

Projeto de Graduação



30/06/2013

SISTEMA DE DETECÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO POR MEIO DE FOTODETECÇÃO NO INFRAVERMELHO

Guilherme Monteiro Torelly



www.ele.puc-rio.br

Projeto de Graduação



SISTEMA DE DETECÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO POR MEIO DE FOTODETECÇÃO NO INFRAVERMELHO

Aluno: Guilherme Monteiro Torelly

Orientadores: Patrícia Lustoza de Souza e Maurício Pamplona Pires

Trabalho apresentado como requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Aos meus pais, Maria José e Ricardo, por sempre me apoiarem de todas as maneiras possíveis e por todos os ensinamentos que me deram, morais e intelectuais, de maneira exemplar.

À toda a minha família, pelo incentivo e suporte em todas as horas.

Aos meus orientadores Patrícia Lustoza de Souza e Maurício Pamplona Pires, por todas as oportunidades oferecidas, portas abertas e caminhos novos que me apresentaram.

Ao amigo Daniel Neves Micha por ter me apresentado ao LabSem, incentivado em todos os minutos e ajudado sempre que precisei.

Aos amigos Rudy Kawabata, Germano Penello e Renato Mourão, sempre dispostos a ensinar, conversar, ajudar e brincar.

À todos os alunos, professores, pesquisadores e funcionários que fizeram parte LabSem e sempre foram excelente companhia.

Às instituições que apoiaram o projeto ou fizeram parte da minha graduação: PUC-Rio, DISSE, FAPERJ, CAPES e Kettering University.

Resumo

Projeto final de graduação em engenharia elétrica com ênfase em eletrônica que relata detalhadamente o desenvolvimento de um equipamento detector de gás baseado na absorção de radiação infravermelha. Através do conhecimento das faixas de absorção ópticas do dióxido de carbono, foi desenvolvido um sistema capaz de medir a concentração do gás no interior do dispositivo através da comparação dos sinais de referência e o medido, baseado na lei de Beer-Lambert. Opticamente, o sistema é composto de um emissor do tipo LED, um detector do tipo fotoresistor e espelhos e lentes específicas para o infravermelho. O comprimento de onda de emissão do LED é o mesmo de uma das faixas de absorção do dióxido de carbono. Com a calibração do sistema, é possível saber a concentração do gás em uma ampla faixa de concentrações através da variação do caminho óptico do feixe de luz.

Palavras-chave: Dióxido de Carbono; Infravermelho; Sensor; Detector; Gás

Carbon dioxide detection system using infrared photodetection

Abstract

Final project for graduation in electrical engineering, with emphasis in electronics, describing in detail the development of a gas detector equipment based on infrared radiation absorption. Knowing the optical absorption bands of the carbon dioxide, a system capable of measuring the concentration of the passing gas was developed, based on the comparison between a reference and a measured signals, according to Beer-Lambert's Law. Optically, the system is composed of an LED type emitter, a photoresistor type detector and special mirrors and lenses for the infrared. The LED's emission wavelength is the same as one of the carbon dioxide's absorption band. The system's calibration allows the measurement of the gas in a wide range of concentrations through the variation of the optical path length.

Keywords: Carbon Dioxide; Infrared; Gas; Sensor; Detector

Sumário

1. Introdução	7
a. LabSem	7
b. Objetivo.....	7
c. Método	7
2. Teoria	8
a. Lei de Beer-Lambert e absorção.....	8
b. Espectro de absorção da atmosfera	8
3. Projeto óptico	11
a. Emissor e detector	11
b. Espelhos	11
c. Lentes	12
d. Esquema simplificado	14
e. Gases alternativos.....	14
f. Características desejadas.....	15
4. Projeto eletrônico	16
a. Simulação do filtro para o detector.....	16
b. Caracterização do filtro montado.....	19
c. Interface de controle	22
5. Equipamento detector completo	23
6. Medida experimental	25
a. Sistema simplificado.....	25
b. Equipamento completo	26
c. Melhorias possíveis.....	26
7. Considerações finais	27
a. Aplicações práticas.....	27
b. Produção nacional do fotodetector.....	27
Bibliografia.....	28

1. Introdução

Através do Laboratório de Semicondutores da PUC-Rio, como aluno de iniciação científica, tive a oportunidade de estudar o funcionamento e construir um equipamento detector de dióxido de carbono (CO_2) capaz de medir a concentração do gás através da absorção de infravermelho (IV) em um determinado intervalo de comprimentos de onda (λ).

Crescentes preocupações com o aumento da concentração do gás carbônico na atmosfera planetária, causado pelas emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis, criam uma demanda por dispositivos capazes de medir a concentração do CO_2 . Estudos indicam uma estreita relação entre a concentração desse gás na atmosfera e o aumento das temperaturas médias na superfície causado pela potencialização do efeito estufa [1].

Além do emprego em aplicações ambientais, este tipo de sistema pode ser utilizado para monitorar vazamentos de gás em tubulações, medição da emissão veicular por motores à combustão, diagnóstico médico de doenças respiratórias, dentre outras aplicações em diversas áreas [2, 3].

a. LabSem

Coordenado pela professora Patrícia Lustoza de Souza, o Laboratório de Semicondutores da PUC-Rio atua na área de pesquisa em dispositivos optoeletrônicos baseados em efeitos quânticos observados nos materiais semicondutores do grupo III-V. No laboratório pesquisadores e alunos investigam propriedades físicas desses materiais, células solares, fotodetectores de infravermelho dentre outros dispositivos, desenvolvem kits de divulgação científica para o ensino médio e também equipamentos como detectores de gás, que é objeto desse projeto.

Esse projeto é derivado de outro, de um detector de gás carbônico, primeiramente estudado de maneira teórica na tese de mestrado de Daniel Neves Micha [4], atual doutorando pela UFRJ e pesquisador do LabSem.

b. Objetivo

Criar um equipamento que permita a detecção e medição da concentração de dióxido de carbono presente numa mistura, como em ar atmosférico, gases do escapamento de automóveis, ar expirado por um indivíduo. Objetivos secundários de desenvolvimento:

Elaborar circuitos eletrônicos que processem os sinais elétricos obtidos através do sistema detector em um valor de concentração de gás.

Criar uma interface de controle que exiba a concentração e permita variar a faixa de detecção utilizando um servo-mecanismo.

c. Método

Primeiramente foi estudada a teoria de absorção do IV e como ela poderia ser utilizada na detecção de diversos gases. Os componentes da atmosfera terrestre foram analisados e foi determinado que o dióxido de carbono é o gás mais adequado para a realização do sistema de detecção, de acordo com a sua intensidade de absorção e o comprimento de onda no qual ela ocorre.

Em acordo com as necessidades ópticas estudadas, foram escolhidos emissor, detector, espelhos e lentes capazes de trabalhar no λ escolhido. A partir das características elétricas do sinal gerado pelo detector, foi elaborado um circuito eletrônico capaz de manipular o sinal de maneira que um microcontrolador o pudesse transformar em um valor de concentração do gás e exibi-lo através de uma interface com display de cristal líquido.

Após a montagem de todo o sistema, foram realizados testes práticos com diversas concentrações do dióxido de carbono, com o objetivo de calibrar o equipamento.

2. Teoria

a. Lei de Beer-Lambert e absorção

O sistema de detecção é baseado na lei de Beer-Lambert, que diz que a intensidade da luz que passa por um meio (I_L) é igual à intensidade original (I_0) exponencialmente reduzida com o aumento da distância percorrida (L), da concentração do gás e de acordo com o coeficiente de absorção do meio (a), que depende do comprimento de onda (λ).

$$I_L = I_0 \cdot e^{-L \cdot a(\lambda) \cdot C}$$

Equação 1: Lei de Beer-Lambert

A queda da intensidade da radiação ao passar por um gás se dá em função da transferência de energia da luz às moléculas da substância, como energia cinética de rotação, vibração, translação ou energia eletrônica [5]. Diferentes gases absorverão diferentes comprimentos de onda, de acordo com a sua estrutura e geometria molecular, e podem apresentar diferentes linhas de absorção em afastadas regiões do espectro eletromagnético.

