



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

RICARDO ATAÍDE DE LIMA

**MÓDULO ELETRO-ÓPTICO DE DETECÇÃO HARMÔNICA DE MÚLTIPLOS
GASES PARA APLICAÇÕES NO SETOR ELÉTRICO**

Recife, 2015.

RICARDO ATAÍDE DE LIMA

**MÓDULO ELETRO-ÓPTICO DE DETECÇÃO HARMÔNICA DE MÚLTIPLOS
GASES PARA APLICAÇÕES NO SETOR ELÉTRICO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Área de concentração: Fotônica

ORIENTADOR: EDUARDO FONTANA, PhD

Recife, 2015.

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

L732m Lima, Ricardo Ataíde de Lima.
Módulo eletro-óptico de detecção harmônica de múltiplos gases para aplicação no setor elétrico / Ricardo Ataíde de Lima. - Recife: O Autor, 2015.
113 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Eduardo Fontana, PhD.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2015.
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Espectroscopia. 3. Detecção Harmônica. 4. Sensor Óptico. 5. Sistemas Embarcados. 6. Análise de Gás Dissolvido. I. Fontana, Eduardo (Orientador). II. Título.

621.3 CDD (22. Ed.)

UFPE/BCTG/2015-72



Universidade Federal de Pernambuco
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
TESE DE DOUTORADO

RICARDO ATAÍDE DE LIMA

TÍTULO

**“MÓDULO ELETRO-ÓPTICO PARA DETECÇÃO HARMÔNICA
DE MÚLTIPLOS GASES PARA APLICAÇÕES NO SETOR ELÉTRICO”**

A comissão examinadora composta pelos professores: EDUARDO FONTANA, DES/UFPE; RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO, DES/UFPE; JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE; SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA, POLI/UPE e LEONARDO RODRIGUES ARAÚJO XAVIER DE MENEZES, DEE/UnB sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **RICARDO ATAÍDE DE LIMA APROVADO.**

Recife, 27 de fevereiro de 2015.

CECILIO JOSÉ LINS PIMENTEL
Coordenador do PPGEE

EDUARDO FONTANA
Orientador e Membro Titular Interno

SERGIO CAMPELLO OLIVEIRA
Membro Titular Externo

RENATO EVANGELISTA DE ARAUJO
Membro Titular Interno

**LEONARDO RODRIGUES ARAÚJO XAVIER
DE MENEZES**
Membro Titular Externo

JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO
Membro Titular Interno

*Aos meus pais: Zaldo e Gorett,
meu irmão Marcelo e a minha
amada esposa Nicole.*

AGRADECIMENTOS

Este agradecimento está dividido em duas partes. Primeiramente reporto os aspectos intelectuais, profissionais ou relacionados à academia. Na segunda parte me refiro à influência dos amigos e parentes na construção de minha personalidade.

Ao professor, orientador e amigo Eduardo Fontana pela imprescindível ajuda para a conclusão deste trabalho. Com iniciação científica, monitoria, mestrado e o doutorado são 10 anos de convivência e que perdure por muito mais tempo nossa parceria e amizade.

Ao professor Joaquim Ferreira Martins Filho, por ter cedido equipamentos necessários para realização dos experimentos.

Aos colaboradores do Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI do Grupo de Fotônica em especial a Caio Renan que forneceu apoio inicial no desenvolvimento experimental da tese e ao Leonardo Medeiros por auxiliar na conclusão deste trabalho.

A Companhia Hidroelétrica do São Francisco - Chesf em nome do engenheiro Djalma Santos.

À secretária Andréa Tenório por sempre estar disposta a resolver problemas, pendências e não deixar o departamento parar.

À CAPES pelo indispensável apoio financeiro, aos professores e funcionários do PPGEE por toda colaboração direta ou indireta prestada.

Ao Instituto Federal de Pernambuco - IFPE Campus Pesqueira em nome dos Professores Mário Monteiro, Valdemir Mariano, Manoel Henrique, Bruno Gomes e demais colegas de trabalho pelo apoio e por me ajudarem na medida do possível para que eu concluísse este trabalho. Aos alunos do Campus Pesqueira, meus sinceros agradecimentos pela paciência e torcida.

Aos meus pais Zaldo Ataide de Lima e Maria Gorett de Santana Lima, pelos conselhos, sermões e principalmente por me ensinar que os maiores bens que os pais podem dar aos filhos são a educação doméstica e acadêmica. Além de me ensinar a ser um cidadão de bem que sabe enxergar o outro. Ao meu irmão Marcelo Ataide de Lima pelo apoio incondicional e ao meu sobrinho Pedro, mesmo na sua inocência, sempre sorrir quando ver o tio, me mostrando o quanto é importante o convívio da família.

À minha amada esposa Nicole Louise Alves de Melo, por estar comigo desde a minha graduação e por ter acompanhado todo o meu crescimento profissional e também com quem dividi meus medos e angústias. Vejo em você uma companheira para partilhar tudo que a vida pode me oferecer pro resto da vida.

Aos amigos que adquiri nessa caminhada Allison Bezerra, Diego dos Passos, Thiago Campos, Larissa Trigueiros e principalmente ao Vladimir Homobono Soares, com quem convivo desde o início do meu mestrado e que sempre se mostrou um amigo leal, solícito, uma pessoa que se importa com o outro de uma forma como há muito tempo eu não via. A todos os citados, partilhamos nossos problemas, pessoais ou de ordem acadêmica, e principalmente comemoramos as vitórias de cada um de nós, já que aprendemos que é possível superar todas as dificuldades com trabalho árduo, se assim quisermos. Além disso, o que nos une é simplesmente a amizade sem nada em troca, coisa esta muito rara e que resgatei com vocês. Meus sinceros agradecimentos por vocês fazerem parte de minha vida.

*“Que vivas momentos interessantes
e sejas sempre observado por
aqueles que estão no poder.”
(Provérbio Chinês)
" Together we stand, divided we
fall" (Pink Floyd - Hey you)*

Resumo da tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**MÓDULO ELETRO-ÓPTICO DE DETECÇÃO HARMÔNICA DE MÚLTIPLOS
GASES PARA APLICAÇÕES NO SETOR ELÉTRICO**

RICARDO ATAÍDE DE LIMA

Fevereiro/2015

Orientador: Eduardo Fontana

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chaves: Espectroscopia. Detecção Harmônica. Sensor Óptico. Sistemas Embarcados.

Análise de Gás Dissolvido.

Número de Páginas: 98

RESUMO: O presente trabalho relata o desenvolvimento de um sistema eletro-óptico embarcado capaz de controlar simultaneamente dois lasers DFB para aplicações na monitoração do estado operacional de transformadores de alta tensão. Como etapa intermediária para o alcance desse objetivo, foi feito um estudo sistemático dos fatores que afetam a qualidade do sinal e o nível de ruído na detecção harmônica de linhas espectrais dos gases que surgem dissolvidos no óleo isolante desses equipamentos e que são indicadores de falhas em potencial. Para isso foi utilizado o gás Monóxido de Carbono como modelo e determinados os parâmetros do sistema de detecção harmônica de gases do Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI do Grupo de Fotônica da UFPE, que permitem maximizar a sensibilidade da técnica. Com respeito ao desenvolvimento do sistema embarcado, foi implementado um protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA), constituído de microcontrolador PIC18F4550, oscilador, conversores digital/analógicos, relés de estado sólido, lasers DFB e circuitos auxiliares. Um programa residente em computador foi desenvolvido para o ajuste de parâmetros operacionais de controle e aquisição de dados pelos componentes do sistema. Para verificar o desempenho do MCA foram realizadas análises do controle da faixa de variação de corrente e de temperatura de um dado laser DFB e a influência desses parâmetros na potência de saída e na resposta espectral. Com o sistema embarcado foi feita uma demonstração preliminar da capacidade do sistema na detecção de Monóxido de Carbono.

Abstract of Dissertation presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the Master degree in Electrical Engineering.

ELECTROOPTIC MODULE FOR THE HARMONIC DETECTION OF MULTIPLE GASES FOR APPLICATIONS IN THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

RICARDO ATAÍDE DE LIMA

February/2015

Supervisor: Eduardo Fontana

Concentration Area: Photonics.

Keywords: Spectroscopy. Harmonic Detection. Optical Sensor. Embedded System. Dissolved Gas Analysis.

Number of Pages: 98

ABSTRACT: This thesis describes the development of an electrooptic embedded system for the simultaneous control of two DFB lasers, for applications directed to the surveillance of operational conditions of high-voltage transformers. As an intermediate step to achieve this goal, a systematic study was made on the factors affecting the signal quality and the noise level in harmonic detection of spectral lines of the gases typically found dissolved in the insulating oil and indicative of potential faults. In the study, carbon monoxide was used as a model compound and the system parameters for maximum signal to noise ratio for harmonic detection were determined in the laboratory prototype of the Sensors and Instrumentation Laboratory - LSI – Photonics Group – UFPE. Regarding development of the embedded system, we implemented a prototype of the Control and Acquisition Module (CAM) composed of a PIC18F4550 microcontroller, oscillator, D/A converters, solid state relays, DFB lasers and auxiliary circuitry. A computer resident program has been developed for adjusting operating parameters of the acquisition and control system components. To check the CAM, performance analyses were carried out to determine the current and temperature ranges of a given DFB laser and the influence of these parameters on the output power and spectral response. With the embedded system a preliminary demonstration was made on the system capacity for the detection of carbon monoxide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista em corte de um transformador de potência. Figura extraída de [16].	6
Figura 2 - Desenho esquemático de um cromatográfico de gás. Figura extraída de [22].	9
Figura 3 - Exemplos de gases chave: (a) Etileno em óleo superaquecido (b) Monóxido de Carbono em Celulose Superaquecida, (c) Hidrogênio em eletrólise e (d) Acetileno em arco no óleo. Extraído de [2].	11
Figura 4 - Desenho ilustrativo do meio absorvedor.	17
Figura 5 - Função de distribuição para uma linha lorentziana.	18
Figura 6 - Secção transversal máxima de absorção para o Monóxido de Carbono ente 1 e 5 μm [11].	19
Figura 7 - Secção transversal máxima de absorção para o Monóxido de Carbono entre 1550 e 1600 nm [11].	20
Figura 8 - Esquema simplificado de um espectrômetro WMS.	21
Figura 9 - Dependência do coeficiente de transmissão e do sinal do segundo harmônico em função do comprimento de onda.	24
Figura 10 - Esquemático do sistema completo para monitoração de múltiplos gases dissolvidos em óleo de transformador.	27
Figura 11 - Diagrama esquemático do sistema de medição de detecção harmônica do LSI - Grupo de Fotônica.	31
Figura 12 - (a) Tela inicial do programa de controle do sistema de medição de gases. (b) Tela de inserção de informações do experimento.	33
Figura 13 - Células espectrométricas utilizadas no sistema de detecção harmônica do LSI.	34
Figura 14 - Potência óptica do laser DFB em função da corrente injetada para vários valores da resistência do termistor.	36
Figura 15 - Comprimento de onda do laser DFB em função da corrente injetada para vários valores da resistência do termistor.	36
Figura 16 - Máximo do segundo harmônico em função do índice de modulação.	38
Figura 17 - Simulação do perfil do segundo harmônico em função do índice de modulação.	39
Figura 18 - Fotografia do circuito de gás do LSI. Extraído de [13].	41
Figura 19 - Perfis do sinal de fase do segundo harmônico na célula espectrométrica de 130 cm com diferentes concentrações de CO.	43

Figura 20 - Perfil do sinal de fase do segundo harmônico na célula espectrométrica de 130 cm preenchida com N ₂	43
Figura 21 - Perfis da fase do segundo harmônico com a célula espectrométrica de 130 cm preenchida com diferentes diluições de CO.	44
Figura 22 - Perfis do módulo do segundo harmônico com CO a célula espectrométrica de 130 cm preenchida com diferentes diluições de CO, corrigindo os sinais de background de fase e quadratura conforme a Equação 3.16.....	45
Figura 23 - Gráfico da absorção de CO na célula espectrométrica de 130 cm, preenchida com 35000 ppm.	47
Figura 24 - Desenho ilustrativo do efeito de Etalon na janela óptica com espessura d	48
Figura 25 - Simulação do ruído espacial na célula espectrométrica para os ângulos de incidência do feixe do laser DFB iguais a: (a) 40 graus (b) 50 (graus), (c) 55,293 graus (d) 60 graus.	49
Figura 26 - Fotografia da célula espectrométrica de 25,4 cm [12].	50
Figura 27 - Gráfico da absorção de CO na célula espectrométrica de 25,4 cm.	52
Figura 28 - Sinais de <i>background</i> em fase e em quadratura do segundo harmônico na célula espectrométrica de 25,4 cm.	52
Figura 29(a),(b) e (c) - Gráficos do perfil do módulo do segundo harmônico de CO na célula espectrométrica de 25,4 cm. O segundo e terceiro gráficos representam uma amplificação do primeiro gráfico para melhor visualização dos perfis medidos.	53
Figura 30 - Gráfico do valor de máximo do módulo do segundo harmônico em função da concentração de CO para a célula espectrométrica de 25,4 cm.....	55
Figura 31 - Gráfico do valor do máximo do módulo do segundo harmônico, em função da concentração de CO para a célula de 25,4 cm, na faixa entre 2780 e 86 ppm.	56
Figura 32 - Diagrama esquemático do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA) O <i>lock-in</i> está suprimido.	61
Figura 33 - Desenho do LDTC0520. Figura extraída de [64].	62
Figura 34 - Fotografia da placa de circuito que contém o AD9833 e demais componentes...	63
Figura 35 - <i>Layout</i> de parte do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA).	64
Figura 36 - Desenho dos circuito de emulação do (a) laser, (b) termistor e (c) peltier.	65
Figura 37 - <i>Layout</i> da placa de multiplexação de dois laser DFB.	66
Figura 38 - Desenho do circuito que fornece corrente aos relés de estado sólido.....	67
Figura 39 - Fluxograma do programa residente do microcontrolador.	69

Figura 40 - Diagrama das conexões SPI entre o microcontrolador e os periféricos.....	70
Figura 41 - Tela inicial do aplicativo de controle do MCA pelo PC.	73
Figura 42 - Gráfico do valor da corrente no laser fornecida pelo sistema do LSI, pelo MCA e o valor selecionado pelo usuário em função do número de interações.	76
Figura 43 - Tempo de resposta do controlador de temperatura do LDTC0520, quando a temperatura selecionada é igual a 10 k Ω e o termistor está ajustado para 8 k Ω	78
Figura 44 - Gráfico do valor da resistência do circuito emulador e do termistor do encapsulamento do laser de 1568 nm, medidos pelo sistema do MCA, em função do tempo.	78
Figura 45 - Gráfico da saída do oscilador AD9833 para uma frequência de 1 kHz, selecionada pelo usuário.....	80
Figura 46 - Gráfico do espectro do sinal de saída do oscilador AD9833 para uma frequência de 1 kHz.	80
Figura 47 - Gráfico do espectro do sinal de saída do laser DFB de 1572,5 nm, obtidos a partir do laser conectado no sistema do LSI, diretamente no LDTC0520 e na placa multiplexada do MCA.....	82
Figura 48 - Gráfico do espectro do sinal de saída do laser DFB de 1654 nm, obtidos a partir do laser conectado no sistema do LSI, diretamente no LDTC0520 e na placa multiplexada do MCA.....	82
Figura 49 - Gráfico da potência do laser DFB de 1654 nm, ajustado com a temperatura de 10 k Ω em função da corrente injetada no laser obtidos pelo sistema do LSI, do LDTC0520 e do MCA.....	83
Figura 50 - Gráfico da potência do laser DFB de 1654 nm, ajustado com a temperatura de 10 kR em função da corrente injetada no laser obtidos pelos sistemas do LSI, do LDTC0520 e do MCA, após a correção no DAC.....	84
Figura 51 - Gráfico do comprimento de onda do laser DFB de 1572,3 nm, ajustado para a temperatura em 10 k Ω , obtidos pelo sistema do LSI, do LDTC0520 e do MCA em função da corrente injetada.....	85
Figura 52 - Gráfico do comprimento de onda do laser DFB de 1654 nm, ajustado para a temperatura em 10 k Ω , obtidos pelo sistema do LSI, do LDTC0520 e do MCA em função da corrente injetada.....	85
Figura 53 - Gráfico da absorção na célula espectrométrica de 25,4 cm preenchida de 700000 ppm de CO utilizando o sistema do LSI e o MCA.	87
Figura 54 - Gráficos do módulo do segundo harmônico obtidos pelo sistema do LSI e no MCA na célula espectrométrica de 25,4 cm preenchida com 700000 ppm de CO.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela I - Limite de concentração de gases dissolvidos em ppm [7].	9
Tabela II - Gases monitorados pelo <i>Serveron</i> e suas respectivas concentrações mínimas [27].	14
Tabela III - Parâmetros das três linhas de CO mais próximo do comprimento de onda central do laser.	37
Tabela IV - Parâmetros usados para simulações.	38
Tabela V - Banda equivalente do ruído para um filtro de <i>Butterworth</i> até a quarta ordem para diversos valores de tempo de integração.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO DO ESTADO OPERACIONAL DE TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO	5
2.1	Transformador de potência e processo de degradação do óleo isolante.....	6
2.2	Análise de gases dissolvidos em óleo isolante.....	8
3	SISTEMAS COMERCIAIS PARA MEDIÇÃO DE GASES E DETECÇÃO HARMÔNICA DO ESPECTRO MOLECULAR	12
3.1	Sistemas comerciais para medição de gases	13
3.2	Instrumentação óptica para detecção de gases.....	15
3.2.1	Princípios básicos de espectroscopia óptica	15
3.3	Detecção harmônica do espectro molecular	21
3.3.1	Redução do ruído pelo amplificador <i>lock-in</i>	23
3.3.2	Sinal de <i>Background</i>	25
3.4	Proposta de sistema eletro-óptico para detecção harmônica de múltiplas linhas de absorção	26
4	EXPERIMENTOS PRELIMINARES PARA DETECÇÃO ESPECÍFICA DE MONÓXIDO DE CARBONO	30
4.1	Sistema de Detecção Harmônica do Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI.....	31
4.2	Sintonia do laser DFB.....	35
4.3	Índice de modulação.....	37
4.4	Parâmetros selecionáveis do amplificador <i>lock-in</i>	39
4.5	Circuito de gás do LSI.....	40
4.6	Detecção harmônica de CO na célula espectrométrica de 130 cm.....	42
4.6.1	Análise do grau de interferência de janela óptica em medidas de absorção.....	46
4.7	Detecção harmônica de CO na célula espectrométrica de 25,4 cm.....	50
5	DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO MÓDULO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO (MCA)	58
5.1	Desenvolvimento do <i>hardware</i> do MCA	60
5.2	Programa residente do microcontrolador e de aquisição de dados.....	67
6	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO DO MÓDULO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO ..	74
6.1	Variação de corrente com o circuito de emulação do laser.....	75

6.2	Sistema de controle de temperatura do MCA	76
6.3	Oscilador.....	79
6.4	Experimentos com a placa de multiplexação de lasers DFB	81
6.5	Experimentos preliminares de absorção e detecção harmônica com o MCA	86
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	89
7.1	Conclusões	90
7.2	Trabalhos futuros.....	92
	REFERÊNCIAS	93

1. INTRODUÇÃO

O transformador de potência é um dos equipamentos de maior importância de uma subestação de energia elétrica. Falhas de operação nesse equipamento podem afetar a confiabilidade e estabilidade do sistema elétrico, ocasionando a inoperância de cargas residenciais e de setores estratégicos, como por exemplo hospitais, agências bancárias entre outras. Além disso, a empresa concessionária de energia responsável pelo equipamento inoperante pode ser penalizada por meio de multas, intervenção administrativa, revogação de autorização entre outros de acordo com a Resolução 63/2004 da ANEEL [1].

Esses transformadores, assim como outros equipamentos de potência utilizados em uma subestação, como por exemplo disjuntores, religadores e chaves elétricas, utilizam o óleo mineral com as funções principais de isolante e refrigerante. Para isolar, o óleo isolante deve ser isento de umidade e contaminantes. Para refrigerar, deve possuir baixa viscosidade e baixo ponto de fluidez para facilitar sua circulação. Além disso, a partir da análise dos gases dissolvidos no óleo isolante, decorrentes de sua degradação e do papel celulose utilizado no enrolamento das bobinas localizadas na parte ativa desses transformadores, é possível inferir indiretamente o estado de degradação desses equipamentos de potência [2].

Diversas técnicas de manutenção preventiva são utilizadas para avaliar a condição de operação dos transformadores de potência. Entre elas, pode-se citar o monitoramento da temperatura da parte ativa, análise da tensão/corrente de operação e a avaliação de gases dissolvidos no óleo isolante do equipamento a partir da técnica DGA (do termo em inglês *Dissolved Gas Analysis*) [3], que geralmente se baseia na técnica de cromatografia gasosa e requer a extração de uma amostra do óleo para análise em laboratório [4-6]. Por causa do aquecimento da parte ativa decorrente das perdas dielétricas do núcleo e também por pequenas descargas ali existentes, ocorre a quebra das cadeias moleculares do óleo e papel celulose. Como produto dessas reações, há um incremento nas concentrações de diferentes gases. Pequenas descargas elétricas geram H_2 , CO e CO_2 . Com o aumento da taxa de geração desses subprodutos, descargas de alta energia se manifestam, gerando um acréscimo na concentração de outros gases como CH_4 e C_2H_2 [7].

Do ponto de vista de instrumentação, a técnica DGA utilizada no setor elétrico apresenta alguns inconvenientes. Os cromatógrafos utilizados são equipamentos sensíveis, pesados e devem ser acondicionados em laboratórios específicos, localizados geralmente na sede das concessionárias de energia. Assim sendo, o óleo isolante extraído de transformadores de potência residente a centenas de quilômetros da sede pode demorar dias ou até mesmo

semanas para ser analisado. Nessas situações, o resultado obtido da análise cromatográfica desse óleo isolante não representa a real situação do estado de operação do transformador, além de ser uma tarefa custosa com demanda de mão de obra especializada.

Para permitir a obtenção de diagnósticos mais rápidos e precisos nesses equipamentos, vem sendo desenvolvido no Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI do Grupo de Fotônica - Dep. de Eletrônica e Sistemas - UFPE, em parceria com a Chesf (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), um sistema de monitoração óptica remota do estado operacional de transformadores de alta tensão, com capacidade de detecção simultânea de quantidades diminutas de 4 gases dissolvidos, além do vapor d'água, representativos do estado operacional do equipamento sob teste. O sistema, em sua concepção final é composto por uma ou mais cabeças sensoras instaladas nos transformadores de uma subestação, *link* de fibra óptica entre uma sala de comando e as cabeças sensoras, e um módulo de controle e aquisição (MCA) gerenciado por *software* embarcado que permite a disponibilização dos dados para a *intranet* da empresa. A técnica proposta para o sensoriamento de gases emprega o princípio de detecção harmônica do espectro, que utiliza lasers de realimentação distribuída (DFB – *Distributed Feedback*) em diferentes comprimentos de onda, com cada comprimento de onda ajustado para o centro da linha de absorção do gás de interesse.

Como forma de demonstrar a viabilidade de implementar a versão final do controlador projetado para compor o sistema sensor em desenvolvimento no LSI, o foco desta Tese é implementar um MCA capaz de controlar mais de um laser DFB para detecção simultânea de mais de uma substância de interesse no projeto. O sistema tem como característica principal o emprego de uma única fonte de corrente e de temperatura para o controle simultâneo dos lasers DFB do MCA. O módulo é também composto por conversores digitais/analógicos, oscilador, relés de estado sólido, e demais dispositivos que permitam selecionar e controlar os lasers DFB, além de viabilizar experimentos de detecção harmônica de forma autônoma. Uma vez implementada essa versão reduzida do MCA, ela pode ser expandida, com uma simples extensão do projeto, para o controle de cinco lasers DFB conforme projetado para o sistema em desenvolvimento no LSI.

Como metas intermediárias visando o alcance desse objetivo, foram realizados os seguintes estudos de natureza teórica e experimental:

- utilização do sistema de medição de gases desenvolvido por pesquisadores do LSI para estudos de desempenho de duas células espectrométricas com o monitoramento do Monóxido de Carbono, CO, a fim de caracterizar a instrumentação óptica do sistema embarcado;
- análise dos efeitos de modo de cavidade e descrição das estratégias de aumento de sensibilidade dos limites de detecção de CO nas respectivas células espectrométricas;
- projeto e implementação do protótipo do MCA, capaz de controlar dois lasers DFB, incluindo o sistema embarcado, programa residente do microcontrolador e programa de inserção e aquisição de informações e
- análise de desempenho do protótipo do MCA.

Esta Tese está organizada em sete capítulos, incluído esta introdução. O Capítulo 2 descreve em linhas gerais o processo de degradação do óleo isolante, além de relatar o procedimento utilizado pela maioria das concessionárias de energia do Brasil para realizar manutenções preventivas. O Capítulo 3 descreve os principais equipamentos disponíveis comercialmente para monitoração remota de gases, além de técnicas ópticas relatadas na literatura para detecção de gases, com ênfase na técnica de detecção harmônica do espectro molecular e a proposta do sistema eletro-óptico embarcado. O Capítulo 4 apresenta a instrumentação existente no LSI, além dos resultados dos experimentos de detecção harmônica, estratégias de aumento de sensibilidade e discussão dos resultados obtidos. O Capítulo 5 descreve em detalhes o projeto do protótipo do MCA. O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos com a análise de desempenho do MCA. O Capítulo 7 descreve as conclusões e proposta de trabalhos futuros.

2. TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO DO ESTADO OPERACIONAL DE TRANSFORMADORES DE ALTA TENSÃO

Este capítulo disserta sobre os métodos de investigação do estado de operação de transformadores de potência. Esses métodos são amplamente aplicados na grande maioria das concessionárias de energia e se baseia na técnica DGA.

2.1 Transformador de potência e processo de degradação do óleo isolante

O transformador de potência é um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos, sem mudança de frequência [14]. Os principais componentes do transformador são: núcleo, constituído de material ferro-magnético e também enrolamentos primários e secundários [14-16]. Os componentes citados são denominados de parte ativa do transformador, conforme pode ser visualizado na Figura 1. A parte ativa é envolvida por um tanque de metal que não possui contato com o meio externo. Associado externamente ao tanque estão conectados, por exemplo, o tanque de expansão de óleo, os radiadores, buchas e o sistema de controle e proteção.

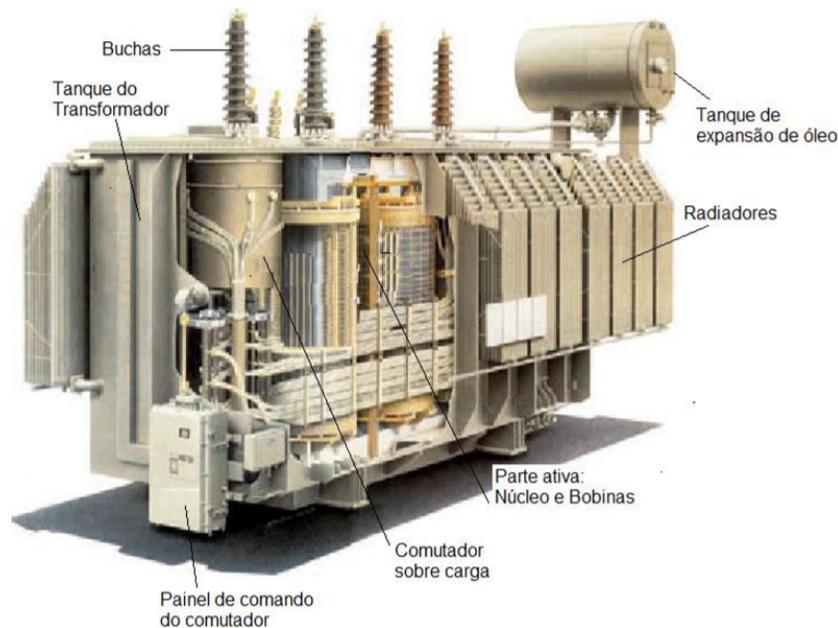


Figura 1 - Vista em corte de um transformador de potência. Figura extraída de [16].

Esses equipamentos utilizam óleo mineral isolante que garante o isolamento elétrico e a refrigeração das partes internas do transformador através da troca de calor com a estrutura externa. O óleo mineral isolante, aplicado em transformadores de potência é regulamentado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível - ANP, através da resolução ANP Nº36 [17]. Nessa norma, estão especificadas características físicas do óleo como, por exemplo, o ponto de fulgor, tensão superficial, viscosidade cinemática entre outras. O processo de deterioração do óleo mineral está ligado principalmente ao processo de envelhecimento e contaminação do óleo. Como consequência desse processo, outras substâncias são produzidas, as quais também contribuem para continuidade do envelhecimento.

Os principais mecanismos de envelhecimento e degradação do óleo e também da degradação do papel celulose dos transformadores são [2] [18]:

- **Hidrólise:** mecanismo de quebra de molécula de água presente no óleo isolante decorrente da elevação da temperatura do óleo, gerando compostos ácidos e gases.
- **Pirólise:** reação que rompe a estrutura molecular do óleo e do papel pela ação de altas temperaturas, provenientes de descargas elétricas.
- **Oxidação:** reação entre o oxigênio e hidrocarbonetos instáveis presentes no óleo. Concomitante com as variações de temperatura, reações químicas proporcionam formações de novas moléculas de hidrocarbonetos, gases, entre outros compostos químicos.

O foco deste trabalho é a detecção simultânea de múltiplos gases que são produzidos pela degradação do óleo isolante e papel celulose. Basicamente são produzidos dois tipos de gases [19]:

- **Óxidos de Carbono:** Monóxido de Carbono (CO) e o Dióxido de Carbono (CO₂)
- **Hidrocarbonetos e Hidrogênio:** Metano (CH₄), Etano (C₂H₆), Etileno (C₂H₄), Acetileno (C₂H₂) e Hidrogênio (H₂).

A degradação do óleo e da celulose provoca no transformador o surgimento de fenômenos elétricos, como por exemplo, o efeito corona, descargas parciais, e arcos elétricos associados a falhas no transformador de baixa, média e alta intensidade, respectivamente [4-

7]. Cada efeito elétrico está associado com a presença de um determinado gás ou conjunto de gases dissolvidos no óleo do transformador [19]. Uma das principais características do óleo isolante, além do resfriamento e isolamento térmica, é funcionar como um portador de informações do estado geral de conservação do transformador. Portanto, analisar a presença e concentração dos gases dissolvidos é fundamental para aplicação de manutenções preventivas [18].

2.2 Análise de gases dissolvidos em óleo isolante

A análise de gases dissolvidos (DGA) é um dos principais métodos de diagnóstico aceito por concessionárias de energia para identificação de falhas incipientes pelo setor elétrico em todo mundo [2], [18]. Essa análise é capaz de detectar e classificar os gases dissolvidos no óleo em concentrações diminutas e depois, a partir de diferentes critérios normatizados, identificar a provável causa de ocorrência de falha em transformadores de potência.

A identificação dos gases dissolvidos no óleo isolante é feita a partir de um cromatógrafo. A Figura 2 mostra o desenho esquemático do equipamento. A cromatografia gasosa consiste na análise físico-química por separação de compostos químicos. A separação ocorre quando, na entrada de um tubo, conhecido como coluna, é injetado um volume conhecido da amostra de gás em análise. Além disso, é realizado um processo de agitação e aquecimento para extrair o gás dissolvido no óleo e em seguida essa mistura de gases é inserida no cromatógrafo. Um gás inerte, denominado de gás de arraste, movimenta a amostra nas paredes da coluna. A vazão de moléculas que fluem ao longo da coluna depende da força de adsorção que, por sua vez, depende do tipo de molécula.

Uma vez que cada tipo de molécula tem uma vazão diferente, os vários componentes da amostra são separados ao fluírem ao longo da coluna, com cada gás tendo a ele associado um dado tempo de retenção na coluna antes de emergir dela. Um detector, localizado na saída da coluna, determina a quantidade de gás para cada tempo de retenção e conseqüentemente também o identifica [2] [20-22].

As concentrações dos gases comumente são dadas em partes por milhão em DGA, sendo definidas como [23]

$$v(\text{ppm}) = \frac{V_{\text{gás}}}{V_{\text{óleo}}} 10^6, \quad (2.1)$$

em que o volume em partes por milhão, $v(\text{ppm})$, do gás específico é igual ao volume ocupado pelo gás, $V_{\text{gás}}$, em condições normais de temperatura e pressão (CNTPT) dividido pelo volume do óleo que contém o gás.

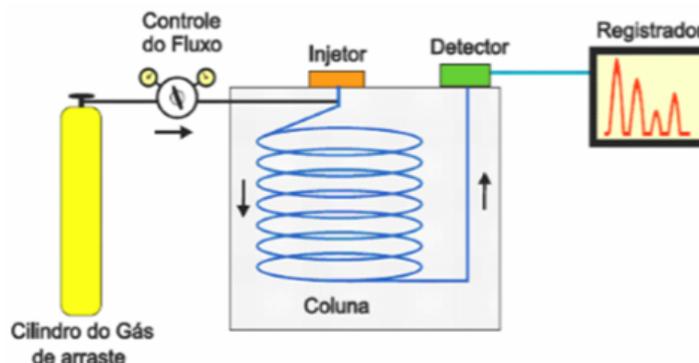


Figura 2 - Desenho esquemático de um cromatográfico de gás. Figura extraída de [22].

