2 \left[\frac{1}{2} (1 - \cos(2\omega t)) \right]. \quad (21)$$

$$T = \frac{\alpha A^2}{2} - \frac{\alpha A^2}{2} \cos(2\omega t). \quad (22)$$

É possível observar que a primeira parcela é uma componente DC e a segunda parcela é um sinal periódico com o dobro da frequência do sinal de excitação. O sinal na saída do experimento, ou seja, o sinal entregue ao amplificador lock-in, é representado matematicamente através da multiplicação do sinal de entrada pela função de transferência. Logo, é sabido que nesse experimento haverá um componente harmônico com o dobro da frequência do sinal de entrada. O amplificador lock-in pode detectar esse componente através de uma alteração na frequência de referência de f para $2f$. Nesse caso, como a frequência de referência que está entrando no lock-in é $2f$, o processamento feito pelo amplificador só vai enxergar as componentes que possuem $2f$, e descartar todas as outras. (KLOOS, 2018).

Seguindo esse mesmo raciocínio é possível detectar a n -ésima componente harmônica simplesmente alterando o valor da frequência de referência. Nos amplificadores lock-in que possuem a capacidade de detectar componentes harmônicas há um bloco interno de multiplicação de frequência cuja finalidade é alterar o valor da frequência de referência para a ordem da harmônica que se deseja detectar.

3.5 SINAL DE REFERÊNCIA

O sinal de referência é parte essencial no princípio de funcionamento dos amplificadores lock-in. Esse sinal deve possuir a mesma frequência que o sinal que modula o experimento. Além disso, a diferença de fase entre o sinal de referência e o sinal que modula o experimento deve ser fixa, ou seja, não pode haver, a todo

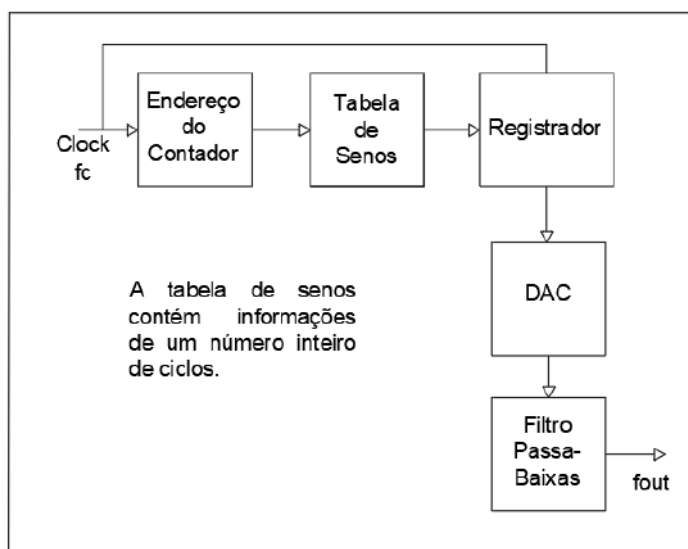
momento, variações de fase entre o sinal de interesse e o sinal de referência. O sinal de referência pode ser gerado internamente, no próprio amplificador lock-in, ou em uma fonte externa. (MEADE, 2013).

Os amplificadores lock-in, em geral, possuem a capacidade de gerar a referência internamente. Nos amplificadores lock-in digitais isso é feito através de circuitos digitais sintetizadores de frequência denominados DDS (*Direct Digital Synthesizer*) (RECOVERY, 2005). A Figura 10 mostra a arquitetura de um circuito sintetizador digital de sinais.

Para se gerar uma onda senoidal, por exemplo, é necessário primeiro ter uma tabela que possua previamente o valor da amplitude para cada ponto de fase. Além disso essa tabela precisa ter no mínimo o valor das amplitudes para cada ponto de fase em um período completo do sinal que se deseja gerar (DEVICES, 2008).

Por exemplo, para uma tabela com 360 posições de memória, o primeiro valor da tabela armazena a amplitude do ponto de fase 0° . O segundo ponto da tabela armazena a amplitude do ponto de fase 1° . O décimo ponto da tabela armazena o valor da amplitude do ponto de fase 9° . E assim por diante. Nesse caso, o incremento mínimo de fase é de 1° . Quanto maior o número de pontos usados para a formação da tabela, menor será o incremento mínimo de fase, e consequentemente maior a resolução de fase alcançada.

Figura 10 – Arquitetura de um Sistema DDS básico.



Fonte: Adaptada de Analog Devices, 2008.

Para a geração do sinal desejado o procedimento realizado pelo circuito é enviar para o conversor digital-analógico cada linha da tabela. Isso é feito linha por linha, da primeira até a última. Após o conversor digital-analógico há um filtro passa-baixas para eliminar as componentes de alta frequência e deixar o sinal gerado mais limpo. Nesses circuitos a frequência do sinal pode ser modificada de duas maneiras: reprogramando a tabela pré-estabelecida ou alterando a velocidade do clock.

4 SETUP EXPERIMENTAL E REQUISITOS DO AMPLIFICADOR LOCK-IN

Este capítulo disserta sobre o setup experimental usado para a implementação do amplificador lock-in baseado no microcontrolador Atmega2560 e sobre os requisitos mínimos que devem ser atendidos pelo microcontrolador para que a implementação seja possível. Além disso, também está descrito um experimento de absorção direta que foi realizado com o objetivo de confirmar o funcionamento dos equipamentos e caracterizar o laser DFB usado.

4.1 REQUISITOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO LOCK-IN

Partindo da teoria de funcionamento do amplificador lock-in, depreende-se que seu hardware deve ser capaz de desenvolver as seguintes atividades:

- Ler sinais analógicos.
- Gerar sinais analógicos.
- Realizar operações matemáticas envolvidas no processo de filtragem, como soma, multiplicação e divisão.

O hardware usado neste trabalho foi o microcontrolador ATmega2560, presente na plataforma de desenvolvimento denominada Arduino Mega. O ATmega2560 possui um conversor analógico-digital (ADC) de 10 bits que o torna capaz de ler sinais analógicos, possui portas digitais na qual se pode usar a técnica de PWM para gerar sinais analógicos, e possui, como qualquer microcontrolador, a capacidade de realizar as 4 operações matemáticas básicas (ATMEL, 2007), obedecendo assim à exigência mínima teórica para se realizar o processamento lock-in.

4.1.1 Capacidade de ler sinais analógicos

O microcontrolador ATmega2560 presente no Arduino Mega vem configurado de fábrica para que seu conversor analógico-digital (ADC) realize leituras analógicas a uma frequência de 9,6KHz (ATMEL, 2007). De acordo com o teorema da amostragem, que diz que a frequência de amostragem deve ser pelo menos duas vezes maior do que a frequência do sinal lido, seria possível ler sinais analógicos de

até 4,8KHz (OPPENHEIN; WILLISKY, 2010). Contudo, em termos práticos, quanto maior for a frequência de amostragem melhor será a qualidade do sinal obtido. No geral, os engenheiros costumam usar uma frequência de amostragem pelo menos 4 a 10 vezes maior do que a frequência do sinal analógico que se deseja ler (WENN. D, 2007). Há casos específicos, como sinais de eletrocardiogramas, em que a frequência de amostragem deve ser bem maior.

Nos experimentos realizados nesse trabalho uma das etapas consistia em ler um sinal senoidal analógico de 2KHz. Com o objetivo de melhorar a qualidade do sinal obtido foi feita uma alteração nas configurações de *prescaler* do microcontrolador de forma a permitir que ele realizasse leituras analógicas a uma frequência teórica de 153KHz.

O Datasheet do ATmega2560 especifica a possibilidade de alterar a frequência de operação do ADC através dos registradores ADPS0, ADPS1 e ADPS2. A tabela 2 mostra as possíveis frequências.

Tabela 2 – Configuração do Clock do ADC

ADPS2 ADPS1 ADPS0	PRESCALER	CLOCK DO ADC	FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM
001	2	8 MHz	615 KHz
010	4	4 MHz	307 KHz
011	8	2 MHz	153 KHz
100	16	1 MHz	76,9 KHz
101	32	500 MHz	38,4 KHz
110	64	250 MHz	19,2 KHz
111	128	125 MHz	9,6 KHz

Fonte: Datasheet Atmel – Atmega2560

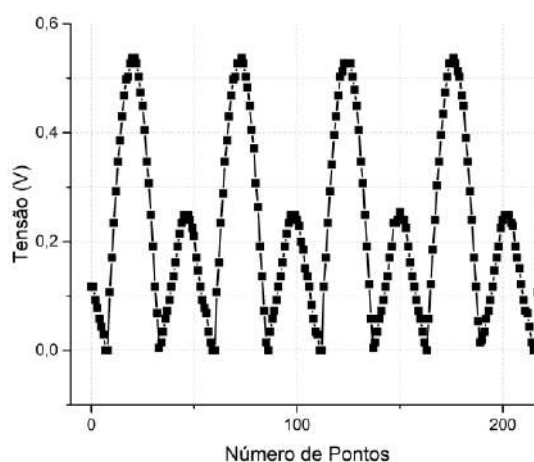
Foram feitos testes com o objetivo de confirmar a capacidade de o Arduino ler um sinal analógico com frequência de 2KHz. A Figura 11 mostra a forma de onda obtida por um osciloscópio a partir de um circuito genérico com amplificador operacional e a Figura 12 mostra o mesmo sinal obtido pelo Arduino. Nessa situação foi usado no Arduino um fator *Prescaler* de 8, que resulta numa frequência de amostragem teórica de 153 KHz.

Figura 11 – Formato do sinal de 2KHz obtido com Osciloscópio



Fonte: Acervo do autor.

Figura 12 – Formato do sinal de 2KHz obtido com Arduino



Fonte: Acervo do autor.

O microcontrolador foi capaz de ler o sinal de 2KHz, contudo, a frequência de amostragem obtida na prática foi de aproximadamente 100KHz, o que resulta num total de 50 pontos por período de sinal amostrado.

4.1.2 Tensão de referência do ADC

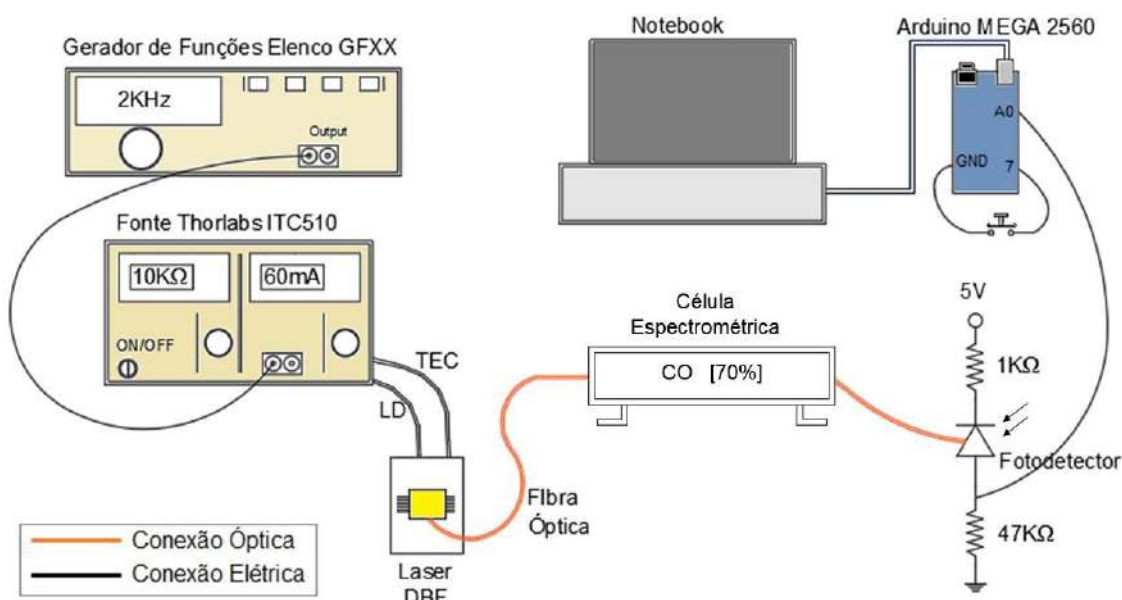
O valor da tensão de referência do ADC do Arduino é, por padrão, 5V. Contudo, essa tensão pode ser configurada para qualquer valor entre 1,1 e 5V (ATMEL, 2007). Nos experimentos realizados neste trabalho o valor da tensão de referência foi configurado para 1,1V. Isso significa que quando a porta A0 receber um sinal de 1,1V

o valor em bits será de 1023, e quando receber o um sinal de 0V, o valor em bits será 0. Esse valor de tensão de referência foi escolhido para que fosse possível obter a melhor resolução do sinal analógico obtido. Quanto menor o valor escolhido para a tensão de referência, maior a resolução obtida na leitura do sinal analógico.

4.2 SETUP DO EXPERIMENTO: EQUIPAMENTOS USADOS

Para se testar a funcionalidade do amplificador lock-in um experimento de detecção harmônica do espectro foi realizado com o objetivo de se detectar concentrações de CO (Monóxido de Carbono) em uma célula espectrométrica na qual o gás estava confinado. A configuração usada para se testar o amplificador lock-in está basicamente mostrada na Figura 13. Salvo a presença de alguns componentes discretos como capacitores e resistores, na Figura 13 estão presentes todos os equipamentos usados no desenvolvimento desse trabalho.