As linhas de absorção de um gás são estudadas pela física quântica e as equações que explicam a absorção das moléculas não serão estudadas aqui, pois estão além do escopo desse trabalho. Para entender a operação do detector proposto, utilizaremos os dados e gráficos disponíveis na literatura, obtidos a partir de simulações, onde são relacionados o comprimento de onda com o valor da intensidade da absorção para uma determinada substância.

Analisando o espectro de absorção da atmosfera e do CO_2 é possível identificar o comprimento de onda específico onde será possível detectar a concentração do gás sem interferências causadas pela presença de outros gases.

b. Espectro de absorção da atmosfera

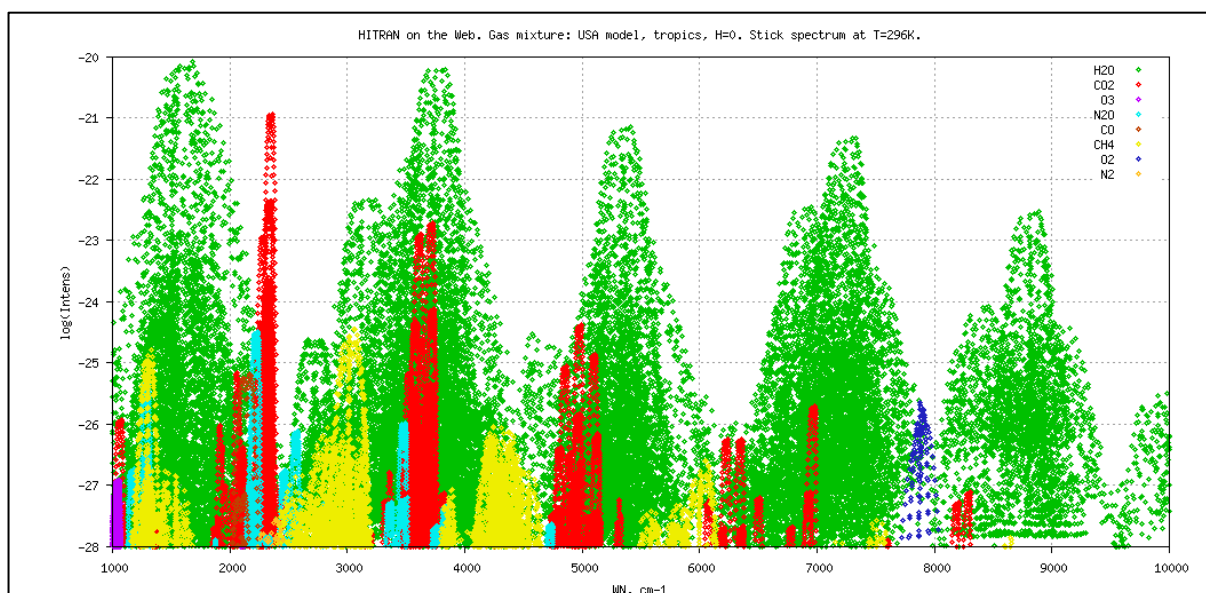


Figura 1: Linhas de absorção dos gases da atmosfera para o infravermelho próximo entre 10 e 1 μm (Número de onda de 1000 a 10000 cm^{-1}).

As figuras de 1 a 5 foram obtidas da referência [6]. Gases componentes da atmosfera simulada: H_2O : 2.59% CO_2 : 0.033% O_3 : 0.000003% N_2O : 0.000032% CO : 0.000015% CH_4 : 0.000170% O_2 : 20.900001% N_2 : 78.100002%

Considerando o intervalo de comprimentos de onda de 1 a 10 μm (10000 a 1000 cm^{-1}), é possível identificar na figura 1 que os grandes componentes da atmosfera que absorvem a luz são: vapor de água, dióxido de carbono, metano e óxido nítrico. Para identificar com mais precisão a contribuição de cada um desses gases, serão mostrados os seus respectivos espectros de transmissão. Os gráficos foram centrados no comprimento de onda da mais intensa linha de absorção do CO_2 , 4.25 μm (2350 cm^{-1}).

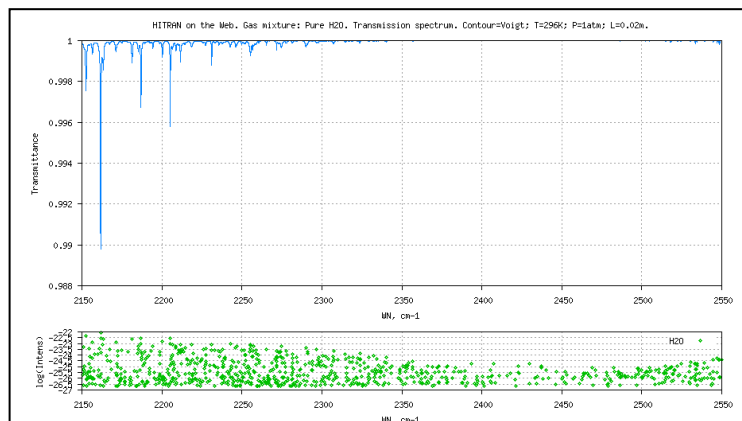


Figura 2: Espectro de transmissão do vapor de água puro de 4.65 a 3.92 μm (2150 a 2550 cm^{-1})

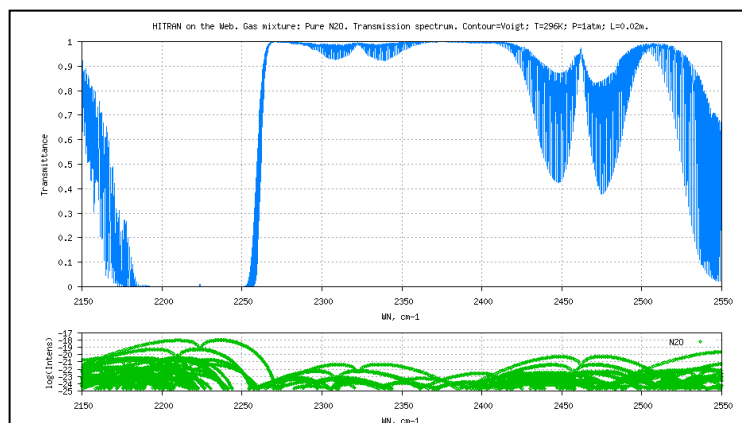


Figura 3: Espectro de transmissão do óxido nítrico puro de 4.65 a 3.92 μm (2150 a 2550 cm^{-1})

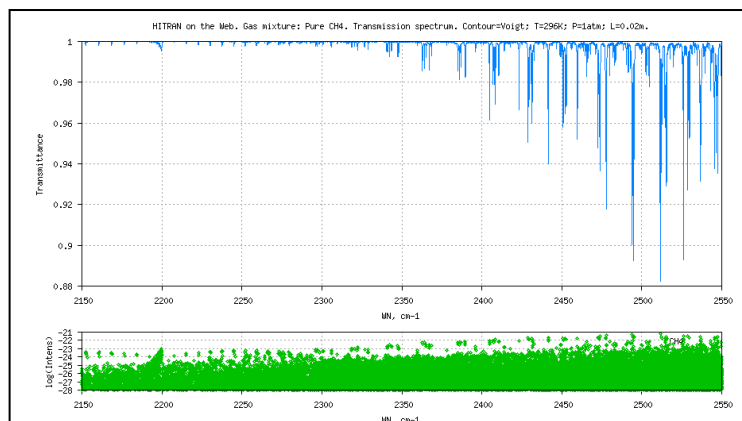


Figura 4: Espectro de transmissão do metano puro de 4.65 a 3.92 μm (2150 a 2550 cm^{-1})