A partir da detecção da presença e concentração dos gases obtidos pelo cromatógrafo, a interpretação dos dados cromatográficos baseia-se na análise da concentração dos gases dissolvidos, com o objetivo de encontrar anormalidades no processo natural de degradação da isolação. A interpretação e o diagnóstico são realizados por meio de normas internacionais padronizadas pelo IEEE [7]. Apesar da existência desses padrões, devem ser levados em consideração outros parâmetros tais como idade, fabricante, condições operacionais, tipo de óleo isolante e histórico de manutenção do transformador [2].

A norma IEEE utiliza uma rotina de avaliação que compara os valores de concentração dos Gases Combustíveis Dissolvidos Totais (GCDT) e as concentrações individuais de cada gás com valores estabelecidos estão indicados na Tabela I.

Tabela I - Limite de concentração de gases dissolvidos em ppm [7].

Condição	<i>Limites inferiores de concentração dos gases chave em ppm</i>							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	GCDT
1	100	120	1	50	65	350	2500	720
2	101-700	121-400	2-9	51-100	66-100	351-570	2500-4000	721-1920
3	701-1800	401-1000	10-35	101-200	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630

As quatro condições listadas na Tabela I definem os seguintes indicadores

- **Condição 1:** indica que o transformador está operando de forma satisfatória e que não há necessidade de uma investigação.
- **Condição 2:** indica que os níveis de gases combustíveis estão acima do normal, o que requer investigação.
- **Condição 3:** indica que o óleo está com elevado nível de degradação e que medidas devem ser tomadas para recuperar o transformador.
- **Condição 4:** indica que o estado de degradação do óleo é excessivo e que a continuidade da operação pode danificar o transformador.

Além da análise do GCDT, a norma indica a aplicação de métodos de investigação. Os métodos apresentados pelo IEEE são: Método do Gás Chave, Método da Razão de Doernenbug e o Método da Razão de Rogers [7]. A Companhia Hidrelétrica do São Francisco, Chesf, e demais concessionárias de energia do Brasil utilizam, em quase sua totalidade, o Método do Gás Chave como método de investigação. Esse método simplifica a análise e a identificação da falha, pois leva em consideração que cada tipo de falha produzirá, em maior concentração percentual, um gás combustível específico, e assim apresentará um padrão de concentração percentual para cada falha. O gás combustível que identifica o padrão é chamado de Gás Chave. Esse método permite diagnosticar quatro tipos de falhas que podem ser desenvolvidas em transformadores a óleo isolante. As falhas indicadas são:

1. **Superaquecimento de óleo.** É uma falha térmica e o gás chave dessa falha é o Etileno (C_2H_4), uma vez que se encontra em maior proporção. Na sequência, com menor concentração, estão os gases Etano (C_2H_6), Metano (CH_4) e o Hidrogênio (H_2), conforme pode ser verificado na Figura 3(a).
2. **Superaquecimento do papel isolante.** A degradação do papel isolante está diretamente relacionada com o aumento de temperatura, que resulta na produção do Monóxido de Carbono (CO), que é o gás chave para essa falha, com geração também do Dióxido de Carbono (CO_2), conforme pode ser verificado na Figura 3(b).
3. **Eletrólise.** A decomposição eletrolítica da água ou a decomposição da água com a ferrugem resulta na formação de grandes quantidades de Hidrogênio (H_2), com pequenas quantidades dos outros gases combustíveis, conforme pode ser visualizado na Figura 3(c).

4. Arco Elétrico. São descargas elétricas de intensidade e duração bem superiores em comparação com as descargas parciais [24]. O gás chave desta falha é o Hidrogênio (H_2) e em menor proporção o Acetileno (C_2H_2), conforme pode ser visualizado na Figura 3(d).

No próximo capítulo são descritos os principais sistemas comerciais utilizados para determinar a concentração de gases e a instrumentação envolvida na detecção de gases com o emprego da técnica de detecção harmônica do espectro molecular, utilizada neste trabalho.

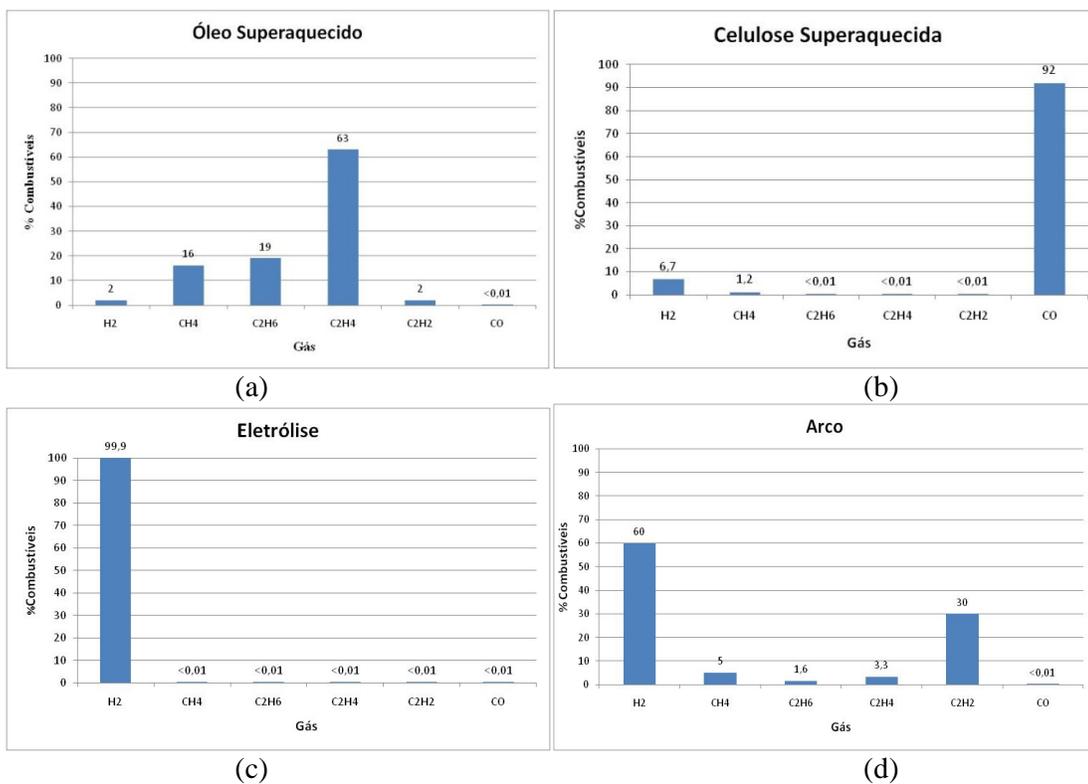


Figura 3 - Exemplos de gases chave: (a) Etileno em óleo superaquecido (b) Monóxido de Carbono em Celulose Superaquecida, (c) Hidrogênio em eletrólise e (d) Acetileno em arco no óleo. Extraído de [2].

3. SISTEMAS COMERCIAIS PARA MEDIÇÃO DE GASES E DETECÇÃO HARMÔNICA DO ESPECTRO MOLECULAR

Como já mencionado, um dos principais limitantes de aplicar a técnica DGA no setor elétrico é a necessidade de transporte da amostra de óleo. Com isso, para transformadores de potência localizados a centenas de quilômetros da subestação, os resultados obtidos já não descrevem o real estado de operação desses equipamentos. Diante desse cenário, torna-se importante o desenvolvimento de um sistema capaz de realizar a detecção da presença e concentração dos gases, em que o elemento sensor esteja diretamente conectado ao transformador de potência e o sistema de aquisição das informações necessárias para aplicar os métodos de investigação da falha do transformador deve ser localizado, por exemplo, na sala de comando das concessionárias de energia. Assim, os operadores podem ter acesso em tempo real às condições de operação do transformador.

Este capítulo fornece uma breve descrição dos sistemas comerciais tipicamente utilizados na detecção de gases do interesse do DGA. Em seguida, é dada ênfase nas técnicas ópticas de medição, em especial à técnica de detecção harmônica do espectro molecular. Ao final do capítulo é brevemente descrito o sistema de monitoração de gases dissolvidos em desenvolvimento no LSI - Grupo de Fotônica e mais precisamente identificada a concepção proposta para o MCA, que representa uma contribuição desta Tese.

3.1 Sistemas comerciais para medição de gases

Estão disponíveis no mercado alguns equipamentos que são acoplados diretamente ao transformador de potência para monitoração de gases. Na maioria desses equipamentos, o elemento sensor é uma célula eletroquímica. Nesta classe de sensores, o gás de interesse é separado do óleo isolante por meio de uma membrana hidrofóbica específica. Os tipos de eletrodos utilizados dependem dos tipos de gases em análise. Através de reações de redução e/ou oxidação ocorre o fluxo de corrente entre os eletrodos, sendo ele proporcional à concentração do gás [25].

Como exemplo para aplicações no setor elétrico, a *General Electric Energy* dispõe de um sistema denominado *Hydran* [26]. Esse dispositivo é composto de dois módulos. O primeiro módulo é conectado diretamente na válvula de saída do óleo do transformador. O segundo módulo é uma unidade de comunicação dotada de uma saída RS-232 para conexão com um computador externo ou *modem* e uma RS-485 para comunicação com outros *Hydrans*. Os gases dissolvidos no óleo isolante passam através de uma membrana permeável onde são extraídos do óleo e detectados a partir de um sensor eletroquímico, produzindo um sinal de tensão proporcional à reação desses gases com o oxigênio residente no sistema

sensor. Nesse sistema é possível detectar Hidrogênio (H_2), Monóxido de Carbono (CO), Acetileno (C_2H_2) e Etileno (C_2H_4). A leitura dos valores de concentração é obtida a partir de uma soma ponderada dos quatro gases chaves, em função de H_2 . Não estão especificados no manual do equipamento valores mínimos de concentração.

Outros equipamentos são utilizados para obter a concentração de gases dissolvidos. Por exemplo, a *True Gas* da *Serveron Corporation* [27] desenvolveu um sistema que combina uma tecnologia própria de extração de gases dissolvidos no óleo do transformador e um robusto cromatógrafo. O sistema é denominado *Serveron* e oito tipos de gases podem ser monitorados nesse equipamento: A Tabela II mostra os gases monitorados, bem como as suas respectivas concentrações mínimas.

Esse sistema é constituído de um extrator de gases montado diretamente no transformador, de um cromatógrafo acoplado ao transformador, um tanque de verificação com concentrações conhecidas e monitoráveis de cada gás, um microcontrolador de memória não volátil com capacidade de armazenamento de aproximadamente um ano de dados, um *modem* industrial integrado e indicadores de *status* de operação. Um *software* incorporado ao sistema é capaz de direcionar a conexão do *modem* para o instrumento realizando o *download* de todos os dados a um computador.

Tabela II - Gases monitorados pelo *Serveron* e suas respectivas concentrações mínimas [27].

Gás	Valores mínimos de medição, Vppm
Hidrogênio (H_2)	10
Acetileno (C_2H_2)	5
Etileno (C_2H_4)	7
Monóxido de Carbono (CO)	5
Metano (CH_4)	50
Oxigênio (O_2)	10
Dióxido de Carbono (CO_2)	5
Etano (C_2H_6)	10

Sistemas de medições embarcados e em tempo real com o princípio de funcionamento descritos acima estão disponíveis por diversas outras empresas no setor. Todavia, esses equipamentos não são utilizados em boa parte das empresas concessionárias de energia do Brasil. Alguns motivos apontados são:

- Custo elevado, aproximadamente US\$ 40.000,00. Em geral, o equipamento realiza a monitoração do gás de apenas um transformador.
- Restrição de inserir dispositivos elétricos nos equipamentos de potência localizados no pátio de suas subestações.
- Não é possível realizar a calibração desses equipamentos.

Dessa maneira, para o desenvolvimento de um sistema de monitoração remota de gases do interesse para o DGA, é interessante que o elemento sensor possua imunidade eletromagnética e que o sistema de aquisição e monitoramento esteja localizado fora do pátio da subestação, por exemplo, dentro de uma sala de comando ou mesmo no laboratório de análise físico-química da empresa, além de permitir aos operadores realizar a calibração do equipamento.

3.2 Instrumentação óptica para detecção de gases

Sensores eletroquímicos podem ser relativamente específicos para medição dos gases de interesse no DGA e também sensíveis o suficiente para medir concentrações da ordem de ppm ou até mesmo de dezenas de ppb (partes por bilhão) [25]. Entretanto, essa classe de sensores possui tempo de vida curto, (menos de um ano) e estes podem facilmente ser contaminados por umidade e demais subprodutos da degradação do óleo isolante e papel celulose, gerando falsos sinais de concentração de gases.

Em contrapartida, sensores de gases baseados em absorção óptica apresentam rápida resposta, alta sensibilidade, imunidade das fibras ópticas e células espectrométricas à interferência eletromagnética típica de subestações, além de alta seletividade, pois cada gás de interesse é monitorado por um comprimento de onda específico. Diversos trabalhos científicos relatam experimentos de laboratório para medição da quantidade diminuta de gases. As concentrações mínimas medidas variam principalmente de acordo com o tipo e comprimento de onda da fonte de luz, do comprimento de interação da luz com o gás de interesse e, principalmente, das estratégias de detecção utilizadas.

3.2.1 Princípios básicos de espectroscopia óptica

Considerando o modelo atômico clássico, o espectro molecular de absorção de uma substância é determinado pela alteração na distribuição de cargas de suas moléculas constituintes sob ação de um campo de radiação eletromagnética. Alterações nos modos de

rotação e de vibração associados aos movimentos dos núcleos de maior inércia estão relacionados com as alterações de distribuição de carga de menor energia, ocorrendo na região espectral que vai do microondas ao infravermelho distante (2 - 14 μm). Transições eletrônicas corresponderiam classicamente a vibrações dos elétrons de menor inércia e, em consequência, maior energia, ocorrendo na região do ultra violeta (200 - 400 nm). Já os modos vibracionais ou rotacionais/vibracionais são de média energia, logo, envolvem a interação da molécula com fótons na região do infravermelho próximo (1,2 - 1,6 μm). Além disso, ao contrário de meios sólidos e líquidos que, devido à proximidade dos seus átomos, exibem bandas de respostas à radiação, os meios gasosos respondem quase que de maneira discreta, ou seja, as absorções somente ocorrem em comprimentos de onda bem definidos [28-32].

Os gases dissolvidos em óleo de transformador de interesse neste trabalho, e que fornecem informações a respeito do estado operacional dos transformadores de potência, são de baixo peso molecular e possuem forte absorção, devido aos modos vibracionais/rotacionais na região espectral do infravermelho médio [8-13]. Cada gás, portanto, reage em diferentes regiões do espectro, produzindo suas próprias linhas de absorção. A fim de saber o quantitativo de potência eletromagnética absorvida por um determinado gás, faz-se necessário caracterizar esse meio absorvedor.

Um meio absorvedor qualquer pode ser modelado como um conjunto de elementos absorvedores que funcionam de maneira similar a uma antena, ou seja, cada elemento capta uma fração da potência incidente [31]. A Figura 4 mostra um volume de um meio absorvedor com uma densidade de elementos absorvedores N [cm^{-3}], volume V [cm^3], secção transversal A [cm^2], comprimento diferencial Δz [cm] e potência incidente P [mW].

Cada elemento absorvedor capta uma fração σ/A da potência incidente P , de maneira que a potência absorvida no elemento absorvedor $\Delta P'$, que representa a diferença entre a potência de saída do meio e a potência incidente, pode ser escrita na forma [28-32]

$$\Delta P' = \left(\frac{\sigma(\omega)}{A} \right) P, \quad (3.1)$$

em que $\sigma(\omega)$ [cm^2] é definido como a secção transversal de absorção da molécula [31].

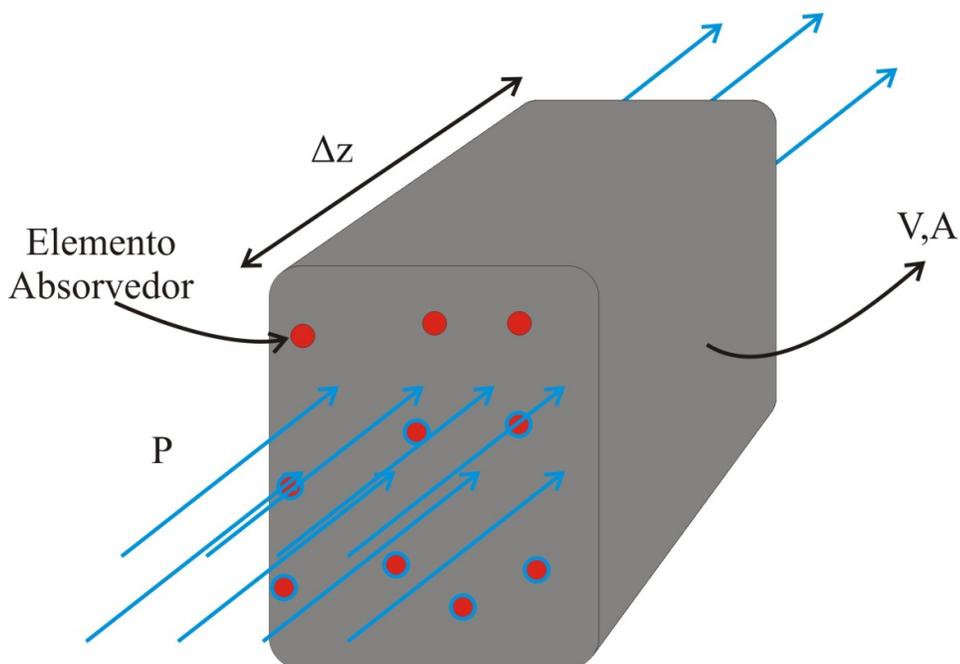


Figura 4 - Desenho ilustrativo do meio absorvedor.

Sabendo que a região apresenta um volume $V = A\Delta z$, reescreve-se a Equação 3.1 para N elementos absorvedores por unidade de volume na forma

$$\Delta \bar{P} = N\sigma(\omega)\Delta Z\bar{P}. \quad (3.2)$$

A taxa de variação de potência em relação ao comprimento Δz pode ser representada por

$$\frac{d\bar{P}}{dz} = -N\sigma(\omega)\bar{P}. \quad (3.3)$$

A solução da Equação 3.3 para um comprimento $z = L$ é

$$\bar{P}(z = L) = \bar{P}(z = 0)\exp[-N\sigma(\omega)L]. \quad (3.4)$$

A partir da Equação 3.4 é possível estimar a densidade de moléculas N no meio absorvedor, contido em uma célula espectrométrica com o comprimento L , a partir da análise da potência incidente e da potência da saída da célula espectrométrica. A densidade $N_{gás}$, dada em cm^{-3} , é relacionada à concentração, dada em ppm, por

$$N_{gás}(cm^{-3}) = 2,463 \times 10^{13} v(ppm), \quad (3.5)$$

considerando as condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Maiores detalhes sobre a Equação 3.5 podem ser obtidos em [13].

A secção transversal de uma molécula pode ser escrita como o produto de dois parâmetros, sendo o primeiro denominado de intensidade normalizada da linha, dado por Σ , e o segundo representado por uma função de distribuição, denominada nesta Tese de função forma, dada por $G(\omega-\omega_0)$. A função de distribuição mais utilizada para descrever a secção transversal de absorção é a função lorentziana [32]. Assim, a secção transversal de absorção é dada por [31]

$$\sigma(\omega) = \Sigma G(\omega - \omega_0) = \Sigma \frac{\gamma}{\pi (\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2}, \quad (3.6)$$

em que ω_0 representa a frequência normalizada central de absorção da linha e γ representa a meia largura a meia altura da linha (*HWHM - Half Width at Half Maximum*). Este resultado é decorrente da parte imaginária da susceptibilidade elétrica do gás em análise. Maiores detalhes podem ser obtidos em [31]. A Figura 5 mostra o perfil da linha.

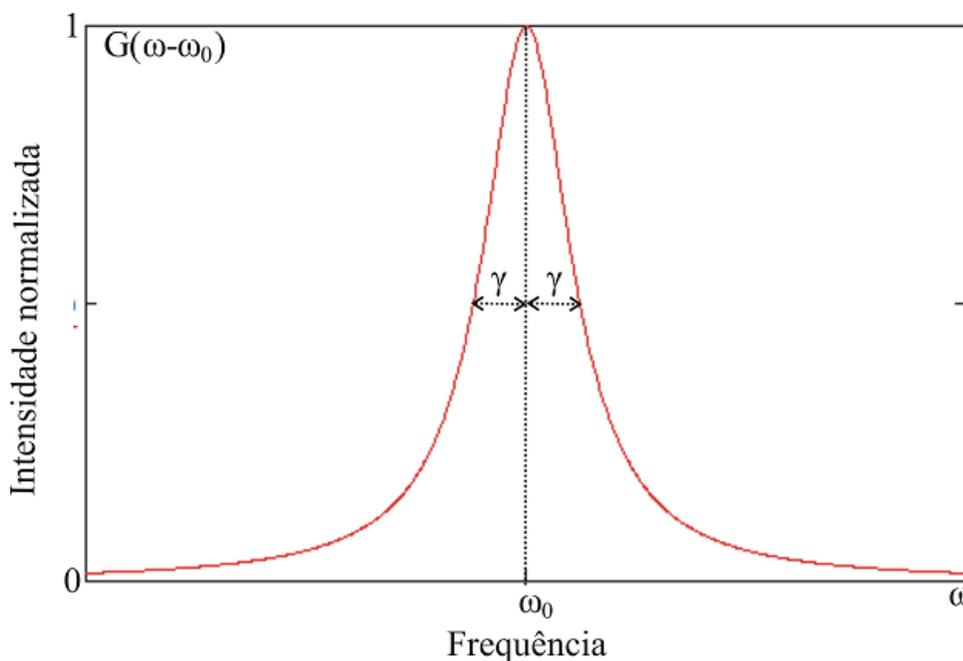


Figura 5 - Função de distribuição para uma linha lorentziana.

A base de dados HITRAN, do Instituto Smithsonian de Harvard [33], que tem registrada cerca de 1 milhão de linhas de absorção, fornece a intensidade normalizada da linha Σ , a frequência central ω_0 , e a HWHM, γ . Utilizando esses valores obtidos e a Equação 3.6,

calculam-se os valores das máximas secções transversais de absorção para os gases de interesse, em função do comprimento de onda.

Foi desenvolvido um programa em *Mathcad 14* para calcular a secção transversal máxima de absorção do Monóxido de Carbono (CO), para a função do comprimento de onda central da linha na região compreendida entre 1 e 5 μm . O resultado é apresentado na Figura 6. Conforme pode ser aí visualizado, na região do infravermelho médio (3 - 5 μm) existem diversas linhas de absorção de CO. Nessa região espectral, são comumente utilizadas técnicas de espectroscopia de Fourier [34-35] e de correlação [36-38]. Em relação a gases dissolvidos de interesse em DGA, Kim *et. al.* [34] conseguiram medir 16 ppb (partes por bilhão) de CO_2 a partir da espectroscopia de Fourier, utilizando um interferômetro constituído de cristais líquidos. O caminho óptico efetivo foi de 1 m. Vargas *et. al* [37] conseguiram medir cerca de 170 ppm de CO, 100 ppm de CO_2 e cerca de 5 ppm de CH_4 através da espectroscopia de correlação, utilizando células espectrométricas de 1,4 m.

Apesar da possibilidade de medição de gases da ordem de partes por bilhão, no tocante ao desenvolvimento de um sistema sensor remoto e de baixo custo, os lasers e fotodetectores nessa região espectral possuem custo muito elevado. Ademais, seria necessário utilizar fibras ópticas para permitir o guiamento do feixe da célula espectrométrica até a central de processamento do sinal obtido pelo fotodetector. Não existem atualmente fibras ópticas comerciais que permitam realizar o guiamento da luz na faixa de 4,5 a 5 μm .

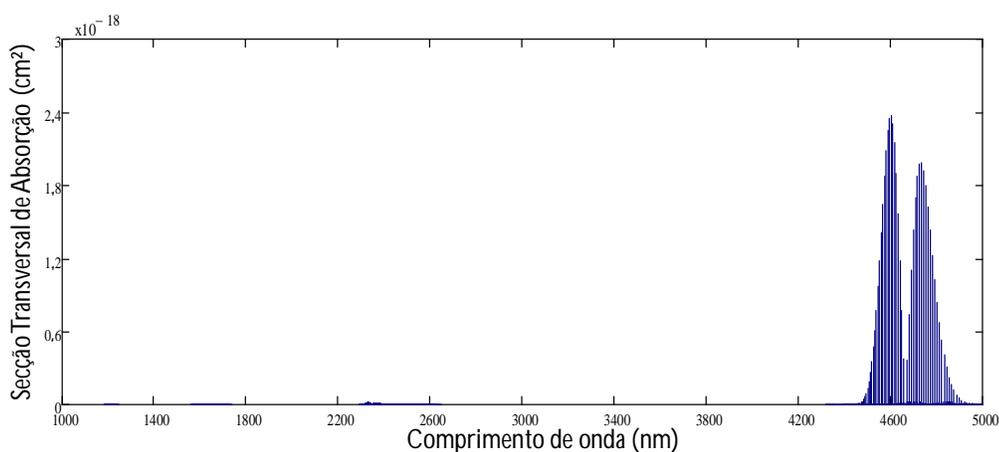


Figura 6 - Secção transversal máxima de absorção para o Monóxido de Carbono ente 1 e 5 μm [11].

A Figura 7 mostra a secção transversal máxima de absorção do CO, em função do comprimento de onda central da linha na região compreendida entre 1,5 e 1,6 μm . Há várias linhas de absorção nesta região espectral, mas elas são cerca de 20000 vezes mais fracas em comparação àquelas no infravermelho médio. Entretanto, há ampla disponibilidade de lasers, fibras e detectores de baixo custo na indústria de telecomunicações e a exploração dessa região espectral é muito atrativa para o desenvolvimento de novos sistemas sensores para monitoração remota. Por exemplo, na Figura 7 está indicada uma linha de absorção em 1568,0335 nm e existe um laser DFB comercial com comprimento de onda central de 1568 nm a 25 °C.

A técnica de absorção direta, a partir de células espectrométricas de múltiplas passagens [39-43] e a espectroscopia por detecção harmônica [8-13], [44-48] são comumente utilizadas nessa região espectral. Células de Herriot [39-40], [43] e esferas integradoras [41-42] são exemplos de células de múltiplas passagens utilizadas na detecção de gases. Em relação aos gases de interesse em DGA, por exemplo, Gurlit *et. al* [43] conseguiram medir 0,1 ppm de CH_4 para absorção direta utilizando célula de Herriot de comprimento de interação de 74 m. No tocante a técnica de detecção harmônica, Engelbrecht *et. al.* [48] conseguiram medir cerca de 9 ppm de CO_2 e cerca de 5 ppm de CO utilizando uma célula de comprimento de interação de 1 m. Neste trabalho é utilizada também a técnica de detecção harmônica no desenvolvimento do módulo de controle e aquisição.

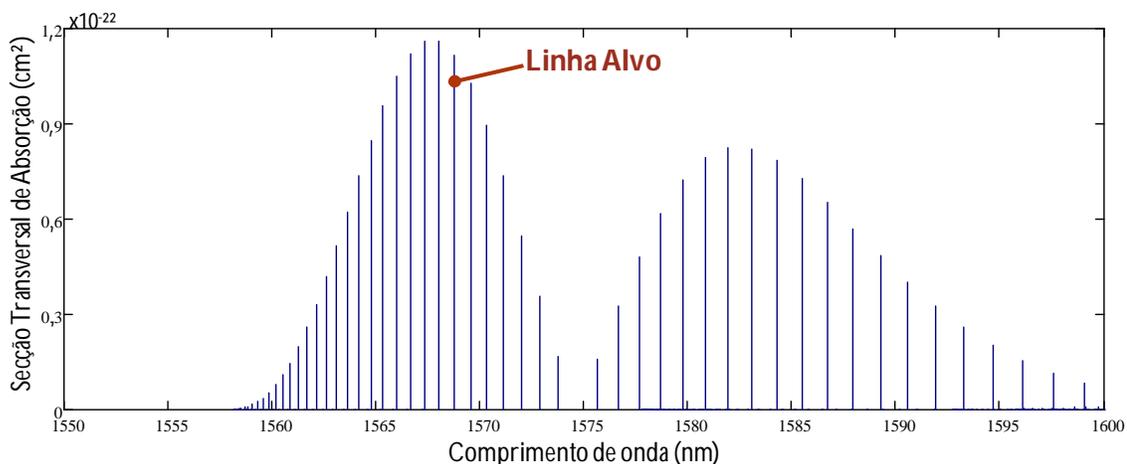


Figura 7 - Seção transversal máxima de absorção para o Monóxido de Carbono entre 1550 e 1600 nm [11].

3.3 Detecção harmônica do espectro molecular

A técnica de detecção harmônica do espectro é também denominada de espectroscopia de modulação do comprimento de onda (WMS – *Wavelength Modulation Spectroscopy*). Com essa técnica é possível detectar concentrações diminutas de gases a partir do uso de lasers do tipo DFB (*Distributed Feedback*), já que esses lasers exibem linhas de emissão cerca de 100 vezes mais finas em comparação a largura da linha de absorção do gás e sintonizáveis pelo ajuste da corrente de injeção. Além disso, faz parte da instrumentação da técnica de detecção harmônica controladores de corrente e temperatura e amplificador *lock-in* [8-13], [44-48].

A Figura 8 mostra um esquema básico da instrumentação necessária para realizar a técnica de detecção harmônica, em que se tem:

1. um elemento de modulação do comprimento de onda do laser em torno de seu comprimento de onda central, a uma frequência ω e com uma determinada amplitude de modulação.
2. o feixe do laser modulado, que atravessa a célula espectrométrica, interage com uma dada linha de absorção da amostra do gás, sendo monitorado por um fotodetector com responsividade máxima no comprimento de onda central do laser;
3. o amplificador *lock-in* capta o sinal do fotodetector, sendo esse sinal um componente DC que representa o n -ésimo harmônico do sinal do fotodetector, associado à frequência ω_n , com a largura de banda determinada pelo inverso do tempo de integração do *lock-in*, T .

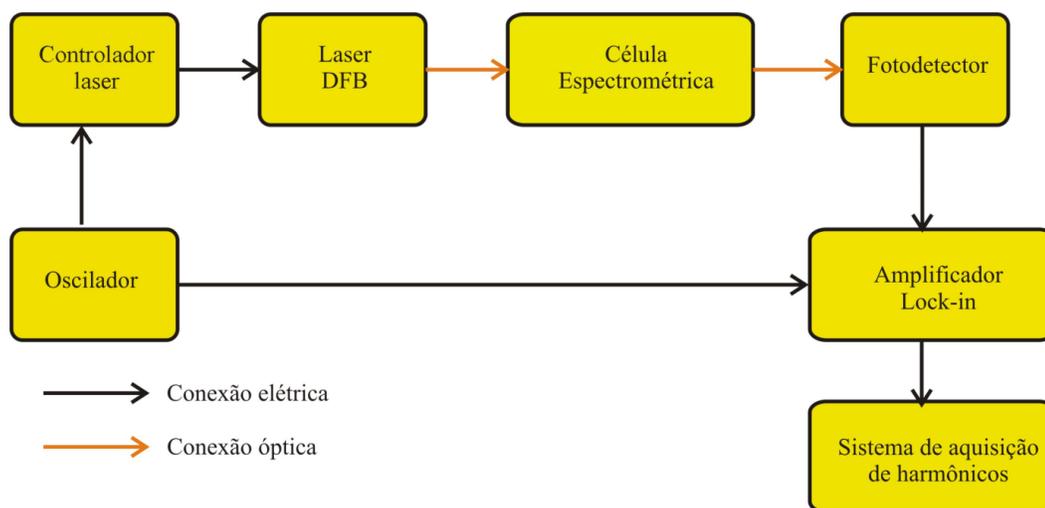


Figura 8 - Esquema simplificado de um espectrômetro WMS.

Os amplificadores *lock-in* digitais, do tipo DSP (do inglês *Digital Signal Processor*), possuem osciladores internos que produzem um sinal de tensão/corrente com frequência ω , que é utilizado como referência para o equipamento e também para modular em amplitude o comprimento de onda do laser. Os amplificadores *lock-in* analógicos necessitam de osciladores externos para essa finalidade. De qualquer forma, nessas condições, a intensidade do laser na entrada da célula espectroscópica é dada por [8-12], [36-40]

$$S_0(t) = \bar{S} + \Delta S \cos(\omega t), \quad (3.7)$$

em que \bar{S} é o valor da intensidade média e ΔS é a amplitude de modulação da intensidade. De forma semelhante, o comprimento de onda torna-se modulado na forma [8-12], [36-40]

$$\lambda(t) = \bar{\lambda} + \Delta \lambda \cos(\omega t), \quad (3.8)$$

com $\bar{\lambda}$ representando o valor médio do comprimento de onda do laser e $\Delta \lambda$ a amplitude de modulação do comprimento de onda.