Figura 13 – Setup experimental: equipamentos usados



Fonte: O autor (2021).

Fizeram parte do experimento os seguintes equipamentos:

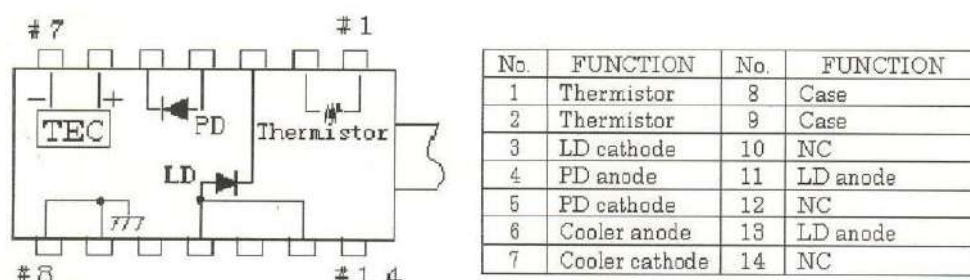
- Gerador de Funções Elenco (Modelo GFG-8016)

O gerador de funções possui a finalidade de fornecer a modulação para o sinal que excita o experimento e também de fornecer o sinal que serve como referência externa para o processamento lock-in. Esse gerador de funções possui a capacidade fornecer sinais de onda senoidal, quadrada e triangular. Além disso, também é possível variar sua frequência de 0,2Hz até 2MHz.

- Laser DFB

O laser usado no experimento foi um laser da marca ANRITSU, modelo GB5A016. Esse laser emite radiação no comprimento de onda de 1568nm a 25°C. A intensidade da radiação emitida e o comprimento de onda são funções da corrente de injeção. Aumentando a corrente de injeção aumenta-se a intensidade e o comprimento de onda da radiação emitida. Controlar a corrente é fundamental. Além da corrente de injeção a temperatura de operação do laser DFB também deve ser criticamente controlada, pois alterações na temperatura tem forte influência sobre o comprimento de onda emitido (NETO et al., 2020). A fonte Thorlabs ITC510 é responsável por controlar a corrente de injeção e a temperatura de operação do laser DFB. A Figura 14 mostra o diagrama do laser DFB usado nesse experimento.

Figura 14 – Diagrama esquemático do laser DFB usado

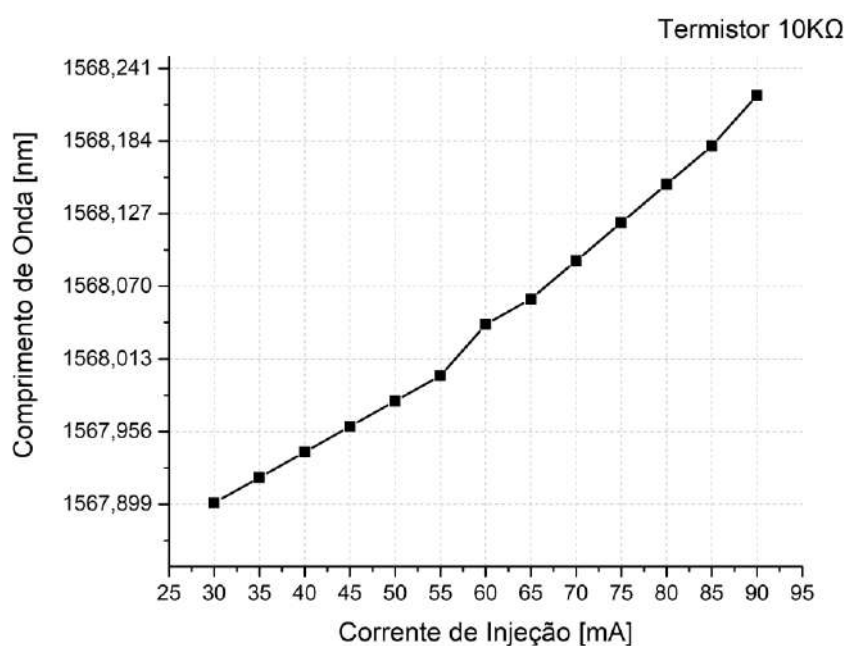


Fonte: Datasheet Laser DBF Anritsu

O Controle de temperatura é feito através dos terminais 6 e 7 (TEC) e dos terminais 1 e 2 (Thermistor) do laser. A corrente que controla a emissão do laser deve ser injetada nos terminais 3 e 11 (ou 13) (ANRITSU). Com o auxílio de um OSA (Optical Spectral Analyzer) algumas simulações foram feitas de maneira a caracterizar

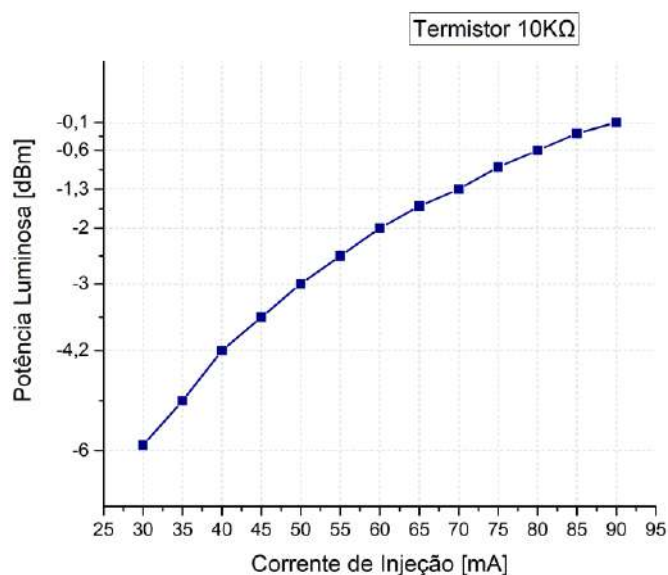
o laser usado. A Figura 15 mostra o comportamento do comprimento de onda do laser em função da corrente de injeção para um valor de termistor de 10K Ω . Já a Figura 16 mostra o comportamento da potência do laser em função da corrente de injeção para um valor de termistor de 10K Ω . Os gráficos apresentam um comportamento linear. É possível perceber que à medida que se aumenta o valor da corrente de injeção aumenta-se o valor do comprimento de onda emitido e da potência luminosa.

Figura 15 – Comprimento de onda x Corrente de injeção



Fonte: O autor (2021).

Figura 16 – Potência Luminosa x Corrente de injeção



Fonte: O autor (2021).

- Fonte Controladora THORLABS ITC510

A fonte controladora é responsável por controlar a corrente de injeção e a temperatura do laser DFB. Da fonte ITC510 saem os conectores: LD e TEC. O conector LD é responsável por controlar a corrente de injeção, enquanto que o conector TEC é responsável por controlar a temperatura do laser (THORLABS, 2008). Ambos os conectores são ligados diretamente ao laser.

- Célula Espectrométrica

A Figura 17 mostra a célula espectrométrica usada no experimento para confinar o gás foi uma célula de múltiplas passagens, com 20 cm de comprimento físico e 78,1 cm de caminho de interação óptica, da empresa *Wavelength References*, modelo FCS-80-1-4. Através do sistema de gás existente do LSI foi realizado o ciclo de preenchimento e diluição do gás na célula.

Figura 17 – Célula Espectrométrica usada nos experimentos



Fonte: O autor (2021).

Para o experimento feito neste trabalho o gás usado foi CO (Monóxido de Carbono) a 70%. Esse gás possui uma linha de absorção em 1568,03nm (ROTHMAN et al., 2004). É através dessa linha de absorção que o sistema sensor é testado.

- Fotodetector

O fotodetector usado neste trabalho foi um fotodiodo InGaAs da Edmund Optics, Modelo 55757. Esse fotodiodo possui uma responsividade de 0,95 A/W em 1550nm. Além disso ele possui um receptáculo FC para a conexão da fibra óptica.

- Arduino Mega2560

O Arduino Mega foi a plataforma de desenvolvimento usada para a implementação do amplificador lock-in. O microcontrolador presente nessa plataforma é um AtMega2560, da ATMEL. Ele é responsável por ler os sinais entregues pelo fotodetector e pelo gerador de função, e também por gerar um sinal analógico em um dos experimentos realizados.

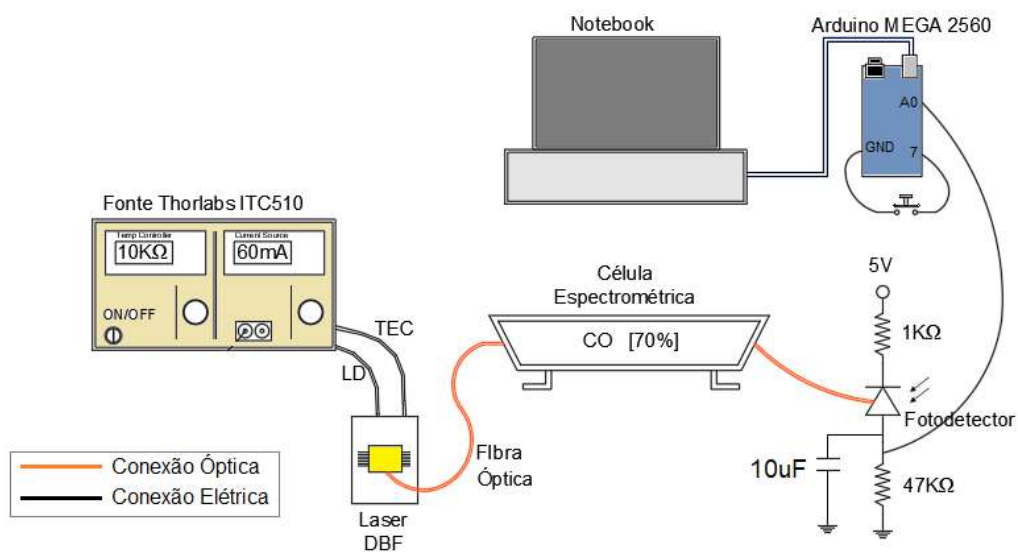
- Notebook

O PC usado possuía um processador Intel® Core (TM) i5-3337u com 1,8 GHz e 6 GB de memória RAM. Seu uso teve a finalidade de programar o Arduino, receber os dados por ele enviados e realizar cálculos matemáticos com esses dados. O programa usado para a realização dos cálculos foi o Microsoft Excel 2019.

4.3 TESTE DO SISTEMA DE GÁS: ABSORÇÃO DIRETA

Antes de começar a realizar os procedimentos para implementação do amplificador lock-in digital, algumas leituras de absorção direta foram feitas a fim de confirmar a presença de gás Monóxido de Carbono no interior da célula espectrométrica. A Figura 18 mostra o *setup* usado nesse experimento de absorção direta.

Figura 18 – Setup do Experimento de Absorção Direta



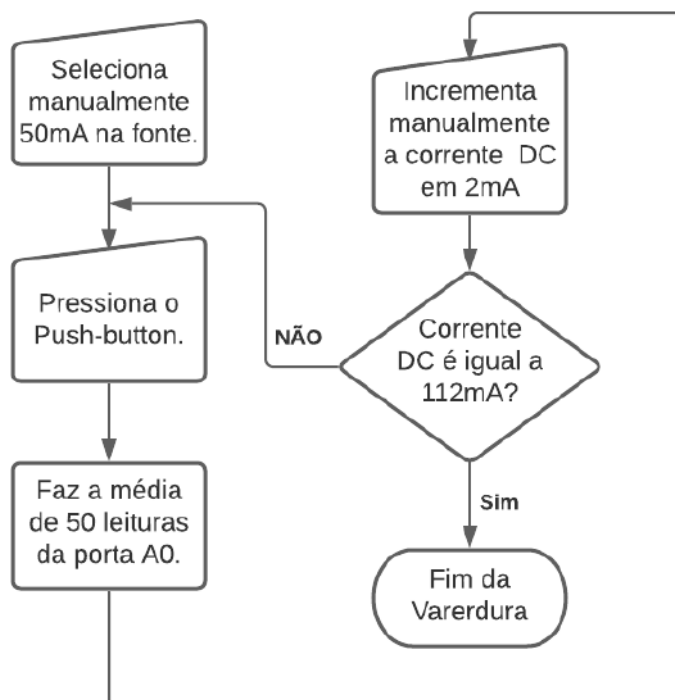
Fonte: O autor, 2021.

O experimento de absorção direta realizado seguiu os seguintes passos:

- Preenchimento da célula com CO com concentração de 70%.
- Leitura de 30 pontos de corrente DC sem a modulação senoidal.
- Esvaziamento da célula espectrométrica.
- Preenchimento da célula espectrométrica com Nitrogênio.
- Leitura de 30 pontos de corrente DC sem a modulação senoidal.
- Realização da operação matemática.

O preenchimento da célula com CO ou Nitrogênio, e o esvaziamento foram feitos manualmente, através da operação de válvulas de bloqueio ON/OFF, e acompanhados através de um manômetro conectado às tubulações do sistema de gás. A leitura dos 30 pontos de corrente DC está explicada no algoritmo da Figura 19.