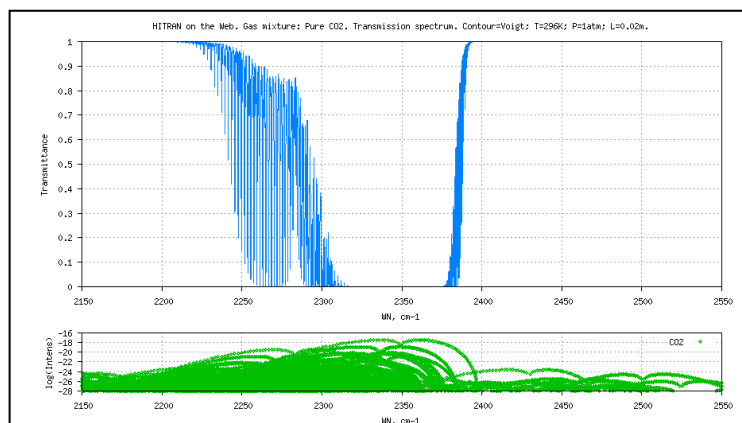


Figura 5: Espectro de transmissão do dióxido de carbono puro de 4.65 a 3.92 μm (2150 a 2550 cm^{-1}) [6]

Analisando as figuras 2 e 4 é possível identificar que vapor de água e metano não apresentam absorção relevante para o intervalo considerado. O óxido nitroso, figura 3, causa uma redução menor que 10% na transmissão, enquanto o dióxido de carbono, figura 5, absorve completamente a radiação.

A absorção predominante do dióxido de carbono em 4.3 μm (2325 cm^{-1}) torna esse comprimento de onda o melhor para a operação do equipamento e a absorção do óxido nitroso no mesmo comprimento de onda só é significativa quando ele se encontra puro. Na atmosfera sua concentração é aproximadamente mil vezes menor que a do gás carbônico e sua absorção pode ser desprezada para fins práticos. Considerando todos os aspectos da absorção do CO_2 , o comprimento de onda escolhido para o sistema é 4,3 μm .

3. Projeto óptico

Após a escolha do comprimento de onda que será utilizado no sistema, é preciso estudar os componentes que serão empregados para manipular a luz de maneira a otimizar o caminho óptico e fazê-la atravessar a região contendo o gás. Serão definidos o emissor de IV, o fotodetector, os espelhos e as lentes necessários para a realização do sistema de detecção.

a. Emissor e detector

É necessário que o conjunto emissor-detector atue na mesma faixa de comprimentos de onda e o que define essa característica é a tecnologia de fabricação dos dispositivos.

De maneira a simplificar e baratear a construção do equipamento, foram escolhidos componentes que funcionam nas condições normais de temperatura e pressão e são operados através de uma eletrônica simples. Tanto o emissor quanto o detector são produzidos pela empresa *Roithner Lasertechnik GmbH* e possuem as seguintes características:

Emissor - Diodo emissor de luz (LED, do inglês) de heteroestrutura em substrato de arseneto de índio (InAs).

Comprimento de onda típico: $4,2 \mu\text{m}$ ($\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Largura de espectro: de $3,0$ a $5,2 \mu\text{m}$

Detector – Fotoresistor de seleneto de chumbo (PbSe).

Comprimento de onda: de $1,0$ a $4,8 \mu\text{m}$.

O LED é controlado por um circuito próprio, também fornecido pela *Roithner*, que permite controlá-lo em dois modos: Máxima potência média e máxima potência de pico. Será utilizado o primeiro modo, pois ele gera uma onda quadrada de frequência constante, 512 Hz , sendo recebida no detector uma onda de mesma frequência, mais fácil de ser filtrada para a obtenção do sinal de saída.

b. Espelhos

Com o objetivo de reduzir o tamanho do sistema sem diminuir o caminho óptico, será empregado um par de espelhos planos onde a luz sofrerá sucessivas reflexões. Em razão da utilização do infravermelho, os espelhos empregados precisam ser de materiais metálicos ou dielétricos que absorvam o mínimo possível nessa faixa do espectro eletromagnético. Múltiplas reflexões causarão perdas por absorção e dispersão; Para minimizá-las, foram analisados valores típicos de refletância de acordo com o material da superfície reflexiva [7, p. 514] com o objetivo de escolher o tipo de espelho mais adequado:

Prata: 96%

Ouro: 94%-98,5%

Dielétricos de ampla banda: 98%-99%

Dielétricos para λ específico: maior que 99%

Dielétricos de perda ultra baixa: 99,97%

Idealmente deveria ser adotado um espelho dielétrico porém, por ser mais fácil obter um espelho de ouro, este material será utilizado. Foi fabricado um par de espelhos no LabSem por um equipamento que faz a evaporação de metais, primariamente utilizado para a criação de contatos em materiais semicondutores, chamado metalizadora. Tendo um espelho de vidro como base, a face de vidro foi metalizada com o ouro em uma espessura de aproximadamente 200 nanômetros , o que é suficiente

para que a radiação infravermelha seja refletida e não atravesse o material, de acordo com o cálculo da profundidade de penetração para o espelho de ouro onde incide o infravermelho [8, pp. 216-220].

c. Lentes

São necessárias lentes para focar a luz emitida pelo LED nos dois extremos do caminho óptico, de maneira a aproveitar o máximo de intensidade possível. Também é essencial que elas não absorvam a luz no comprimento de onda escolhido. Foram estudados os tipos de lente mais comuns disponíveis no mercado que permitem a passagem do IV no λ desejado, de maneira a escolher aquele com melhor transmissão:

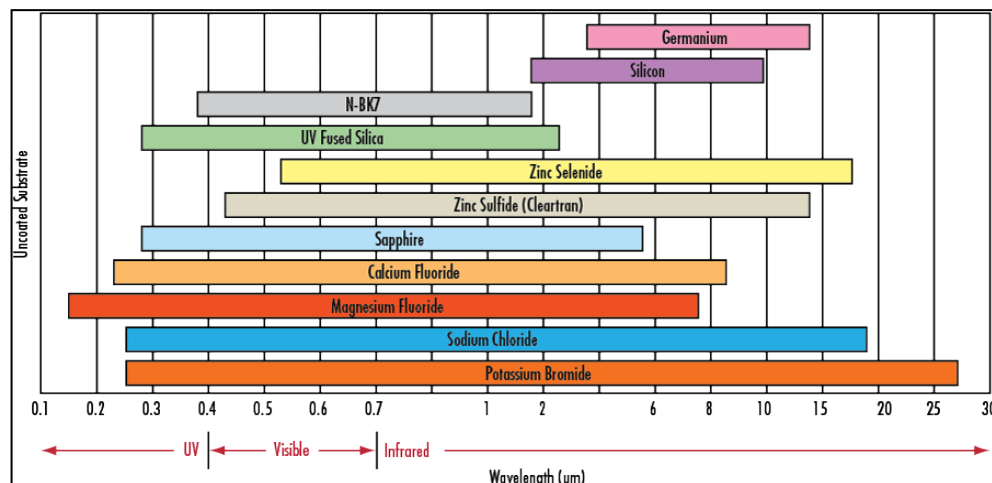


Figura 6: Faixas de transmissão dos materiais utilizados na confecção de lentes [9].