A intensidade do laser, após a absorção em um meio de comprimento L é dada por [8-12], [36-40]

$$S(t) = \bar{S}_0(t) \exp \left\{ - \frac{N_{\text{gás}} \sigma_{\text{max}} \gamma^2}{[\lambda(t) - \lambda_0]^2 + \gamma^2} L \right\}. \quad (3.9)$$

Devido à natureza não linear da secção transversal de absorção da linha, diferentes harmônicos são gerados na frequência de modulação. A amplitude de cada harmônico é proporcional à concentração de moléculas absorvedoras, que pode ser detectada utilizando um amplificador *lock-in* [8-13], [44-48] em que a saída deste equipamento, $S(t)$, é dada por [49]

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} [F_n \cos(n\omega t) + Q_n \text{sen}(n\omega t)] \quad (3.10)$$

em que

$$F_n = \frac{2 - \delta_{n0}}{T} \int_0^T S(t) \cos(n\omega t) dt \quad (3.11)$$

e

$$Q_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(n\omega t) dt \quad (3.12)$$

em que T representa o tempo de integração e δ_{n0} é o delta de *Kronecker* [8-13]. As Equações 3.11 e 3.12 são, respectivamente, os componentes em fase e em quadratura do n -ésimo harmônico do sinal de saída do amplificador *lock-in*.

A medida de interesse na maioria dos experimentos de espectroscopia de gases é o módulo do n -ésimo harmônico do sinal, S_n , que é insensível a flutuações de fase do sinal, dado por [49]

$$S_n = \sqrt{F_n^2 + Q_n^2} \quad (3.13)$$

Uma vez que a linha de absorção, dada pela Equação 3.9, é quadrática, é possível identificar especificamente a existência dessa linha, observando a existência de uma componente de segundo harmônico do sinal. A Figura 9 mostra a dependência com o comprimento de onda da componente de segundo harmônico para o caso de 35000 ppm de CO à pressão atmosférica. É realizada uma varredura no comprimento de onda, o que implica em uma varredura na corrente injetada do laser. A intensidade do segundo harmônico é máxima, no comprimento de onda onde o coeficiente de transmissão é mínimo. O nível máximo do sinal é proporcional à concentração $N_{gás}$, e essa propriedade é utilizada para inferir a concentração do gás no ambiente sob teste [8-13]. Todavia, é importante analisar o espectro do segundo harmônico em uma faixa de comprimentos de onda para verificar a influência de ruídos eletrônicos e ópticos determinando assim, estratégias de aumento de sensibilidade.

3.3.1 Redução do ruído pelo amplificador *lock-in*

O amplificador *lock-in* é utilizado para medir valores de tensão e/ou corrente, com amplitude inferior ao nível do ruído sendo dotado de filtros de largura de banda estreita, além de outros dispositivos para minimizar a influência do ruído [49].

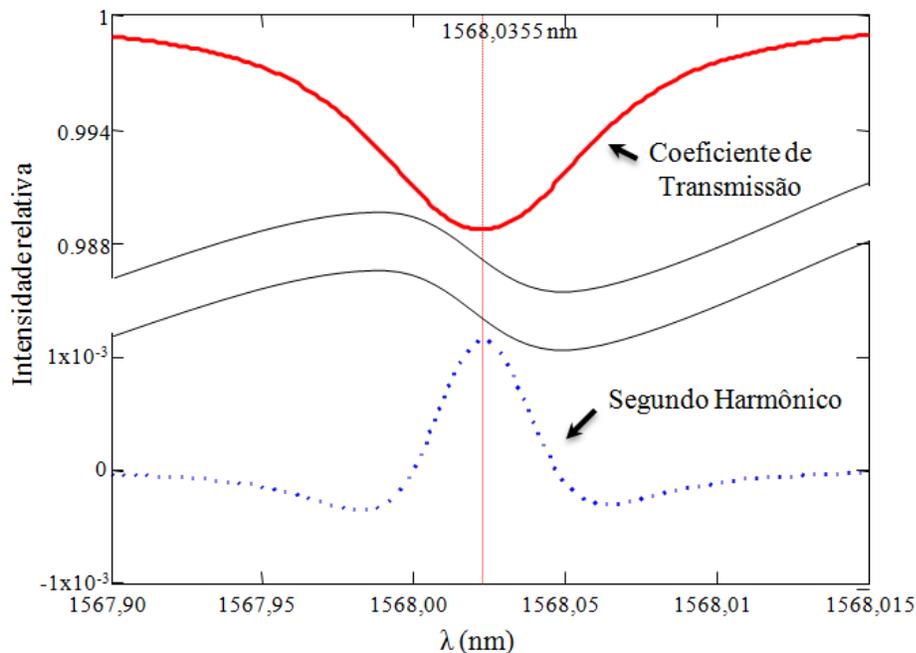


Figura 9 - Dependência do coeficiente de transmissão e do sinal do segundo harmônico em função do comprimento de onda.

O ruído eletrônico pode ser do tipo térmico e de disparo, com intensidade independente da frequência, sendo denominado de ruído branco [51]. Os ruídos dos tipos rosa e vermelho são dependentes do inverso da frequência e, quando é realizada a detecção harmônica para frequências superiores a alguns kHz, esses ruídos são fortemente atenuados [49], [51].

Dessa forma, o amplificador *lock-in* atua também para suprimir a influência do ruído branco. Devido ao valor praticamente constante desse tipo de ruído, a sua densidade espectral de potência é representada matematicamente pela função impulso. Assim, o ruído branco é incorrelacionável com qualquer sinal, mesmo com outras amostras de ruído branco [50]. Considerando $f(t)$ uma função que representa o ruído branco, não é possível determiná-la analiticamente, mas pode-se analisar a potência média do ruído, $\langle f(t)^2 \rangle$, e a densidade espectral de potência do ruído, $U(\omega)$ [W/Hz], relacionados por [50]

$$\langle f(t)^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} U(\omega) d\omega. \quad (3.14)$$

Para o ruído branco, $U(\omega) = C$, onde C é uma constante. Daí, tem-se que

$$\langle f(t)^2 \rangle = \frac{C\Delta\omega}{2\pi}, \quad (3.15)$$

em que $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ representa a banda equivalente do ruído. Em sistemas sofisticados, o valor de $\Delta\omega$ é da ordem de 10^{-2} Hz [48-50]. O amplificador *lock-in* utilizado nesta Tese é dotado de um filtro passa-baixa de Butterworth. Para esse filtro, a banda equivalente do ruído é dada por [50]

$$\Delta\omega = \omega_{3dB} \frac{\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{2m}\right)}, \quad (3.16)$$

com m representando a ordem do filtro, que varia de 1 (6 dB/oitava) até 4 (24 dB/oitava) e ω_{3dB} é a frequência de corte normalizada em 3 dB, dada por [50]

$$\omega_{3dB} = \frac{1}{2\pi T}. \quad (3.17)$$

A partir das Equações 3.16 e 3.17, é possível determinar os valores da banda equivalente do ruído em função da ordem do filtro e da constante de integração, parâmetros esses seleccionáveis nos amplificadores *lock-in*. A título de exemplo, considerando um filtro de quarta ordem com a constante de integração de 1 segundo, a banda equivalente do ruído $\Delta\omega$ é igual a 0,1197 Hz. Como a densidade espectral de potência do ruído é dada em termos de W/Hz , a banda equivalente do ruído atenua essa densidade espectral, para o valor de $\Delta\omega$ obtido, cerca de 88 % da sua magnitude.

3.3.2 Sinal de *Background*

Alguns problemas na instrumentação de um sistema de detecção harmônica acarretam em uma drástica redução na relação sinal/ruído. Pode-se citar por, exemplo, modo de cavidade da célula espectrométrica decorrente de falha no projeto da célula, alinhamento ineficiente entre as lentes e colimadores de entrada e saída da célula, problemas nas emendas das fibras ópticas do sistema, distorção harmônica acentuada no sinal de referência, entre outros. Nessas condições, é perceptível a influência do sinal de *background* na medidas de detecção harmônica [52-54]. Assim, o amplificador *lock-in* interpreta o sinal de *background* como sendo uma componente adicional da Série de Fourier, em termos de sinais em fase e em quadratura, para os respectivos n -ésimos harmônicos. Dai, tem-se que:

$$\begin{aligned} F'_n &= F_n + \Delta F_n \\ Q'_n &= Q_n + \Delta Q_n \end{aligned} \quad (3.18)$$

onde F'_n e Q'_n representam, respectivamente, as componentes observadas em fase e em quadratura do respectivos n-ésimos harmônicos, que correspondem ao sinal que se deseja monitorar, adicionado do sinal de *background*, ΔF_n e ΔQ_n . Para minimizar a influência do sinal de *background* em um experimento de detecção harmônica de gases, pode-se adotar o seguinte procedimento [52-54]:

1. Realizar a detecção harmônica dos sinais em fase e em quadratura do harmônico de interesse, com a célula espectrométrica contendo um gás que não apresenta linha de absorção para o laser DFB utilizado. Os sinais obtidos são os sinais de *background*;
2. em seguida, promover a detecção harmônica do gás em análise dos sinais em fase e em quadratura do harmônico de interesse. Depois, realiza-se a subtração vetorial entre os sinais obtidos e calcula-se o módulo. Dai, tem-se que

$$S_n = \sqrt{(F'_n - \Delta F_n)^2 + (Q'_n - \Delta Q_n)^2}. \quad (3.19)$$

3.4 Proposta de sistema eletro-óptico para detecção harmônica de múltiplas linhas de absorção

A Figura 10 mostra um diagrama do sistema ora em desenvolvimento para determinar a concentração dos quatro principais gases utilizados em DGA (CO, CO₂, CH₄ e C₂H₂), além de vapor de água, através de medição em uma célula espectrométrica conectada diretamente ao reservatório do transformador de potência. As informações são enviadas para o Módulo de Aquisição e Controle (MCA), destacado na Figura 10 e posteriormente enviadas para a rede *intranet* da Chesf. A técnica utilizada para a monitoração dos gases é a detecção harmônica do espectro molecular.

O sistema em sua versão final será constituído por um Módulo de Controle e Aquisição (MCA) que irá conter uma fonte de corrente e controlador de temperatura dedicados, um amplificador *lock-in* analógico, relés de estado sólido, com cada conjunto de relés conectado a um dado laser DFB. Além disso, como ilustrado na Figura 10, o sistema também possuirá um acoplador óptico 5x1, responsável pela multiplexação dos lasers DFB em uma fibra monomodo, célula espectrométrica e um fotodetector. De forma autônoma, o MCA selecionará um dado laser DFB, transmitindo comandos para o conjunto associado de

relés de estado sólido, à fonte de corrente e ao controlador de temperatura para o ajuste adequado do comprimento de onda do laser em torno da linha de absorção de interesse.

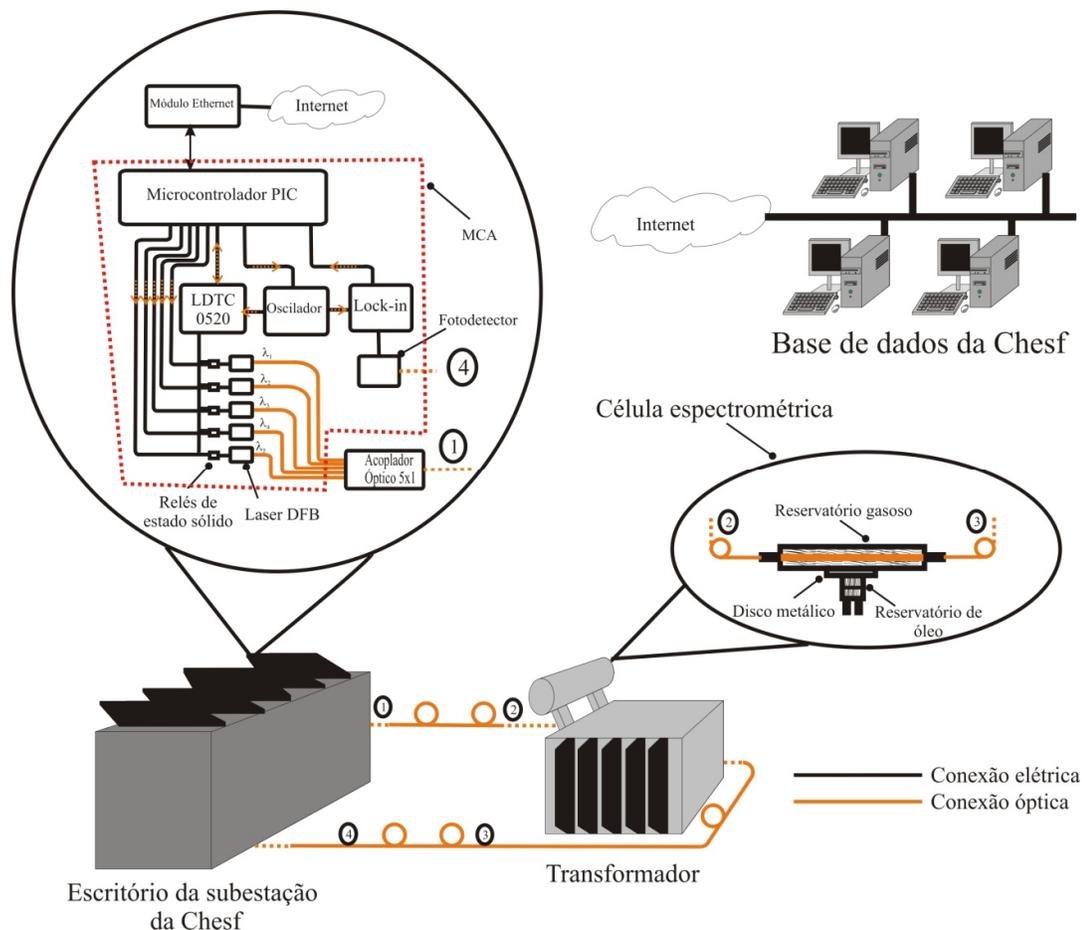


Figura 10 - Esquemático do sistema completo para monitoração de múltiplos gases dissolvidos em óleo de transformador.

A saída do multiplexador óptico estará conectada a um cabo óptico de fibra monomodo que será lançado de uma sala de comando da subestação até a entrada da célula espectrométrica, conforme ilustrado na Figura 10. Na saída da célula, outro cabo óptico será lançado de volta à sala de comando, sendo conectado a um fotodetector do MCA e o sinal elétrico obtido é então processado pelo amplificador *lock-in*, conforme indicado na Figura 10. O óleo isolante irá circular em um reservatório específico na célula espectrométrica. A conexão será feita através de uma das válvulas de extração de óleo disponível no transformador. Os reservatórios de óleo e gás serão separados por um filtro especialmente projetado para permitir a difusão do gás dissolvido no óleo e evitar a contaminação do reservatório gasoso pelo óleo. O resultado do experimento, bem como os parâmetros de controle do laser fornecido pelo MCA são transmitidos via *internet* (*ethernet* ou *Wi-Fi*) até a

base de dados localizada na empresa. Um aplicativo *web* será desenvolvido para a visualização gráfica ou tabular dos resultados obtidos.

Dessa forma, o sistema proposto irá permitir classificar a condição de operação do transformador de potência, bem como aplicar os métodos de investigação para realizar manutenções preventivas em tempo real. Além disso, será possível o operador realizar a calibração das medidas realizadas conforme necessário. Por fim, existe a possibilidade de monitorar mais de um transformador, utilizando um único sistema eletrônico, conectado a várias células espectrométricas.

O foco principal desta Tese é o desenvolvimento de um protótipo do MCA, capaz de operar com dois lasers DFB. Uma vez demonstrada essa capacidade de controle preciso de duas fontes de luz, o protótipo pode ser adaptado e expandido para o controle de cinco lasers DFB, conforme projetado para o sistema de monitoração em desenvolvimento no LSI- Grupo de Fotônica. O protótipo é controlável por um operador a partir de um computador pessoal. A interface entre o MCA e o PC ocorre por meio de protocolo de comunicação serial. Faz-se necessário a interface com o PC, pois testes devem ser realizados para aperfeiçoar os parâmetros, a fim de viabilizar os experimentos de detecção harmônica para, posteriormente, o MCA tornar-se autônomo. O protótipo do MCA contém a fonte de corrente e o controlador de temperatura OEM integrados em um único equipamento, além de um oscilador, microcontrolador, relés de estado sólido e demais circuitos auxiliares de alimentação e de comunicação serial. Além disso, o protótipo do MCA contém circuitos de testes do controlador de temperatura e corrente injetada do laser. Ademais, a opção de controlar dois lasers ao invés de cinco nessa versão do MCA é devido à necessidade de analisar os desafios que têm de ser superados para realizar o chaveamento de lasers, bem como a realização de experimentos para análise de potência óptica, entre outros.

Contribuições intermediárias importantes para o alcance do objetivo principal da Tese também foram obtidas, incluindo uma série de experimentos de medição de Monóxido de Carbono (CO) no sistema de detecção de gases do Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI do Grupo de Fotônica - DES - UFPE. Foram realizados experimentos a fim de caracterizar os equipamentos ópticos (célula espectrométrica, fibras, lentes, entre outros) passíveis de utilização com o sistema embarcado e de instalação nos transformadores de potência da Chesf. Esses experimentos foram conduzidos também com o objetivo de determinar as estratégias de instrumentação mais indicadas para minimização da influência do

ruído espacial nas células espectrométricas permitindo assim minimizar o limite de detecção da técnica. Esses experimentos são descritos no próximo capítulo.

4. EXPERIMENTOS PRELIMINARES PARA DETECÇÃO ESPECÍFICA DE MONÓXIDO DE CARBONO

Este capítulo relata o sistema experimental utilizado no Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI do Grupo de Fotônica - DES - UFPE para detecção de gases utilizando a técnica de detecção harmônica. Diversos experimentos realizados com esse sistema permitiram avaliar o ruído espacial, aperfeiçoar a instrumentação óptica e ajustar parâmetros do amplificador *lock-in* de forma a minimizar o limite de detecção de Monóxido de Carbono para o caso de uma célula espectrométrica de passagem única e tendo pequeno comprimento de interação.

4.1 Sistema de Detecção Harmônica do Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI

A Figura 11 mostra o diagrama esquemático do Sistema de detecção harmônica que foi desenvolvido e vem sendo aperfeiçoado por pesquisadores do LSI [8-13]. Usa-se um laser de diodo semiconductor tipo DFB com *pigtail* e encapsulamento tipo *butterfly* de 14 pinos, que emite no comprimento de onda específico do gás de interesse. Lasers DFB têm largura espectral cerca de 100 vezes mais fina em relação à meia largura da linha de absorção de interesse, que é a ordem de 0,01 nm.

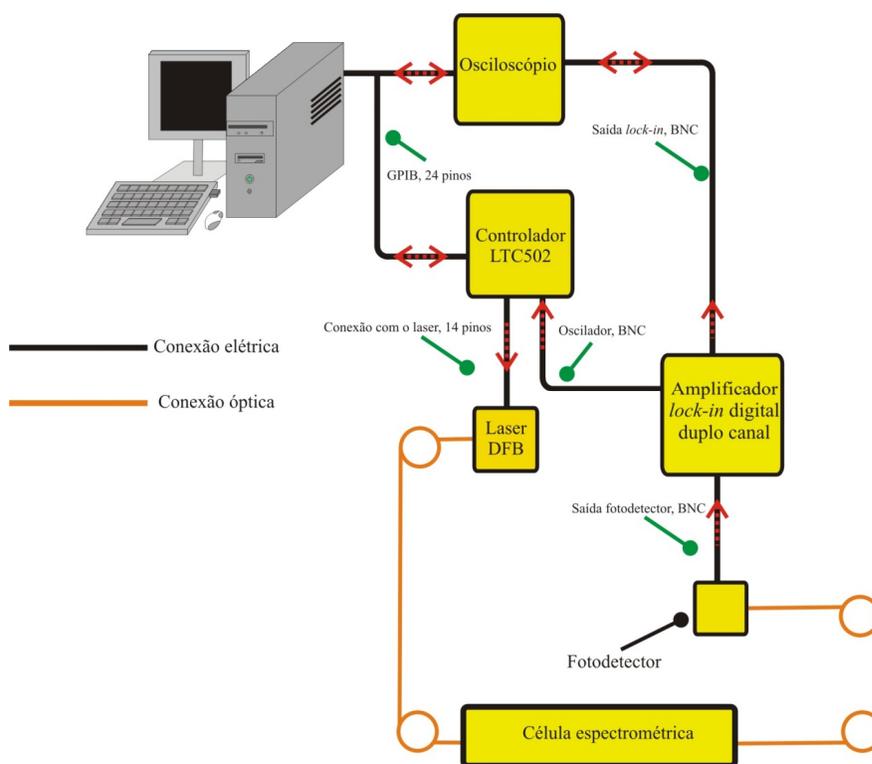
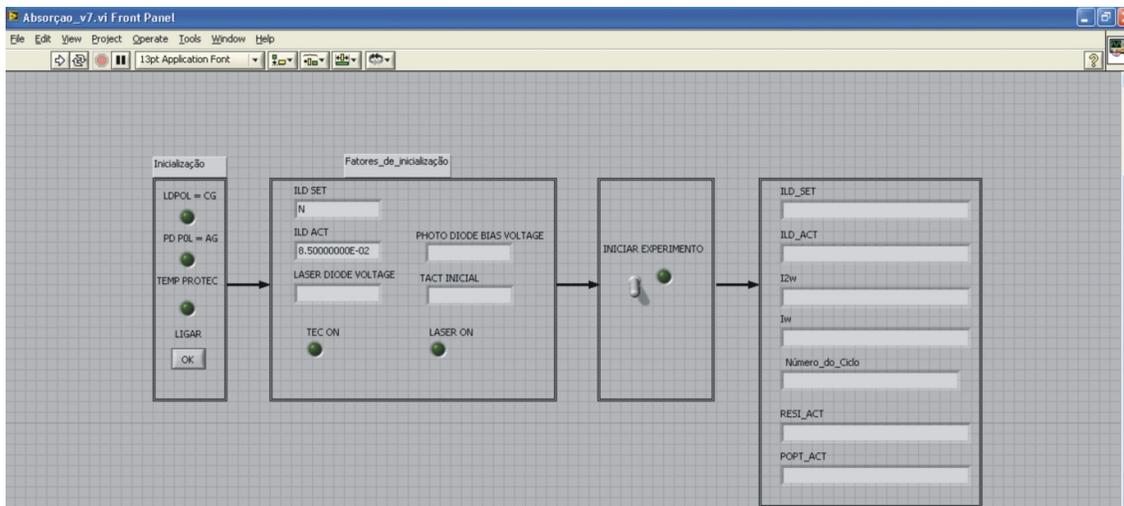


Figura 11 - Diagrama esquemático do sistema de medição de detecção harmônica do LSI - Grupo de Fotônica.

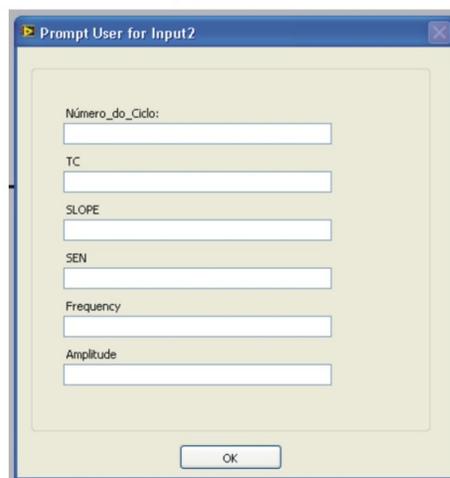
O sistema de alimentação e controle da temperatura do laser DFB é o controlador ITC502 da *Thorlabs* [55]. A conexão do laser com esse equipamento é feita a partir de uma placa de circuito desenvolvida para essa finalidade. O controlador possui limitadores de corrente do laser, além de ser acionado apenas quando o valor da temperatura do laser é previamente selecionado. A partir da seleção do valor de temperatura, o controlador mantém a temperatura do laser DFB no valor estabelecido a partir do valor do termistor, integrado ao encapsulamento do laser DFB e da atuação da pastilha *peltier*, também integrada no encapsulamento do laser DFB. A velocidade de atuação do *peltier* depende dos parâmetros do controlador PID (proporcional-integral-derivativo). Por fim, o ITC502 contém uma entrada para uso externo de um sinal de modulação em alta frequência.

O controlador ITC502 e um osciloscópio modelo TDS3052B da *Tektronics* estão conectados ao PC a partir de uma porta GPIB e controlados através de um programa desenvolvido em *Labview* 8.0. A Figura 12(a) mostra a tela inicial do programa. O aplicativo residente no computador foi desenvolvido inicialmente por Urtiga *et. al.*[8-9] e aperfeiçoado por Soares *et. al.* e Lima *et. al.* [10-12]. As principais melhorias desse programa, que estão sendo apresentadas nesta Tese, foram a otimização no tempo de aquisição dos dados obtidos a partir do osciloscópio, além da inserção de informações sobre o valor do termistor e do fotodetector, ambos integrados no encapsulamento do laser DFB.

Antes de inicializar o programa, o usuário deve digitar, em campos específicos, o valor inicial da corrente do laser, do termistor, além de escrever a faixa de variação da corrente com a inserção dos limites superior e inferior de corrente, bem como o valor de incremento de corrente para cada medida. A interface gráfica também permite acompanhar o andamento do experimento, visualizando em tempo real a variação de intensidade do canal 1 (I_w) e canal 2 (I_{2w}) do osciloscópio, além dos valores de termistor e fotodetector do laser. Ao acionar o botão *inicializar experimento*, o programa abre uma janela para que o usuário insira informações gerais do experimento e especificações dos parâmetros do amplificador *lock-in*, conforme pode ser visualizado na Figura 12(b). O osciloscópio TDS3052B da *Tektronics* serve como conversor A/D para dados de saída do amplificador *lock-in*. O osciloscópio é ajustado para realizar uma média de 512 amostras de cada medida, as quais são gravadas em arquivo no computador.



(a)



(b)

Figura 12 - (a) Tela inicial do programa de controle do sistema de medição de gases. (b) Tela de inserção de informações do experimento.

O amplificador *lock-in* utilizado é do tipo DSP de duplo canal, modelo 7265 da *Signal Recover* [56]. Esse equipamento possui um oscilador interno que fornece um sinal senoidal com a finalidade de modular a corrente injetada no laser. A partir de uma entrada específica do amplificador *lock-in*, o sinal é detectado e são processados os diferentes harmônicos gerados na frequência de modulação. Após essa etapa, o sinal é enviado para dois canais de saída com conectores BNC, que são ligados diretamente ao osciloscópio.

Dois células espectrométricas estão disponíveis no LSI. A Figura 13 mostra o desenho das células. A célula espectrométrica (a), utilizada por Urtiga *et. al.* [8], tem secção transversal cilíndrica, possuindo 130 cm de comprimento. As duas aberturas da célula são vedadas com janelas inclinadas a 55° em relação ao eixo óptico, para minimizar os ruídos provenientes de modos de cavidade. Nos experimentos realizados nesta Tese, a fibra óptica do

laser está emendada diretamente a um colimador GRIN (sigla inglesa para *Graded-Index*) externo à célula espectrométrica. Na saída, outro colimador de área de entrada de $0,785 \text{ cm}^2$ é usado para coletar o feixe transmitido para o fotodetector.

A célula espectrométrica (b), utilizada em [9-13] é adaptada de um guia de onda retangular de microondas, com 25,4 cm de comprimento e flanges circulares. Além disso, ela possui lentes do tipo GRIN acopladas à fibra óptica e fixadas nas flanges de entrada e saída da célula por uma resina epóxi. Na saída, um conector FC é acoplado ao fotodetector. O fotodetector utilizado para ambas as células é o modelo DET 110 da *Thorlabs* [57]. Esse fotodetector possui responsividade de $0,95 \text{ W/A}$ em 1568 nm , com área ativa de $0,8 \text{ mm}^2$.

A partir da instrumentação apresentada, foram realizados experimentos de detecção do segundo harmônico do Monóxido de Carbono (CO), para analisar os problemas de modo de cavidade e ruído espacial relatados em [10-13]. Foi verificada a influência do sinal de *background* nas medidas de detecção harmônica, e também foi averiguada qual a menor concentração, em ppm, de CO que o sistema é capaz de medir.

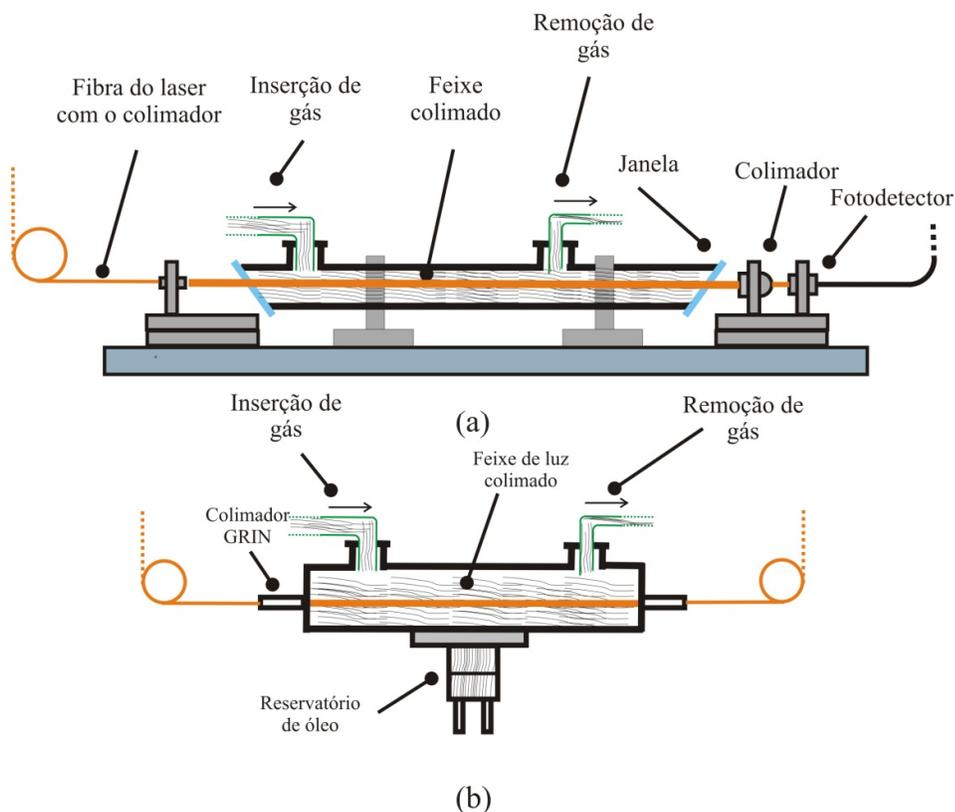


Figura 13 - Células espectrométricas utilizadas no sistema de detecção harmônica do LSI.

Os experimentos descritos a seguir são de importância para o projeto de um sistema embarcado de detecção harmônica, uma vez que é o adequado projeto óptico que permite minimizar o limite de detecção da técnica. Conforme descrito no capítulo anterior, o sinal de *background* não é suprimido pelo amplificador *lock-in* e, conseqüentemente, faz-se necessário utilizar estratégias de instrumentação e o programa de aquisição de dados deve realizar manipulações matemáticas para extrair o sinal desejado. Dependendo do comprimento de interação, processamentos matemáticos mais complexos podem se tornar necessários para obter o sinal em análise.

4.2 Sintonia do laser DFB

É preciso realizar a sintonia da corrente de operação do laser para que o comprimento de onda do laser DFB coincida com o centroide da linha de absorção do gás em análise. Nesta Tese, foi utilizado um laser DFB, emitindo no comprimento de onda de 1568 nm a 25 °C da *Anritsu* [58]. O procedimento experimental adotado para a caracterização desse laser DFB foi o seguinte:

- O valor da potência óptica foi monitorado em função da variação da corrente de operação do laser, sendo fixado um valor da resistência do termistor. O valor da potência óptica foi obtido diretamente do *display* do controlador de laser ITC502. Esse procedimento foi repetido para diversos valores de termistor.
- Com o auxílio de um analisador de espectro óptico (*Optical Spectrum Analyzer – OSA*) foi monitorado o comprimento de onda do laser em função de sua corrente de operação, sendo fixado o valor da resistência do termistor. Esse procedimento foi repetido para diversos valores da resistência do termistor.

Os resultados dos experimentos são apresentados na Figura 14 e na Figura 15. A potência óptica e comprimento de onda do laser variam linearmente com a corrente injetada. Além disso, na Figura 14 verifica-se que, quando ocorre o incremento no valor da resistência de termistor, tem-se o aumento da potência óptica do laser. Na Figura 15 observa-se a diminuição do comprimento de onda do laser quando ocorre o incremento na resistência do termistor, que causa aumento na temperatura de operação do laser. Por causa de configurações de fábrica do ITC502, em ambos os experimentos, o controlador desliga o laser

quando a resistência do termistor atinge o valor de 16 k Ω e a corrente injetada no laser tende a superar o valor de 77 mA.