Figura 19 – Algoritmo usado na leitura dos 30 pontos de corrente DC



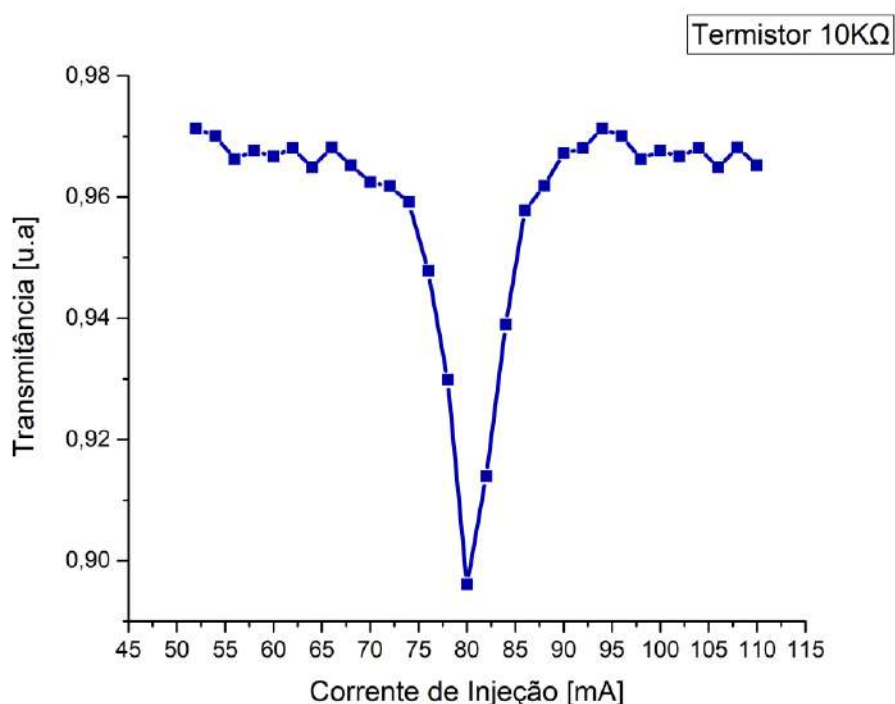
Fonte: O autor, 2021.

O algoritmo se resume em três passos. O primeiro passo era selecionar manualmente o valor de 50mA de corrente DC na fonte Thorlabs. Isso era feito através do *knob* existente no painel frontal da fonte controladora. O segundo passo era apertar o *push-button* conectado à porta digital 7 do Arduino. Nessa rotina de se ler a absorção direta, cada vez que se apertava o botão conectado à porta digital 7 do Arduino o programa realizava um média de 50 leituras analógicas através da porta A0 e enviava o valor obtido para o PC via cabo USB. Esse valor era mostrado no monitor serial da IDE do Arduino. O terceiro passo era incrementar manualmente, em 2mA, o valor da corrente DC na fonte controladora.

Toda essa rotina foi feita de 50 a 110mA, tanto para o CO como para o Nitrogênio. Ao final de cada varredura, estavam presentes no monitor serial, na tela do notebook, 30 valores, cada um referente a leitura de um ponto de corrente DC. Esses valores foram copiados para o Microsoft Excel para a realização dos cálculos, que consistia na simples divisão entre os valores lidos na varredura inicial, feita com CO presente na célula espectrométrica, pelos valores lidos na segunda varredura, feita com nitrogênio na célula.

O resultado obtido dessa operação matemática de divisão representa a transmitância do sinal em função da corrente de injeção DC e está representado na Figura 20.

Figura 20 – Resultado obtido no experimento de Absorção Direta



Fonte: O autor, 2021.

Dois aspectos do gráfico mostrado na Figura 19 devem ser observados. O primeiro é que no ponto de máxima absorção o gráfico possui um formato pouco suave, algo bastante diferente dos gráficos de transmitância encontrados na literatura, como mostrado em (LIMA et al., 2019), (FONTANA; FILHO; URTIGA, 2007), (LIMA; FONTANA; LIMA, 2020). Isso se deve ao espaçamento entre os valores de corrente DC lidos. Como o espaçamento de corrente selecionado foi de 2mA entre cada ponto lido, a resolução fica comprometida.

O segundo aspecto a ser comentado é sobre o ponto onde ocorreu a máxima absorção. A Figura 19 mostra que ponto de máxima absorção ocorreu em um valor de corrente DC igual a 79mA. Contudo, tomando como base a Figura 14, que relaciona comprimento de onda emitida pelo laser e a corrente de injeção DC, o ponto de máxima absorção deveria ocorrer em 55mA. Nesse valor de corrente DC o laser emite um comprimento de onda de 1568nm, que é exatamente onde está a linha de

absorção do gás em estudo. A hipótese que explica esse acontecimento é que há algum erro de calibração nos instrumentos usados. O experimento foi repetido várias vezes e em todas elas o ponto de máxima absorção foi em 79mA.

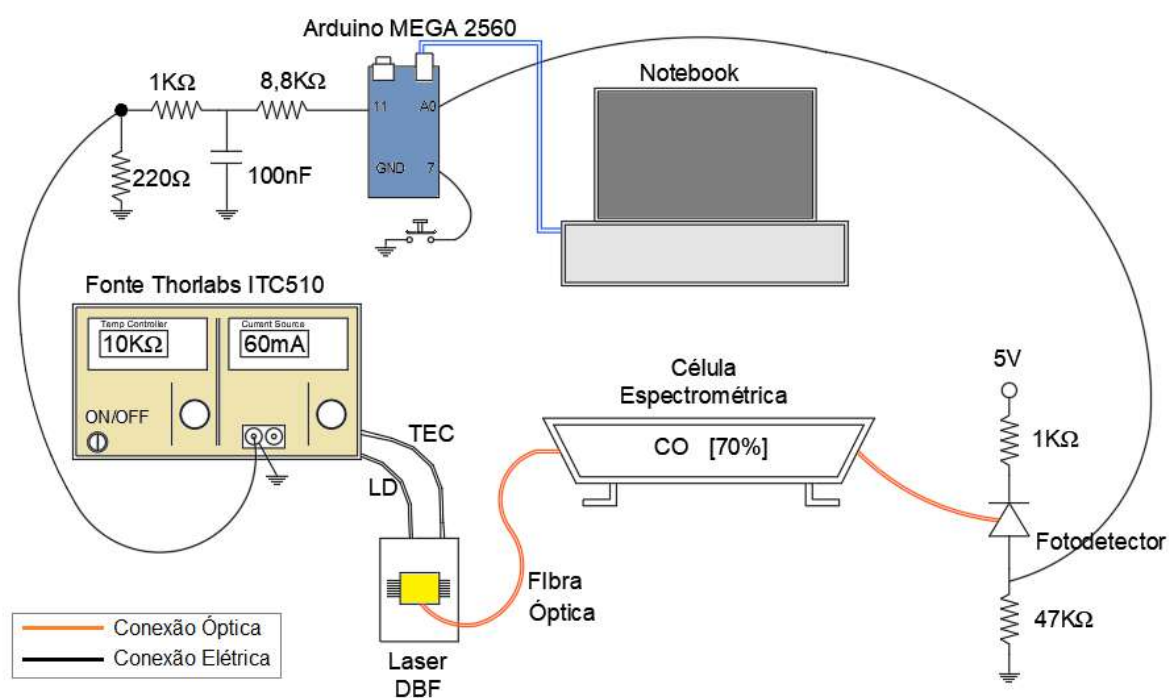
5 IMPLEMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL

Este capítulo descreve todas as etapas realizadas no desenvolvimento do amplificador lock-in baseado no Arduino Mega. Em um primeiro momento comenta-se a respeito do amplificador lock-in com sinal de referência gerado internamente, em seguida comenta-se sobre a tentativa de se implementar um lock-in a partir de um sinal de referência gerado por uma fonte externa. Além disso também é descrito o experimento de WMS usado para validação do protótipo.

5.1 IMPLEMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL COM REFERÊNCIA INTERNA.

A configuração usada para o experimento de validação do amplificador lock-in com sinal de referência gerado internamente é mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Configuração Experimental do Amplificador Lock-in com referência interna



Fonte: O autor, 2021.

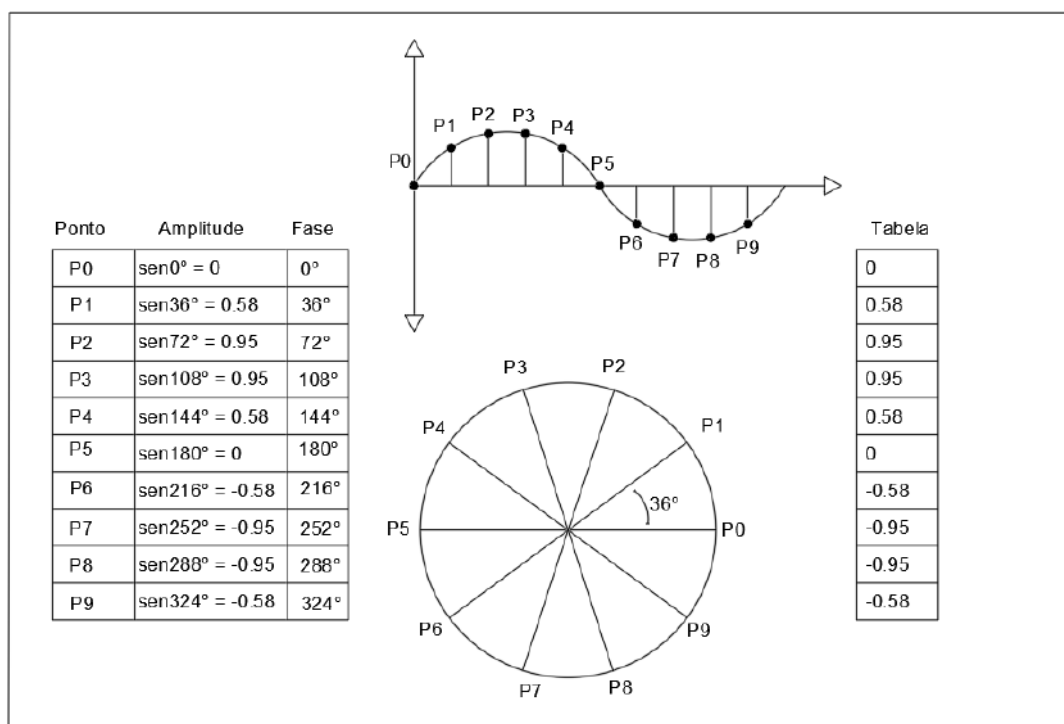
O Arduino possui basicamente três funções nesse setup:

1. Gerar o sinal senoidal que, além de modular o sinal de excitação do experimento, também serve como sinal de referência.
2. Ler o sinal de interesse, que é senoidal e entregue pelo fotodetector na entrada analógica A0.
3. Enviar os dados para o PC para a realização das operações matemáticas.

5.1.1 Geração do Sinal Senoidal

A técnica usada para a geração do sinal é denominada DDS (Direct Digital Synthesizer). Essa técnica consiste na criação de um sinal a partir de uma tabela previamente salva na memória do microcontrolador contendo os valores discretos de um período completo do sinal que se deseja gerar (DEVICES, 2008). Nesse trabalho usou-se um sinal senoidal, mas essa tabela poderia ter os dados referentes a qualquer tipo de forma de onda. A Figura 22 ilustra um exemplo de tabela com dez valores de um sinal senoidal e sua respectiva forma de onda.

Figura 22 - Tabela para geração de sinal com a técnica DDS

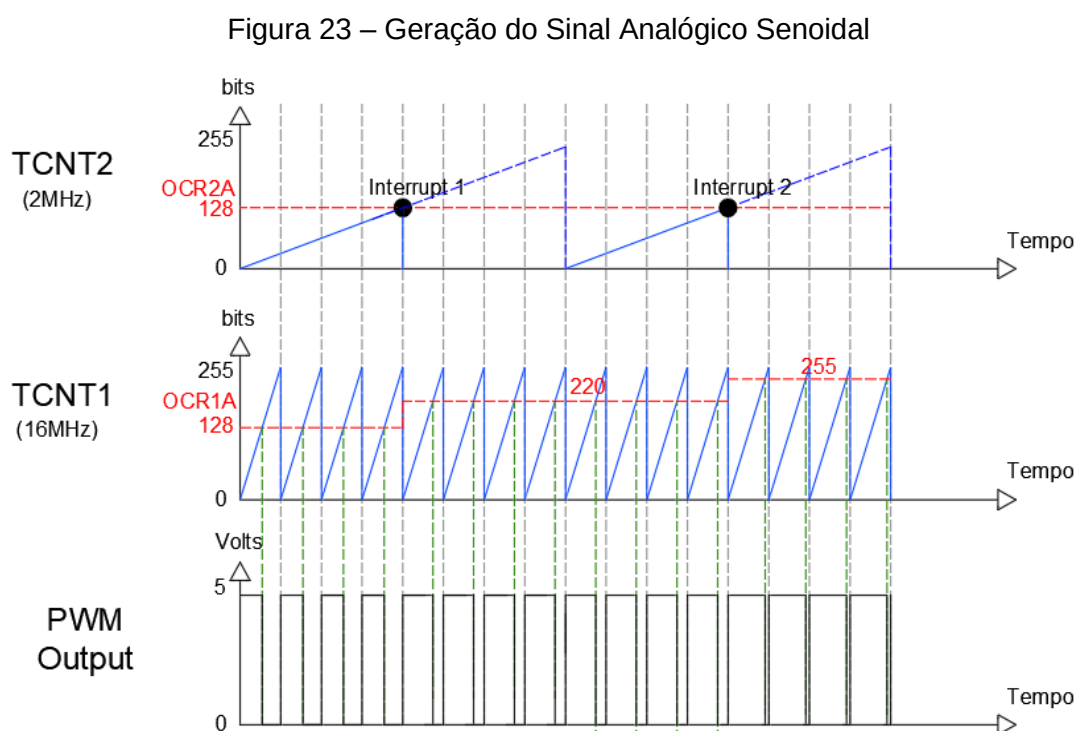


Fonte: O autor, 2021.