Através da figura 6 é possível identificar os materiais ópticos que transmitem o infravermelho em comprimento de onda próximo de $4,3 \mu\text{m}$: germânio, silício, seleneto de zinco, sulfeto de zinco, safira, fluoreto de cálcio, fluoreto de magnésio, cloreto de sódio e brometo de potássio. Características detalhadas dos materiais [9, 10]:

- Germânio - Ge - Não higroscópico e não tóxico. Apresenta transmissão de 50% entre 2 e $12 \mu\text{m}$.
- Silício - Si - Baixas densidade e dispersão. Apresenta transmissão entre 1.2 e $7 \mu\text{m}$.
- Seleneto de zinco - ZnSe - Não higroscópico, tóxico, estável em ambiente laboratorial. Apresenta transmissão de 70% entre 0,6 e $14 \mu\text{m}$.
- Sulfeto de zinco - ZnS - Material extremamente resistente, utilizado em aplicações militares. Apresenta transmissão maior que 50% entre 4 e $12 \mu\text{m}$.
- Safira - Al_2O_3 - Material extremamente duro, inerte, insolúvel. Alto custo. Apresenta transmissão de 150 nm a $6 \mu\text{m}$.
- Fluoreto de cálcio - CaF_2 - Baixa solubilidade. Apresenta transmissão de 200 a 8000 nm.
- Fluoreto de magnésio - MgF - Material duro e robusto, resistente a choques mecânicos e térmicos, apresenta transmissão de 110 a 7500 nm.
- Brometo de potássio - KBr - Resistente a choques mecânicos, solúvel em água. Transmissão de 0.25 a $25 \mu\text{m}$.
- Cloreto de sódio - NaCl - Baixo custo, solúvel em água, sensível a choques, apresenta transmissão de 0.25 a $18 \mu\text{m}$.

Após a análise das características e da disponibilidade de todos os tipos de lentes, foram escolhidas lentes de fluoreto de cálcio (CaF_2) por apresentarem transmissão maior do que 90% na faixa desejada e por serem insolúveis.

Serão utilizadas duas lentes para a realização de testes: idênticas com distância focal de 2.54 cm (1 pol) e diâmetro de 2 cm, feitas de fluoreto de cálcio (CaF_2).

Com o objetivo de definir o número de lentes a ser empregado, foram feitas medidas utilizando quatro opções:

1. Nenhuma lente entre detector e LED
2. Uma lente próxima ao LED
3. Uma lente próxima ao detector
4. Duas lentes, uma próxima ao LED e uma próxima ao detector

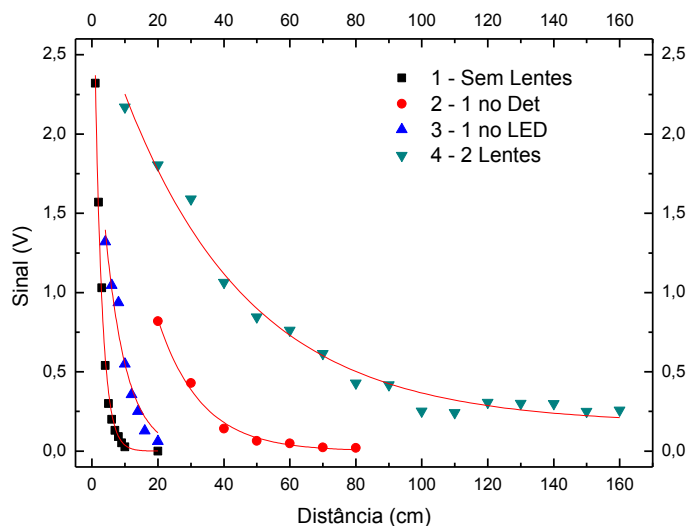


Figura 7: Relação entre o sinal e a distância do LED ao Detector para quatro arranjos com lentes

A figura 7 mostra que as medidas sem lente ou com uma lente no LED resultaram em um sinal forte para distâncias menores do que 5 cm, mas fraco para distâncias maiores e que somente foi detectável a 20 cm ou menos. A medida com uma lente no detector apresentou um bom resultado, mas a queda no sinal é mais acentuada do que com duas lentes e o sinal é mais fraco para o mesmo caminho óptico. Somente com duas lentes é possível aumentar o caminho óptico significativamente e ainda assim obter um sinal detectável, logo serão utilizadas duas lentes no sistema.

Limitada pelas dimensões da mesa óptica utilizada, a medida somente foi realizada para distâncias de até 160 cm.

Um ajuste de curvas foi feito para cada medida, e o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o decaimento exponencial. As equações para cada caso são mostradas a seguir:

Sem Lentes (1): $y = 3,762e^{-x/2,167}$

Equação 2: Sinal sem lentes

Lente no LED (3): $y = 3,818e^{-x/13,108}$

Equação 3: Sinal com lente no LED

Lente no detector (2): $y = 2,601e^{-x/6,427}$

Equação 4: Sinal com lente no detector

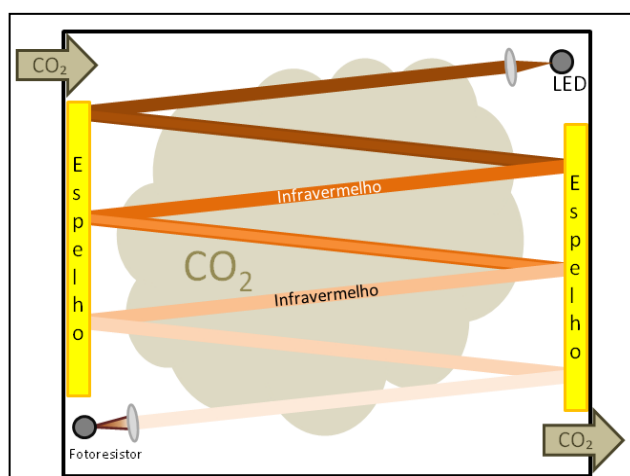
Duas lentes (4): $y = 2,707e^{-x/38,1} + 0,171$

Equação 5: Sinal com duas lentes

Primeiramente foram geradas quatro equações sem nenhuma restrição, o que gerou, para as três primeiras curvas, componentes constantes negativos, indicando que com um aumento na distância o sinal seria negativo, o que não é possível, pois corresponderia a uma emissão de luz pelo detector. Para adequar as equações encontradas à situação real, as três primeiras foram limitadas a ter o componente constante igual a zero.

Sabendo que a equação quatro não tende a zero, o resultado obtido indica que seria possível obter sinal mesmo com um caminho óptico infinito. Em razão da dispersão da luz que ocorre por causa das imperfeições e aberrações nas lentes, é irreal acreditar que o sinal exista para qualquer distância, porém dentre as possibilidades de medição, para todas as distâncias foi obtido um sinal.

d. Esquema simplificado



1. Figura 8: Esquema simplificado do sistema de detecção

Desenho esquemático mostrando os elementos essenciais ao funcionamento do sistema detector e uma representação visual do infravermelho sendo absorvido à medida que passa pelo gás carbônico no interior da célula. O circuito eletrônico de leitura do sinal não é mostrado, pois não necessariamente está no interior da célula. A variação do caminho óptico pode ser feita com uma mudança no ângulo do emissor e do detector ou alteração na disposição dos espelhos.

e. Gases alternativos

O princípio de operação do sistema de detecção é universal e funcionará para qualquer gás que tenha uma faixa de absorção conhecida, caso seja trocada a fonte de luz e o detector de acordo com o necessário.

Alguns gases que podem ser detectados e os seus respectivos comprimentos de onda são apresentados a seguir. Cuidado extra deve ser tomado para evitar a superposição de duas faixas de absorção, possivelmente com a utilização de uma fonte de referência, para que haja a certeza de que o gás que está sendo detectado é o correto.

Gás	λ (μm) possíveis
CH ₄ - Metano	1,7; 2,3; 3,2-3,5
H ₂ O - Vapor de água	2,7-2,9; 1,8-2,0
NH ₃ - Amônia	2,3; 3,0
HCN - Cianeto de hidrogênio	2,9-3,0
HCl - Ácido clorídrico	3,5; 1,8; 1,2
HBr - Ácido bromídrico	4,0; 2,0; 1,3
NO - Óxido nítrico	2,5; 5,5

Tabela 1: Gases alternativos para a detecção com infravermelho próximo [11]

f. Características desejadas

Após o estudo de cada elemento do conjunto óptico, serão apresentadas algumas das características desejadas do sistema detector e a razão de cada uma delas:

- Entrada mínima de luz exterior

É preferível que somente a luz dos LEDs esteja presente no interior do equipamento, evitando assim interferências na detecção causadas pela presença de outras fontes de infravermelho externas.

- Fuga mínima de gás

Deseja-se reduzir ao máximo a quantidade de gás que entra ou sai do equipamento que não seja proveniente da fonte que se deseja medir.