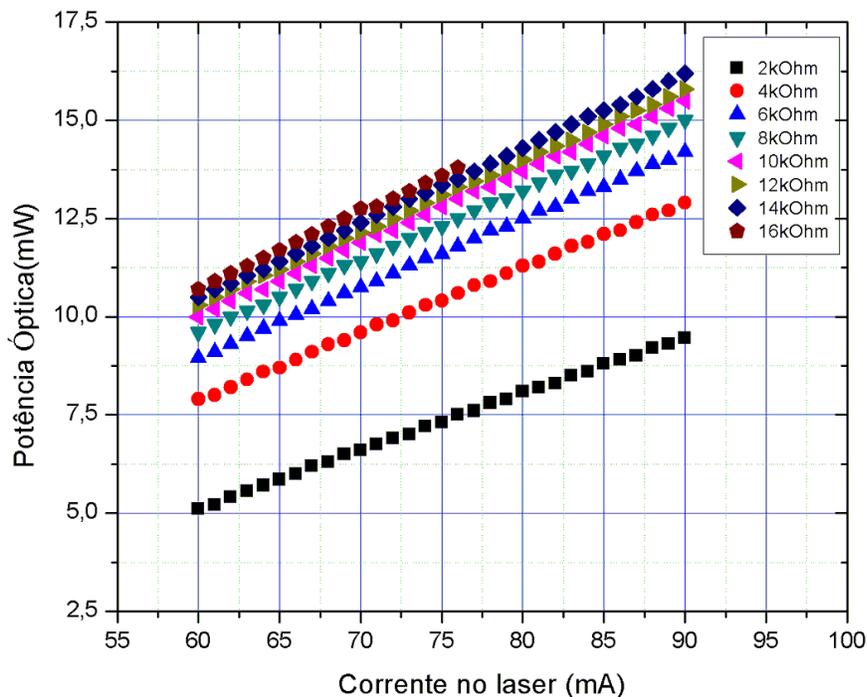


Figura 14 - Potência óptica do laser DFB em função da corrente injetada para vários valores da resistência do termistor.

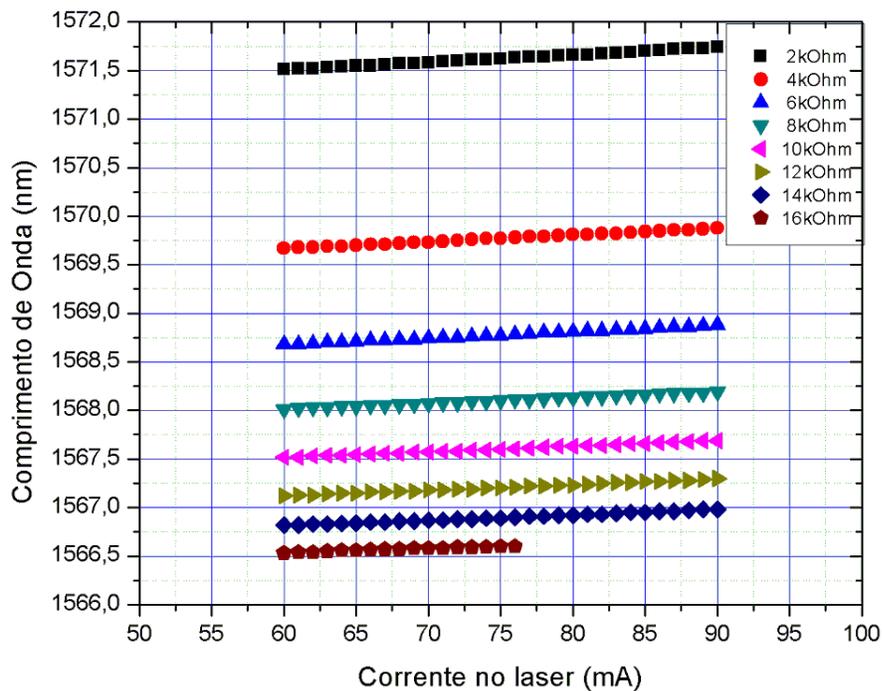


Figura 15 - Comprimento de onda do laser DFB em função da corrente injetada para vários valores da resistência do termistor.

A partir da informação da máxima secção transversal de absorção de CO em função do comprimento de onda obtida na Figura 7, existem três linhas de máxima absorção em torno do comprimento de onda de operação do laser. A Tabela III mostra as informações sobre essas linhas. Para os experimentos realizados nesta Tese, foi monitorada a Linha 1, por ter um maior valor da máxima secção transversal de absorção, σ_{\max} , em comparação com as demais linhas. De posse dos valores do comprimento de absorção da linha obtidos na Tabela III, e com o auxílio dos gráficos da Figura 14 e da Figura 15, é possível fixar a resistência do termistor para sintonizar o comprimento de onda do laser em torno das linhas de máxima absorção para um determinado valor de corrente injetada no laser.

De um modo geral, considerando a mesma linha de absorção, quanto menor o valor da resistência do termistor, ou seja, quando maior da temperatura do laser, menor será o valor da corrente injetada para sintonizá-lo. Todavia, os valores de resistência utilizados nesta Tese não acarretam em operação forçada do laser, já que sua faixa de operação em temperatura varia entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ [58]. A título de exemplo, para uma corrente no laser de $72,5\text{ mA}$, a resistência do termistor para sintonizar com a Linha 1, indicado na Tabela III é de $8,5\text{ k}\Omega$ ($29,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), e para uma corrente de $82,5\text{ mA}$ o valor de termistor para sintonizar a mesma Linha 1 é de $9,58\text{ k}\Omega$ ($28,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Tabela III - Parâmetros das três linhas de CO mais próximos do comprimento de onda central do laser.

	$\lambda_0(\text{nm})$	$\gamma(\text{nm})$	$\sigma_{\max}(10^{-22}\text{ cm}^2)$
Linha 1	1568,0355	0,01465	1,16
Linha 2	1568,7736	0,01498	1,12
Linha 3	1569,5386	0,01542	1,03

4.3 Índice de modulação

Para estimar um valor ótimo do índice de modulação da corrente injetada no laser ΔI , foram escolhidos os parâmetros tipicamente utilizados em medidas experimentais, com o auxílio do programa *Mathcad 14*. Esse procedimento está descrito em [13]. A Tabela IV mostra os parâmetros usados.

O resultado obtido é apresentado na Figura 16. Como pode ser observado, o valor ótimo em rms para ΔI é de 5 mA , valor idêntico obtido em [13]. A Figura 17 mostra o gráfico

do módulo do segundo harmônico de CO para alguns índices de modulação. O incremento de ΔI ocasiona um alargamento horizontal com o seu valor ótimo em 5 mA.

Tabela IV - Parâmetros usados para simulações.

Parâmetros	Valores
Mistura padrão CO/N ₂ à pressão atmosférica (<i>ppm</i>)	35000
Comprimento de absorção do gás, λ_0 (<i>nm</i>)	1568,0355
Meia largura da linha, γ (<i>nm</i>)	0,0187
Secção transversal de absorção na ressonância, σ (<i>cm</i> ²)	1×10^{-22}
Dependência do comprimento de onda pela corrente injetada, $\lambda(I)$ (<i>nm</i>)	$0,055713 I + 1568,138858$
Comprimento da célula espectrométrica, <i>L</i> (<i>cm</i>)	130
Relação entre o índice de modulação em A_{rms} com V_{rms}	$\delta I = \delta V/12,5$
Relação entre o valor <i>rms</i> corrente de modulação (δI) e a amplitude de modulação (ΔI)	$\Delta I = \sqrt{2} \delta I$

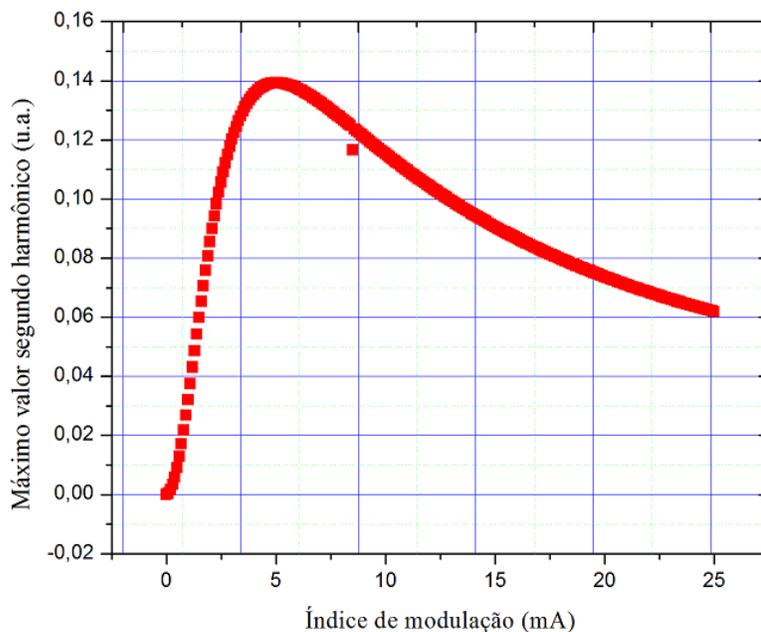


Figura 16 - Máximo do segundo harmônico em função do índice de modulação.

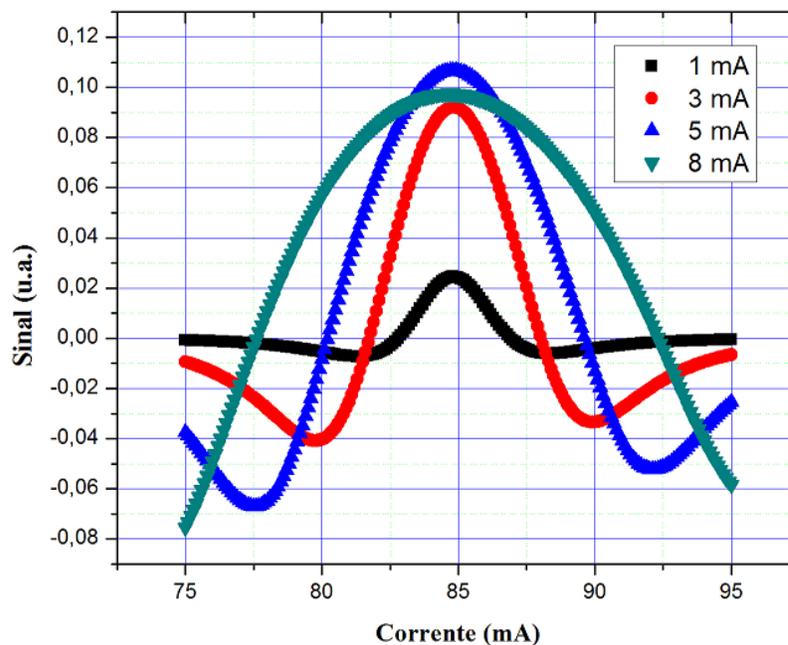


Figura 17 - Simulação do perfil do segundo harmônico em função do índice de modulação.

4.4 Parâmetros selecionáveis do amplificador *lock-in*

A Tabela V mostra os valores da banda equivalente do ruído, $\Delta\omega$, em função do tempo de integração T, e da ordem do filtro, sendo da ordem 1 (6dB/oitava) até 4 (24dB/oitava). Os valores apresentados na Tabela V foram obtidos a partir das Equações 3.16 e 3.17, mostradas no Capítulo 3. Para os experimentos realizados nesta Tese, foi monitorada a tensão do ruído, obtida a partir do amplificador *lock-in*. De posse desta informação, foi possível estimar o limite de detecção do sistema e além da relação sinal/ruído esperada e também da mínima concentração de gás detectável. O cálculo da tensão de ruído do sistema, V_r , é dada por [49]

$$V_r = (V_{rl})\Delta\omega^2, \quad (4.1)$$

onde V_{rl} é o valor de tensão adquirida pelo *lock-in*, dada em $V/\sqrt{\text{HZ}}$ que representa um percentual da tensão de fundo de escala do equipamento.

Tabela V - Banda equivalente do ruído para um filtro de *Butterworth* até a quarta ordem para diversos valores de tempo de integração.

Tempo de integração, T	Banda equivalente do ruído, $\Delta\omega$ (Hz)			
	6 dB/oitava	12dB/oitava	18dB/oitava	24dB/oitava
5 ms	50	37,5	31,25	27,35
10 ms	25	17,2	14,15	12,35
20 ms	12,5	8,3375	6,875	5,9875
50 ms	5	3,335	2,75	2,395
100 ms	2,5	1,6675	1,375	1,1975
200 ms	1,25	0,83375	0,6875	0,59875
500 ms	0,5	0,335	0,275	0,2395
1 s	0,25	0,16675	0,1375	0,11975
2 s	0,125	0,08337	0,06875	0,059875
5 s	0,05	0,03335	0,0275	0,02395
10 s	0,025	0,01667	0,01375	0,011975

4.5 Circuito de gás do LSI

A Figura 18 mostra uma fotografia do circuito de gás existente no LSI. O circuito é fabricado em aço inoxidável com válvulas de bloqueio e serpentinas, também de aço inoxidável, para o processo de troca dos gases provenientes de cilindros externos. Um manômetro, mostrado na Figura 18, está conectado na célula espectrométrica de 130 cm. Todavia, existe uma conexão entre essa célula e a célula espectrométrica de 25,4 cm, fazendo com que ambas as células sejam isobáricas para as concentrações de gases medidas. O valor de fundo de escala do manômetro é de 1 atm com resolução de 2×10^{-2} atm.

Especificamente, a mistura de Monóxido de Carbono residente no cilindro obedece à seguinte relação de concentração

$$v(\text{ppm}) = 35000 \frac{x}{760}, \quad (4.2)$$

em que x representa a pressão em mmHg indicada no manômetro. Assim, para realizar a diluição, considerando que a célula espectrométrica esteja preenchida com a concentração máxima do cilindro de um gás específico, é utilizado o seguinte procedimento: realiza-se a evacuação do gás na célula até o manômetro indicar a metade do fundo de escala, i.e, 380 mmHg. Posteriormente, a célula é preenchida com N_2 , fazendo com que a concentração do gás específico seja a metade do valor anterior. Com isso, após N diluições, a concentração do gás específico é cerca 2^N vezes menor que o valor inicial, e a pressão da célula sempre se mantém a 1 atm.

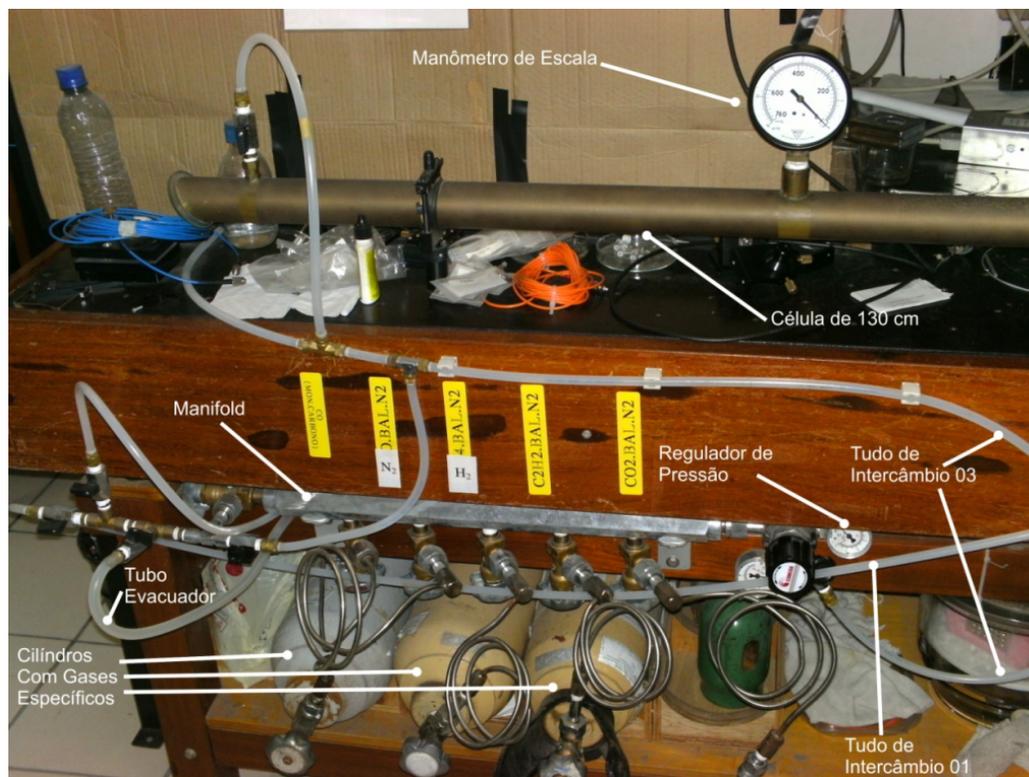


Figura 18 - Fotografia do circuito de gás do LSI. Extraído de [13].

Observa-se que é necessário realizar a evacuação do circuito quando este está preenchido com CO para depois preenchê-lo com N₂ para poder iniciar o processo de diluição. Essa limitação do sistema pode acarretar na contaminação dos cilindros de gás e conseqüentemente resulta em uma imprecisão nas medidas de concentração do gás em análise. Para minimizar esses problemas, o circuito é preenchido com uma quantidade de gás suficiente para os experimentos na célula espectrométrica sob análise. Após a realização dos experimentos, o sistema é totalmente evacuado. Além disso, os experimentos são repetidos três vezes e as curvas de detecção harmônica e absorção aqui apresentadas representam valores médios dos resultados obtidos. Ademais, um dos parâmetros de sistema embarcado de monitoramento dos gases sob análise é a difusão do gás dissolvido no óleo isolante. Nesta Tese, o gás é inserido diretamente no reservatório gasoso das células espectrométricas e está em estudo por pesquisadores do LSI estratégias de separação do óleo e de uma fração dos gases dissolvidos para que estes sejam detectados na célula espectrométrica na cabeça sensora.

4.6 Detecção harmônica de CO na célula espectrométrica de 130 cm

Os experimentos preliminares de detecção de Monóxido de Carbono foram realizados com a célula espectrométrica de 130 cm de comprimento, que contém duas janelas ópticas, uma na entrada e outra na saída. Um colimador integrado à fibra óptica foi emendado na saída do laser DFB. Na saída dessa célula, um colimador de área igual a $0,785 \text{ cm}^2$ foi utilizado para focalizar o feixe de saída da célula no fotodetector. A temperatura de operação do laser foi ajustada para que o comprimento de onda de absorção máximo ocorresse para uma corrente no laser de 72,5 mA. A banda equivalente do ruído do amplificador *lock-in* para esse experimento foi de 0,335 Hz.

A Figura 19 mostra o gráfico do espectro em fase do segundo harmônico em função da concentração de CO. Como pode ser aí observado, foi monitorado o espectro até a 3ª diluição (4375 ppm). Nesta situação, não foi possível distinguir o espectro da célula preenchida com 8750 ppm. Daí, conclui-se que o limite de detecção neste experimento ficou compreendido entre 17500 e 8750 ppm, muito aquém para aplicações no setor elétrico, em que o limite de detecção exigido é de 350 ppm.

Foi realizado o mesmo procedimento experimental de obtenção da fase do segundo harmônico do sinal com a célula preenchida com N_2 , com a finalidade de analisar o ruído espacial dessa célula. O experimento foi repetido diversas vezes e foi verificado que as curvas obtidas possuíam padrões de comportamento muito similares entre si. A Figura 20 mostra o gráfico de um dos espectros em fase de segundo harmônico adquiridos. Era esperado obter uma linha horizontal. Todavia, como pode ser aí observado na Figura 20, o espectro muda com a variação do valor de corrente injetada no laser de forma não linear e atinge o seu valor máximo próximo de 72,5 mA, como se a célula espectrométrica estivesse preenchida com CO. Não existem linhas de absorção de N_2 na região do infravermelho próximo. Este experimento foi repetido com o laser DFB de 1531 nm e verificou-se um padrão de comportamento similar ao da Figura 20. Problemas de modo de cavidade e interferências ópticas na célula espectrométrica fazem com o que o amplificador *lock-in* interprete um falso valor de segundo harmônico. O sinal representado na Figura 20 é o sinal de *background* para esse experimento. Posteriormente, a célula espectrométrica foi preenchida com CO e ciclos de diluição foram realizados. Daí, a curva de *background* foi subtraída de cada curva.

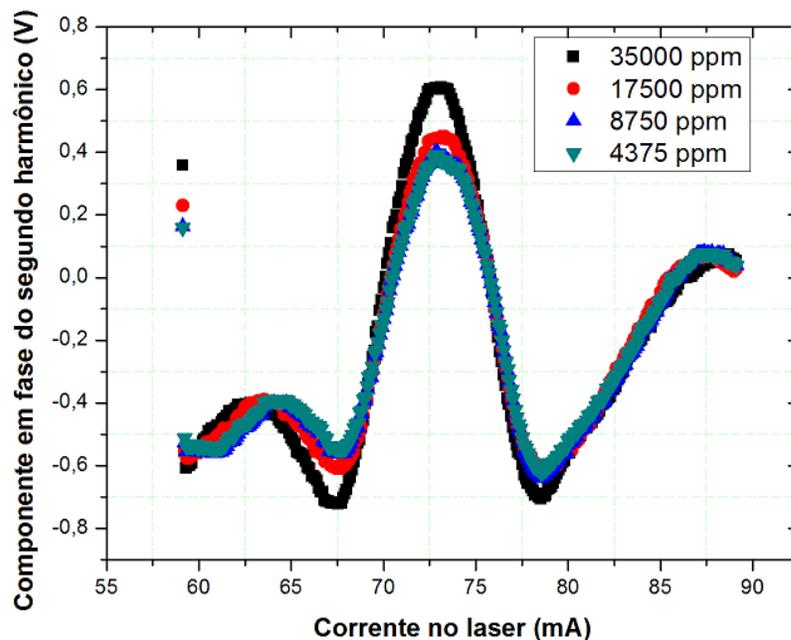


Figura 19 - Perfis do sinal de fase do segundo harmônico na célula espectrométrica de 130 cm com diferentes concentrações de CO.

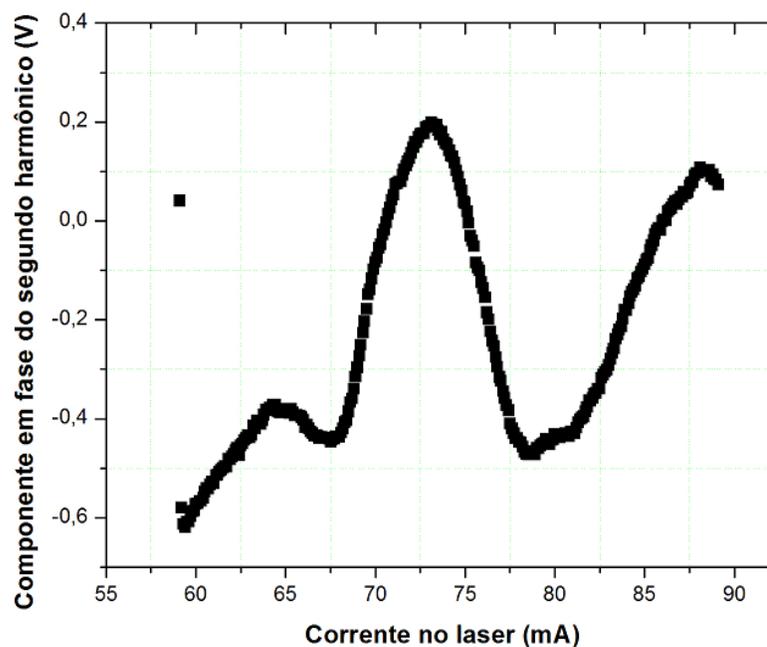


Figura 20 - Perfil do sinal de fase do segundo harmônico na célula espectrométrica de 130 cm preenchida com N₂

A Figura 21 mostra o resultado obtido. A temperatura de operação do laser foi ajustada para que o comprimento de onda de absorção máximo ocorresse com o laser polarizado em 72,5 mA. A banda equivalente do ruído do *lock-in* para esse experimento foi de 0,335 Hz. Como pode ser observado na Figura 21, foi monitorado o espectro até a 5ª diluição

(1093 ppm). Nesta situação, não foi possível distinguir o espectro da célula preenchida com 2187 ppm. Daí, conclui-se que o limite de detecção neste experimento ficou compreendido entre 4375 e 2187 ppm, ainda não adequado para aplicações do setor elétrico

Para tentar melhorar a relação sinal/ruído do sistema, foi realizado outro experimento, em que foi medido o sinal em fase e em quadratura do segundo harmônico com a célula preenchida com N_2 , para obter os sinais de *background* de fase e quadratura do experimento. Em seguida, foram medidos os sinais em fase e em quadratura com a célula preenchida com CO e diluições. A partir dos resultados obtidos foi utilizada a Equação 3.16 para calcular o módulo com as correções do sinal de *background*.

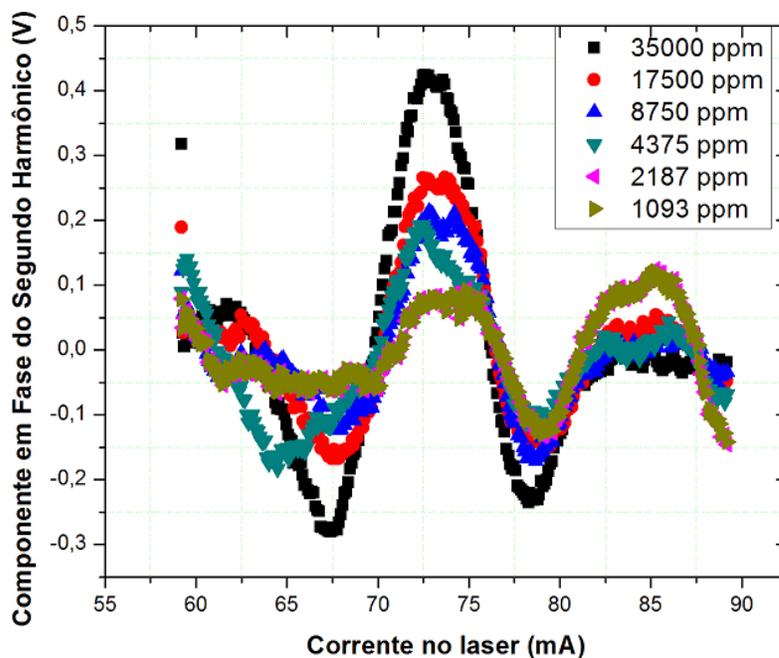


Figura 21 - Perfis da fase do segundo harmônico com a célula espectrométrica de 130 cm preenchida com diferentes diluições de CO.

A Figura 22 mostra o gráfico com os resultados. A temperatura de operação do laser foi ajustada para que o comprimento de onda de absorção máximo ocorresse com o laser polarizado em 75 mA. A banda equivalente do ruído do *lock-in* para esse experimento foi de 0,112 Hz. Para facilitar as visualizações das concentrações mais baixas, está ai apresentado o perfil do segundo harmônico na Figura 22, a partir da concentração de 8750 ppm. Conforme pode ser observado, a partir do cálculo do módulo com a subtração dos sinais de fase e quadratura de *background*, foi monitorado o espectro até a 7ª diluição (273 ppm). Nesta situação, não foi possível distinguir o espectro da célula preenchida com 543 ppm. Daí, conclui-se que o limite de detecção neste experimento ficou compreendido entre 1093 ppm e

543 ppm. Além disso, é possível verificar que o perfil do segundo harmônico encontra-se distorcido, mesmo para concentrações mais altas. Ademais, é possível verificar também que os valores de máximo do segundo harmônico para concentrações mais baixas são muito próximos entre si, o que torna restritivo utilizar esse tipo de modo de medição para o sistema sensor.

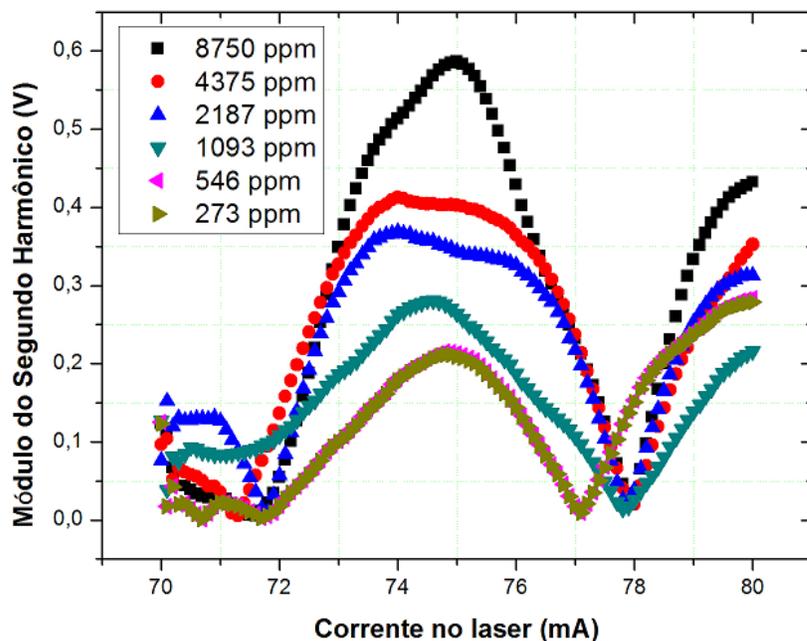


Figura 22 - Perfis do módulo do segundo harmônico com CO a célula espectrométrica de 130 cm preenchida com diferentes diluições de CO, corrigindo os sinais de background de fase e quadratura conforme a Equação 3.16.

Pode-se estimar a relação sinal/ruído na célula espectrométrica a partir dos parâmetros de banda equivalente do ruído, ganho de saída do *lock-in*, tensão do ruído e intensidade máxima do segundo harmônico. Assim, a tensão de ruído, para o experimento indicado na Figura 21, medida pelo amplificador *lock-in*, para o valor máximo de 424 mV do segundo harmônico na concentração de 35000 ppm de CO, foi de 656,78 μ V. Para o experimento indicado na Figura 22, a tensão de ruído foi praticamente igual ao resultado anterior. Considerando a relação diretamente proporcional entre o valor de pico do segundo harmônico e a máxima secção transversal de absorção do gás, para as concentrações medidas nesta Tese, estima-se que a concentração mínima detectável seja em torno de 54 ppm. O fato do sistema atual, utilizando essa célula espectrométrica de 130 cm, exibir um limite de detecção compreendido entre 4375 e 2187 ppm para o primeiro experimento e de 1093 e 540 ppm para o segundo experimento, indica que ruído branco não é um fator limitante de desempenho do sistema.

Observaram-se nos vários espectros medidos em fase e em módulo, interferências dependentes do comprimento de onda na faixa espectral medida. Algumas hipóteses foram levantadas para determinar a origem dessas interferências: flutuações na potência de saída do laser, efeitos de temperatura, modos de cavidade nas várias interfaces entre entrada e saída da célula espectrométrica e variações de fase do sinal como função do comprimento de onda.

Em relação a flutuações na potência de saída e efeitos de temperatura no laser DFB, a partir do programa de controle residente no PC, é possível obter o valor de potência óptica no fotodetector e do valor da resistência do termistor, ambos integrados ao encapsulamento do laser. Para todos os espectros medidos, a potência do laser variou de forma linear em função da corrente injetada e o valor da resistência do termistor variou apenas na quarta casa decimal, o que descarta a hipótese de problemas no laser DFB.

No tocante a variações de fase do sinal, a partir do cálculo do módulo do segundo harmônico, o amplificador *lock-in* torna-se insensível a essas variações. Através do cálculo do módulo do segundo harmônico com a correção definida pela Equação 3.16, é possível verificar na Figura 22 a melhora da relação sinal/ruído em comparação aos espectros da Figura 21, apesar do perfil do módulo do segundo harmônico estar distorcido e com pouca sensibilidade para as concentrações mais baixas. Isso indica que os fenômenos de interferência presentes nessa célula espectrométrica não são suprimidos em sua totalidade com a remoção do sinal de *background*, apontando para problemas estruturais na célula, mais especificamente, problemas nas janelas ópticas de entrada e saída.

4.6.1 Análise do grau de interferência de janela óptica em medidas de absorção

Foi avaliado o efeito das janelas ópticas na qualidade da medida de absorção de CO na célula espectrométrica de 130 cm para polarização no plano de incidência. A espessura medida de cada janela foi de 4 mm. Cada ponto da curva de absorção direta é obtido da relação

$$v_{\%} = \frac{v_{CO}(ppm)}{v_{N_2}(ppm)} - 1, \quad (4.2)$$

em que $v_{CO}(ppm)$ e $v_{N_2}(ppm)$ representam a concentração de CO e N₂ respectivamente. Esse procedimento foi adotado já que para a célula preenchida com 35000 ppm de CO, a atenuação no ponto de máxima absorção é da ordem de 1 %. O resultado é mostrado na Figura 23. Pode-

se verificar claramente na Figura 23 a presença de interferências por modo de cavidade devido as oscilações do sinal compreendidas entre 50 a 70 mA e 80 a 90 mA.

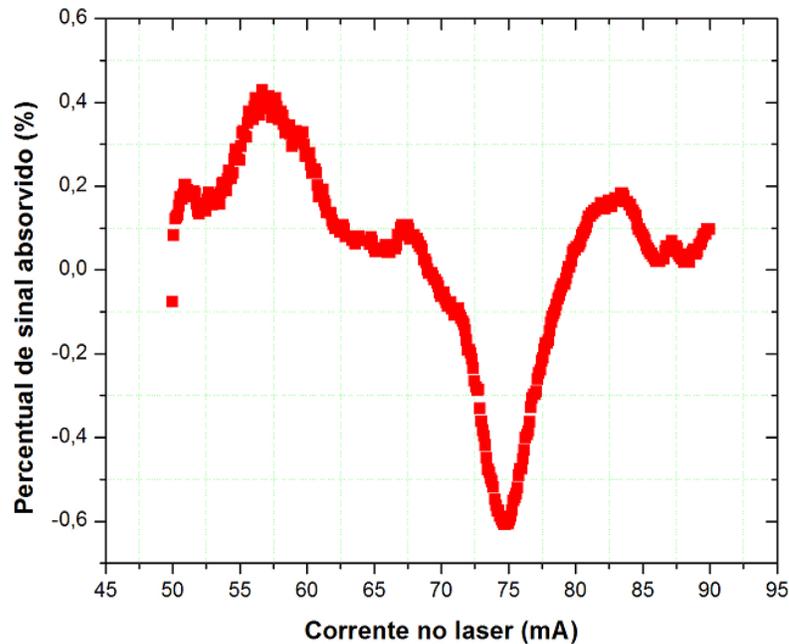


Figura 23 - Gráfico da absorção de CO na célula espectrométrica de 130 cm, preenchida com 35000 ppm.