Conforme preza a técnica DDS, após a tabela estar devidamente salva no programa a ser executado a tarefa do microcontrolador é percorrer linha por linha dessa tabela transformando esses valores digitais em um valor analógico através de um DAC. O Arduino Mega não possui um DAC interno, contudo há uma maneira de se produzir um sinal analógico usando as saídas PWM (Pulse With Modulation) do microcontrolador e alguns componentes discretos como capacitores e resistores (ATMEL, 2007). Com essas saídas é possível alterar o Duty Cycle de uma onda quadrada de forma que o valor médio seja um valor analógico entre 0 e 5V.

Neste trabalho uma tabela de seno com 120 valores de amplitude foi salva na memória do programa. Os valores mínimo e máximo eram 0 e 255 respectivamente. Isso foi necessário devido ao fato de o microcontrolador usado nesse trabalho não trabalhar com valores negativos.

Para se gerar o sinal analógico em uma saída do microcontrolador foram usados timers, registradores, interrupção por comparação e interrupção por overflow. A Figura 23 mostra o diagrama no tempo das etapas de geração do sinal.



Fonte: O autor, 2021.

Os timers 1 (TCNT1) e 2 (TCNT2) incrementam em um a cada ciclo de clock. O timer 1 funciona na velocidade do ciclo de máquina, que é de 16MHz, enquanto o

timer 2 funciona a 2 MHz. Isso significa que o timer 1 é 8 vezes mais rápido que o timer 2. É possível perceber isso na Figura 20, pois quando o timer 2 chega a 255, o timer 1 já chegou nesse valor oito vezes.

OCR1A e OCR2A são registradores de comparação. O valor do TCTN1 é comparado a todo momento com o valor de OCR1A, enquanto o valor de TCNT2 é comparado com o valor de OCR2A. O valor presente no registrador OCR2A é mantido fixo durante todo programa. Já o valor de OCR1A é atualizado constantemente pelo próximo valor da tabela de senos.

Inicialmente TCNT2 tem valor 0 e a cada ciclo de clock incrementa em 1. Quando TCNT2 se iguala a OCR2A ocorre uma interrupção e as seguintes ações são realizadas:

- O valor de TCNT2 é zerado.
- O valor de OCR1A é atualizado (próximo valor da tabela de senos).
- Uma leitura analógica é realizada.

Da mesma maneira, inicialmente TCNT1 tem valor 0 e a cada ciclo de clock incrementa em 1. O valor da saída PWM associada a esse timer é colocada em nível lógico alto quando o TCNT1 está igual a zero. Quando TCNT1 se iguala a OCR1A algumas ações são realizadas:

- O valor da saída PWM é colocado em nível lógico baixo.
- TCNT1 continua incrementado a cada ciclo de clock, ou seja, ele não é zerado nesse ponto, diferentemente do que ocorre no timer 2.

Quando TCNT 1 atinge o valor 255 as seguintes ações são realizadas:

- Estouro do timer por overflow: OCR1A é redefinido.
- A Saída PWM é colocada em nível lógico alto.

Dessa maneira foi gerado um sinal senoidal com uma qualidade muito alta. O sinal senoidal gerado era obtido na porta 11 do Arduino. Nessa porta foi necessário colocar um filtro passa-baixas e um divisor de tensão. O filtro passa-baixas foi necessário para eliminar a componente alta frequência existente no sinal senoidal originada devido ao uso da técnica de PWM. O divisor de tensão foi necessário para que se entregasse à fonte Thorlabs uma tensão senoidal com 80mV pp. Esse valor de tensão foi escolhido porque através dele, percebeu-se que a fonte fornecia uma variação da corrente do laser de 5mA, que é o valor ótimo descrito em (SOARES, 2010).

5.1.1.1 Frequência do Sinal Senoidal Gerado

A frequência do sinal senoidal pode ser controlada através da fórmula

$$f = \frac{TCNT2_{RATE}}{OCR2A \cdot N_T}. \quad (23)$$

Para o experimento foi usado um valor de OCR2A de 80. Como o valor de $TCNT2_{RATE}$ é 2MHz e a tabela tem 120 posições, ou seja, $N_T = 120$, o valor da frequência do sinal senoidal gerado foi de aproximadamente 208Hz. Alterando esses valores seria possível modificar o valor da frequência do sinal gerado. Por exemplo, para um OCR2A igual a 50, um $TCNT2_{RATE}$ igual a 2MHz e uma tabela com 30 posições a frequência do sinal gerado seria de 1,3KHz.

É preciso ter cuidado na manipulação desses valores de maneira que a conversão analógico-digital não seja prejudicada. Uma estimativa teórica é de que seria possível selecionar uma frequência de até 1,3KHz sem maiores problemas quanto à capacidade do hardware. Experimentos realizados por (SOARES, 2010), com o gás acetileno, detalharam a influência da frequência de modulação nos valores de pico obtidos para os sinais do primeiro e do segundo harmônico. No estudo em questão, foi sugerido que uma frequência em torno de 3KHz seria a melhor escolha para se obter o maior valor de pico. Frequências acima e abaixo dessa mostraram o sinal de segundo harmônico com uma amplitude menor.

No caso do amplificador lock-in desenvolvido neste trabalho foi escolhida uma frequência de operação de 208Hz de modo a diminuir a complexidade do software desenvolvido. Para se utilizar frequências de operação maiores seria necessária a implementação de algoritmos de recuperação de sinais amostrados a partir de uma quantidade menor de dados.

5.1.2 Leitura do Sinal de Interesse

O sinal de interesse, que era senoidal e possuía 208Hz, foi obtido no anodo do fotodiodo. Uma conexão elétrica entregava esse sinal à porta A0 do Arduino para que pudesse ser lido. O Arduino se dividia na tarefa de gerar o sinal de referência e ler o sinal de interesse. As duas coisas aconteciam ao mesmo tempo, que era no instante

em que o valor de TCNT2 se igualava a OCRA2. Na Figura 22 esse instante é representado pelas interrupções.

Ou seja, à medida que o sinal senoidal estava sendo gerado através do percorrer da tabela de senos, o microcontrolador também recebia o sinal de interesse na porta A0.

Sabe-se, do princípio de funcionamento do amplificador lock-in, que é preciso é ler três sinais analógicos: o de interesse, o de referência e o de referência defasado em 90° . Contudo, quando o sinal de referência está sendo gerando internamente não é preciso realizar sua leitura, pois seus valores já estão previamente salvos na tabela de senos na memória do programa. Só é necessário ler o sinal de interesse.

5.1.3 Transferência do sinal para o PC

Após cada ciclo de leitura analógica os dados eram transferidos para o PC com o objetivo de tornar mais prática a manipulação dos dados. Ao todo foram realizados 30 ciclos, um para cada valor de corrente DC selecionado na fonte. Durante cada ciclo 2400 valores analógicos eram armazenados temporariamente na memória SRAM do Arduino, o que equivale a 4.8KB de dados. Para armazenar o total de dados referente aos 30 ciclos o Arduino precisaria de 144KB de memória SRAM, e ele só possui 8KB.

A transferência para o PC era feita via cabo USB e os dados ficavam impressos no monitor serial da IDE do Arduino. Ao final de toda varredura os dados eram inteiramente copiados do monitor serial para o Microsoft Excel em uma planilha que realizava a multiplicação e filtragem dos sinais.

Na planilha em que os dados eram processados havia 92 colunas com dados, cada uma com 2400 linhas. Duas dessas colunas continham os sinais de referência em fase (seno) e em quadratura (cosseno). Como o objetivo inicial do experimento era obter o módulo do segundo harmônico esses sinais tinham o dobro da frequência do sinal presente na tabela de senos, que foi usada para gerar o sinal de referência com o Arduino. As outras 90 colunas eram divididas em 30 grupos de 3 colunas. Em cada grupo a primeira coluna continha o sinal de interesse para um determinado valor DC, a segunda coluna continha a multiplicação linha a linha desse sinal de interesse pela referência em fase, e a terceira coluna continha a multiplicação linha a linha desse sinal de interesse pela referência em quadratura. A Figura 24 ilustra a estrutura da

tabela descrita acima apenas para o valor de corrente DC de 60mA. Estão suprimidos 29 grupos de 3 colunas.

Figura 24 – Estrutura da Tabela que realiza o processamento lock-in

	A	B	C	D	E
	Sinal de Referência em Fase	Sinal de Referência em Quadratura	Sinal de Interesse (Idc = 60mA)	Sinal de Interesse X Sinal de Referência Em Fase	Sinal de Interesse X Sinal de Referência em Quadratura
	Sen	Cos	60 mA	60mA * Sen	60mA * Cos
1					
2					
3					
4					
5					
.					
.					
.					
2397					
2398					
2399					
2400					

Fonte: O autor, 2021.

O filtro passa baixa existente no processamento lock-in foi aplicado aos sinais das colunas D e E. Como os sinais são senoidais a filtragem passa-baixas foi realizada por uma média aritmética simples. É importante esclarecer que só foi possível usar esse tipo de filtragem devido à natureza senoidal do sinal. Se a modulação do sinal fosse uma onda quadrada seria necessária a implementação de filtros digitais do tipo FIR ou IIR.

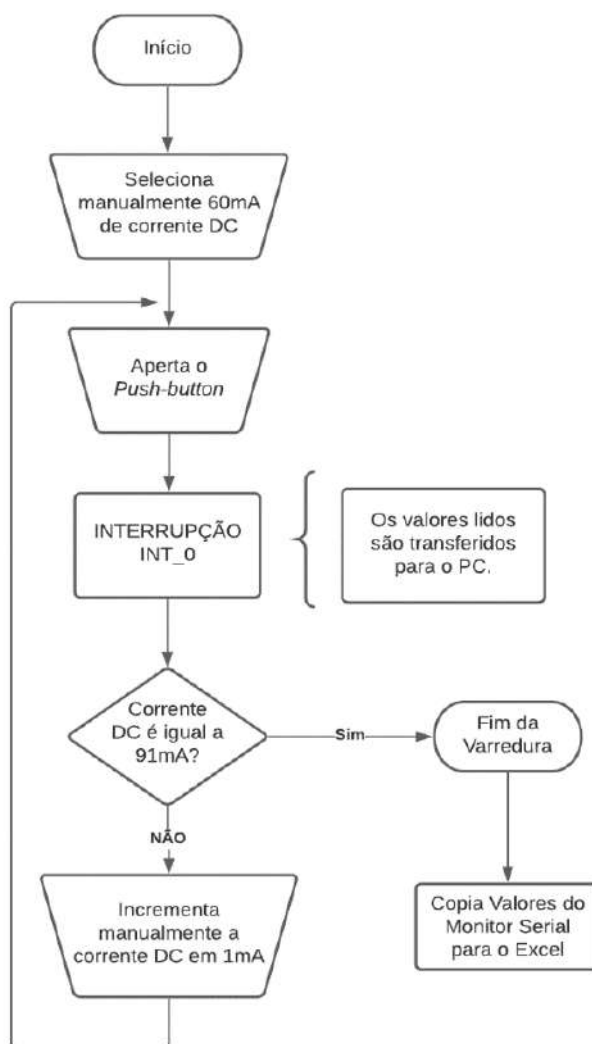
O resultado da filtragem foram os valores DC U_1 e U_2 . Esses valores foram usados para se calcular o valor do módulo do segundo harmônico.

Após a obtenção do módulo do segundo harmônico no experimento realizado inicialmente, uma pequena alteração foi feita, na própria planilha do Excel, para se obter o sinal do primeiro harmônico. As colunas que continham o sinal de referência com o dobro da frequência do sinal gerado pelo Arduino foram modificadas de maneira a ter a mesma frequência do sinal senoidal gerado na porta 11 do Arduino. Dessa maneira foi possível obter o sinal de 1º harmônico.

5.1.4 O experimento do amplificador Lock-in com Referência Interna

A figura 25 mostra um fluxograma que descreve o desenvolvimento do experimento. Ela mostra as etapas que foram executadas para a obtenção do sinal de interesse. Há operações manuais e operações feitas pelo Arduino.

Figura 25 – Fluxograma do Experimento com Referência Interna



Fonte: O autor, 2021.

Durante o experimento foi usado um osciloscópio na porta 11 do Arduino a fim de se verificar a geração do sinal senoidal. Ao se ligar o microcontrolador o sinal senoidal já começava a ser gerado. Além do sinal senoidal estar sendo gerado, a porta A0 também estava sendo lida, pois ambas as coisas ocorrem em paralelo. Os valores lidos constantemente na porta A0 eram armazenados em um vetor de dados do tipo INT criado no programa. O código foi feito de uma forma que sempre que o microcontrolador realizasse a leitura de 2400 valores analógicos, a próxima leitura analógica começava a sobrescrever o vetor onde os valores analógicos estavam salvos. Dessa maneira, no vetor onde se armazenava os valores analógicos lidos estavam presentes apenas as últimas 2400 leituras, o que corresponde a 20 períodos

completos do sinal analógico lido. Esse valor foi escolhido de modo a evitar o preenchimento total da memória RAM do microcontrolador.