- Caminho óptico variável

Permite medir diferentes gamas de concentrações com maior precisão do que se houvesse apenas um caminho óptico.

- Número mínimo de peças móveis

Para obter um caminho óptico variável, é necessário ter algumas peças móveis no sistema, mas a minimização do número de mecanismos aumenta a robustez do sistema, diminuindo a probabilidade de falhas mecânicas.

- Volume mínimo da câmara

Diminuir a quantidade de gás necessária na amostra diminui o tempo de resposta do sistema a mudanças na concentração do gás.

- Caminho óptico máximo

É necessário que o maior caminho óptico do sistema seja o mais longo possível para aumentar a sensibilidade do sistema a baixas concentrações de CO₂.

Com o objetivo de minimizar a entrada de luz exterior, a caixa que contém os componentes é toda em alumínio, metal que além de evitar a entrada da luz irá diminuir a entrada de ruído elétrico que poderia ser captado pelo detector. A vedação será feita com cola de silicone nas interfaces entre placas da caixa, diminuindo as fugas onde não houver necessidade de movimento.

Para variar o caminho óptico, o ângulo do LED e do detector serão controlados por um servo mecanismo que opera de maneira a obter um sinal ótimo para diferentes situações.

4. Projeto eletrônico

a. Simulação do filtro para o detector

Sendo o detector um fotoresistor, um circuito divisor de tensão é utilizado para detectar a variação na voltagem conforme a resistência do componente varia com a incidência da luz. Como todo o circuito foi projetado para funcionar com duas baterias de nove volts, a tensão de uma delas será usada para alimentar o fotoresistor, que tem resistência aproximada de 200 kOhms, conforme o esquema:

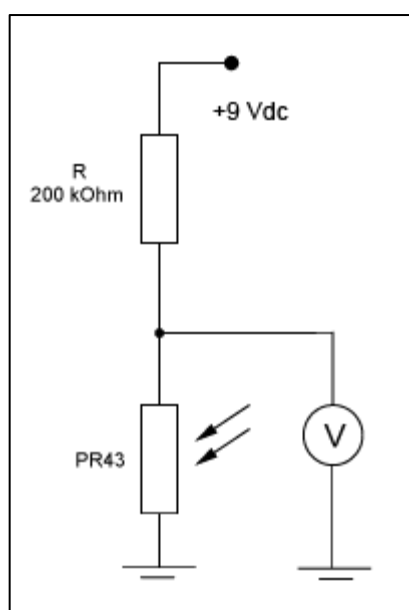


Figura 9: Circuito divisor de tensão do fotoresistor

O sinal de saída do fotoresistor é uma onda quadrada de 512 Hz com amplitude da ordem de micro volts e com um nível DC de aproximadamente 4,5 V.

Não é útil o nível DC, então o primeiro estágio do circuito é um simples capacitor na entrada para só deixar passar as componentes AC do sinal, um filtro passa-altas. A onda então é amplificada em um amplificador não-inversor, filtrada duas vezes em filtros do tipo Sallen-Key passa-banda idênticos e em seguida retificada por um circuito retificador de precisão com filtro de suavização. O resultado é um sinal DC, proporcional à intensidade de luz e, consequentemente, à concentração de gás no sistema, que varia entre 0 e 5 volts. O sinal analógico é enviado a um microcontrolador que o processa e transforma em um valor de concentração, exibido em um visor de cristal líquido. O diagrama é apresentado na figura 10.



Figura 10: Diagrama em blocos do circuito de tratamento do sinal detectado

Para projetar o circuito foram empregados os softwares Maple 13® e LTSpiceIV® e modelos de amplificadores popularmente conhecidos, que podem ser encontrados em [12] e [13]. O esquema completo utilizado na simulação é mostrado na figura 11.

O circuito do amplificador não-inversor foi ajustado com resistores de 40 kOhm e 10 kOhm, de maneira a se obter um ganho de 5 V/V [12, p. 17].

O projeto do filtro Sallen-Key e as equações que definem as suas características são as seguintes [13, p. 719]:

Para o início do cálculo, é necessária a definição das frequências de corte superior e inferior, no caso 511 Hz e 513 Hz para a criação de um filtro passa-banda, bem estreito, centrado em 512 Hz. A qualidade do filtro, Q , é determinada através da seguinte fórmula:

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{2 * \pi * 512}{2 * \pi * 513 - 2 * \pi * 511} = 256$$

Equação 6: Qualidade do filtro

onde $\omega_{0,1,2}$ são as frequências angulares do filtro.

Utilizando um valor arbitrário de 10 nF para o capacitor e sabendo a frequência central, é possível encontrar dos resistores necessários assim como o ganho interno do circuito, A , e o ganho na frequência desejada, K .

$$C = 10 \text{ nF}$$

$$K = A * Q = 767$$

$$R = \frac{1}{\omega_0 * C} = 31084.95 \Omega$$

Equação 9: Ganho na frequência desejada

Equação 7: Resistência principal do filtro Sallen-Key

$$R1 = R * (A - 1) = 62048.47$$

$$A = 3 - \frac{1}{Q} = 2.996$$

Equação 10: Resistência 1 do filtro Sallen-Key

$$Rdb = 2 * R = 62169.90$$

Equação 8: Ganho interno do circuito

Equação 11: Resistência "db" do filtro Sallen-Key

O projeto do retificador de precisão não requer escolha do valor dos componentes [12, p. 88].

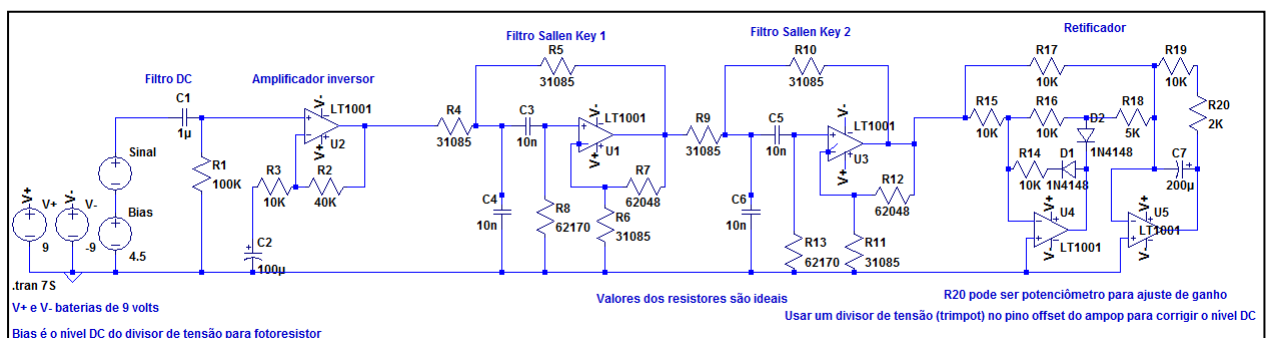


Figura 11: Projeto do circuito no LTSpiceIV

Simulando o circuito foi possível obter os gráficos das formas de onda do sinal após a passagem por cada um dos elementos:

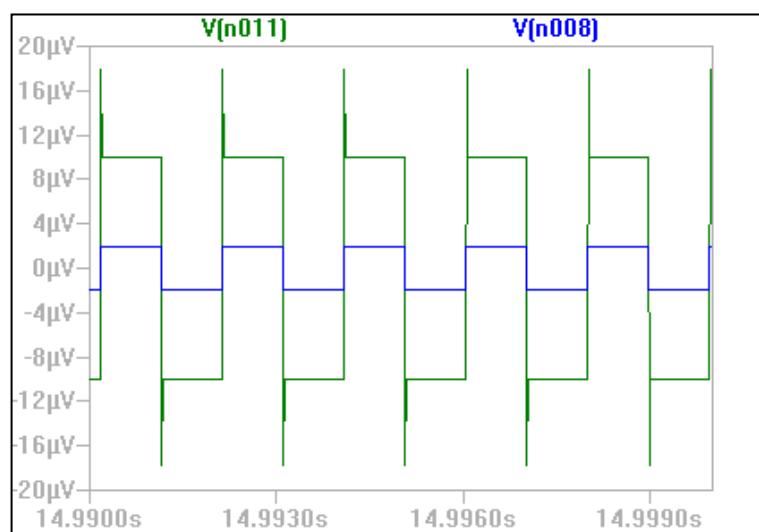


Figura 12: Sinais de entrada - V[n008] - e saída - V[n011] - do amplificador não inversor