Essas interferências por modo de cavidade se dão nessa célula espectrométrica devido às janelas ópticas, que foram montadas com um ângulo de 60 graus em relação ao eixo longitudinal do tubo. O ângulo de Brewster para sílica no comprimento de onda da linha de CO, no entanto, seria próximo de 55 graus [59]. Outro motivo é a separação entre a janela óptica e os vários elementos distribuídos ao longo do feixe laser, que sai da fibra, ou ainda entre o fotodetector e outras superfícies. Essa interface ar-janela óptica faz com que a janela, por ter sido montada em um ângulo diferente do de Brewster, atue como uma cavidade de Fabry-Perot, com a transmissão de variação periódica com a frequência óptica. A rigor, a transmissão não é exatamente periódica na frequência devido à dispersão cromática. Esse fenômeno também é denominado efeito de Etalon [28], [60], ilustrado na Figura 24.

É interessante verificar o efeito do ruído espacial por não se ter o ângulo de desvio exatamente no ângulo de Brewster. A transmitância T na janela de entrada da célula é dada pela Equação de Airy [28-30], [60]

$$T = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)}, \quad (4.3)$$

em que F representa o coeficiente de *fitness* do espelho dado por [28-30]-[60]

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2}, \quad (4.4)$$

sendo R o coeficiente de reflexão no espelho. O ângulo δ é expresso por [28-30], [60]

$$\delta = 4\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon(\lambda) - \sin^2 \theta}, \quad (4.5)$$

em que λ corresponde ao comprimento de onda do laser, $\varepsilon(\lambda)$ representa a permissividade elétrica da sílica em função do comprimento de onda do laser, d é a espessura do espelho, em mm, e θ é o ângulo de incidência do feixe do laser DFB. A transmitância total do sistema, T_{total} , é dada por

$$T_{total} = T^2 = \frac{(1-R)^4}{\sqrt{1+R^2 - 2R \cos(4\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{\varepsilon(\lambda) - \sin^2(\theta)})}}. \quad (4.6)$$

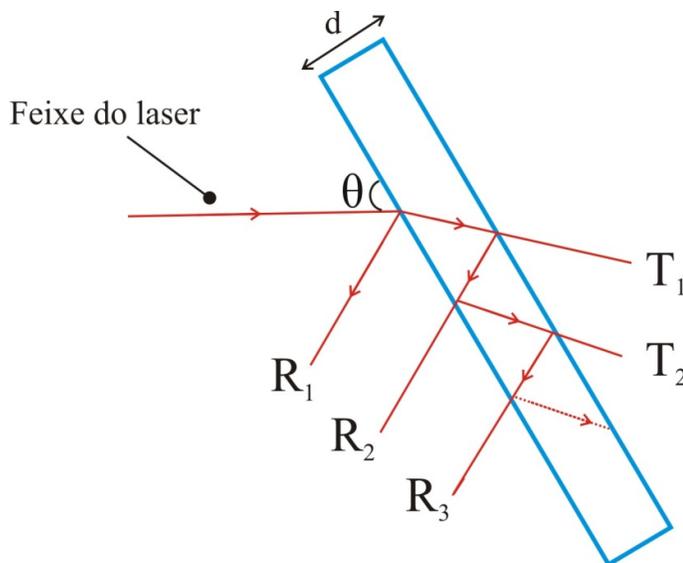


Figura 24 - Desenho ilustrativo do efeito de Etalon na janela óptica com espessura d .

A partir de Equação 4.6 e dos dados obtidos experimentalmente da absorção de CO, foi possível realizar uma simulação no *Mathcad 14* capaz de emular o efeito de Etalon de duas janelas ópticas, de espessura de 4 mm cada, em função do ângulo de incidência θ . Nessa simulação foi admitido o feixe polarizado no plano de incidência. O resultado pode ser visualizado na Figura 25. Observa-se na Figura 25(c) que o valor do ângulo de Brewster é

55,293 graus, onde a linha de absorção fica claramente observada. Na Figura 25(a, b e d) para ângulos inferiores e superiores ao ângulo de Brewster a linha de absorção está distorcida.

Os experimentos de absorção e detecção harmônica com a célula espectrométrica de 130 cm foram importantes para verificar o seguinte:

- O projeto de uma célula espectrométrica com janelas ópticas não se mostra interessante em um projeto de célula a ser inserida em um transformador de potência, pois iria exigir a fixação de colimadores na janela de entrada da célula e na conexão com o fotodetector na janela óptica de saída. Seria muito difícil eliminar o ruído espacial nessas condições.
- Mesmo com o ruído espacial elevado na célula espectrométrica, a estratégia de instrumentação, que consiste em determinar o sinal de *background* e posteriormente, o cálculo do módulo do segundo harmônico, mostrou-se eficiente para aumentar a sensibilidade no limite de detecção da concentração do gás.

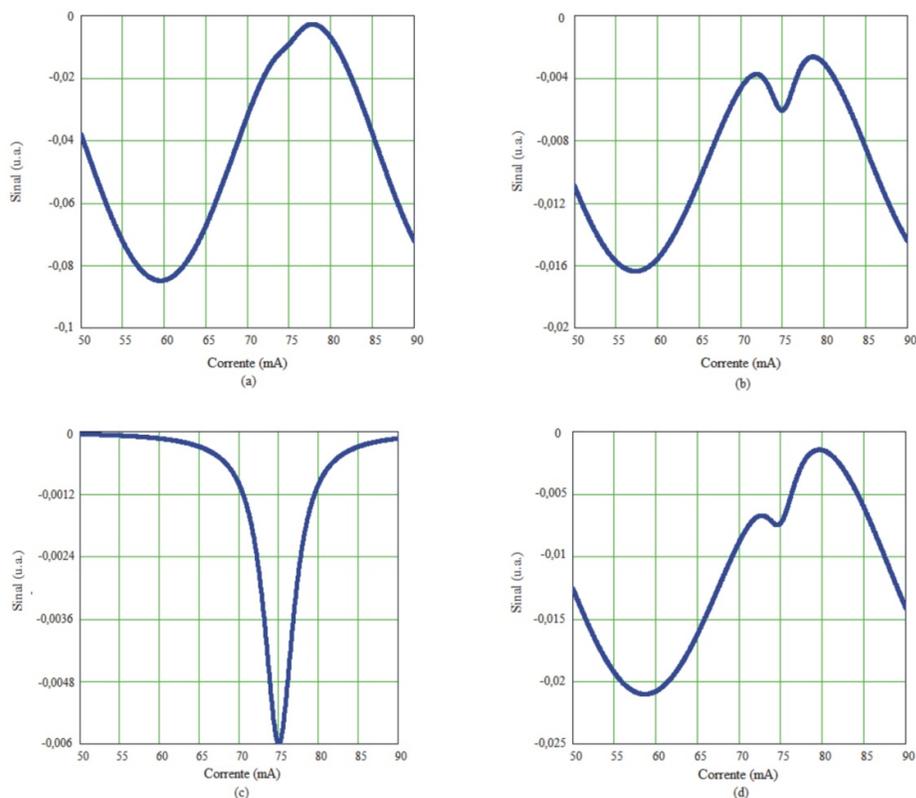


Figura 25 - Simulação do ruído espacial na célula espectrométrica para os ângulos de incidência do feixe do laser DFB iguais a: (a) 40 graus (b) 50 (graus), (c) 55,293 graus (d) 60 graus.

4.7 Detecção harmônica de CO na célula espectrométrica de 25,4 cm

Foram realizados experimentos de absorção e detecção harmônica na célula espectrométrica de 25,4 cm adaptada de um guia de onda planar, existente no LSI. Conforme descrito anteriormente, e ilustrado na Figura 26, essa célula consiste, basicamente, de dois reservatórios, sendo um para a fase gasosa e o outro para o óleo, flanges acopladas a lentes GRIN que colimam o feixe óptico através da célula e tubos de interconexão para entrada e saída de gás, marcados como Tubo 1 e Tubo 2 na Figura 26.

Inicialmente, a saída do laser DFB foi emendada diretamente na fibra da lente GRIN de entrada da célula. Durante o processo de alinhamento foi verificado que o fotodetector conectado na saída da célula estava saturando para valores de corrente no laser abaixo de 30 mA. A partir daí, foi inserido um acoplador direcional de duas saídas 95/5, onde a saída que corresponde a 5 % da luz guiada foi emendada na fibra de entrada da célula. Mesmo assim, era observada a saturação do fotodetector para valores de corrente em torno de 50 mA. Um resistor de 2,2 k Ω foi colocado em paralelo com a entrada do osciloscópio, formando um divisor de corrente para evitar a saturação do fotodetector.

Para os experimentos com essa célula, foi adquirido um cilindro de gás que contém concentração de CO igual a 707117 ppm. Essa concentração foi escolhida através do cálculo de transmitância para medição de absorção direta nessa célula. É esperada uma atenuação de 10% no ponto de máxima absorção.

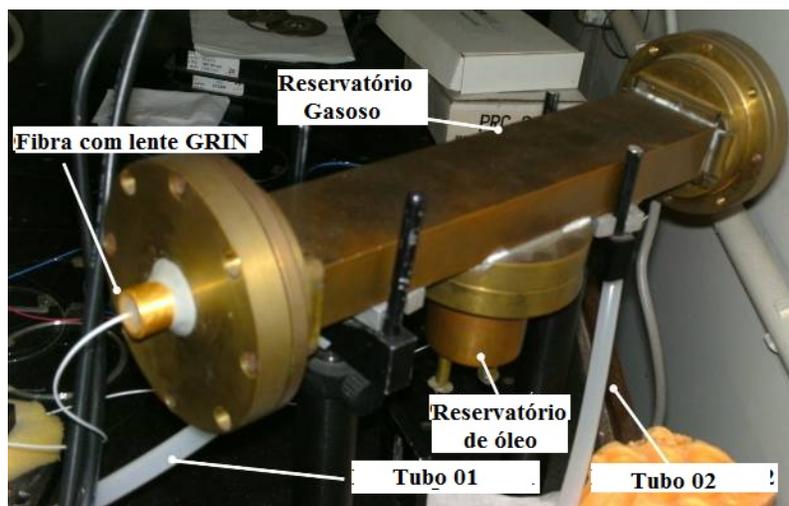


Figura 26 - Fotografia da célula espectrométrica de 25,4 cm [12].

A Figura 27 mostra a curva de absorção de CO. O procedimento experimental adotado para obter o gráfico da Figura 27 foi o mesmo utilizado para a célula de 130 cm. A temperatura de operação do laser foi ajustada para que o comprimento de onda de absorção máximo ocorresse com o laser polarizado em 92,5 mA. Conforme pode ser verificado, a absorção em 92,5 mA é em torno de 9,8 %, muito próximo do valor estimado teoricamente. Além disso, não foram observados padrões perceptíveis de interferência como aqueles visualizados na célula espectrométrica de 130 cm.

Para determinar o sinal de *background* em fase e em quadratura na célula espectrométrica, foi utilizado o mesmo procedimento adotado na célula de 130 cm. A Figura 28 mostra o resultado obtido. Observa-se um sinal aleatório com seu valor próximo de zero, tanto no sinal em fase, como em quadratura. Esse resultado indica que o sinal de *background* não é o limitante nas medições harmônicas de CO nessa célula. Assim é possível estimar que essa célula será capaz de detectar concentrações menores por conta de ter um sinal de *background* menos pronunciado em relação a célula espectrométrica de 130, mesmo levando em consideração o menor comprimento de interação da célula de 25,4 cm.

A partir dos resultados obtidos foi realizado o experimento de detecção harmônica de CO. A temperatura de operação do laser foi ajustada para que o comprimento de onda de absorção máximo ocorresse com o laser polarizado em 82,5 mA. A banda equivalente do ruído para esse experimento foi de 0,112 Hz. Devido ao alto valor de concentração no cilindro de CO, foram realizadas duas diluições consecutivas para cada medição. Esse procedimento foi repetido até que a concentração de CO na célula fosse igual a 690 ppm. Após essa concentração, foi realizada uma diluição para cada medição. Foi calculado o módulo do segundo harmônico a partir das medições do sinal em fase e quadratura, juntamente com a subtração do sinal de *background*, conforme descrito na Equação 3.16. O resultado das medições pode ser visualizado na Figura 29.

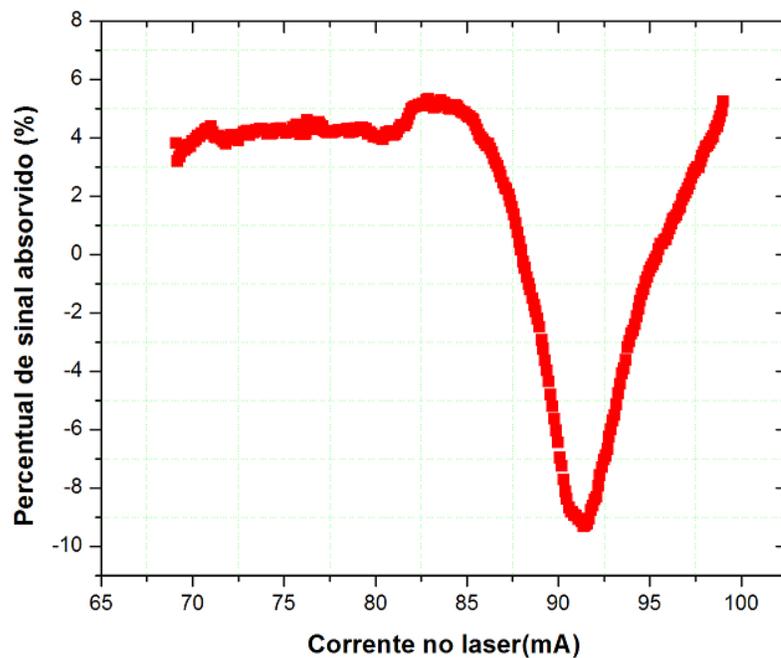


Figura 27 - Gráfico da absorção de CO na célula espectrométrica de 25,4 cm.

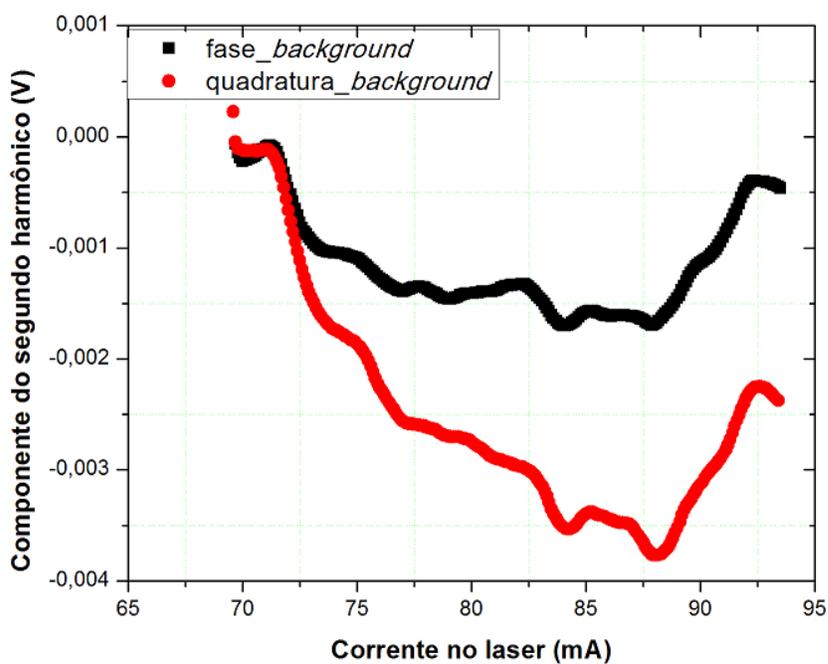
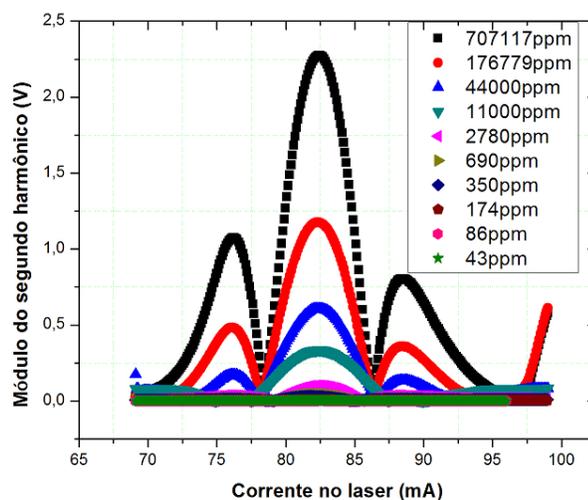
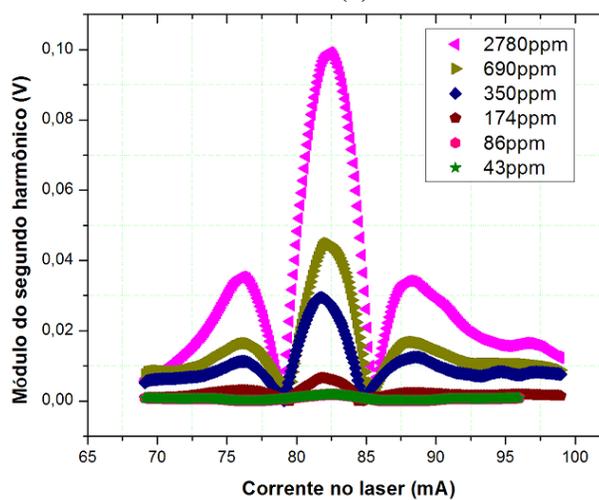


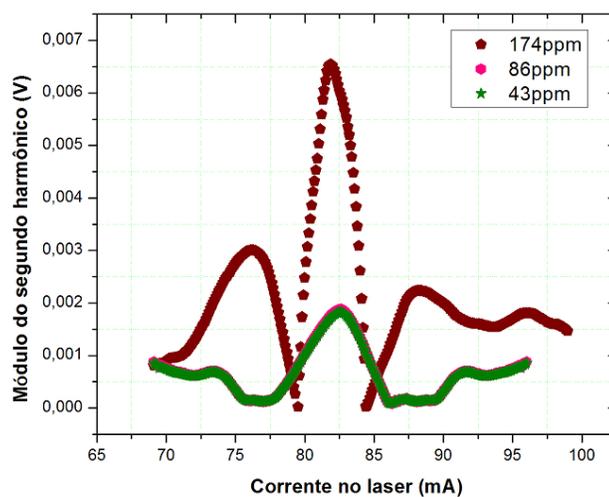
Figura 28 - Sinais de *background* em fase e em quadratura do segundo harmônico na célula espectrométrica de 25,4 cm.



(a)



(b)



(c)

Figura 29(a),(b) e (c) - Gráficos do perfil do módulo do segundo harmônico de CO na célula espectrométrica de 25,4 cm. O segundo e terceiro gráficos representam uma amplificação do primeiro gráfico para melhor visualização dos perfis medidos.

Como pode ser visualizado, o limite de detecção neste experimento ficou compreendido entre 174 ppm e 86 ppm de CO. Além disso, é possível verificar que os perfis dos módulos do segundo harmônico apresentam claramente um sinal de máximo, que coincide com o ponto de operação do laser para a máxima absorção. A partir da 10ª diluição, com a concentração da célula de CO igual a 690 ppm, foi necessário aumentar a faixa dinâmica do amplificador *lock-in*, a fim de monitorar o módulo do segundo harmônico. A faixa dinâmica está associada diretamente com o ajuste do fundo de escala da medição e do ganho que o amplificador tem que inserir para continuar a medir sinal válido, na frequência de referência. Matematicamente, a faixa dinâmica, DR, (do inglês *Dynamic Range*) é dada por [48]

$$DR = 20 \log\left(\frac{2}{SEN}\right) - AC_{gain}, \quad (4.7)$$

onde SEN é o valor de fundo de escala e AC_{gain} é o ganho inserido nas medições. Para todas as medidas realizadas nesta Tese, o fundo de escala adotado foi de 50 mV, correspondendo a uma faixa dinâmica de 32 dB. Para medir a concentração de 690 ppm, o fundo de escala foi ajustado para 20 mV, com DR de 40 dB. Para manter esse perfil na mesma escala das medidas anteriores, foi necessário dividir o sinal adquirido em 690 ppm por 8 dB, valor esse obtido a partir da Equação 4.7. Na 13ª e 14ª diluição foi necessário novo ajuste da faixa dinâmica para o valor de 60 dB, com valor de fundo de escala de 2 mV. Para concentrações abaixo de 86 ppm, o perfil do módulo do segundo harmônico apresentava-se distorcido, mesmo com o aumento da faixa dinâmica do amplificador *lock-in*.

Para a concentração de 86 ppm, o valor de tensão obtido pelo amplificador *lock-in* no ponto de máximo é aproximadamente igual a 1,88 mV. Foi medida a tensão do ruído nessa célula espectrométrica e o valor obtido foi de 395 μ V. Verifica-se que a tensão do ruído é 4,76 vezes menor do que a tensão do ponto de máximo para a concentração de 86 ppm. Assim, considerando a relação linear entre o valor de pico e a concentração de gás no cilindro, estima-se que seria possível medir concentrações de até 18 ppm. De qualquer forma, pode-se determinar a relação sinal/ruído, SN_{dB} máxima do sistema para este experimento, em dB, a partir da seguinte relação [50]

$$SN_{dB} = 20 \log\left(\frac{Máximo(N = 700000 ppm)}{Máximo(N = 86 ppm)}\right), \quad (4.8)$$

onde $Máximo(N = 700000 \text{ ppm})$ e $Máximo(N = 86 \text{ ppm})$ correspondem aos valores de pico do módulo do segundo harmônico para as concentrações de 700000 ppm e 86 ppm, respectivamente e assumindo que $Máximo(N = 86 \text{ ppm})$ é o limite de detecção onde a potência deste sinal é igual a potência do ruído. A partir dos dados experimentais é possível estimar a relação sinal/ruído do sistema igual a 61,6 dB.

A Figura 30 mostra o gráfico do valor de máximo do segundo harmônico em função da concentração de CO. É possível observar que os valores de pico não são linearmente proporcionais à concentração do gás, considerando toda a faixa de diluição do CO. Esse fato ocorre por causa da contaminação entre os cilindros de gases e o circuito de gás. Está em estudos modificar a configuração do sistema de evacuação e inserção. De qualquer forma, foi verificada a sensibilidade do sistema sensor considerando as concentrações medidas entre 86 e 2780 ppm, uma vez que a faixa de concentração de interesse de CO para aplicações no setor elétrico está situada entre 350 e 1400 ppm. O resultado é apresentado na Figura 31. Conforme pode ser visualizado pela curva de tendência, pode-se estimar que a sensibilidade do sistema sensor, na faixa de concentração indicada, é de $3,64 \times 10^{-5} \text{ V/ppm}$.

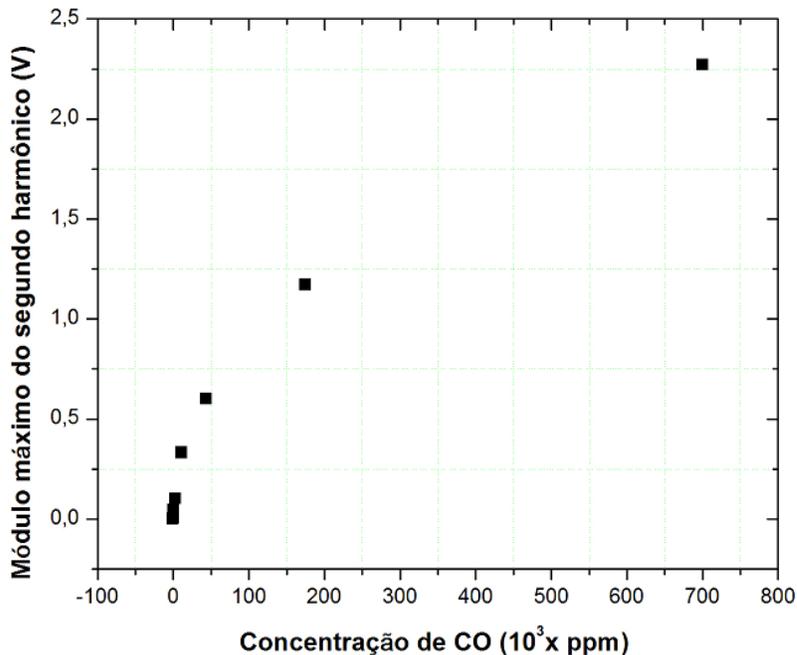


Figura 30 - Gráfico do valor de máximo do módulo do segundo harmônico em função da concentração de CO para a célula espectrométrica de 25,4 cm.

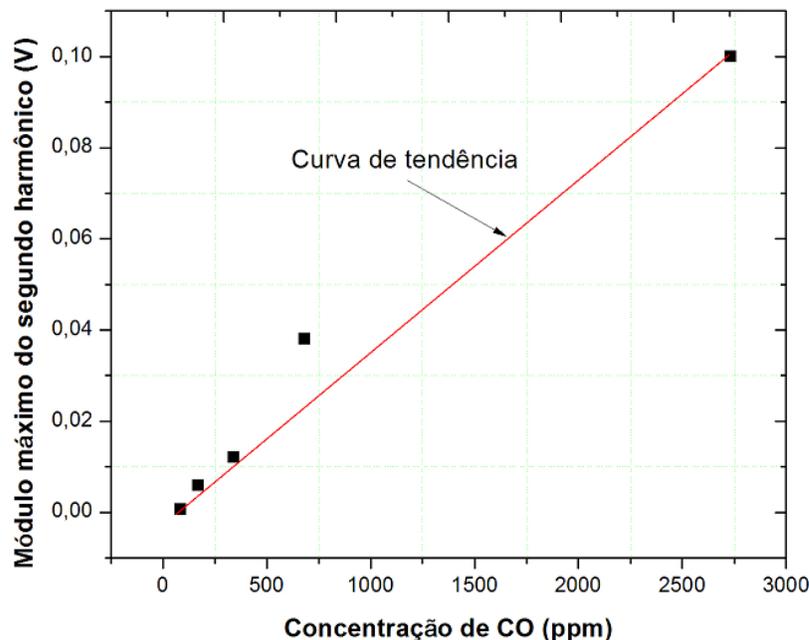


Figura 31 - Gráfico do valor do máximo do módulo do segundo harmônico, em função da concentração de CO para a célula de 25,4 cm, na faixa entre 2780 e 86 ppm.

Em comparação com alguns resultados obtidos da literatura, Engelbret *et. al* [48], Hangauer *et. al* [61] e Korman *et. al.* [62] conseguiram medir respectivamente 5 ppm; 0,11 ppm e 0,2 ppb de CO utilizando a técnica de detecção harmônica do espectro molecular e, em específico, a partir da análise do segundo harmônico. Todavia, em [48] foi utilizada uma célula espectrométrica de 1 m além de um aparato óptico para monitoração de sinais de referência e emprego de polarizadores para ajustar o feixe do laser. Em [61] foi utilizado um laser com comprimento de onda central de 2,3 μm e, nessa região espectral, a secção transversal de absorção é cerca de 50 vezes mais intensa do que no comprimento de onda central de 1568 nm. O comprimento da célula espectrométrica usada em [61] é de 40 cm. Em [62] foi utilizado um laser com comprimento de onda central em 4,6 μm . Nessa região, a linha exibe uma secção transversal de absorção cerca de 20000 vezes mais forte quando comparada com a região do infravermelho próximo (1,2 - 1,6 μm), além de utilizar uma célula de múltiplas passagens com comprimento de interação total de 36 m.

Assim, os resultados obtidos nesta Tese com a detecção harmônica de CO, utilizando um laser de 1568 nm e uma célula espectrométrica de única passagem de 25,4 cm, obtendo-se uma detecção mínima de 86 ppm mostra-se relevante, considerando o aparato instrumental mais simples em comparação aos trabalhos relatados em [48], [61-62]. O limite de detecção de CO exigido em DGA em óleo isolante é de 350 ppm e conseqüentemente a estratégia de

obtenção do sinal, conforme proposta nesta Tese, teria a sensibilidade adequada para aplicações em DGA em tempo real. Ademais, o custo, a simplicidade na construção e alinhamento dessa célula espectrométrica são atrativos para o desenvolvimento do protótipo simples de monitoração remota, em comparação com as células de múltiplas passagens.

O próximo capítulo irá descrever em detalhes o desenvolvimento do protótipo do Módulo de Controle de Aquisição (MCA).

5. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO MÓDULO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO (MCA)

Como desafio para o desenvolvimento do módulo eletro-óptico descrito na Figura 10 do Capítulo 3, pode-se citar, por exemplo, a seleção de um entre os cinco lasers DFB para que ele esteja eletricamente conectado a um controlador. Este deve ser preciso no ajuste da corrente de operação e controle de temperatura do laser. Ademais, o amplificador *lock-in* é o equipamento fundamental para promover a detecção harmônica do gás de interesse.

Estão disponíveis no mercado diversos tipos de controladores de laser e amplificadores *lock-in* digitais de bancada que podem ser comandados por meio de protocolos de comunicação serial. A partir de um microcontrolador, é possível realizar a automação destes equipamentos. Todavia, a proposta desta Tese é o desenvolvimento de um sistema remoto de baixo custo. Utilizar equipamentos de bancada, além de requerer cuidados adicionais no seu acondicionamento, implica também que o custo do sistema completo seria similar ao de sistemas comerciais. Optou-se então por utilizar um controlador OEM (do inglês *Original Equipment Manufacturer*) de baixo custo. Os parâmetros de controle são obtidos por meio de nível de tensão em entradas específicas do equipamento. Dai, faz-se necessário utilizar conversores digital/analógico para que seja possível o controle deste equipamento por meio de um microcontrolador.

No estágio de desenvolvimento apresentado na Figura 10 será utilizado um amplificador *lock-in* analógico, também OEM devido ao seu custo reduzido. Entretanto, este tipo de equipamento não possui oscilador interno, e apenas aceita sinal TTL como sinal de referência. Dai, faz-se necessário utilizar um oscilador programável por microcontrolador para promover a modulação em amplitude do laser DFB e gerar o sinal TTL. Ambas as situações requerem o auxílio de amplificadores e comparadores.

Para a conexão entre o laser selecionado e o controlador OEM são utilizados relés de estado sólido. Esse tipo de dispositivo foi escolhido em detrimento do tradicional multiplexador analógico. Essa opção foi adotada tendo em vista que o multiplexador analógico não suportaria as altas correntes de operação tanto do laser DFB quanto do *peltier*, uma limitação que não se verifica para o caso dos relés de estado sólido [63].

Este capítulo descreve em detalhes o projeto do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA), que faz uso de uma fonte de corrente e um controlador de temperatura do laser OEM, integrados no mesmo equipamento, conversores digitais/analógicos, osciladores, relés de estado sólido, e demais dispositivos que permitam selecionar e controlar mais de um

laser DFB, além de viabilizar experimentos de detecção harmônica a partir de um computador pessoal. Todo o desenvolvimento, tanto do *hardware* quanto do *software* do protótipo do MCA aqui apresentado foi feito de forma a facilitar a expansão do sistema para o controle de cinco lasers. Trata-se de uma solução inovadora, não encontrada na literatura, para a sintonia precisa de vários lasers, estes tendo pontos de operação específicos, com apenas um controlador de corrente e de temperatura.

5.1 Desenvolvimento do *hardware* do MCA

A Figura 32 mostra o diagrama de blocos do protótipo do Sistema de Controle e Aquisição (MCA) com os requisitos relatados no Capítulo 3. O microcontrolador da *Microchip* PIC 18F4550 [64] possui um programa residente, que se comunica, a partir de protocolos de comunicação serial, com um programa residente em um PC. A escolha pelos microcontroladores da *Microchip* é devida, principalmente, à familiaridade dos pesquisadores do LSI com sua linguagem de programação e também pela experiência positiva adquirida em outros projetos de P&D com circuitos operando há três anos ininterruptos sem necessidade de manutenção em ambiente com grande variação de temperatura e ruídos eletromagnéticos [65].

O usuário, a partir do computador pessoal, conectado ao MCA por meio de um conversor USB/RS232, digita os parâmetros do experimento de espectroscopia e o programa no microcontrolador envia, para os dispositivos específicos, os comandos necessários para realizar a detecção harmônica de um determinado gás. Esses comandos incluem a seleção de um dos lasers disponíveis, os limites superior e inferior da corrente do laser, o valor da frequência do oscilador e o valor da resistência do termistor, para que o laser opere a uma dada temperatura.