O Primeiro passo foi selecionar manualmente o valor de corrente DC onde se iniciou a varredura, 60mA. Esse valor era selecionado no painel frontal da fonte Thorlabs através de um knob. Enquanto isso o osciloscópio estava mostrando o sinal senoidal sendo gerado normalmente na porta 11 e o Arduino estava lendo constantemente a porta analógica A0.

Após escolhido o valor de corrente DC inicial o push-button era apertado. Ao se apertar o push-button uma interrupção INT0 era acionada. Essa interrupção possui uma prioridade mais alta em relação às interrupções usadas para se gerar o sinal senoidal (TIMER1 COMPA, TIMER2 COMPA e TIMER1 OVF). E como a prioridade é mais alta o microcontrolador para de fazer tudo que estava fazendo para realizar as instruções dentro dessa interrupção INT0. Nesse momento o sinal senoidal parava de ser gerado e o microcontrolador começava a transferir para o PC o vetor com as últimas 2400 leituras feitas na porta A0.

Terminada a transferência dos dados para o PC, a interrupção INT0 se encerrava e o Arduino já começava, novamente, a gerar o sinal senoidal na porta 11 e ler o sinal de interesse na porta A0.

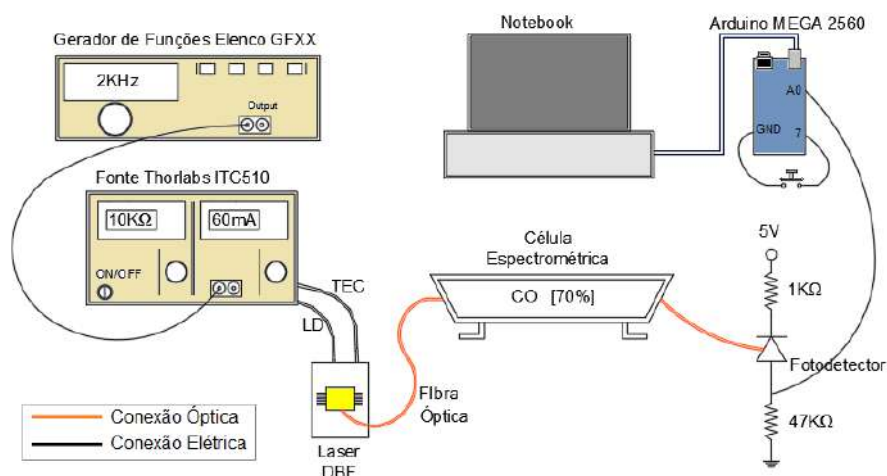
A Próxima etapa era escolher o próximo valor de corrente DC, 61mA. E todo ciclo se repetia. Isso foi sendo feito até que a última leitura analógica fosse realizada. Ao final da varredura estavam presentes no monitor serial as 30 leituras, o que dá 72000 linhas de dados. Todas essas linhas eram copiadas para a planilha do Excel para o processamento dos cálculos, que eram feitos com base nas Eq. (3.1) a (3.11).

5.2 AMPLIFICADOR LOCK-IN COM REFERÊNCIA EXTERNA

A configuração usada para o experimento de validação do amplificador lock-in com sinal de referência gerado externamente é mostrada na Figura 26. O Arduino possui basicamente três funções nesse setup:

1. Ler o sinal de interesse, que é senoidal e entregue pelo fotodetector na entrada analógica A0.
2. Ler o sinal de referência, que é senoidal e é obtido conectando-se o gerador de funções diretamente ao Arduino.
3. Enviar os dados para o PC para a realização das operações matemáticas.

Figura 26 – Setup do Experimento com Referência Externa



Fonte: O autor, 2021.

Diferentemente do experimento descrito no início deste capítulo, aqui o sinal de referência foi gerado externamente pelo gerador de funções Elenco. Todo o resto do experimento é semelhante ao descrito no caso do amplificador lock-in com referência interna. Essa tentativa de implementar um amplificador lock-in com sinal de referência sendo gerado externamente foi feita com o objetivo de se implementar um lock-in com características semelhantes aos lock-in comerciais, fornecendo assim maiores possibilidades de aplicação.

5.2.1 Leitura do sinal de interesse

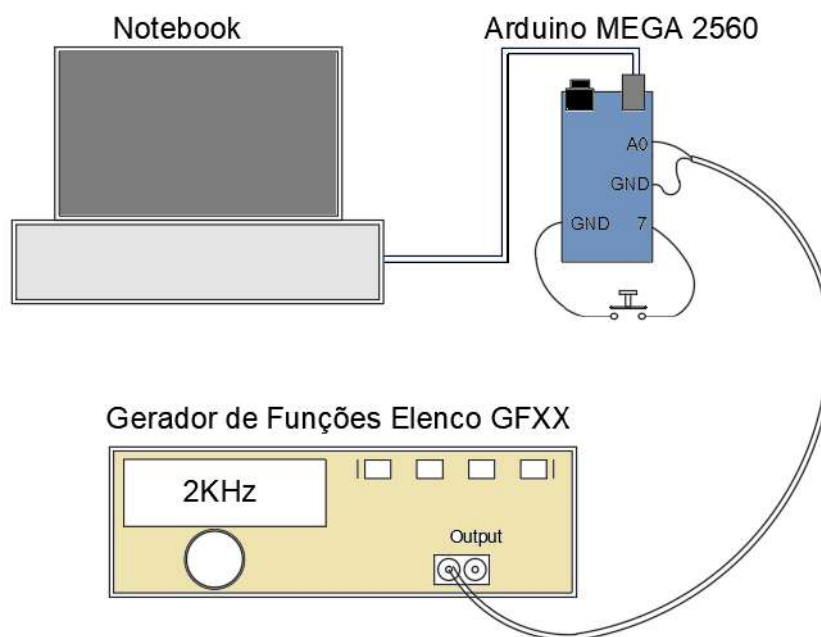
O primeiro passo foi ler o sinal de interesse. Esse sinal era senoidal e tinha uma frequência de 2KHz ajustada no gerador de funções. A obtenção desse sinal foi feita no anodo do fotodiodo, conforme mostrado na Figura 26. Para esse caso foi configurado no Arduino um fator *prescaler* igual a 16, o que fornece uma frequência de amostragem do ADC de 76,9KHz. Assim, o sinal de interesse lido continha um total de aproximadamente 38 pontos por período.

5.2.2 Leitura do sinal de referência

O sinal usado como referência externa era o mesmo que foi usado para modular o sinal do laser. A diferença é que nesse caso o sinal foi obtido diretamente no gerador

de funções. A Figura 27 ilustra a conexão feita entre os dois equipamentos. Foi tomado o cuidado necessário para não se alterar a frequência selecionada no equipamento. Assim, o requisito de o sinal de interesse e sinal de referência possuírem a mesma frequência seria respeitado.

Figura 27 – Obtenção do sinal de Referência Externo.

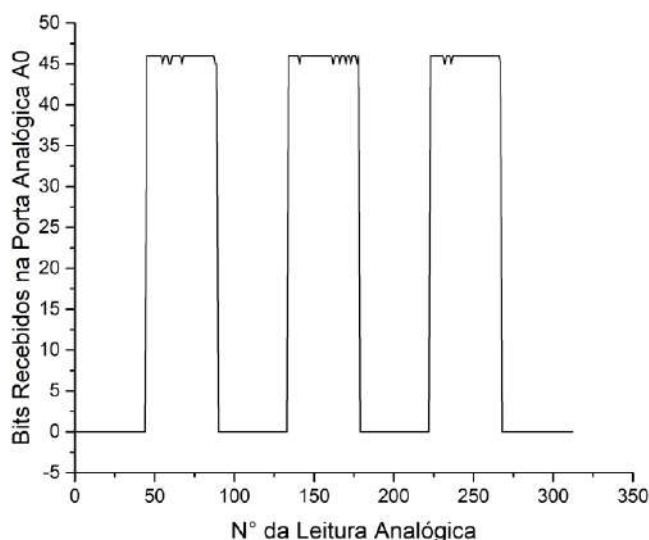


Fonte: O autor, 2021.

A Figura 28 mostra um sinal de referência obtido em uma das leituras realizadas. Nesse caso foi selecionado no gerador de funções uma onda quadrada, de modo a facilitar a manipulação dos dados no Microsoft Excel. A Partir desse sinal de referência, foi feita uma operação de deslocamento de bit com o objetivo de defasar o sinal em 90° .

O deslocamento em 90° foi um ponto crítico no tratamento do sinal, pois foi observado que a quantidade de pontos por período era diferente ao se comprar dois trechos diferentes do sinal obtido. Em determinado trecho o período apresentava 89 pontos, enquanto em outro trecho ele apresentava 90 pontos. Dessa maneira não havia como garantir que os sinais usados no processamento eram um seno e um cosseno.

Figura 28 – Sinal de Referência Obtido Externamente



Fonte: O autor, 2021.

5.2.3 Transferência para o PC

Aqui o procedimento foi o mesmo realizado para o experimento descrito no amplificador lock-in com referência gerada internamente.

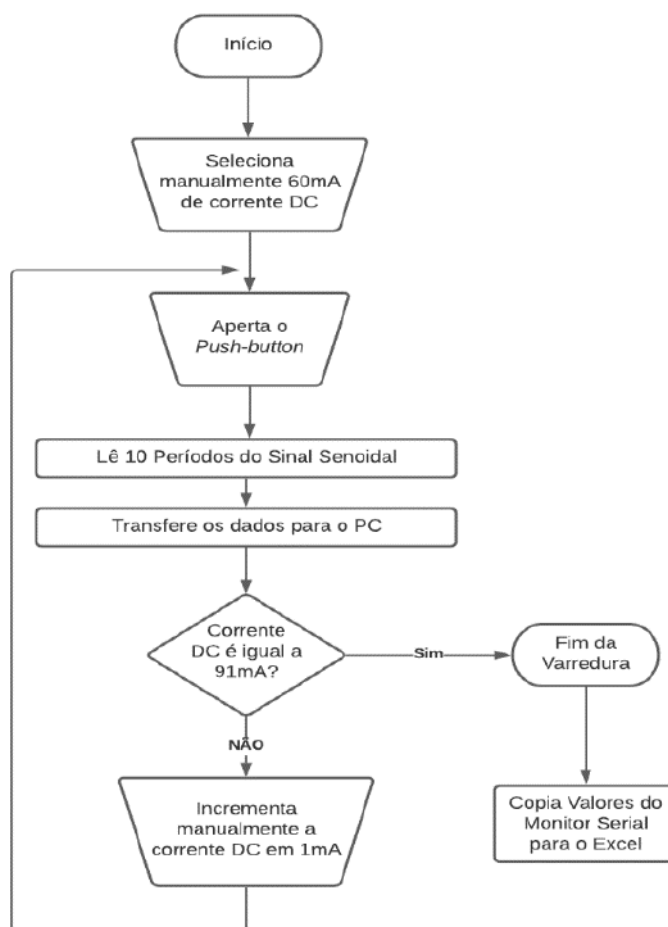
5.2.4 O experimento do amplificador Lock-in com Referência Externa

O procedimento realizado foi bastante parecido. Aqui a varredura tinha que ser feita duas vezes: uma para o sinal de interesse e uma para o sinal de referência. No primeiro caso o sinal era obtido no anodo do fotodetector e no segundo caso o sinal era obtido diretamente no gerador de funções. A Figura 29 mostra o fluxograma do experimento.

A principal diferença é que no experimento com sinal de referência gerado internamente o sinal de interesse é lido a todo momento pelo Arduino. Aqui, no experimento com sinal de referência gerado externamente, o Arduino só lê o sinal analógico quando o push-button é pressionado. Após se terminar a varredura todos os dados são copiados para o Excel, onde os cálculos são feitos.

O amplificador lock-in com referência gerada externamente não funcionou.

Figura 29 – Fluxograma do Experimento com Referência Externa



Fonte: O autor, 2021.

A hipótese para o amplificador lock-in ter dado errado, mesmo sabendo que a frequência emitida pela fonte não havia mudado, é a de que houve uma variação de fase entre as leituras do sinal de interesse e de referência.

Como dito no Capítulo 2, além da frequência dos sinais ser igual, a diferença de fase entre eles não pode variar a todo momento. Como a leitura dos sinais de interesse e de referência foram feitas em momentos diferentes, e para vários valores de corrente DC diferente, não foi possível garantir que a diferença de fase entre eles se mantivesse constante.

Para se resolver esse problema a solução imaginada é integrar ao Arduino um circuito PLL. Desta maneira seria possível manter uma diferença de fase fixa entre os sinais de referência e de interesse. Este trabalho restringiu-se ao amplificador lock-in com sinal de referência gerado internamente e não realizou testes com um circuito PLL.