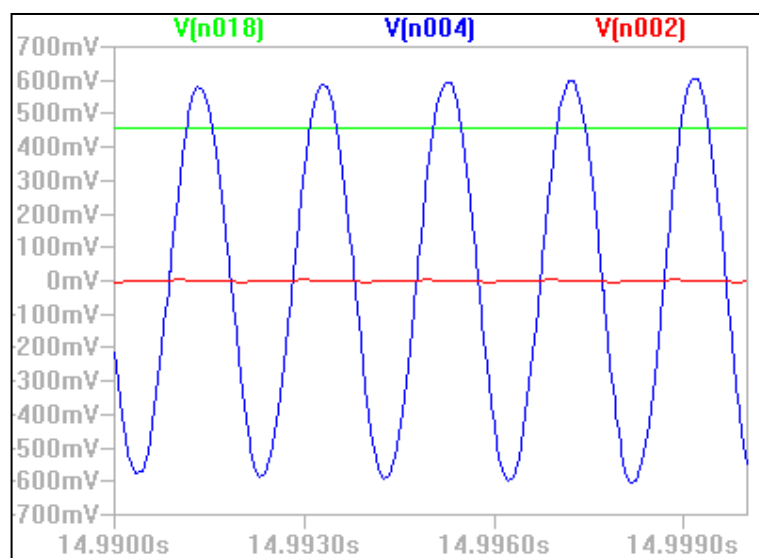


Figura 13: Sinais de saída do primeiro filtro - V[n002], segundo filtro - V[n004] e do retificador - V[n018]

A simulação mostra (figuras 12 e 13) que o circuito é capaz de transformar uma onda quadrada de 512 Hz e amplitude de 2 μV em um sinal CC de 450 mV com um ganho de 107 dB.

O gráfico da resposta em frequência do filtro completo mostra que ele é extremamente fino, centrado em 510,903 Hz, com suas frequências de 3 dB separadas por apenas $\pm 0,55$ Hz. Em 512 Hz temos uma queda de 10 dB, o que podemos considerar uma queda grande demais, sendo o filtro sensível demais a variações na frequência para ser utilizado.

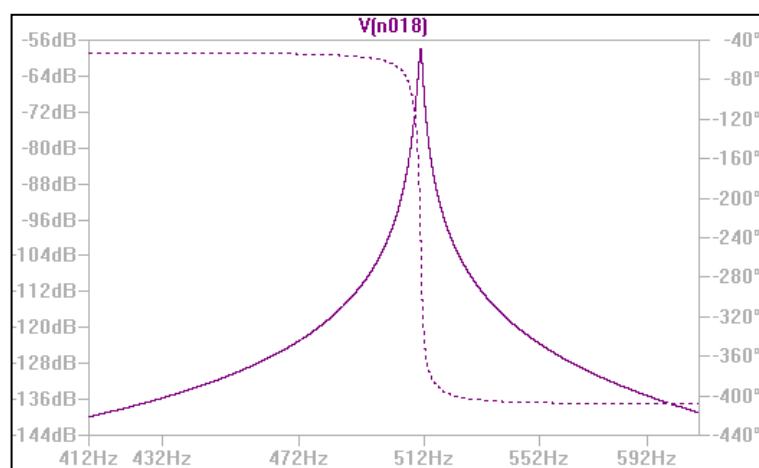


Figura 14: Resposta em frequência do filtro completo

Apesar de ser estreito demais, tendo em vista que somente componentes com precisão de 5% estão disponíveis no mercado, o circuito foi confeccionado com componentes de valor o mais próximo possível do ideal e testado para verificar se correspondia ao desejado. Em seguida são apresentadas as medidas no circuito montado.

b. Caracterização do filtro montado

Após o cálculo do valor de todos os componentes do circuito, o material para montá-lo foi comprado e, primeiramente em uma placa de prototipagem rápida (*protoboard*) e posteriormente em um circuito soldado, figura 15, o circuito foi caracterizado e teve a sua funcionalidade comprovada.

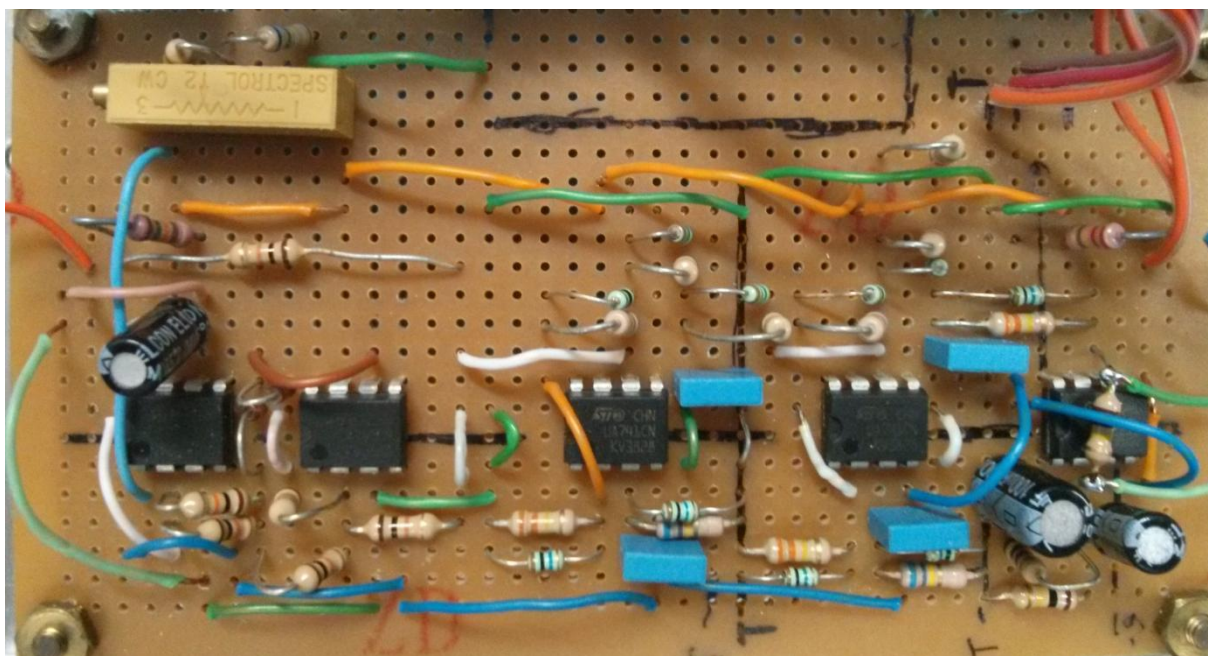


Figura 15: Circuito amplificador montado

Duas mudanças foram realizadas no circuito montado: a inclusão de um potenciômetro no lugar da resistência R2, figura 11, de maneira que o ganho do amplificador não-inversor possa ser alterado caso necessário e de um potenciômetro no pino de *offset* do último amplificador operacional para que o nível de saída fosse ajustado a zero quando não houvesse nenhum sinal no detector.