Após a seleção de todos os parâmetros do experimento, o microcontrolador PIC irá, inicialmente, acionar os respectivos relés de estado sólido responsáveis por conectar eletricamente o laser selecionado com o LDTC0520. Um circuito dedicado para cada laser é responsável por fornecer corrente suficiente para o acionamento dos relés. Em seguida, o oscilador fornece em sua saída um sinal senoidal com frequência determinada pelo usuário. O próximo passo é o ajuste do valor da resistência do termistor através do conversor digital/análogo (DAC). Além disso, o valor da corrente injetada no laser DFB irá variar entre os limites inferior e superior de corrente também através de um DAC. Os dois DACs,

assim como o oscilador, são controlados pelo microcontrolador a partir do protocolo de comunicação SPI.

O sinal de saída do amplificador *lock-in*, bem como parâmetros de temperatura do laser e potência óptica do laser, são registrados pelos conversores analógico/digital do microcontrolador PIC. Todas essas informações, juntamente com os valores de varredura da corrente do laser, são transmitidas via protocolo serial para o programa residente no PC. Os resultados obtidos são apresentados em forma tabular para análise gráfica em programas específicos.

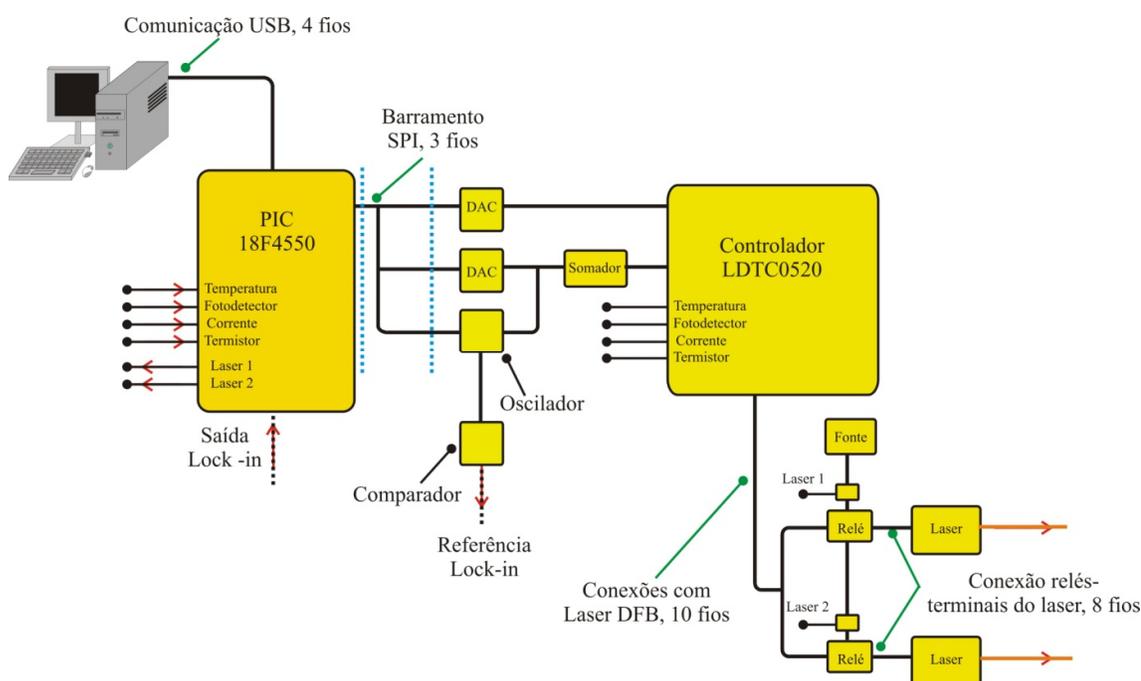


Figura 32 - Diagrama esquemático do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA) O *lock-in* está suprimido.

Para que o laser opere com variações mínimas no seu comprimento de onda, deve-se utilizar uma fonte de corrente estável e um controlador de temperatura. Para essa finalidade, é utilizado o equipamento LDTC0520 da *Wavelength Instruments* [66]. Esse equipamento é constituído da fonte de corrente modelo FL500 e um controlador de temperatura modelo WLD3343, ambos da *Wavelength Instruments*. A fonte de corrente atende as especificações do projeto em relação aos limites de operação, tempo de estabilização e profundidade de modulação da corrente. O controlador de temperatura atende as especificações no tocante ao tipo de sensor de temperatura e velocidade de atuação do *peltier*. Outros fatores para a escolha entre demais variedades disponíveis no mercado é por se tratar de um equipamento OEM e de custo inferior a 500 dólares. A Figura 33 mostra o desenho das conexões do equipamento.

Como pode ser observado, é possível monitorar os valores de corrente do laser, o sinal de tensão proveniente do fotodetector incorporado no encapsulamento do laser DFB, e os valores de temperatura selecionada para operação e monitoração da temperatura atual. De posse dessas informações é possível, em aplicações futuras, implementar uma malha de controle fechada via *software* para evitar danos ao equipamento e ao laser.

Os parâmetros de controle do LDTC0520, que são o ajuste da corrente e temperatura de operação do laser, são determinados a partir de valores de tensão aplicados em entradas específicas do equipamento. Para fornecer esses valores de tensão são utilizados dois conversores digital/analgico, (DAC), com resolução de 10 bits, TLC5615 da *Texas Instruments* [67]. Esses DACs são comandados pelo microcontrolador a partir do protocolo de comunicação SPI. Um desses DACs é responsável por fornecer a corrente DC de operação do laser e também permitir a variação da corrente em uma faixa definida pelo usuário. O outro DAC é responsável pelo ajuste da temperatura do laser e deverá manter esse valor durante toda a execução do experimento de espectroscopia.

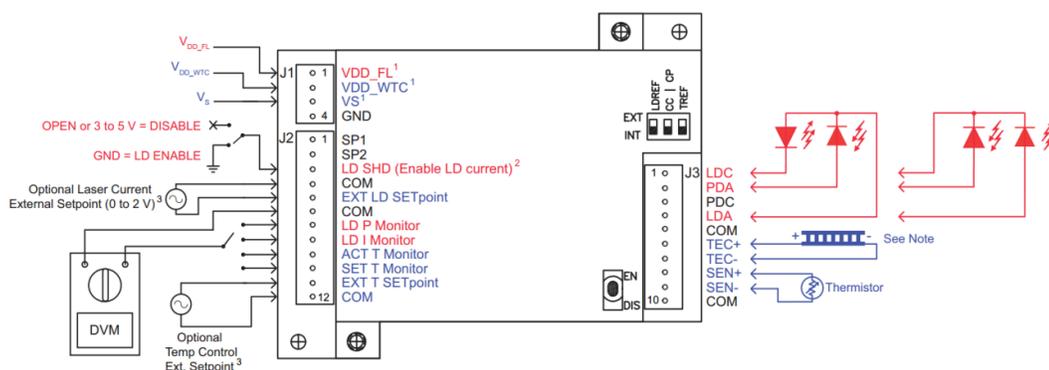


Figura 33 - Desenho do LDTC0520. Figura extraída de [64].

Em relação ao circuito oscilador responsável por inserir um sinal senoidal para modular a corrente de laser e também servir como sinal de referência do *lock-in*, é utilizado o circuito integrado AD9833 da *Analog Devices* [68]. Ele requer um *clock* de referência de até 25 MHz, resistores de alta precisão e capacitores de desacoplamento para disponibilizar sinais gerados digitalmente, com frequência de até 12,5 MHz. A Figura 34 mostra uma fotografia da placa de circuito impresso que contém o oscilador, o cristal de 25 MHz e demais componentes.



Figura 34 - Fotografia da placa de circuito que contém o AD9833 e demais componentes.

O AD9833 tem uma interface serial de 3 pinos, que é compatível com o protocolo de comunicação SPI. O dado é carregado no dispositivo como uma palavra digital de 16 bits, sob o controle de um *clock* de entrada serial. Os parâmetros para o oscilador, que será utilizado nos experimentos de detecção harmônica, são que a amplitude e frequência sejam em torno de $40 \text{ mV}_{\text{rms}}$ e de no máximo 6 kHz, respectivamente. De acordo com o *datasheet* do AD9833 [68], não é possível ajustar via *software* a amplitude da sinal de saída. Dessa maneira, foi projetado e montado um circuito para o ajuste desta amplitude. Diante desse fato, o único parâmetro selecionado pelo usuário é a frequência da onda senoidal, uma vez que não será necessário utilizar outra forma de onda (triangular ou quadrada) e nem ajuste de fase.

A Figura 35 mostra o *layout* da placa de circuito impresso de parte do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA). O desenho da placa foi realizado no programa *Proteus 8.1*. Além dos equipamentos e componentes eletrônicos citados, esse *hardware* possui circuitos de teste do LDTC0520 que viabilizam a emulação do laser, do termistor e do *peltier*. A Figura 36 mostra os circuitos utilizados para essa finalidade. A Figura 36(a) é o circuito responsável para a emulação do laser. Os circuitos das Figura 36(b) e Figura 36(c) são responsáveis por emular o termistor e o *peltier* respectivamente [66]. Esses dois circuitos serão utilizados para calibração do sistema de controle de temperatura do laser.

O sinal senoidal no LDTC0520, é inserido no pino *EXT LD SET Point* através da saída do DAC, responsável por injetar a corrente no laser DFB, juntamente com o sinal de saída do oscilador AD9833. Ademais, faz-se necessário utilizar um sinal TTL para referência do amplificador *lock-in*, pois em aplicações futuras será utilizado um *lock-in* analógico e essa

categoria de equipamento permite apenas sinal TTL como referência. Para tal, foi utilizada a matriz de amplificadores operacionais LM324 para o projeto de um circuito comparador de malha aberta e um circuito amplificador somador não-inversor. O primeiro circuito gera em sua saída um sinal TTL com frequência igual ao da saída do oscilador. O segundo irá somar os sinais de saída do DAC e o oscilador, além de adequar a magnitude desses para os experimentos de espectroscopia.

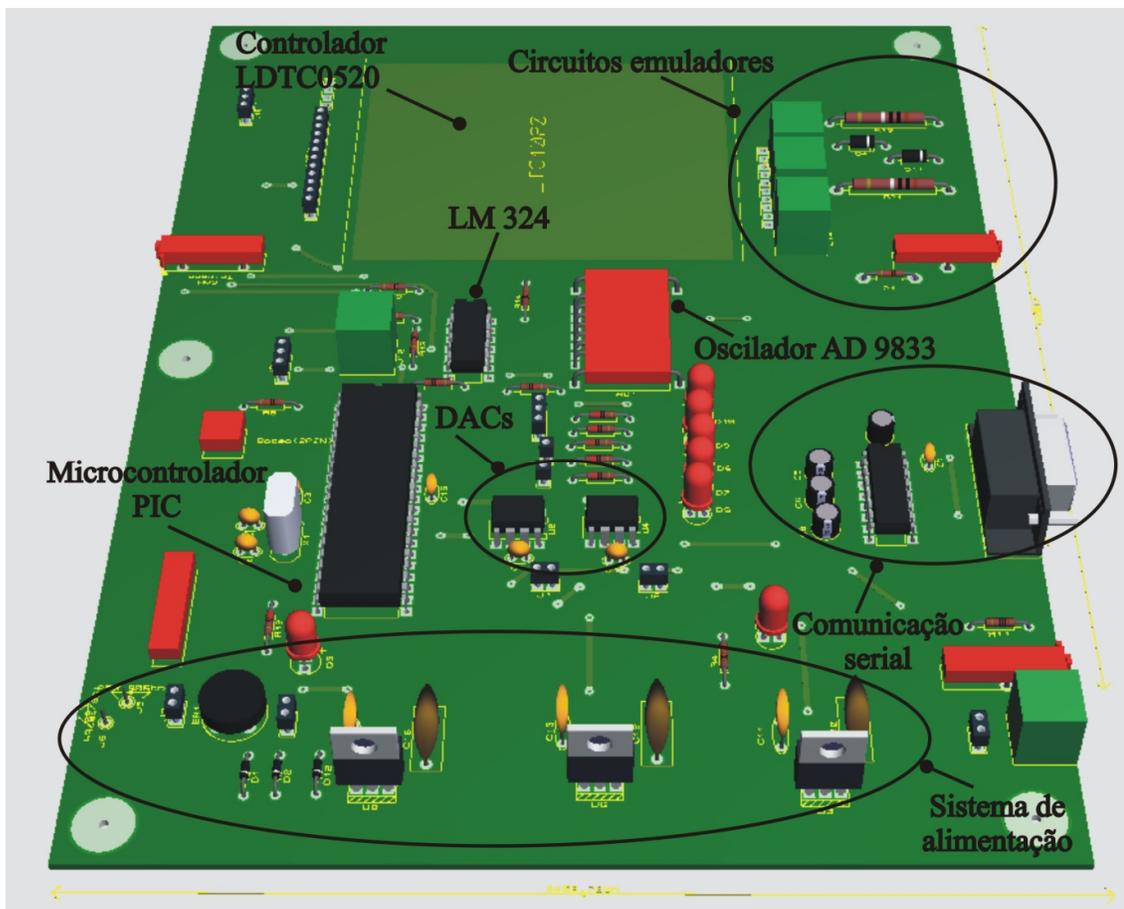


Figura 35 - Layout de parte do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA).

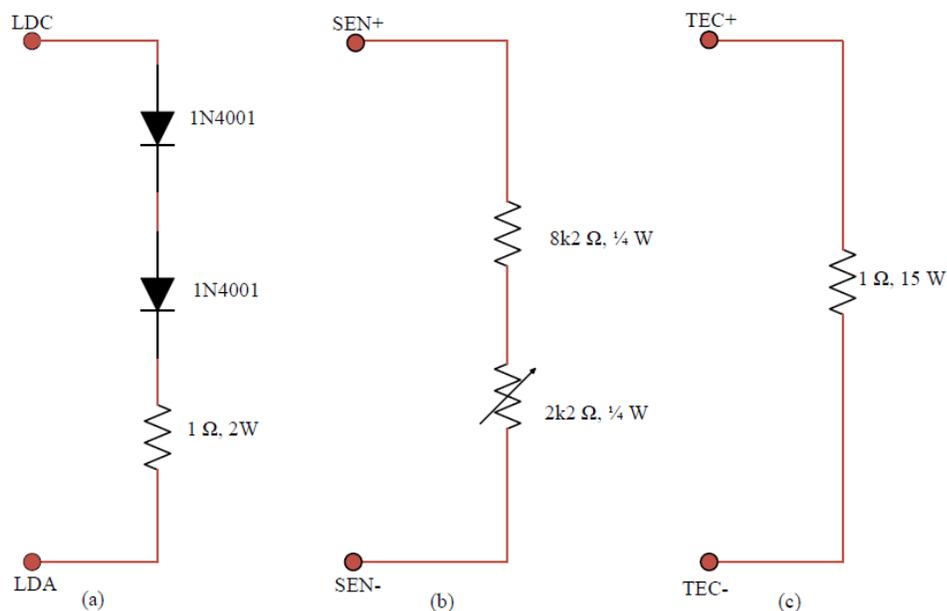


Figura 36 - Desenho dos circuitos de emulação do (a) laser, (b) termistor e (c) peltier.

Para promover a conexão entre dois lasers com o LDTC0520, onde um laser estará operando por vez, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso. A Figura 37 mostra o *layout* da placa. Ela, juntamente com o circuito impresso apresentado na Figura 35, representam o protótipo do MCA. A placa da Figura 37 contém dois tipos de relés de estado sólido, regulador de tensão, transistor, lasers DFB propriamente ditos e circuitos auxiliares. Os relés de estado sólido são responsáveis por conectar eletricamente os lasers DFB e o LDTC0520, sendo o modelo G3VM-41AY/DY da *RoHS Compliant* responsável pela conexão elétrica do *peltier*, já que a sua corrente de trabalho é em torno de 1 A e esse relé suporta correntes DC de até 2 A. O relé de estado sólido modelo LH1502BAC da *Vishay* é responsável pelas demais conexões elétricas do laser DFB.

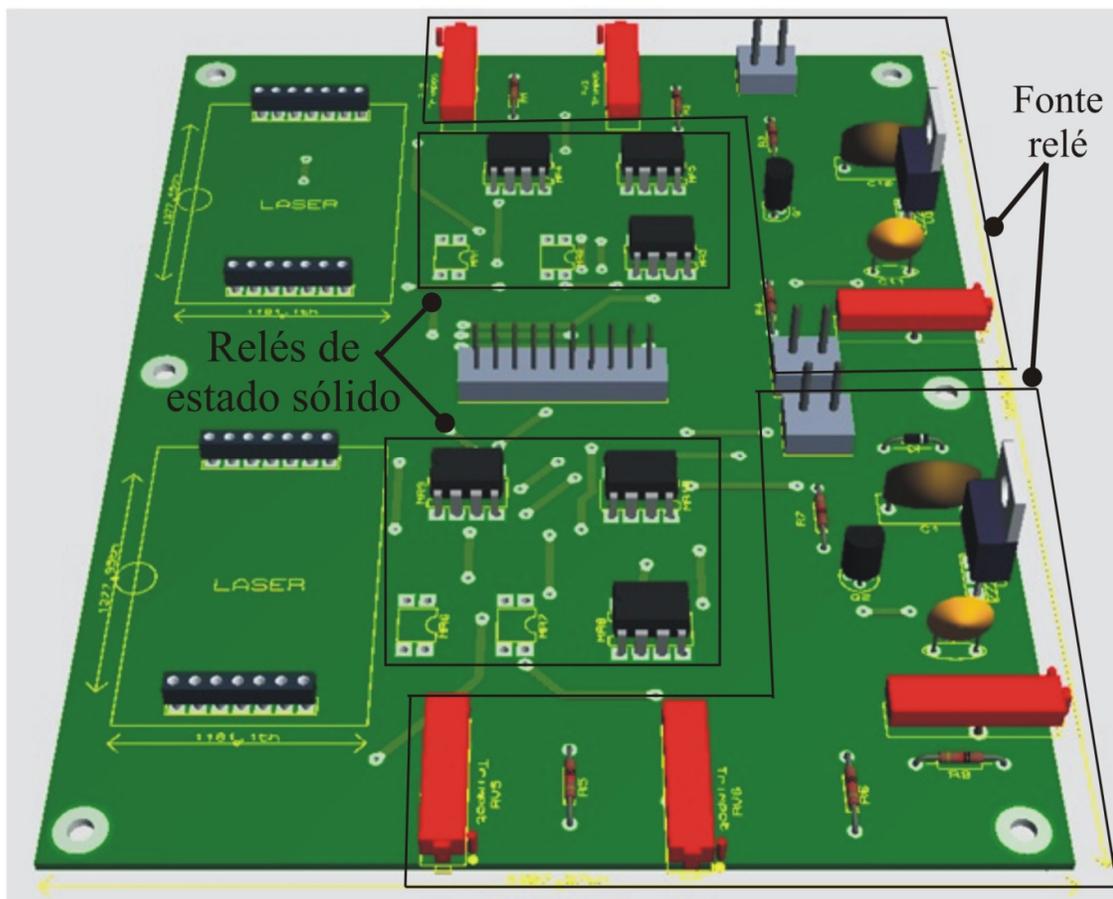


Figura 37 - *Layout* da placa de multiplexação de dois laser DFB.

Duas saídas do microcontrolador PIC estão habilitadas para ir ao estado lógico alto quando o usuário selecionar um dos lasers. Cada saída do microcontrolador habilitada para essa finalidade está conectada a um circuito responsável por fornecer corrente aos relés de estado sólido. A Figura 38 mostra o desenho do circuito. São utilizados um regulador 7805, um transistor BC567, resistores e *trimpots* para cada circuito. A respectiva saída do microcontrolador PIC está conectada na base do transistor, e quando essa saída for para o nível lógico alto, o transistor fica na região ativa devido a flutuações de tensão no emissor. Assim, o regulador irá fornecer a corrente necessária para acionar o conjunto de relés conectando o laser DFB selecionado ao LDTC0520. No emissor do transistor estão conectados potenciômetros para ajustes de tensão nas entradas do conjunto de relés. É possível observar que, para acrescentar outros lasers DFB, basta inserir no desenho da placa de circuito impresso o conjunto de relés e o circuito apresentado na Figura 38.

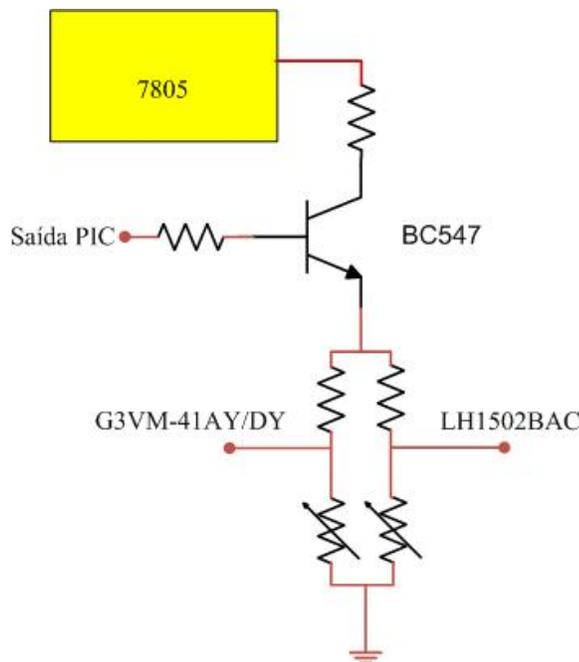


Figura 38 - Desenho do circuito que fornece corrente aos relés de estado sólido.

5.2 Programa residente do microcontrolador e de aquisição de dados

Diante do protótipo aqui concebido, foi desenvolvido o programa residente no microcontrolador que permite ao usuário selecionar os seguintes parâmetros:

- um laser entre dois disponíveis, neste estágio de desenvolvimento do MCA;
- o limite inferior e o superior de corrente (em mA) que deseja trabalhar;
- o valor da tensão de referência. Esse parâmetro determina qual o menor incremento de corrente, ou seja, calcula o passo mínimo que o DAC é capaz de fornecer;
- o valor da resistência do termistor (em $k\Omega$) e;
- o valor da frequência do oscilador (em Hz).

Após a seleção de todos os parâmetros, o respectivo laser será selecionado a partir do acionamento dos relés de estado sólido conectados ao laser. Esse acionamento ocorre quando a respectiva saída digital do microcontrolador atinge o nível lógico alto, acionando o circuito da Figura 38 e assim energizando os respectivos relés de estado sólido. É realizada a

aquisição do sinal de saída do amplificador *lock-in*, além dos valores de potência óptica e corrente no laser. É obtido também o valor da resistência do termistor definido pelo usuário bem como o valor da resistência do termistor monitorado diretamente do encapsulamento *butterfly* do laser DFB, sendo todos esses parâmetros fornecidos pelo controlador LDTC0520. Esses valores são adquiridos a partir dos cinco conversores A/D, habilitados do microcontrolador PIC e os resultados obtidos juntamente, com o respectivo valor de corrente do laser são transmitidos via serial para o programa residente do PC.

A Figura 39 mostra o fluxograma do programa residente no microcontrolador. Ele foi desenvolvido no compilador para microcontroladores da *Microchip* em C, *CCS4.2*. Os conversores digital/analógico (DACs) e o oscilador são controlados pelo microcontrolador PIC através do protocolo de comunicação SPI. (*Serial Peripheral Interface*). Este é um protocolo de dados seriais síncronos utilizado em microcontroladores para comunicação com um ou mais periféricos [69]. Nesse tipo de protocolo, o microcontrolador atua como dispositivo mestre e os DACs, além do oscilador, atuam como dispositivos escravos. Nesta Tese, a SPI foi emulada em portas genéricas do microcontrolador, pois o pino de envio de dados deste tipo de protocolo é o mesmo utilizado pela comunicação RS232, também utilizada no protótipo do MCA. A Figura 40 ilustra o diagrama de blocos.

Conforme pode ser visualizado na Figura 40, existem três conexões nesse protocolo [69]:

- MOSI (*Master OUT Slave IN*) - Dados do dispositivo mestre para o dispositivo escravo.
- SCK (*Serial Clock*) - *Clock* de sincronização para transmissão de dados entre o dispositivo mestre e o dispositivo escravo.
- \overline{SS} (*Slave Select*) - Seleciona qual dispositivo escravo receberá os dados.

Assim, o programa residente do microcontrolador PIC seleciona o dispositivo a partir do acionamento do pino \overline{SS} , envia uma sequência de impulsos no pino SCK e transmite os dados propriamente ditos no pino MOSI. Inicialmente, é acionado o DAC responsável pelo ajuste do valor da resistência do termistor, posteriormente o AD9833. Esses dois dispositivos não possuem seus valores modificados até o fim do experimento de espectroscopia. Por fim, o DAC responsável pela varredura da corrente do laser DFB tem o seu valor atualizado após um

ciclo de programa. Ao atingir o limite superior de corrente definido pelo usuário o programa é encerrado.

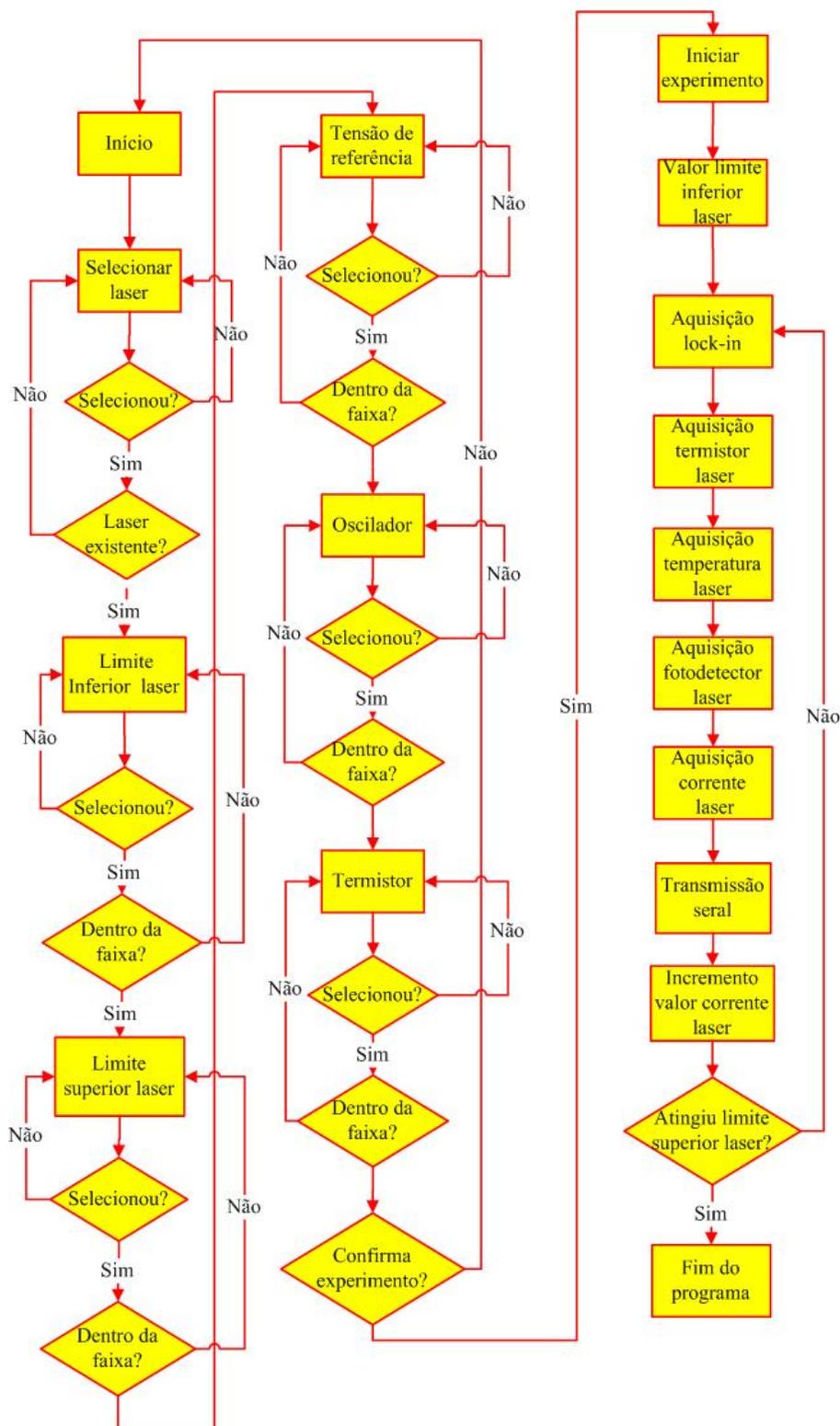


Figura 39 - Fluxograma do programa residente do microcontrolador.

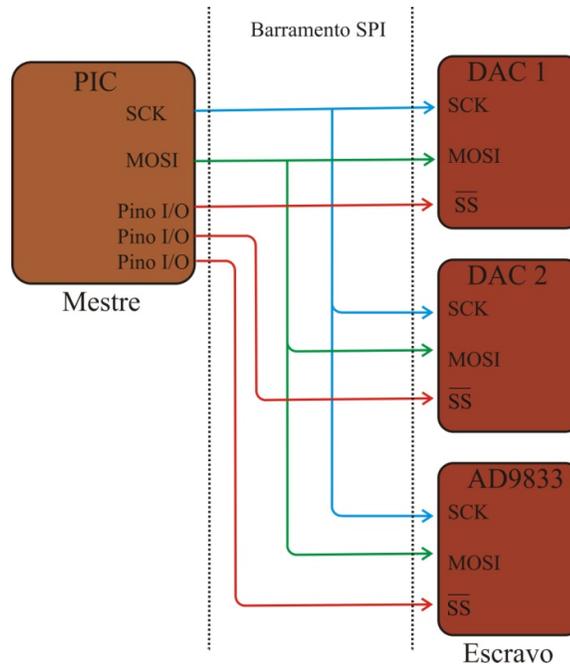


Figura 40 - Diagrama das conexões SPI entre o microcontrolador e os periféricos.

Para operar com o conversor digital/analógico TLC5615, apesar dele ser um conversor digital/analógico de 10 bits, é necessário enviar pacotes de dados de 16 bits. Dos 6 bits excedentes, dois bits são utilizados para operações de interrupções do tipo *Daisy Chain* e os demais são para preencher o pacote para totalizar 16 bits. Essa categoria de bits é denominada de *Bits Dummy*. Para a correta aquisição do valor da tensão de saída, é necessário realizar uma operação de deslocamento de bits e uma operação AND, bit a bit.

No tocante ao ajuste do valor da resistência do termistor, de acordo com [57] e [66], para efeitos de calibração, considerando um termistor de resistência igual a 10 k Ω em um ambiente com temperatura de 25 °C, a tensão sobre esse será de 1 V. Ainda de acordo com [57] e [69] a equação que relaciona o valor da resistência do termistor, do tipo NTC, com a temperatura é:

$$R(T) = R_0 \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (5.1)$$

onde $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$, $T_0 = 298,15 \text{ K}$ e β é a constante do termistor. Foi verificado que para todos os lasers utilizados neste trabalho, tem-se $\beta = 3900 \text{ K}$. Como pode ser observada na Equação 5.1, a relação entre o valor da resistência do termistor com a temperatura não é linear. Todavia, os controladores de temperatura responsáveis por ajustar a temperatura do laser são

dotados de uma fonte de corrente contínua com o valor fixo de 100 μ A. Assim, a tensão de saída do DAC, V_D , será:

$$V_D = R(T) \times 10^{-4}. \quad (5.2)$$

Dessa maneira, o microcontrolador PIC deve enviar o comando para que a tensão na saída desse DAC seja igual ao valor obtido a partir da Equação 5.2 e esse deve permanecer inalterado até o fim do experimento.

Em relação à varredura da corrente do laser na faixa compreendida entre os limites superior e inferior, definidos pelo usuário, tem-se que, de acordo com [67], o menor incremento de tensão que pode ocorrer na saída do TLC5615, definido como V_{in} , é

$$V_{in} = \frac{2V_{ref}}{1023}, \quad (5.1)$$

onde V_{ref} é a tensão de referência do DAC. Como parâmetro de projeto, um divisor de tensão de 1,0 V foi conectado no pino referente a tensão de referência. Daí, os valores selecionados pelo usuário devem ser entre 1 e 2,5 V, já que o valor máximo de V_{ref} é a metade da tensão de polarização do TLC5615. De acordo com [66], a função transferência da fonte de corrente é de 250 mA/V. Assim, o menor incremento de corrente que pode ocorrer na saída da fonte será:

$$I_{in} = V_{in} \times 250(mA) \quad (5.1)$$

Com isso, o programa residente no microcontrolador PIC deve enviar para o DAC o valor inicial de tensão, que corresponde ao valor inicial de corrente no laser, definido pelo usuário e deverá incrementar esse valor definido pelo V_{in} , que corresponde ao I_{in} , até atingir o valor do limite superior de corrente no laser.

Sobre o oscilador programável AD9833, de acordo com o seu *datasheet* [68] é necessário enviar cinco comandos para cinco registradores específicos, que permitem ao oscilador identificar os dados transmitidos pelo microcontrolador como um sinal válido. Os cinco registradores são:

- Registrador de controle: indica o início do ciclo de operação do oscilador. A configuração padrão é $(0x21)_{16}$.