6 RESULTADOS OBTIDOS

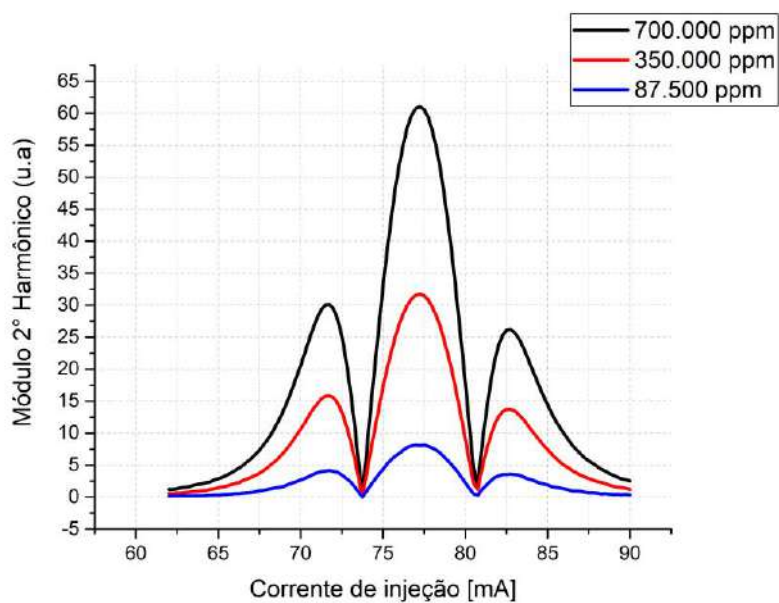
Neste capítulo são descritos os resultados obtidos em simulações de um experimento de WMS realizadas no software Microsoft Excel e em linguagem de programação Python. Além disso também são mostrados os resultados obtidos em experimentos WMS para detecção de Monóxido de Carbono, no qual foi usado o amplificador lock-in baseado no Arduino com sinal de referência gerado internamente implementado neste trabalho.

6.1 RESULTADOS OBTIDOS EM SIMULAÇÕES

Antes de se implementar o amplificador lock-in em termos práticos, foram realizadas simulações em software como o Microsoft Excel e em linguagem de programação Python com a finalidade de se validar o algoritmo desenvolvido, que está presente no Anexo I. As Figuras 30 e 31 ilustram o resultado da simulação de um experimento de WMS. Na ocasião o gráfico obtido foi o de módulo do segundo harmônico em função da corrente de injeção. Para essa simulação considerou-se uma célula de 78 cm de caminho óptico preenchida com determinadas concentrações de Monóxido de Carbono. O conversor analógico-digital (ADC) usado na aquisição dos sinais foi de 10 bits. A amplitude da modulação senoidal fornecida ao sinal do laser na entrada da célula espectrométrica foi de 5mA. Além disso a temperatura ambiente foi considerada constante.

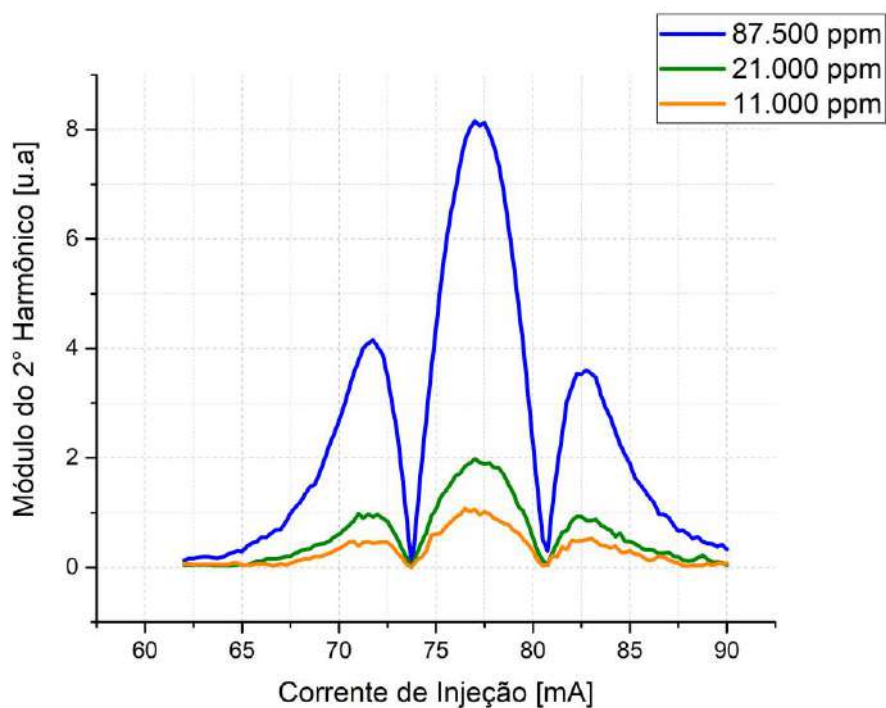
Apesar de o gráfico mostrado nas Figuras 30 e 31 estarem representados por uma linha, na simulação, entre o valor inicial e final de corrente DC, há 120 valores de corrente DC. O formato do gráfico foi o esperado. Experimentos realizados em (SOARES, 2010), (DE LIMA, 2019) (DE LIMA, 2017), (FONTANA; FILHO; URTIGA, 2007) obtiveram gráficos com o mesmo formato.

Figura 30 – Simulação de experimento de WMS para concentrações de 700000, 350000 e 87500 ppm



Fonte: O autor, 2021.

Figura 31 – Simulação de experimento de WMS para concentrações de 87500, 21000 e 11000 ppm



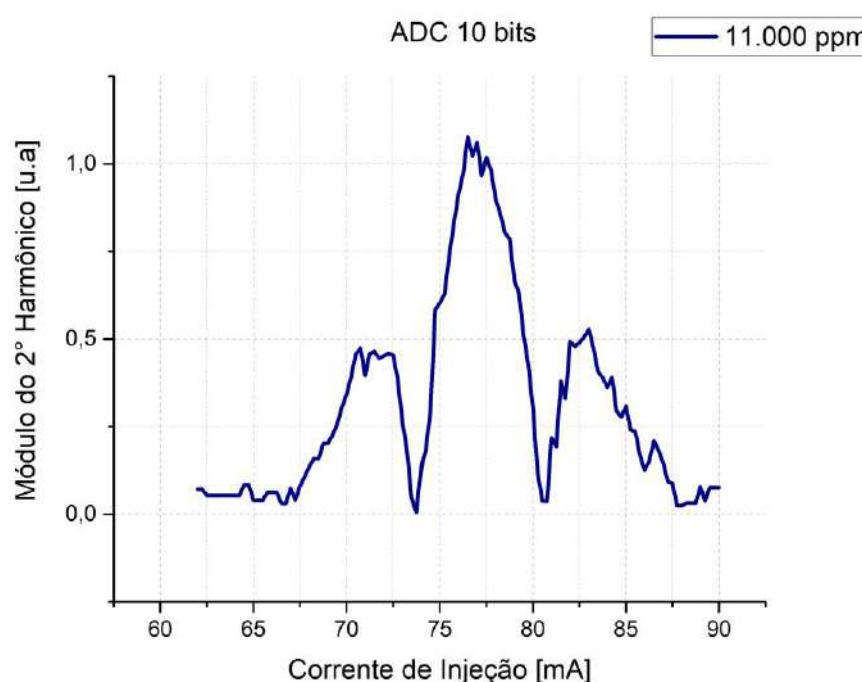
Fonte: O autor, 2021.

A partir dos gráficos obtidos na simulação é possível perceber que à medida que a concentração de gás no interior da célula diminui, o pico do módulo do segundo harmônico também diminui. Esse era o comportamento esperado.

Um ponto importante a ser comentando é sobre a qualidade do gráfico à medida que a concentração vai diminuindo. A Figura 32 mostra, exclusivamente, o gráfico para uma concentração de 11.000 ppm. É possível observar imperfeições se comparado aos gráficos cuja concentração é mais alta. Foi observado que essas imperfeições ocorreram devido à quantidade de bits do ADC. Ao se usar um ADC de 16 bits no lugar de um ADC de 10 bits, houve uma melhoria visível na qualidade de sinal. O Resultado da simulação usando um conversor analógico-digital de 16 bits está mostrado na Figura 33.

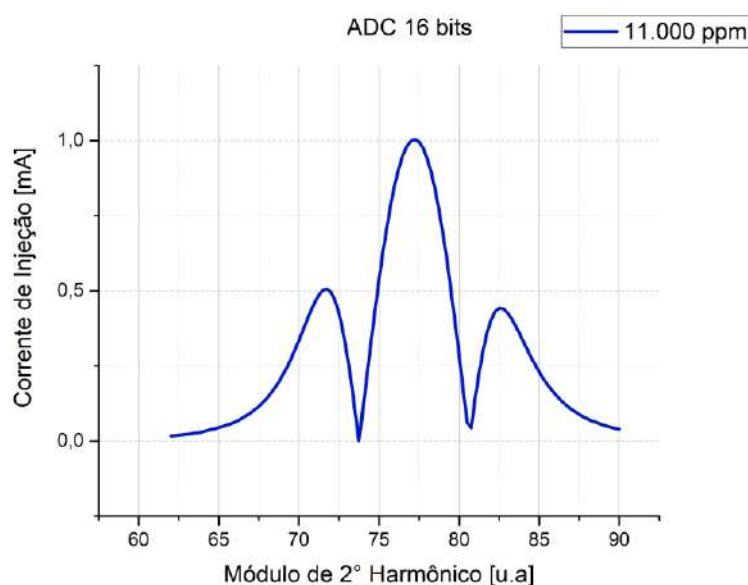
Nas simulações em software, usando um ADC de 16 bits, é possível obter o módulo do 1° e 2° harmônico para concentrações muito pequenas, abaixo dos 200 ppm por exemplo, sem que os gráficos percam o formato esperado. As imperfeições se mostram presentes e cada vez se tornam maiores à medida que a concentração de gás diminui, contudo, o formato do gráfico é mantido.

Figura 32 – Simulação do Módulo do 2° Harmônico para uma concentração de 11.000ppm e ADC de 10 bits



Fonte: O autor, 2021.

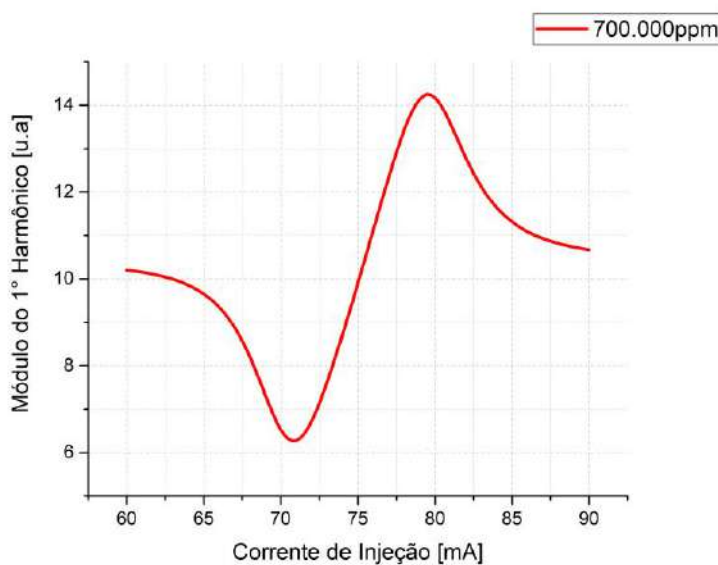
Figura 33 – Simulação do Módulo do 2º Harmônico para uma concentração de 11.000ppm e ADC de 16 bits



Fonte: O autor, 2021.

Outro gráfico gerado nas simulações em software foi o do 1º harmônico, que está mostrado na Figura 34. Esse gráfico foi obtido para uma concentração de 700.000 ppm e um ADC de 10bits. O valor está normalizado para ficar próximo da primeira dezena.

Figura 34 – Simulação do 1º Harmônico para uma concentração de 700.000 ppm



Fonte: O autor, 2021.

6.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS EXPERIMENTOS

Neste trabalho um amplificador lock-in baseado em um microcontrolador Atmega2560 e com sinal de referência gerado internamente foi implementado. Houve também a tentativa de se implementar o lock-in usando uma fonte externa como sinal de referência, contudo, não houve sucesso, e a hipótese para isso foi a não sincronização de fase/frequência do sinal de referência com o sinal de interesse. Como foi comentado no Capítulo 5, uma possível solução esse problema seria a incorporação ao projeto de um circuito PLL para garantir que a diferença de fase entre os sinais se mantivesse fixa e os sinais ficassem na mesma frequência. Sendo assim, todos os resultados obtidos na prática foram para o lock-in de referência interna.

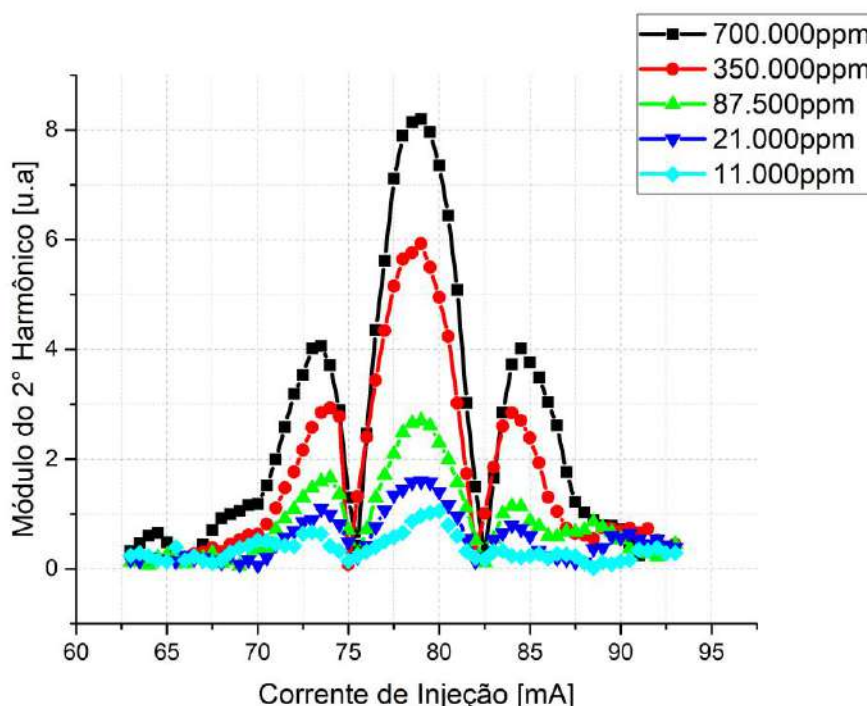
O cenário no qual o experimento foi realizado é bastante similar com o que foi feito na simulação em software. A célula espectrométrica usada para confinar o gás possuía um comprimento físico de 20 cm e um caminho óptico de 78,1 cm, o ADC usado pelo microcontrolador possuía 10 bits, a temperatura foi mantida constante pela fonte controladora durante toda operação e o gás usado foi o Monóxido de Carbono.