Através dos gráficos obtidos com o osciloscópio (figuras 16, 17 e 18), é possível ver a transformação do sinal ruidoso e de baixa amplitude em um limpo, de grande amplitude e, posteriormente, em um sinal CC:

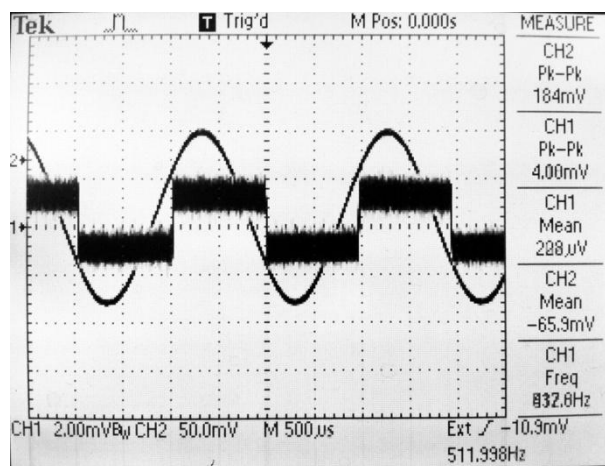


Figura 16: Sinal do fotodetector amplificado pelo amplificador não-inversor (onda quadrada com ruído, ch1) e saída do primeiro filtro Sallen-Key (ch2)

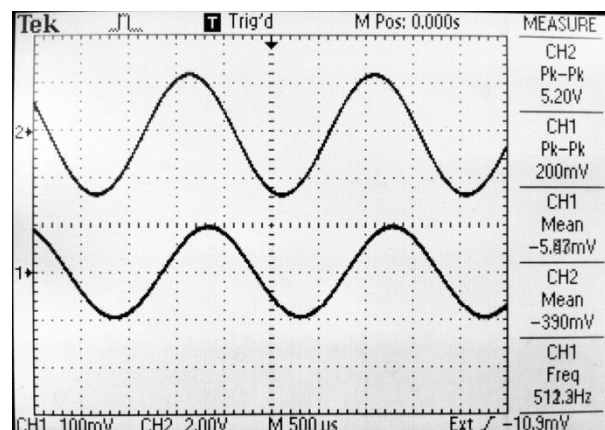


Figura 17: Entrada (ch1) e saída (ch2) do segundo filtro Sallen-Key

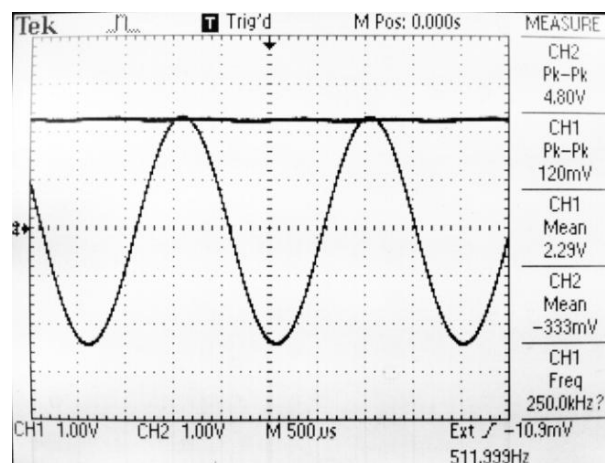


Figura 18: Entrada (ch2) e saída (ch1) do retificador de precisão

A resposta em frequência do filtro foi medida com o auxílio de um gerador de funções e pode ser vista abaixo. O gerador de funções foi configurado para fornecer uma onda de amplitude e formato equivalentes à gerada pelo fotoresistor em funcionamento.

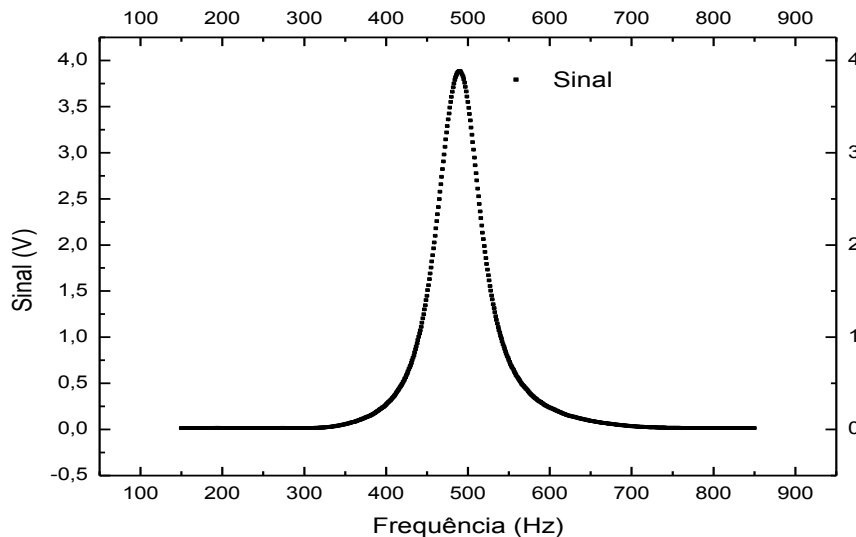


Figura 19: Resposta em frequência do filtro amplificador

Analisando o gráfico obtido (figura 19) é possível verificar que o pico está próximo de 490 Hz com um sinal de 3,9 V. Na frequência de interesse, 512 Hz, é obtido um sinal de 2,61 V, suficiente para que o circuito seja utilizado satisfatoriamente. A largura do pico é maior do que na simulação, como consequência das imperfeições dos componentes. O ruído da medição é aproximadamente cem vezes menor que o sinal e as barras de erro são menores que os pontos do gráfico. Microcontrolador e sistema de controle

Para criar a interface entre o usuário e o equipamento será empregado um microcontrolador *Arduino*. Foi escolhido esse modelo por ser muito popular e ter diversos adaptadores prontos no mercado que possibilitarão a prototipagem mais rápida. Conectado a uma placa de prototipagem rápida com pequenos circuitos que fazem a interface com o amplificador analógico, ele criará a interface com o usuário através de um visor de cristal líquido com botões. Para mudar o caminho óptico, serão utilizados dois servomecanismos, alterando individualmente os ângulos do LED e do detector em relação aos espelhos, de modo a otimizar o sinal antes de fazer a medida.

A programação do *Arduino* permitiu a criação de um menu simplificado que permite ao usuário a escolha do caminho óptico desejado, de acordo com a concentração de gás a ser medida. Após a seleção do caminho desejado, o sistema se ajusta para obter o melhor sinal possível e inicia a medição.

A linguagem de programação para o *Arduino* é C ou C++ e as bibliotecas necessárias estão disponíveis gratuitamente na internet sob a licença *Creative Commons* [14].

c. Interface de controle

Utilizando cinco botões disponíveis, além de um para voltar às configurações iniciais (*reset*), foi criada uma interface que permite ao usuário escolher a informação exibida na tela e também realizar a calibração manual do sistema, caso seja necessário. Na figura 20 é apresentada a interface com os botões ainda sem rótulos e a tela mostrando o valor imediato da concentração na linha superior e a gama de concentrações que pode ser detectada em ppm (partes por milhão). A figura 21 mostra a tela de calibração, com o valor em voltagem que está sendo detectado e o ângulo do servomecanismo que controla o LED.

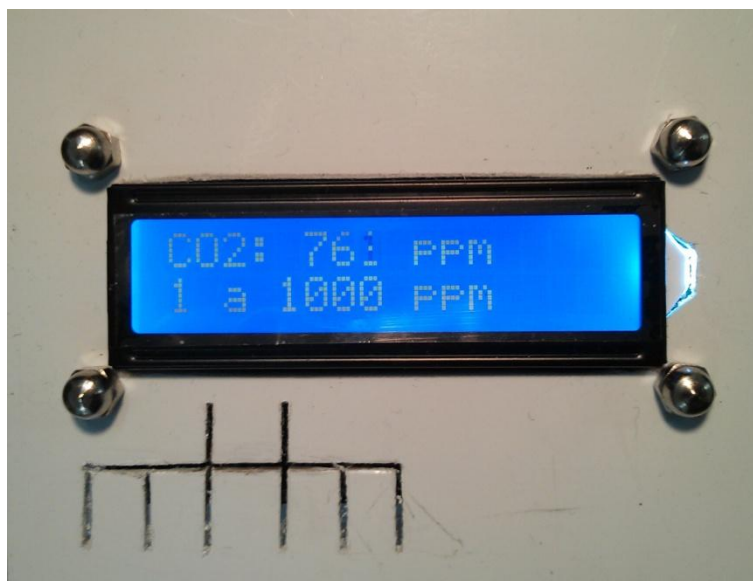


Figura 20: Interface de controle com botões e tela de cristal líquido



Figura 21: Tela de calibração

5. Equipamento detector completo

Antes da fabricação da caixa metálica que contém o sistema, ela foi projetada com a utilização de um programa de modelagem em 3D, *Siemens Solid Edge*, onde foi possível analisar as principais dimensões para que todos os componentes do sistema coubessem adequadamente.