- Registrador de dígitos mais significativos do valor da frequência do oscilador.
- Registrador de dígitos menos significativos do valor de frequência do oscilador.
- Registrador de valor de fase. A configuração padrão é $(0xC)_{16}$, pois nas aplicações desse projeto o valor de deslocamento de fase será zero.
- Registrador de reset, indicando o fim da transmissão dos comandos. A configuração padrão é $(0x2)_{16}$.

Foram habilitados 14 bits para que o valor de frequência máxima da saída do oscilador seja de aproximadamente 6 kHz. Logo, no programa, são realizados deslocamentos de bits para que os respectivos bits que compreendem o valor da frequência de saída sejam devidamente alocados nos registradores de dígitos mais e menos significativos. Por fim, todas as informações são transmitidas via o barramento SPI do microcontrolador PIC para o oscilador, na sequência de registradores especificadas acima.

Para a inserção dos parâmetros e a recepção das informações do experimento de espectroscopia, foi desenvolvido um programa com interface gráfica. A Figura 41 mostra a tela de trabalho do referido aplicativo. Como pode ser observado, existem os campos para inserir as informações de limites superior e inferior de corrente, valor da resistência do termistor, frequência do oscilador AD9833 e valor de referência dos DACs. Após inserir os dados o programa interroga o usuário para confirmar se eles estão corretos. Os parâmetros monitorados são: módulo do sinal de saída do amplificador *lock-in* (ADC1), potência óptica do laser (ADC2), corrente do laser (ADC3), valor selecionado de temperatura do termistor, em $k\Omega$, (ADC4) e o valor atual da temperatura do termistor, em $k\Omega$ (ADC5). Em seguida, o programa realiza a aquisição de 100 valores das medidas do *lock-in* e dos parâmetros obtidos e realiza uma média aritmética desses valores. Por fim, para cada incremento de corrente do laser DFB os resultados são apresentados em forma tabular e novas aquisições são realizadas, até atingir o limite superior de corrente.

O próximo capítulo relata a análise de desempenho do MCA.

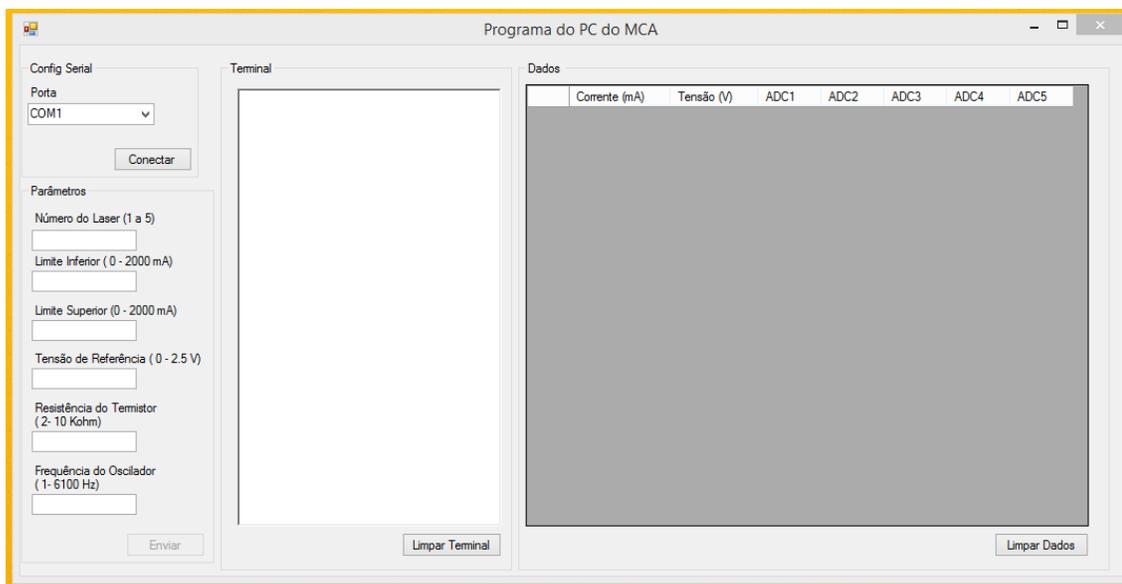


Figura 41 - Tela inicial do aplicativo de controle do MCA pelo PC.

6. ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTÓTIPO DO MÓDULO DE CONTROLE E AQUISIÇÃO

Neste capítulo são relatados os experimentos realizados com o protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA). Esses experimentos consistem, inicialmente, em emular o laser, o termistor e o *peltier* com os circuitos indicados na Figura 36. A partir do circuito da Figura 36(a) foi monitorado o valor de corrente injetada no circuito emulador do laser. A calibração do controlador de temperatura foi analisada a partir da variação do valor da resistência do termistor e velocidade de atuação do controlador através dos circuitos das Figura 36(b) e (c). A caracterização do oscilador também é apresentada neste capítulo.

Os outros experimentos realizados incluem testes do protótipo do MCA com dois lasers DFB, sendo um laser operando por vez. Foram analisados os espectros de saída, a potência óptica e a variação do comprimento de onda em função da corrente injetada no laser para um valor fixo de termistor.

Experimentos preliminares de absorção e detecção harmônica de CO também foram realizados. Em todos os experimentos descritos neste capítulo foram realizadas comparações com o sistema de detecção de gases existente no Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI. A inserção de todos os parâmetros do experimento do MCA, bem como a aquisição dos resultados, foram realizados a partir do programa residente do computador pessoal.

6.1 Variação de corrente com o circuito de emulação do laser

Para determinar se o programa residente do microcontrolador está realizando a variação da corrente do laser na faixa determinada, bem como o incremento de corrente de acordo com as especificações do usuário, foi realizado um experimento com o circuito emulador do laser, indicado na Figura 36(a). Foi selecionada uma faixa de operação do laser compreendida entre 70 e 100 mA, com o incremento de corrente de 0,1 mA. O pino *LD I MON* do LDTC0520 foi conectado a um dos conversores A/D do microcontrolador PIC e o resultado adquirido no PC é o valor de tensão no circuito emulador do laser. A partir da função transferência do LDTC0520, que é de 250 mA/V, é possível obter o valor de corrente que o atravessa.

Foram adquiridos também os valores de corrente do laser DFB de 1568 nm, obtidos diretamente a partir do sistema do LSI, na mesma faixa de corrente e com o mesmo incremento. A Figura 42 mostra o gráfico comparando os resultados do MCA e do LSI e também com os valores de corrente determinados pelo usuário, chamados nesse experimento

de valores esperados em função do número de interações, onde cada interação corresponde a um múltiplo do incremento de corrente.

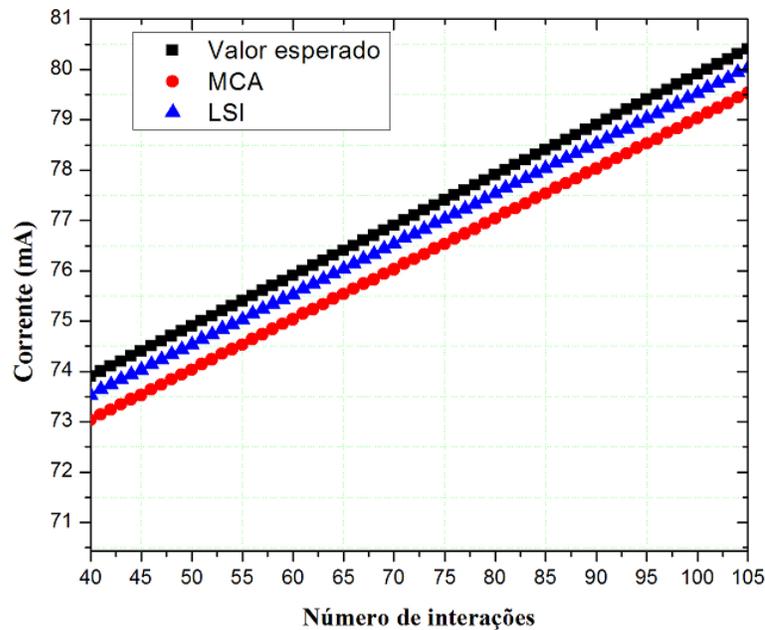


Figura 42 - Gráfico do valor da corrente no laser fornecida pelo sistema do LSI, pelo MCA e o valor selecionado pelo usuário em função do número de interações.

Os valores de corrente, tanto do MCA como do LSI são muito próximos entre si e ambos são bem próximos aos valores selecionados pelo usuário. Conforme pode ser visualizado na Figura 42, por exemplo, na 70ª interação, o valor esperado de corrente é de 77 mA e os valores obtidos pelo LSI e MCA são, respectivamente, iguais a 76,522 e 76,026 mA. A partir dos gráficos da Figura 42, é possível constatar um descolamento dos resultados obtidos pelo LSI e pelo MCA iguais a 0,478 e 0,974 mA, respectivamente em relação ao valor esperado. O maior desvio de corrente, apresentado pelo circuito emulador se deve provavelmente a aproximações desse modelo em comparação ao laser real. De qualquer forma, verifica-se que é possível realizar uma correção do valor de corrente via programa residente do microcontrolador. Assim, pode-se concluir que o MCA, em relação a faixa de variação de corrente, atende as especificações de projeto.

6.2 Sistema de controle de temperatura do MCA

Os circuitos mostrados nas Figura 36(b) e (c) são utilizados para emular respectivamente o termistor e o *peltier*, que são o sensor e o atuador do sistema de controle de temperatura. O valor de temperatura de operação do laser é determinado pelo usuário a partir

da seleção do valor da resistência do termistor. A sintonia do laser DFB, para atingir o valor de máximo da secção transversal de absorção, depende do ajuste preciso do valor desse termistor. Qualquer desvio significativo do seu valor, no decorrer do experimento de espectroscopia, deve ser rapidamente corrigido através da atuação do *peltier*.

O ajuste do valor máximo da corrente circulante no *peltier* é feita manualmente no LDTC0520, a partir da regulação de potenciômetros residentes no equipamento. Para os experimentos realizados, o sistema de atuação do controle de temperatura foi calibrado da seguinte forma: o circuito emulador do termistor foi ajustado para uma resistência de 8 k Ω . Nessa resistência, quando o usuário determinava via *software* que o valor do termistor deveria ser de 10 k Ω , a corrente que circula no *peltier* deve ser de 1 A, no sentido de esfriar o laser DFB. O sistema de controle de temperatura não foi ajustado para atuar no sentido de aquecer no laser.

De acordo com as especificações do fabricante do LDTC0520, o sistema de atuação do *peltier* é um controlador PI (Proporcional-Integral) de primeira ordem, com o ganho proporcional, K_p , igual a 5 e tempo de integração, T_s , de 3 segundos. A partir do ajuste de aquisição do osciloscópio, foi possível verificar que, na situação onde o usuário selecionou o valor do termistor igual a 10 k Ω , e ele, através do circuito emulador, está ajustado para o valor de 8 k Ω , simulando uma situação em que o laser está aquecendo, a constante de tempo do sistema foi de 0,2 segundos. Ou seja, nesse instante de tempo, a corrente circulante no circuito emulador do *peltier* foi de 650 mA. O resultado foi obtido a partir da aquisição de dados no osciloscópio da *Agilent*, modelo DSOX2004A, monitorando diretamente no *peltier*. A Figura 43 mostra o resultado do experimento. Em uma situação real de aquecimento do laser, no instante de tempo em que começa a atuação do *peltier*, ocorre o esfriamento do laser. Assim, é esperado que a temperatura do laser seja estabilizada em um instante de tempo inferior a constante de tempo obtida nesse experimento.

Outro experimento realizado foi o monitoramento do valor da resistência do circuito emulador do termistor e do sensor residente no encapsulamento do laser DFB de 1568 nm, ambos conectados diretamente no LDTC0520, em função do tempo. Nas duas situações, o valor definido pelo usuário foi de 10 k Ω . O pino *ACT T SET* do LDTC0520 é conectado a um dos conversores A/D do microcontrolador PIC e o resultado obtido é o valor de tensão no circuito emulado e do termistor do laser. Ambos são supridos por uma fonte de corrente constante de 100 μ A. Assim é possível obter os respectivos valores de resistência. A Figura

44 mostra o resultado do experimento. Em ambas as situações, a variação do valor das resistências medidas ocorre apenas na quarta casa decimal e, para ambos os casos, o erro relativo foi de aproximadamente 0,1 %. Esse resultado indica que o sistema de controle de temperatura do MCA está atuando de forma adequada para os requisitos dos experimentos de espectroscopia.

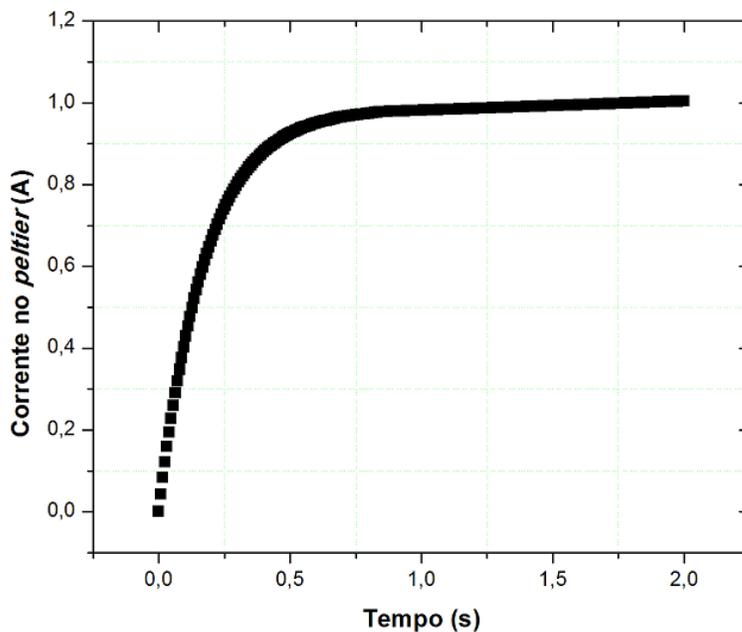


Figura 43 - Tempo de resposta do controlador de temperatura do LDTC0520, quando a temperatura selecionada é igual a $10\text{ k}\Omega$ e o termistor está ajustado para $8\text{ k}\Omega$.

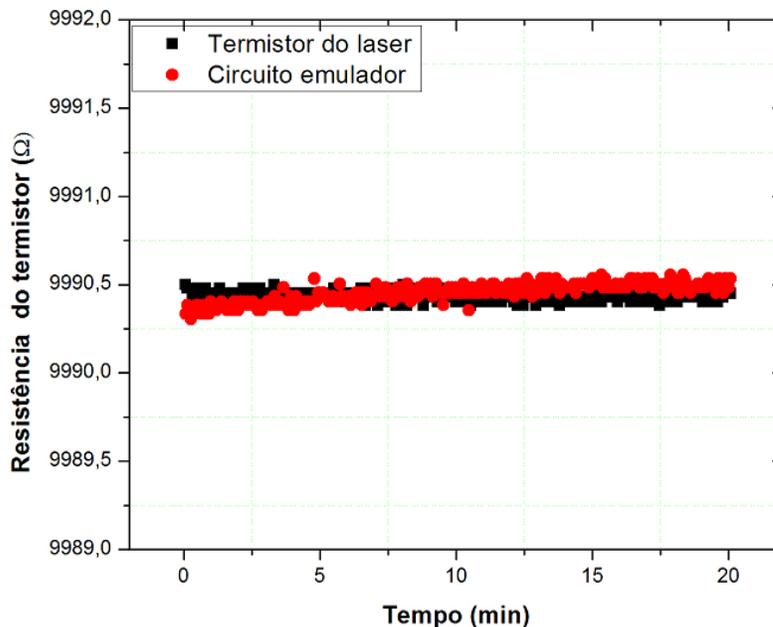


Figura 44 - Gráfico do valor da resistência do circuito emulador e do termistor do encapsulamento do laser de 1568 nm , medidos pelo sistema do MCA, em função do tempo.

6.3 Oscilador

No tocante ao controle do oscilador AD9833, o usuário digita no campo específico do programa residente no PC o valor da frequência desejada. O valor máximo de frequência é aproximadamente de 6 kHz, com resolução de 1 Hz. Conforme dito no Capítulo 4, o usuário não irá controlar o valor de amplitude da senoide. A amplitude é ajustada manualmente no MCA a partir de circuitos específicos, de acordo com a necessidade dos experimentos de espectroscopia.

Faz-se necessário calcular o valor da distorção harmônica total, do inglês *Distortion Harmonic Total* - DHT do sinal de saída do oscilador. Para tal, foi obtido o sinal de saída do oscilador em forma tabular, a partir de um osciloscópio, e os dados foram processados no *Origin 8.0*, para a obtenção dos termos da Transformada Rápida de Fourier, do inglês *Fast Fourier Transformer* – FFT. Matematicamente, tem-se que a distorção para cada harmônico n , DH_n , pode ser calculada por [70]

$$DH_n = \frac{|b_n|}{|b_1|}, n \geq 2, \quad (7.1)$$

onde b_1 e b_n representam o primeiro e o n -ésimo termo da FFT do sinal de interesse, respectivamente. A partir dessa informação, pode-se calcular a distorção harmônica total, *DHT*, dada por [70]

$$DHT = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} DH_n^2}. \quad (7.2)$$

A Figura 45 mostra o sinal obtido na saída do oscilador. A frequência de operação selecionada foi de 1 kHz e a amplitude foi de 0,3 V. A Figura 46 mostra o resultado obtido do cálculo da FFT em função dos múltiplos da frequência fundamental de 1 kHz. A partir das informações obtidas do gráfico da Figura 46 e das Equações 7.1 e 7.2, tem-se que a distorção harmônica é em torno de -53,8 dB. O cálculo da distorção considerou até o quinto harmônico. O mesmo experimento foi realizado com o oscilador interno do amplificador *lock-in* DPS residente do LSI e o resultado obtido para a distorção harmônica foi de -80 dB, com a frequência do oscilador igual a 1 kHz. Em primeira hipótese, pode-se estimar que experimentos de espectroscopia utilizando o oscilador do MCA podem acarretar na redução de sensibilidade na detecção do perfil do segundo harmônico medido.

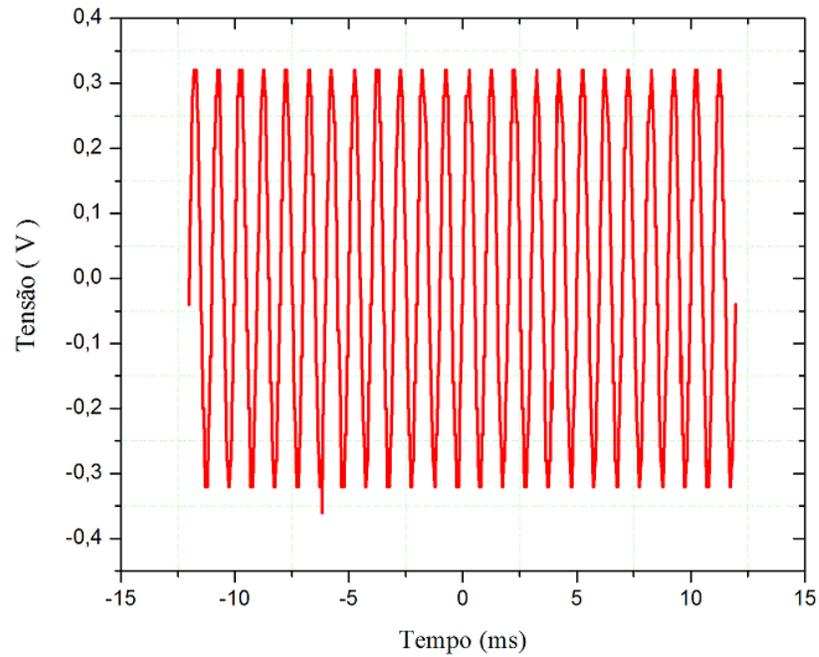


Figura 45 - Gráfico da saída do oscilador AD9833 para uma frequência de 1 kHz, selecionada pelo usuário.

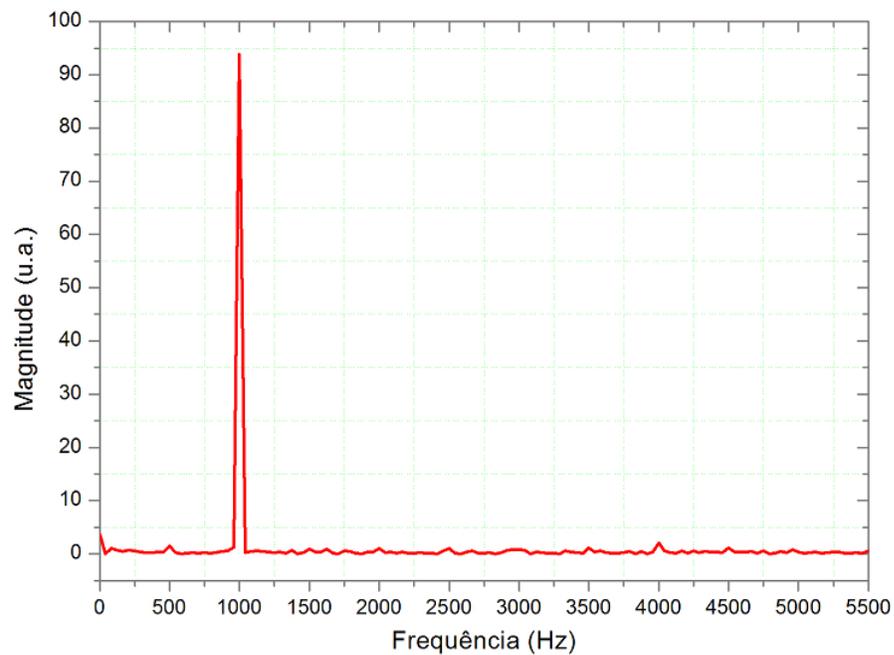


Figura 46 - Gráfico do espectro do sinal de saída do oscilador AD9833 para uma frequência de 1 kHz.

6.4 Experimentos com a placa de multiplexação de lasers DFB

Foi utilizada a placa desenvolvida para acondicionar dois lasers DFB, constituída, basicamente de relés de estado sólido, reguladores de tensão e *trimpots*. Para os testes de chaveamento foram utilizados os lasers DFB de 1572,3 nm e de 1654 nm, ambos da QPHOTONICS, que serão utilizados em experimentos futuros de detecção harmônica de CO₂ e CH₄, respectivamente. O usuário seleciona, a partir do programa residente do PC, qual laser deseja trabalhar. Após a seleção do laser, os respectivos relés conectados ao laser selecionado são acionados, ligando eletricamente o laser DFB com o LDTC0520. Quando um determinado laser era selecionado, foi realizado teste de medição de impedância nas conexões entre os relés e o laser DFB. Foi verificado que o instrumento utilizado para a medição acusava continuidade, indicando baixa resistência de saída dos relés.

Com o auxílio do OSA, modelo MS9470A, da *Anritsu* foram obtidos os espectros do sinal de saída dos lasers utilizados nesse experimento. Inicialmente foram obtidos os espectros dos lasers conectados no sistema do LSI, sendo um laser por vez. Em seguida, os lasers foram conectados diretamente ao LDTC0520 também um por vez, e por fim com os lasers acondicionados na placa de multiplexação. Para os lasers de 1573,2 e 1654 nm foram definidos os valores de resistência do termistor iguais a 10 k Ω e 8 k Ω , respectivamente e corrente de operação igual a 80 mA para ambos os lasers.

Os resultados são mostrados na Figura 47 e na Figura 48. Nas três situações, praticamente ocorre uma superposição dos espectros da saída dos lasers, indicando que a inserção de relés de estado sólido para realizar conexão elétrica entre o laser e o LDTC0520 não acarreta em deslocamento ou alargamento espectral na saída dos lasers DFB. O valor de pico do sinal obtido pelo OSA, com os lasers conectados na placa multiplexadora é menor em comparação às duas situações descritas. Como os relés de estado sólido e o componentes do encapsulamento *butterfly* do respectivo laser DFB estão conectados em paralelo, era esperado um resultado similar apresentado nas situações anteriores. A causa provável é devida a interferências eletrônicas entre as placas que constituem o MCA, afetando diretamente o divisor de tensão utilizado nos conversores digital/analógico (DACs) que serve para definir o valor mínimo de corrente injetada no laser. O valor de corrente adquirido pelo controlador nesse experimento foi de 78,6 mA.

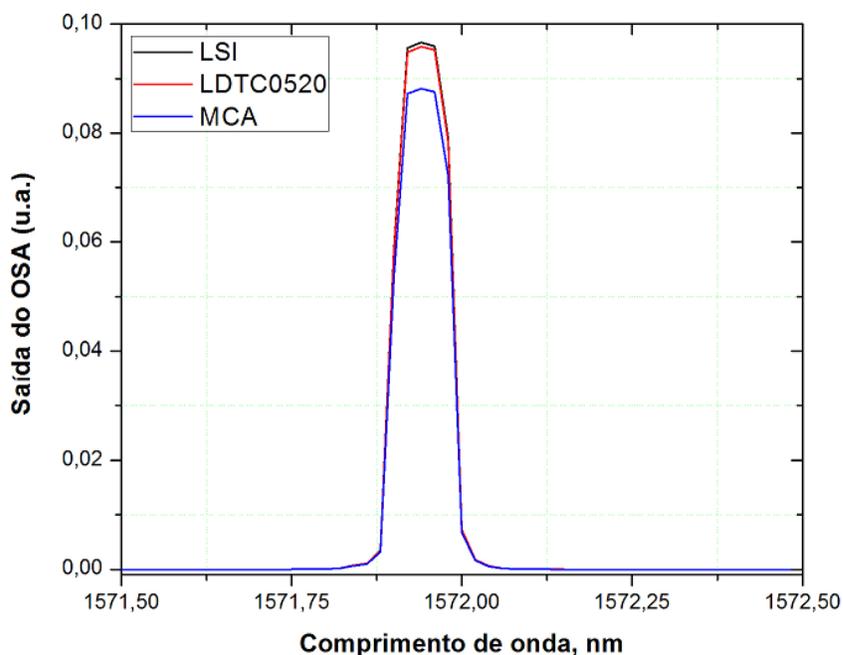


Figura 47 - Gráfico do espectro do sinal de saída do laser DFB de 1572,5 nm, obtidos a partir do laser conectado no sistema do LSI, diretamente no LDTC0520 e na placa multiplexada do MCA.

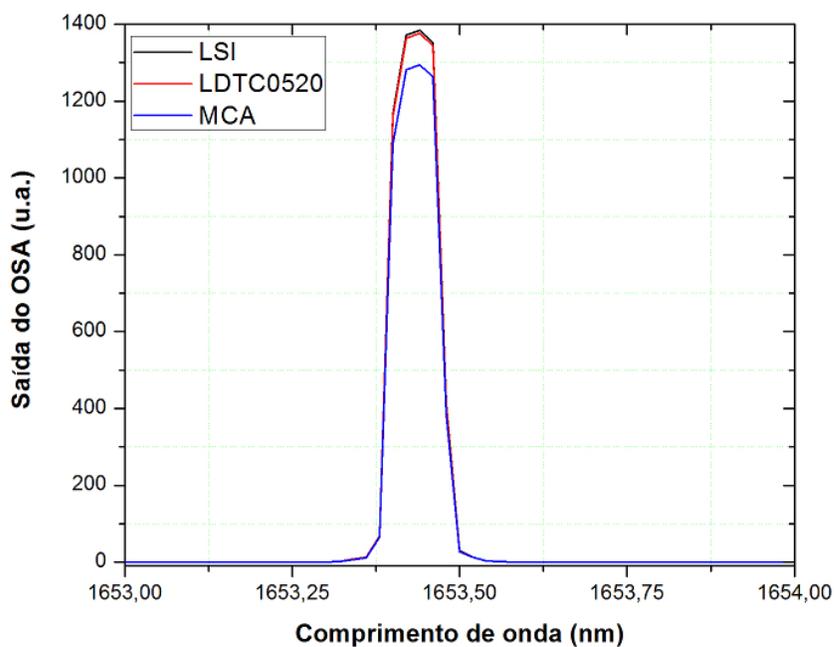


Figura 48 - Gráfico do espectro do sinal de saída do laser DFB de 1654 nm, obtidos a partir do laser conectado no sistema do LSI, diretamente no LDTC0520 e na placa multiplexada do MCA.

Foi analisada a potência óptica do laser DFB de 1654 nm, utilizando o mesmo procedimento de instrumentação do experimento anterior. Em todas as situações, o valor de termistor foi ajustado para o valor de 10 k Ω . Os resultados das potência ópticas monitoradas pelo laser conectado no LSI foram adquiridos diretamente do *display* do ITC502. Para as demais situações, o pino *LD P Monitor* do LDTC0520 é conectado a um dos conversores A/D do microcontrolador PIC e o valor de tensão no fotodetector foi visualizado no programa residente do PC. De acordo com o manual desse equipamento, quando a tensão no fotodetector for de 1 V, a corrente que o atravessa é igual a 500 μ A. Dessa maneira, é possível determinar a potência óptica do laser.

Os resultados dos experimentos são mostrados na Figura 49. Percebe-se que o resultado obtido pelo laser na placa de multiplexação está deslocado cerca de 0,25 mW em comparação com o gráfico obtido pelo LSI. Esse fato ocorre devido as interferências eletromagnéticas descritas no experimento anterior. Para atenuar esses problemas, foi analisado o divisor de tensão dos DACs e verificou-se problemas na solda destes componentes com a placa. Após a correção do problema, foi realizado um novo experimento de monitoramento da potência óptica do laser. O resultado é apresentado na Figura 50. Conforme pode ser visualizado, praticamente existe uma superposição dos resultados obtidos nas três situações.

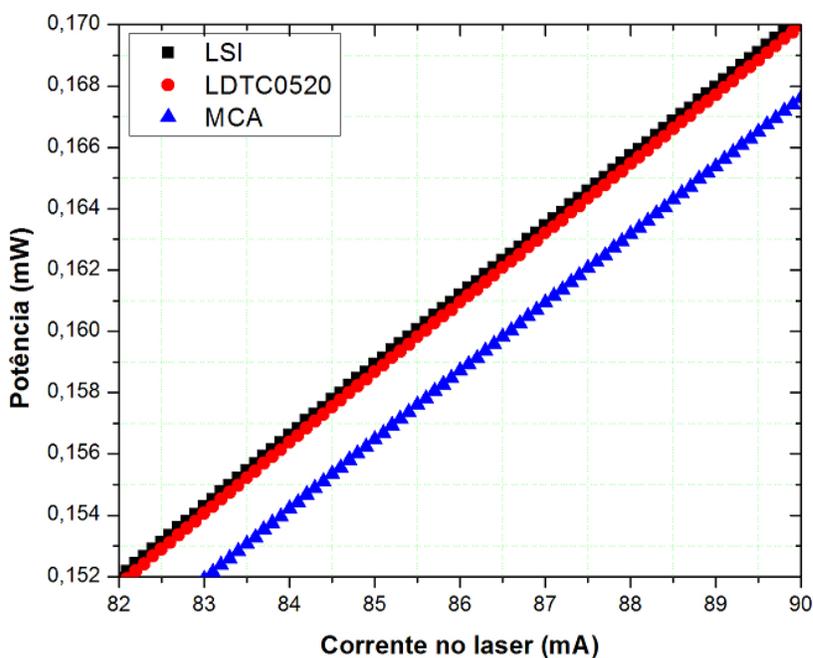


Figura 49 - Gráfico da potência do laser DFB de 1654 nm, ajustado com a temperatura de 10 k Ω em função da corrente injetada no laser obtidos pelo sistema do LSI, do LDTC0520 e do MCA.

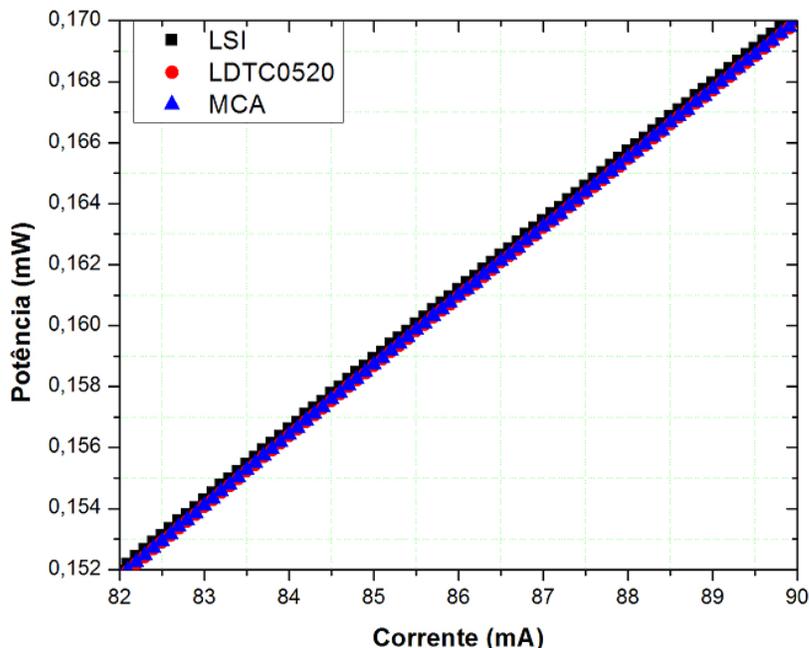


Figura 50 - Gráfico da potência do laser DFB de 1654 nm, ajustado com a temperatura de 10 kR em função da corrente injetada no laser obtidos pelos sistemas do LSI, do LDTC0520 e do MCA, após a correção no DAC.