As medições começaram a ser feitas em uma concentração de gás Monóxido de Carbono (CO) a 70%, o que equivale a 700.000ppm. Essa era a concentração de gás na célula espectrométrica assim que ocorria o primeiro ciclo de enchimento. Durante todo o experimento a pressão de gás no interior da célula foi mantida em 1atm. Isso foi controlado através de manômetros de escala presentes no sistema de gás e de um vacuômetro.

Após a realização de uma varredura completa, um ciclo de diluição era feito. A cada ciclo de diluição a concentração de gás no interior da célula espectrométrica diminuía à metade do valor anterior. A diluição foi feita com gás Nitrogênio.

A Figura 33 ilustra o módulo do segundo harmônico em função da corrente de injeção para uma série de valores de concentração. É possível concluir que o resultado obtido no experimento coincide com o que foi obtido nas simulações em software. Os gráficos mostrados na Figura 35 e nas Figuras 30 e 31 possuem o mesmo formato.

Figura 35 – Módulo do 2º Harmônico para vários valores de concentração



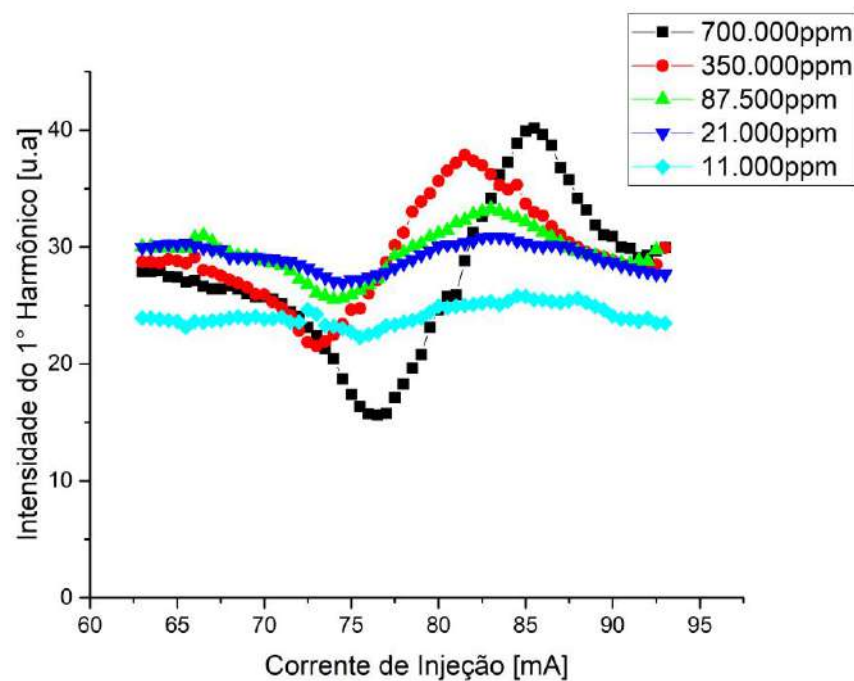
Fonte: O autor, 2021.

Sabe-se que o pico do módulo do segundo harmônico coincide com o ponto de máxima absorção do gás (SASAKI, 1996). Isso pode ser comprovado no experimento comparando o gráfico da Figura 30 com o resultado obtido na medição de absorção direta, que está mostrado na Figura 15. É possível constatar que o pico do módulo do segundo harmônico do experimento coincide com o ponto de máxima absorção, que está localizado, aproximadamente, em 77,5mA.

A Figura 36 ilustra o 1º harmônico para vários valores de concentração. Neste caso o formato do gráfico obtido também foi o esperado.

Para a obtenção desses gráficos de 1º e 2º harmônico foram lidos 20 períodos do sinal de interesse. No momento da elaboração do código há a possibilidade de fazer com que o algoritmo faça a integração baseado em uma determinada constante de tempo ou baseado em um número de períodos completos. Nesse trabalho o código fez a média usando 20 períodos completos. Como a frequência do sinal foi de 208Hz, isso daria uma constante de tempo de integração de aproximadamente 100mS caso a constante de tempo estivesse sendo usada como parâmetro para a realização da média/integração.

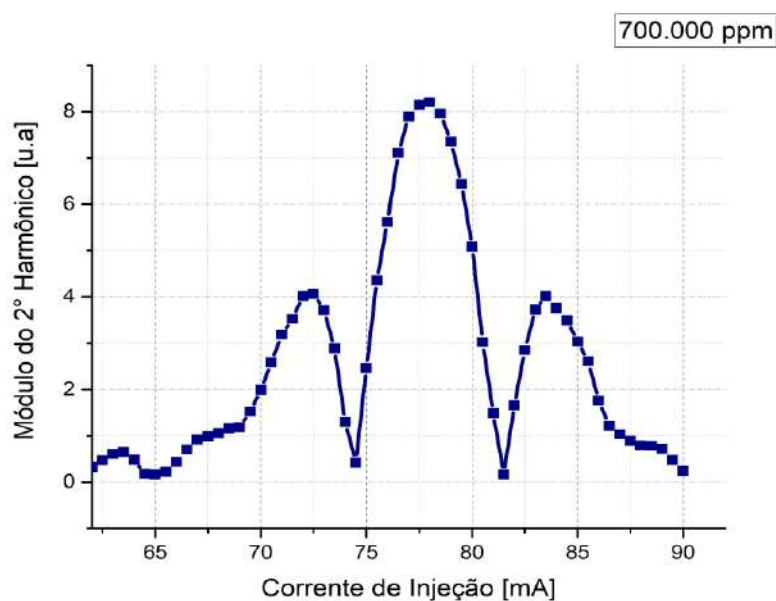
Figura 36 – Intensidade do 1° Harmônico para vários valores de concentração



Fonte: O autor, 2021.

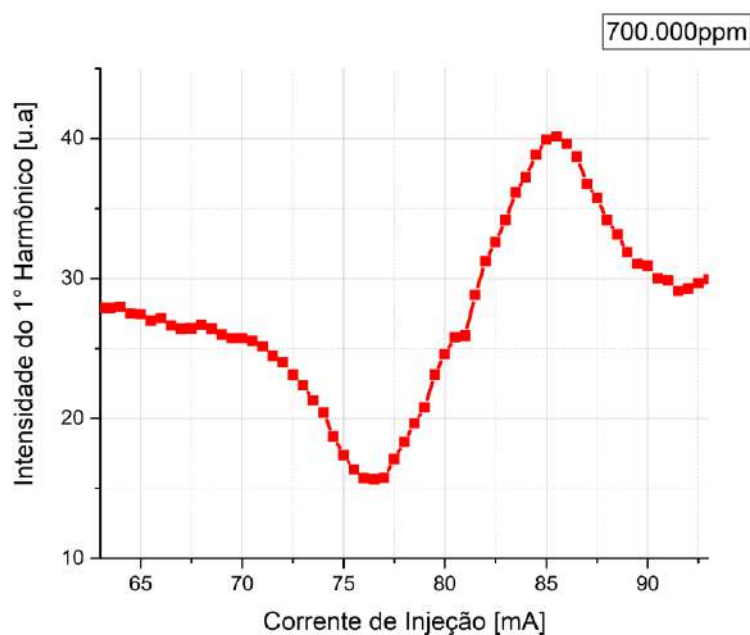
As Figuras 37 e 38 mostram, exclusivamente, os gráficos dos módulos de 2° e 1° harmônico para o caso do preenchimento inicial, onde há 700.000ppm de CO.

Figura 37 – Módulo do 2° Harmônico para 700.00ppm de CO



Fonte: O autor, 2021.

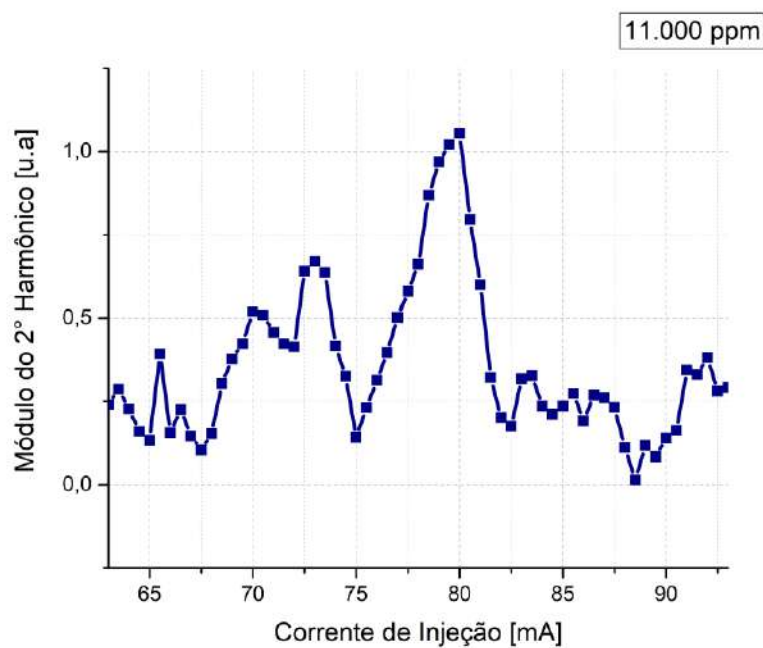
Figura 38 – Intensidade do 1º Harmônico para 700.00ppm de CO



Fonte: O autor, 2021.

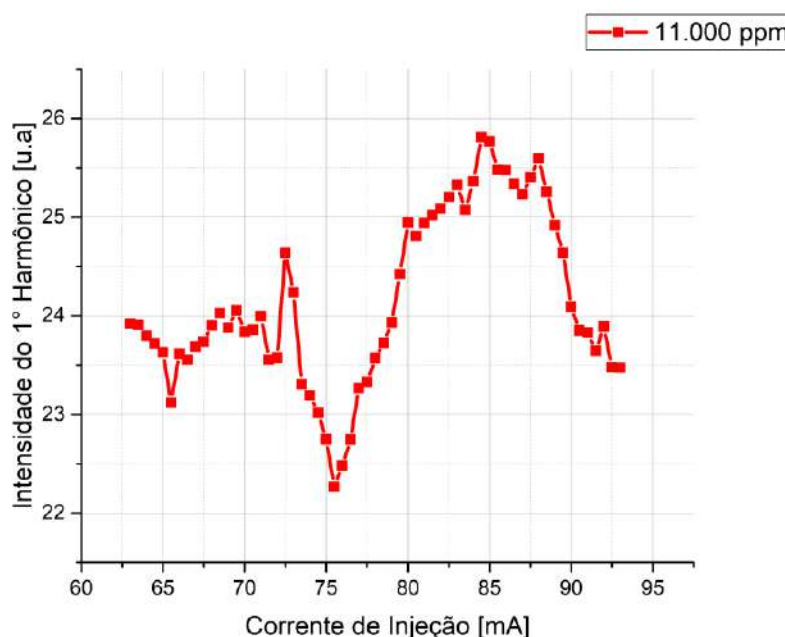
Já as Figuras 39 e 40 mostram os gráficos dos módulos de 2º e 1º harmônico após 6 diluições.

Figura 39 – Módulo do 2º Harmônico para 11.000 ppm de CO.



Fonte: O autor, 2021.

Figura 40– Intensidade 1° Harmônico para 11.000 ppm de CO.



Fonte: O autor, 2021.

Nessa etapa do processo a célula espectrométrica possui uma concentração de aproximadamente 11.000 ppm. Tanto na Figura 39 como na Figura 40 o formato do gráfico já não é similar ao esperado. No caso do módulo do 2º harmônico ainda é possível perceber que o gráfico possui um lóbulo principal, contudo já não se percebe os dois lóbulos secundários. O formato já está bem diferente se comparado às concentrações mais altas. No caso do 1º harmônico o primeiro vale foi fortemente modificado.

6.3 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Os resultados obtidos no experimento prático foram comparados com os resultados obtidos em simulações realizadas anteriormente em software. Dois pontos, em específico, foram observados:

- I. Valor de Pico do 2º Harmônico x Concentração do gás.