Outro experimento realizado consistiu em monitorar o comprimento de onda dos lasers em função da corrente injetada, para a resistência do termistor também ajustado em 10 k Ω . Nesse experimento, inicialmente os lasers foram conectados no sistema LSI, sendo um laser por vez. Em seguida, com os lasers conectados diretamente no LDTC0520, também sendo um laser por vez e por fim, com os lasers na placa multiplexada do MCA. No sistema embarcado, os lasers foram selecionados a partir do programa residente do PC. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 51 e na Figura 52. Conforme pode ser observado, ocorre praticamente uma superposição entre os resultados dos lasers obtidos nas três situações propostas. Esse resultado indica que é possível realizar a sintonia de um determinado laser DFB para coincidir com a máxima seção transversal de absorção de um determinado gás de análise, utilizando o protótipo do MCA.

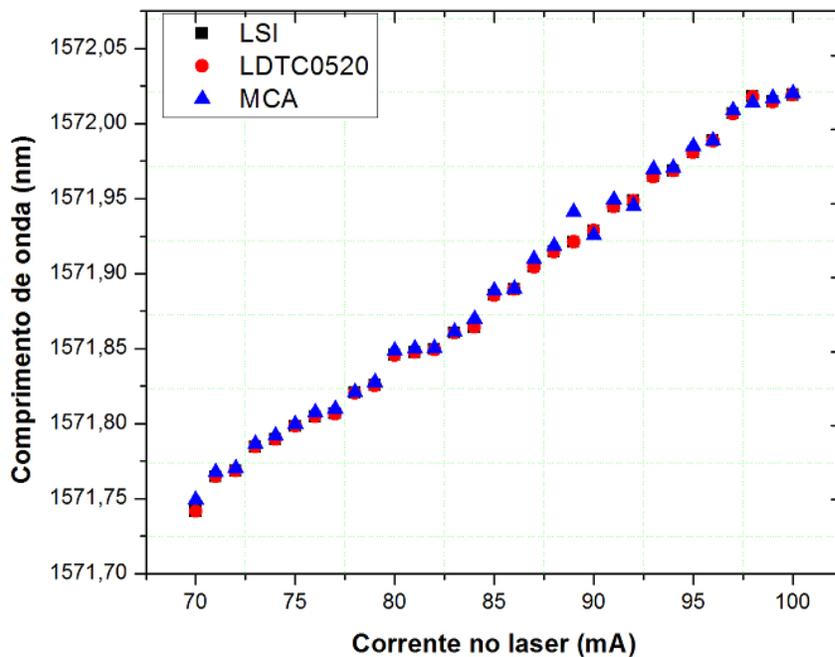


Figura 51 - Gráfico do comprimento de onda do laser DFB de 1572,3 nm, ajustado para a temperatura em 10 kΩ, obtidos pelo sistema do LSI, do LDTC0520 e do MCA em função da corrente injetada.

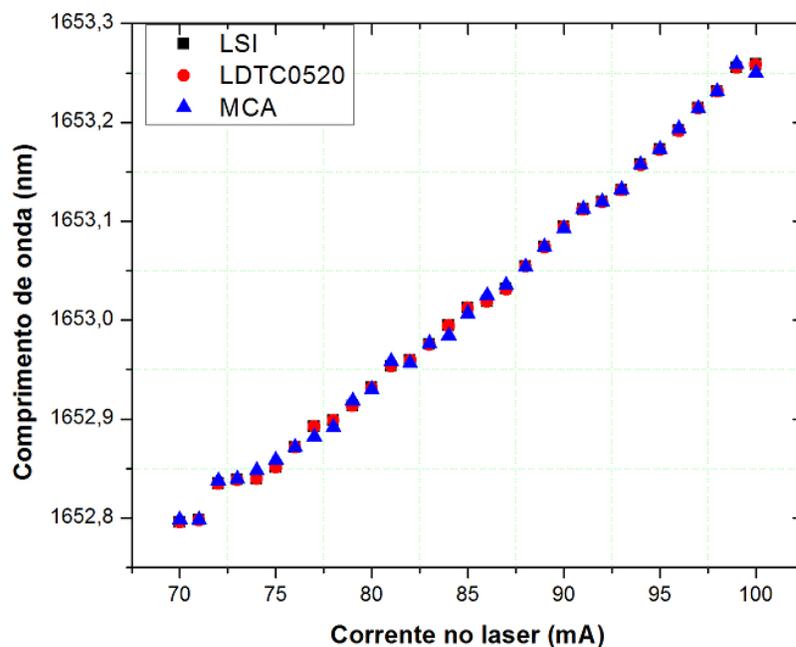


Figura 52 - Gráfico do comprimento de onda do laser DFB de 1654 nm, ajustado para a temperatura em 10 kΩ, obtidos pelo sistema do LSI, do LDTC0520 e do MCA em função da corrente injetada.

6.5 Experimentos preliminares de absorção e detecção harmônica com o MCA

Após os resultados obtidos com o protótipo do MCA, em relação ao controle de dois lasers DFB, foram realizados experimentos com o laser utilizado para monitorar CO, sendo controlado pelo sistema embarcado desenvolvido. Os experimentos realizados incluem a análise da absorção e detecção harmônica do CO na célula espectrométrica de 25,4 cm. Os resultados alcançados em ambos os experimentos foram comparados com os dados obtidos no sistema do Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI aqui realizados.

Para os experimentos de detecção harmônica, foi usado o mesmo amplificador *lock-in* utilizado nos experimentos com o sistema do LSI. O sinal de referência para esse amplificador foi obtido a partir do oscilador AD9833 no qual, a partir de um comparador de malha aberta residente na placa do MCA, foi gerado um sinal de onda quadrada TTL que foi conectado a uma entrada específica do *lock-in*. Em aplicações futuras do sistema embarcado será utilizado um amplificador *lock-in* analógico modelo 420, da *Scitec Instruments*, que possui apenas essa opção de sinal de referência.

A Figura 53 mostra o resultado do experimento de absorção direta obtido a partir do sistema do LSI e do Módulo de Controle e Aquisição (MCA). O procedimento para a obtenção desses gráficos foi o mesmo utilizado para obter a absorção na célula espectrométrica de 130 cm. O laser DFB foi sintonizado para que a máxima absorção de CO ocorresse em 82,5 mA. A concentração de CO na célula espectrométrica foi de 700000 ppm. Conforme pode ser visualizado, os perfis dos sinais detectados são similares entre si, com cerca de 9,3 % e 8,3 % de sinal absorvido na corrente de 82,5 mA para o sistema do LSI e o MCA, respectivamente. O valor teórico estimado é de 10 %. Além disso, os experimentos foram realizados em momentos diferentes, ou seja, a célula espectrométrica foi preenchida para medição de cada equipamento. Assim, imperfeições no sistema de gases ou até mesmo variação de temperatura podem provocar redução do valor de máxima absorção medido pelo sistema do MCA. É observado também, para ambos os gráficos, na faixa de 60 a 75 mA, interferências ópticas, porém, de forma menos intensas das verificadas no gráfico da Figura 23. Esse fato se deve, provavelmente, a imperfeições nas emendas ópticas realizadas entre o laser e o colimador GRIN. De qualquer maneira, o resultado apresentado indica que o MCA consegue medir a absorção de CO com praticamente a mesma eficácia do sistema do LSI.

A Figura 54 mostra o resultado do experimento de medição do módulo do segundo harmônico de CO a partir dos sistemas LSI e MCA. O laser DFB, para ambos os sistemas, foi sintonizado para que a máxima absorção de CO ocorresse em 82,5 mA. A concentração de CO na célula espectrométrica também foi de 707117 ppm. A banda equivalente do ruído para esse experimento foi de 0,112 Hz.

É possível observar na Figura 54 que os perfis do módulo do segundo harmônico obtido para ambos os sistemas está claramente visualizado. Todavia, o valor de pico do módulo do segundo harmônico obtido pelo MCA é cerca de 86 % do valor obtido pelo sistema do LSI. Uma das prováveis causas são problemas de interferências eletrônicas ocasionadas pelo arranjo instrumental como, por exemplo, a falta de blindagem eletromagnética das placas desenvolvidas e problemas de conexão dos cabos BNC utilizados podem contribuir para a inserção de ruído no sistema e, conseqüentemente, a redução da sensibilidade das medidas realizadas pelo MCA. Além das medições terem ocorrido em instantes diferentes conforme descrito no experimento de absorção. Mesmo assim, conclui-se que é possível realizar detecção harmônica do espectro molecular com o protótipo do Módulo de Controle e Aquisição desenvolvido nesta Tese.

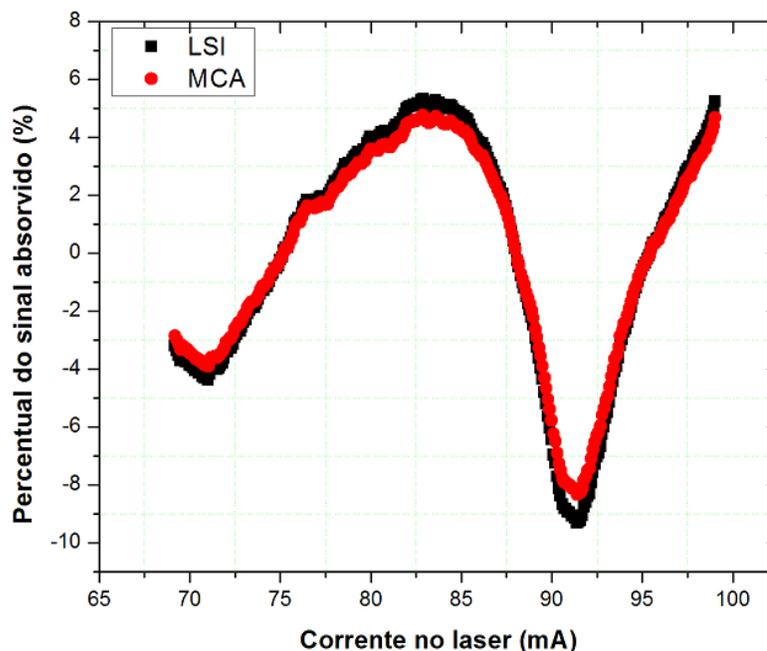


Figura 53 - Gráfico da absorção na célula espectrométrica de 25,4 cm preenchida de 700000 ppm de CO utilizando o sistema do LSI e o MCA.

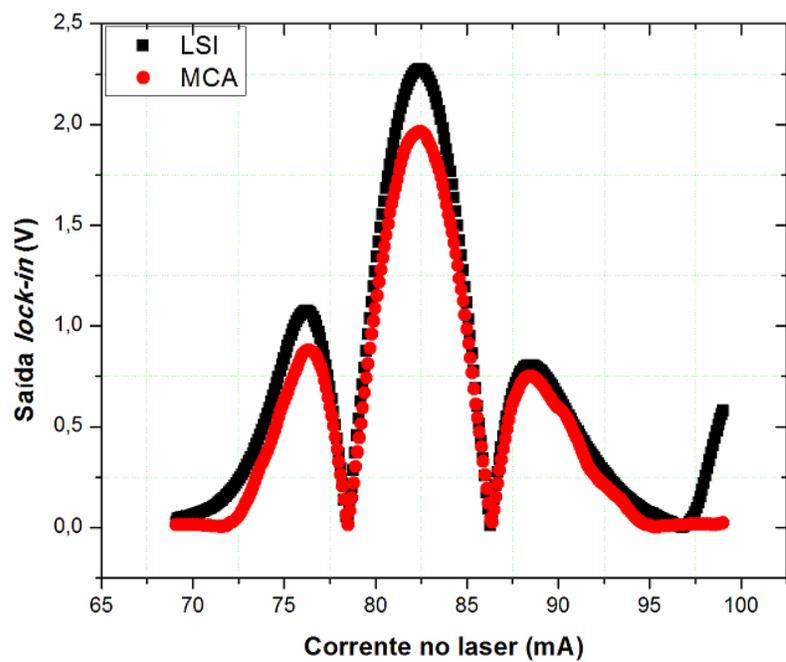


Figura 54 - Gráficos do módulo do segundo harmônico obtidos pelo sistema do LSI e no MCA na célula espectrométrica de 25,4 cm preenchida com 700000 ppm de CO.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

O objetivo de contribuir para o desenvolvimento de um sistema eletro-óptico embarcado, que possibilite a detecção de mais de um gás, através da técnica de detecção harmônica do espectro molecular, foi alcançado. Como etapa intermediária, foi realizada a análise minuciosa de detecção harmônica de CO utilizando as duas células espectrométricas existentes no Laboratório de Sensores e Instrumentação - LSI do Grupo de Fotônica - DES - UFPE. A partir dos resultados obtidos foram verificadas estratégias de instrumentação, a fim de detectar quantidade diminutas de concentração de CO e, também, validar a célula espectrométrica, fibras ópticas, fotodetector e colimadores a serem instalados em transformadores de potência e integrados ao MCA. O foco da Tese foi a implementação do protótipo do Módulo de Controle e Aquisição (MCA), controlável a partir de um computador pessoal, por meio de um programa desenvolvido para essa finalidade.

A partir dos experimentos de detecção harmônica realizados com o sistema do LSI, inicialmente na célula espectrométrica de 130 cm, tornou-se viável analisar o problema de modo de cavidade que reduz consideravelmente a sensibilidade da medição. Verificou-se que, com a obtenção do sinal de *background* e calculando o módulo do segundo harmônico através da Equação 3.16, foi possível medir concentrações menores do gás em análise. Todavia, devido ao problema das janelas ópticas dessa célula não estarem posicionadas no ângulo de Brewster, o perfil do módulo do segundo harmônico apresentou-se distorcido.

Os experimentos de detecção harmônica realizados com a célula espectrométrica de 25,4 cm permitiram medir 86 ppm de CO. Foram utilizados divisores de potência óptica, e as lentes colimadores da célula foram ligeiramente desalinhadas para reduzir os modos de cavidade no interior da célula, evitando a saturação do fotodetector. Nesses experimentos, verificou-se que o sinal de *background* não era um limitante nas medições. O perfil do módulo do segundo harmônico e os respectivos valores de pico eram claramente visualizados, mesmo em concentrações diminutas.

Nos experimentos de ambas as células, os parâmetros do amplificador *lock-in* foram analisados e, a partir dos ajustes da ordem do filtro, constante de tempo e faixa dinâmica, foi possível determinar a banda equivalente do ruído e, conseqüentemente, a tensão do ruído branco nos experimentos. Em todas as situações, essa modalidade de ruído não era um limitante nas medições. Além disso, nos experimentos realizados na célula de 25,4 cm,

verificou-se a necessidade de aumentar a faixa dinâmica quando a célula espectrométrica estava preenchida com 690 ppm de CO. A relação sinal/ruído máxima obtida nessa célula foi de 61,7 dB.

Foi desenvolvido um protótipo do MCA, constituído de microcontrolador PIC, conversores digital/analógico, oscilador, relés de estado sólido e demais circuitos. Foram realizados experimentos a fim de avaliar o desempenho do MCA, referente as placas de circuitos desenvolvidas e os programas residentes do microcontrolador e computador pessoal. Todos os resultados obtidos pelo MCA foram comparados com os parâmetros obtidos pelo sistema utilizado no LSI. Foram analisados, inicialmente, o incremento de corrente no laser dentro da faixa estabelecida, o sistema de controle de temperatura e o funcionamento do oscilador. A corrente fornecida ao laser pelo sistema do MCA foi cerca de 0,9 mA inferior em relação ao sistema do LSI e a variação do valor de termistor monitorado ocorreu na quarta casa decimal.

Como relação aos testes de multiplexação dos lasers, foram realizados experimentos analisando o espectro de saída do laser DFB, a potência óptica e a variação do comprimento de onda em função da corrente injetada no laser para um valor fixo de termistor. Esses experimentos foram comparados com as informações obtidas a partir do sistema do LSI. Os resultados obtidos apontam que a inserção dos relés de estado sólido não provocam alterações significativas no espectro de saída do laser. Além disso, também não foram observadas mudanças relevantes na relação entre o comprimento de onda, em função da corrente injetada, para um valor fixo de termistor em comparação com o sistema do LSI.

Medidas de absorção e detecção harmônica foram realizadas com o protótipo do MCA. Em relação a absorção, verificou-se que o sinal obtido pelo MCA foi similar ao adquirido pelo sistema do LSI. No tocante à detecção harmônica, observou-se que o perfil do módulo do segundo harmônico obtido pelo MCA apresentou o valor de pico cerca de 14 % do obtido pelo sistema do LSI. As principais causas apontadas são as interferências eletromagnéticas nas placas de circuito por causa do não acondicionamento dessas em uma caixa metálica, além de imperfeições no sistema de gases. Esses fatores acarretam em uma pequena redução da sensibilidade em comparação com o sistema do LSI. Tanto com a instrumentação de bancada quanto com o MCA foi possível realizar a detecção de CO em concentração cerca de 4 vezes menor que o mínimo necessário para a monitoração do estado

de degradação do óleo isolante. Ambos os sistemas usam uma célula de apenas 25,4 cm, leve, que pode ser acoplada ao transformador sem causar impactos à sua operação.

7.2 Trabalhos futuros

Os próximos trabalhos a serem realizados terão objetivos de expandir o módulo eletro-óptico embarcado, com o controle de cinco lasers DFB para monitorar CO, CO₂, C₂H₂, CH₄ e vapor d'água, e com as respectivas saídas dos lasers conectadas ao multiplexador óptico passivo. Serão analisados os limites de detecção e também os principais parâmetros, como por exemplo, faixa de variação de corrente e valor de termistor para cada laser, a fim de tornar o MCA autônomo.

Será utilizado um módulo de comunicação *ethernet* da *Microchip* ENC28J60 para transmitir as informações dos experimentos de espectroscopia para um banco de dados. A visualização dos resultados será feita através de um programa similar a uma página de *internet*. Nesse estágio de desenvolvimento do sistema, ele irá ser instalado no pátio de uma subestação da Chesf, para realizar a monitoração dos gases dissolvidos no óleo isolante em tempo real.

Algumas alternativas estão sendo investigadas para extrair de forma mais eficiente o valor das concentrações dos gases dissolvidos no óleo isolante. Por exemplo, a análise dos valores máximo e mínimos do perfil do módulo do segundo harmônico e correlacioná-los com a concentração do gás. Técnicas de computação inteligente, reconhecimento de padrões ou teoria da decisão podem também ser aplicadas a partir de um banco de dados detalhado, advindo de diversas medições em campo. Com isso, em princípio, será possível identificar padrões, correlacioná-los com a concentração de gases e, conseqüentemente, aplicar os métodos de investigação consolidados pelas concessionárias de energia para melhorar o planejamento das manutenções preventivas nos seus transformadores de potência.

REFERÊNCIAS

- [1] Agência Nacional de Engenharia Elétrica- ANEEL. Resolução Normativa nº 63. Brasília, 12 de Maio de 2004.
- [2] MILASCK, M. “*Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante.*” Ed. Edgar Blucher Ltda. São Paulo, 1984.
- [3] SAHA, T. K. “Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers”. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, No. 5, pp. 903-917, 2003.
- [4] OKAN, H.; YAMOTO, T. “Proposals for an Improvement in Transformer Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis (DGA)”. *IEC Publications*, Vol. 11, No. 6, pp. 15-21, 1995.
- [5] DUVAL, M.; DEPABLO, A. “Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases”. *IEC Publications*, Vol. 17, No. 2, pp. 31-41, 2001.
- [6] WARD, S.A. “Evaluating Transformer Condition Using DGA Oil Analysis”. In: *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (Oct. 2003: Albuquerque, New Mexico). *Annals*. New Mexico, 2003. pp. 463-468.
- [7] IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. “*IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*”, C57.104™. New York, 2009.
- [8] FONTANA, E., URTIGA, L. M. B. A., MARTINS-FILHO, J.F. “Feasibility of the Modulation Spectroscopy Technique for Dissolved Gas Analysis of Insulating Oils of High Voltage Transformers,” in *International Microwave & Optoelectronics Conference - IMOC*, Salvador, Annals, 2007. pp. 229-233.
- [9] FONTANA, E., URTIGA, L. M. B. A., MARTINS-FILHO, J.F. “Sensor System for Fault Detection of High Voltage Transformers”, in *IEEE Sensors Conference*, Lecce, Annals, 2008. pp. 1368- 1370.
- [10] SOARES, V. H., MORAES, C., LIMA; R. A., FONTANA, E., MARTINS-FILHO, J.F. “Contributions to the Optimization of an Optical Sensor for Acetylene and Carbon Monoxide.” in *SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference*, Natal, Annals, 2011. v. 1. p. 819-823.
- [11] LIMA; R. A., SOARES, V. H., FONTANA, E. “Progresso no Desenvolvimento de um Sistema de Detecção Harmônica de Monóxido de Carbono para Aplicações no Setor Elétrico.” em MOMAG 2012, João Pessoa, *Anais do MOMAG 2012*, 2012. p. 1-6.
- [12] SOARES, V. H., LIMA; R. A., GOMES, V. B., FONTANA, E. “Limite de Detecção de Acetileno em uma Célula Espectrométrica de 25,4 cm Projetada para Aplicações no Setor Elétrico” em MOMAG 2014, Curitiba, *Anais do MOMAG 2014*, 2014. p. 1-5.

- [13] SOARES, Vladimir Homobono. *Otimização de um sensor óptico para detecção específica de gases dissolvidos em óleo de transformador*. Recife, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Transformadores de Potência - Generalidade*, NBR 5356 - 1. Rio de Janeiro, 2007
- [15] FILHO, Geraldo Luppi. *Comparação entre os critérios de diagnósticos por análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador de potência*. São Carlos, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [16] CATÁLOGO TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA SIEMENS. Disponível em <http://www.energy.siemens.com/br/pt/transmissao-de-energia/transformadores/transformadores-de-potencia/transformadores-de-forca.htm>. Acessado em 20 Jul 2012.
- [17] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL, ANP 36. Rio de Janeiro, 2007.
- [18] Malik, N.H., Al-Arainy, A. A., Qureshi, M.I. “*Electrical Insulation in Power Systems*” Taylor & Francis, 1998.
- [19] DIGIORGIO, J. B. “Dissolved Gas Analysis of Mineral Oil Insulating Fluids”, Northern Technology & Testing, pp.1-21 2005. Disponível em <http://www.nttworldwide.com/docs/dga2102.pdf>. Acesso em 30 Ago 2012.
- [20] CIOLA, R. “*Fundamentos de Cromatografia a Gás*”, Ed. Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 1985.
- [21] VAN DEEMTER, J.J., ZUIDERWEG, F.J., KLINKENBERG, A., “Longitudinal Diffusion and Resistance to Mass Transfer as Cause of Nonideality in Chromatography”. *Chem. Engin. Sci.* 5, 271-289, 1956.
- [22] NOGUEIRA, César Augusto Azevedo. *Avaliação de Sistemas de Medição da Concentração de Hidrogênio Dissolvido em Óleo Isolante*. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Metrologia). Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [23] AN AMERICAN NATIONAL STANDARD, “*Detection and Determination of Generated Gases in Oil-Immersed Transformers and Their Relation to the Serviceability of the Equipment*”, 1978.
- [24] DANIKAS, M. G., "The definition Used of Partial Discharge Phenomena" *IEEE Transactions on Electrical Insulators*. Vol.28, Nº 6, pp 1075-1081, 1993.
- [25] BAKKER, E., TELTING-DIAZ, M., "Electrochemical sensors" *Anal Chermical*, Vol. 74, Nº 12, pp. 2781-2780, 2012.
- [26] CATÓLOGO DO HYDRAN M2 DA GENERAL ELECTRIC.

Disponível em <https://www.gedigitalenergy.com/md/catalog/hydranm2.htm>. Acessado em 10 de Maio de 2013.

[27] CATÁLOGO DO MONITOR DE DGA ON-LINE SERVERON TM8. Disponível em http://www.qualitrolcorp.com.br/Products/Serveron%C2%AE_TM8%E2%84%A2_On-line_DGA_Monitor/. Acessado e Maio de 2013.

[28] BASS, M. “*Handbook of Optics*,” Vol.1, 2nd ed. McGraw-Hill, 1995.

[29] JACKSON, J. D., “*Classical Electrodynamics*”, 3rd ed. Wiley, 1998.

[30] STONE, J. M., “*Radiation and Optics*”, McGraw-Hill, New York, 1963.

[31] FONTANA, E., “Nota de aula 6: Atenuação”, Notas de Aula do Curso de Fundamentos de Óptica da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -PPGEE -UFPE, 2010.

[32] DEMTRODER, W. “*Laser Spectroscopy Volume 1: Basic Principles*,” Vol.1, 4th ed. Springer, 2008.

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

[34] KIM, S. S., MENEGAZZO, N., YOUNG, C., CHAN, J., CATER, C., MIZAIKOFF, B., “Mid-infrared trace gas analysis with single-pass Fourier Transformer infrared hollow waveguide gas sensor,” *Applied Spectroscopy*, Vol. 63, N° 3, pp. 331-337, 2009.

[35] CHAO, T. H., DAVIS, S. R., ROMMEL, S. D., FARCA, G., LUEY, B., MARTIN, A., ANDERSON, M. H., “Compact Liquid Crystal Waveguide based Fourier Transformer Spectrometer for *In-Situ* Remote Gas and Chemical Sensing”, in International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Sensor Technologies and Applications, China Annals, 2009. Vol. 7508. pp. 1-6.

[36] LOU, X. T., SOMESFALEAN, G., ZHANG, Z. G., Svanberg, S., “Sulfur dioxide measurements using an ultraviolet light-emitting diode in combination with gas correlation techniques”, *Application Physics*, Vol. 1, N° 94, pp 699–704, 2009.

[37] VARGAS-RODRIGUEZ, E., RUTT, H.N., “Design of CO, CO₂ and CH₄ gas sensor based on correlation spectroscopy using a Fabry-Perot interferometer”, *Sensor and Actuators B: Chemical*, Vol. 137, N°1. pp. 410-419, 2009.

[38] DAKIN, J. P., EDWARDS, H. O., WEIGL, B. H., “Progress with optical gas sensors using correlation spectroscopy”, *Sensors Actuators B: Chemical*, Vol. 29, N° 1, pp 87–93, 1995.

[39] HERRIOTT, D. R., SCHULTE, H. J., "Folded Optical Delay Lines", *Applied Optics*, Vol. 4, N° 8, pp. 883-889, 1965.

[40] ROBERT, CLAUDE., “Simple, Stable and Compact Multiple-reflection Optical Cell for very long optical paths”, *Applied Optics*, Vol. 46, N° 22, 2007.

- [41] MASIYANO, D., HODGKINSON, J., TATAM, R. P., “Gas cells for tunable diode laser absorption spectroscopy employing optical diffusers. Part 2: Integrating spheres”, *Applied Physics B*, Vol. 100, N° 2, pp. 303-3012, 2010.
- [42] TRANCHART, S., BACHIR, I. H., DESTOMBES, J-L., 1996 “Sensitive trace gas detection with near-infrared laser diodes and an integrating sphere”, *Applied Optics*, Vol. 35, N° 36, pp. 7070–7074, 1996.
- [43] GURLIT, W., ZIMMERMANN, R., GIESEMANN, C., FERNHOLZ, T., EBERT, V., WOLFRUM, J., PLATT, U., BURROWS, J. P., “Lightweight diode laser spectrometer CHILD (compact high-altitude in-situ laser diode) for balloonborne measurements of water vapor and methane” *Applied Optics*, Vol. 44, N° 1, pp. 91–102, 2005.
- [44] FETZER, G. J., PITNER, A. S., RYDER, W. L., BROWN, D. A., “Tunable diode laser absorption spectroscopy in coiled hollow optical waveguides”, *Applied Optics*, Vol. 41, N° 18 pp. 3613-3621, 2002.
- [45] PHILIPPE, L. C.; HANSON, R. K. “Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure and velocity in shock-heated oxygen flows” *Applied Optics*, Vol 32, No 30, Oct 1993.
- [46] ZHU, X.; CASSIDY, D.T. “Modulation Spectroscopy with a semiconductor diode laser by injection-current modulation,” *Optical Society of America*, Vol 14, No 8, Aug 1997.
- [47] KLUCZYNSKI, P.; GUSTAFSSON, J.; LINDEBERG, Å. M.; AXNER, O. “Wavelength modulation absorption spectrometry” – an extensive scrutiny of the generation of signals” *Spectrochimica Acta Part B*, 2001.
- [48] ENGELBRECHT, R., “A compact NIR fiber-optic diode laser spectrometer for CO and CO₂: analysis of observed 2f wavelength modulation spectroscopy line shapes”, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular*, Vol. 60, N° 14, pp. 3291–3298, 2004.
- [49] MEAD, M., “*Lock-in amplifiers: principles and applications*”, IEEE electrical measurement series, 1983.
- [50] HAYKIN, S., “*Communication system*”, Vol.1, 1st ed. John Wiley & Sons, LTD, 2009.
- [51] SANTOS, J., P., E., “*Eletrônica Analógica Integrada e Aplicações*”, Vol. 1, 1 ed, Editora Livraria da Física, 2011.
- [52] KLUCZYNSKI, P.; LINDEBERG, Å. M.; AXNER, O. “Background signals in wavelength-modulation spectrometry with frequency-doubled diode-laser light. I. Theory,” *Applied Optics*, Vol. 40, N° 6, 2001.
- [53] KLUCZYNSKI, P.; LINDEBERG, Å. M.; AXNER, O. “Background signals in wavelength-modulation spectrometry by use of frequency-doubled diode-laser light. II. Experiment,” *Applied Optics*, Vol. 40, N° 6, 2001.

- [54] LI, H., RIEKER, G. B., LIU, X., JEFFRIES, J. B., HANSON, R. K., “Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases”, *Applied Optics*, Vol. 45, N° 5, 2006.
- [55] THORLABS, “Operation Manual Laser Diode Combi Controller ITC502”, pp.1-115. Disponível em www.thorlabs.com. Acessado em 14 Mai. 2012.
- [56] PERKINELMER INSTRUMENTS “Instruction Manual DSP Lock-in Amplifier Model 7265, pp. 1-200, 2000.
- [57] THORLABS, “DET110- High speed silicon detection”, pp. 1-3, 2005.
- [58] ANRTSU, “1.55 μm LD module AF5B145FM50M Optical output power 450 mW”, pp. 1-4, Fev. 2005.
- [59] Etalon Effects on CO absorption. Disponível em <<https://www.youtube.com/watch?v=SBn5aokVRBQ>>. Acesso em 27 de fevereiro de 2011.
- [60] CAO, J., WANG, Z., ZHANG, K., YANG R., WANG, Y., “Etalon Effects Analysis in Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy Gas Concentration Detection System Based on Wavelength Modulation Spectroscopy”, in SOPO/IEEE MTT-S *Symposium on Photonics and Optoelectronic* 2010, Chengdu, China, Annals, 2010. v. 1. p. 1-5.
- [61] HANGAUER, A., CHEN, J., STRZODA, R., ORTSIEFER, M., AMANN, M. C., “Wavelength modulation spectroscopy with a widely tunable InP-based 2.3 μm vertical-cavity surface-emitting laser”, *Applied Optics*, Vol. 33, N° 14, pp. 1566-1568, 2008.
- [62] KOSTEREV, A. A., BAKHIRKIN, Y. A., TITTEL, F. K., “Ultrasensitive gas detection by quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy in the fundamental molecular absorption bands region”, *Applied Physics B*, Vol. 80, N° 1, pp. 133-138, 2008.
- [63] TEXAS INSTRUMENTS, “High-Speed CMOS Logic Analog Multiplexers/Demultiplexers CD74HC4051E. Disponível em www.ti.com. Acessado em 14 Mai. 2012.
- [64] MICROCHIP, “28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with NanoWatt Technology PIC 18F4550”, pp. 1-430. Disponível em www.microchip.com. Acessado em 14 Mai. 2012.
- [65] FONTANA, E., MARTINS-FILHO, J.,F., OLIVEIRA, S.,C., CAVALCANTI, F.,J.,M.,M., LIMA, R.,A., CAVALCANTI,G.,O., PRATA,T.,L. LIMA, R., B., "Sensor Network for Monitoring the State of Pollution of High-Voltage Insulator Via Satellite", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.27, N°.2, 2012.
- [66] WAVELENGTH INSTRUMENTS, “Datasheet and Operation Guide LDTC0520/LTDC1020: Laser Diode and Temperature Controller”, pp. 1-25. Disponível em www.teamwavelength.com. Acessado em 14 Mai. 2012.
- [67] TEXAS INSTRUMENTS, “10-Bit Digital-to-Analog Converters TLC5615”, pp.1-10. Disponível em www.ti.com. Acessado em 14 Mai. 2012.

[68] ANALOG DEVICES, “Low Power, 12.65 mW, 2.3 V to 5.5 V, Programmable Waveform Generator AD9833”, pp. 1-24.
Disponível em www.analog.com. Acessado em 14 Mai. 2012.

[69] MIYADAIRA, A.N., “*Microntroladores PIC18 Aprenda e Programe em Linguagem C.*”, Vol. 1, 3^{ed}, Editora Érica.

[70] OPPENHEIM, A. V., SCHAFER R. W., BUCK, J. R., “*Discrete-Time Signal Processing*”, 2nd ed. Prentice Hall, 1998.