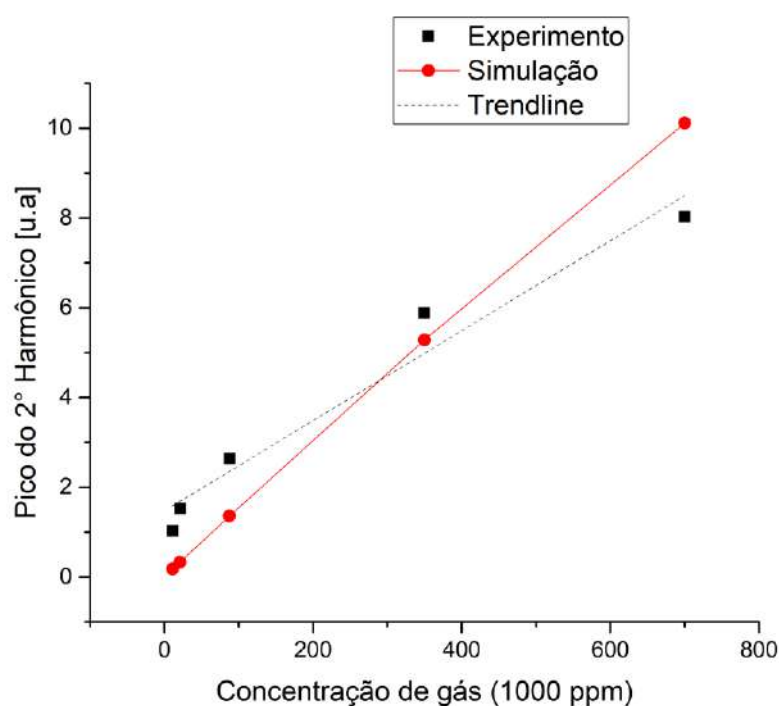
Quanto ao primeiro ponto é importante comentar que os gráficos obtidos nos experimentos práticos realizados em laboratório tiveram o mesmo comportamento que

os gráficos que foram obtidos nas simulações realizadas anteriormente em softwares, ou seja, o gráfico do módulo do 2º harmônico possui, em ambos os casos, um lóbulo principal com um pico maior e dois lóbulos secundários, e o gráfico do primeiro harmônico possui, também em ambos os casos, um vale e um pico.

A Figura 41 ilustra uma relação entre o valor de pico do módulo do 2º harmônico e a concentração de gás presente na célula espectrométrica. Nessa Figura a curva vermelha, que é referente aos resultados obtidos na simulação, foi normalizada através de um fator multiplicativo com o objetivo de possuir a mesma ordem de grandeza da curva preta, que é referente aos resultados obtidos no experimento e está indicada no gráfico como “trendline”. Essa curva trata-se de uma reta de tendência gerada a partir dos pontos quadrados pretos dispersos mostrados no gráfico.

Em ambos os casos é possível perceber que o aumento da concentração de gás no interior da célula resulta no aumento do valor do pico de 2º harmônico, o que mostra que simulação representa de maneira correta o experimento. A menor inclinação observada na reta preta está relacionada à capacidade prática limitada de ser detectar baixas concentração de gás.

Figura 41 – Valor de Pico 2º Harmônico x Concentração de Gás



Fonte: O autor, 2021.

II.Quantidade de bits do ADC.

O segundo ponto a ser comentado é sobre a quantidade de bits do ADC usado para a aquisição do sinal analógico. Esse valor tem interfere em todo o processamento lock-in, pois quanto maior a número bits do ADC, maior a resolução do sinal obtido. Nas simulações realizadas em software foi possível perceber através de inspeção visual nos gráficos das Figuras 32 e 33 que para uma concentração de 11000 ppm de Monóxido de Carbono o sinal obtido com um ADC de 10 bits apresentava irregularidades não encontradas no sinal obtido com um ADC de 16 bits. Essas irregularidades ocorreram devido a menor resolução do ADC de 10 bits.

Nos experimentos realizados nesse trabalho o ADC presente no microcontrolador usado possuía 10 bits. Isso significa que é possível aumentar a sensibilidade de medição do sistema sensor usando um hardware que possua um ADC de 16 bits.

III.Tempo de Processamento

O terceiro ponto importante que deve ser comentado é em relação ao tempo que o microcomputador gasta para realizar o processamento lock-in. Durante as simulações do experimento de WMS descritas em (LIMA, 2020), um PC comum, destinado a uso pessoal, com 6GB de memória RAM e processador Intel i5-3337u 1,8GHz gastou um tempo aproximado de 6,4 segundos para realizar os cálculos matemáticos de uma varredura completa. Apesar dessa estimativa de tempo não ser um parâmetro fixo, ou seja, pode variar em computadores com configuração semelhante, ela mostra a ordem de grandeza do tempo gasto nessa operação. E a partir disso, pode-se concluir que este é um tempo que pode ser considerado irrisório dado o cenário em que o sistema sensor é aplicado.

Já no experimento prático uma estimativa bastante conservadora é de que o tempo total para uma varredura completa mais o processamento lock-in seja de aproximadamente 10 minutos, onde a parte de processamento é responsável por 2% desse total. O tempo gasto para se realizar toda operação prática é um pouco maior devido aos processos de aquisição do sinal analógico e variação do sinal do laser. O valor exato do tempo gasto em um uma varredura completa não foi contabilizado devido à maneira manual que o experimento foi realizado.

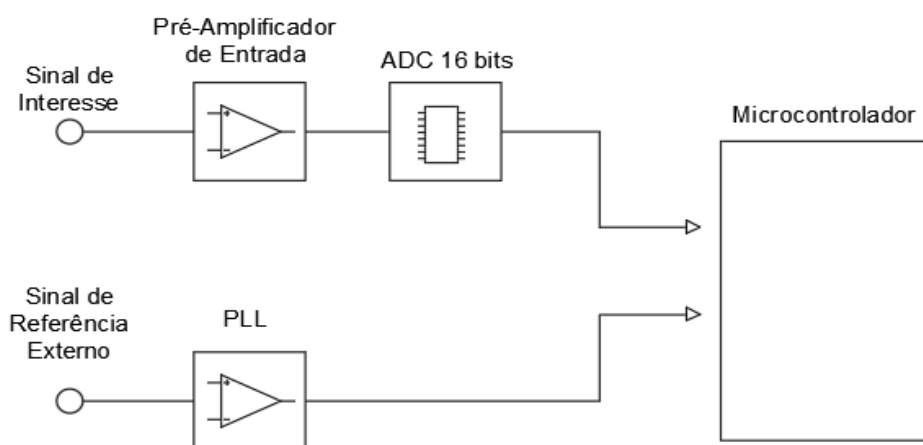
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou que é possível implementar um amplificador lock-in digital capaz de detectar componentes harmônicas usando microcontroladores de baixo custo. O domínio da técnica de processamento lock-in obtido nesse trabalho possibilitará o aprimoramento do Módulo de Controle e Aquisição (MCA) que está sendo desenvolvido por pesquisadores do LSI/LOPEL, de forma que o sistema sensor seja inteiramente produzido e desenvolvido no próprio laboratório.

O lock-in baseado no microcontrolador Arduino Mega foi testado em um experimento de WMS, no qual se detectou uma concentração de 11.000ppm de Monóxido de Carbono. Apesar do correto funcionamento, o lock-in não apresentou a sensibilidade desejada, o que impede sua utilização em campo para aplicações de DGA. Talvez, com a sensibilidade atual ela possa ser utilizado em outros experimentos, como por exemplo medição de defasagem entre sinais e outras medições de gases que não exija uma sensibilidade tão baixa.

Algumas melhorias podem ser implementadas para que se melhore a sensibilidade e se atinja o limite mínimo de detecção requisitado pelo DGA, como por exemplo uso de um pré-amplificador na entrada do sistema, uso de um conversor analógico-digital de 16 bits, implementação de um circuito PLL para tornar possível o uso de sinais de referência gerado externamente e elaboração de algoritmos de filtragem mais eficientes. A Figura 42 esboça as melhorias na qual poderá possibilitar a melhoria na sensibilidade do sistema.

Figura 42 – Proposta para trabalhos futuros



Fonte: O autor, 2021.

REFERÊNCIAS

ATMEL. *Datasheet ATmega2560*, 2007.

BASS, M. *Handbook of Optics*. Vol.1, 2nd ed. McGraw-Hill. 1995.

COGO, J. R.; OLIVEIRA, J. C.; ABREU, J. P. G. *Transformadores: Teoria e ensaios*. Edgar Blucher Ltda, 1984.

DEMTRODER, W. *Laser Spectroscopy*. Fourth. Springer, 2008.

DEVICES, A. *Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS) - MT085: Analogue Devices*. 2008.

FONTANA, E.; FILHO, J. F. M.; URTIGA, L. M. B. A. Feasibility of Modulation Spectroscopy Technique for Dissolved Gas Analysis of Insulating Oil of High Voltage Transformers. In: *2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, p. 229–233. 2007.

FONTANA, E. *Nota de Aula 4 do curso “Fundamentos de Óptica e Propagação da luz*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPE, 2018.

GERVASONI, G.; CARMINATI, M.; FERRARI, G. FPGA-based lock-in amplifier with sub-ppm resolution working up to 6 MHz. In: *2016 IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)*. p. 117–120. 2016.

GIORGIO, J. B. D. *Dissolved Gas Analysus Of Mineral Oil Insulating Fluids*. Disponível em: <<https://nttworldwide.com/pdf-archives/>>.

IEEE. C57.93-2019 - *IEEE Guide for Installation and Maintenance of Liquid-Immersed Power Transformers*. 2019.

IMMANUEL, J. M.; BHASKAR, P.; PARVATHI, C. S. Design and Development of Advanced Lock-in Amplifier and its Application. *Sensors & Transducers Journal*, v. 153, n. 6, p. 22–28. 2013.

KLOOS, G. *Applications of lock in in optics*. Washington, 2018.

KLUCZYNSKI, P. et al. Wavelength modulation absorption spectrometry — an extensive scrutiny of the generation of signals. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, v. 56, n. 8, p. 1277–1354, 2001.

LIMA, B. C. N. d. O.; FONTANA, E.; LIMA, R. A. de. Simulador de um Lock-in Digital para Aplicações em Detecção Harmônica de Linhas de Absorção. In: *MOMAG 2020 - 19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*. p. 613–618. 2020

LIMA, R. A. de. *Módulo Eletro-óptico de Detecção Harmônica de Múltiplos Gases Para Aplicações no Setor Elétrico*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

LIMA, R. A. de et al. Tailoring a spectral line detection system for applications in dissolved gas analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 293, p. 178–188, 2019.

LIMA, R. A. de; FONTANA, E. Development of a control and acquisition module for the harmonic detection of multiple spectral lines. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 28, n. 3, p. 35901, 2017.

MEADE, M. L. *Lock-in Amplifiers: Principles and Applications*. e-edition. 2013.

MILASCH, M. *Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante*. Edgar Blucher Ltda, 1984.

NETO, J. O. M. et al. Protótipo de um Controlador Multiespectral com Lasers de Realimentação Distribuída. In: *Anais MOMAG 2020 - 19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, p.341–345. 2020.

OGITA, S.; KOTAKI, Y.; ISHIKAWA, H. Direct Frequency Modulation of Semiconductor Laser. *Electronics and Communications in Japan*. Vol. 74, No. 2, 1991.

OPPENHEIN, A. V.; WILLISKY, A. *Sinais e Sistemas*. 2º. ed. Pearson, 2010.

RAHMANNURI, H.; RIVAI, M.; SARDJONO, T. A. Design of Digital Lock-In Amplifier for Low Concentration Gas Detection. In: *International Seminar on Intelligent Technology and Its Application*. p. 319–322. 2017.

RECOVERY, S. *Technical Note TN1003 - Digital Lock-In Amplifier - Signal Recovery*, 2005.

REID, J.; LABRIE, D. Second-harmonic Detection With Tunable Diode Lasers — Comparison of Experiment and Theory. *Applied Physics B*, v. 26, p. 203–210, 1981.

ROTHMAN, L. S.; SCHROEDER, J.; KUILIAN, T. “*Java Hitran Atmospheric Workstation Manual*”, 2004

SAHA, T. K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 10, n. 5, p. 903:917, 2003.

SANTOS, E. T. F. *Análise e Desenvolvimento de um Amplificador Lock-In Digital*. Dissertação, Universidade Federal da Bahia, 2002.

SASAKI, T. et al. Oil-filled cable surveillance system using newly developed optical fiber gas sensor. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 11, n. 2, p. 656–662, 1996.

SALEH, B. E.; TEICH, A. C. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, Inc., 1991. ISBN 0-471-83965-5.

SCHILF, S. et al. Wavelength Modulation Spectroscopy: combined frequency and intensity laser modulation. *Applied Optics*, Vol. 42, n. 33, 2003.

SCHULTZ, K. D. Phase-sensitive detection in the undergraduate lab using a low-cost microcontroller. *American Journal of Physics*, v. 84, n. 7, p. 557–561, 2016.

SOARES, V. H. *Otimização de um Sensor Óptico Para Detecção Específica de Gases Dissolvidos em Óleo de Transformador*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Pernambuco, 2010.

SOARES, V. H. *Caracterização de Transporte e Difusão Molecular por espectroscopia de Modulação de Comprimento de Onda e Aplicações*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Pernambuco, 2020.

THORLABS. *Laser Diode Combi Controller - ITC510/502 Operation Manual*, 2008.

ZHANG, C. et al. FPGA-based digital lock-in amplifier with high precision automatic frequency tracking. *IEEE Access*, v. 8, p. 123114 – 123122, 2020.

VIEIRA, L. P. *Guia de Utilização do Controlador Digital de Sinal TMS320F2835..* Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação), Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.

WENN, D. *Implementing Digital Lock-In Amplifiers Using the dsPIC® DSC*, 2007.