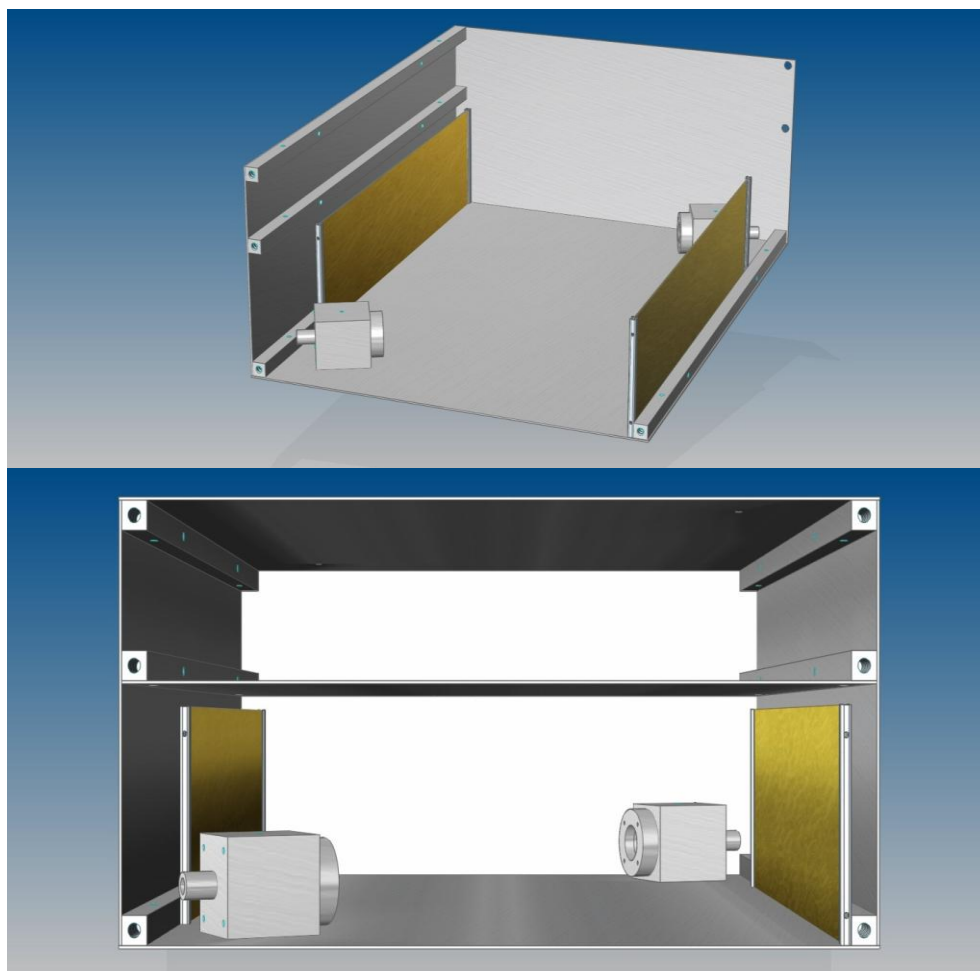


Figura 22: Modelo computadorizado do equipamento

A figura 22 mostra uma visão dos componentes ópticos e o seu posicionamento em relação às paredes laterais da caixa. Modelado de acordo com os componentes disponíveis, esse desenho não está otimizado para a redução do volume do gás em seu interior.

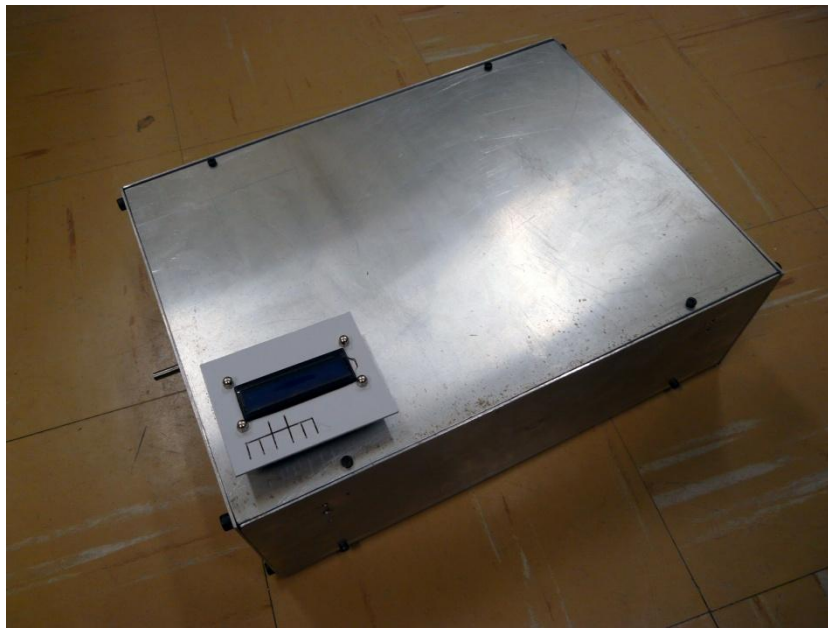


Figura 23: Sistema montado e fechado

Após a conclusão do projeto, o equipamento foi montado e teve todos os seus componentes instalados. A figura 23 mostra o equipamento pronto para os testes. A interface de controle será instalada na face superior da caixa após a conclusão da calibração.

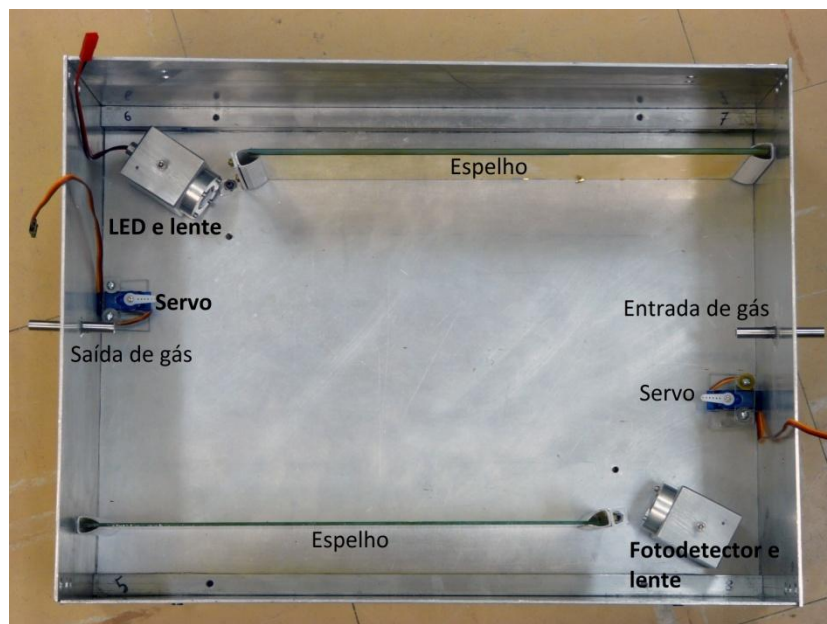


Figura 24: Equipamento desmontado

Na figura 21 é possível visualizar os componentes ópticos do equipamento, em acordo com o esquema simplificado (figura 8).

6. Medida experimental

a. Sistema simplificado

Antes da construção do equipamento, o LED e o fotodetector foram testados com a presença de gás em diferentes concentrações.

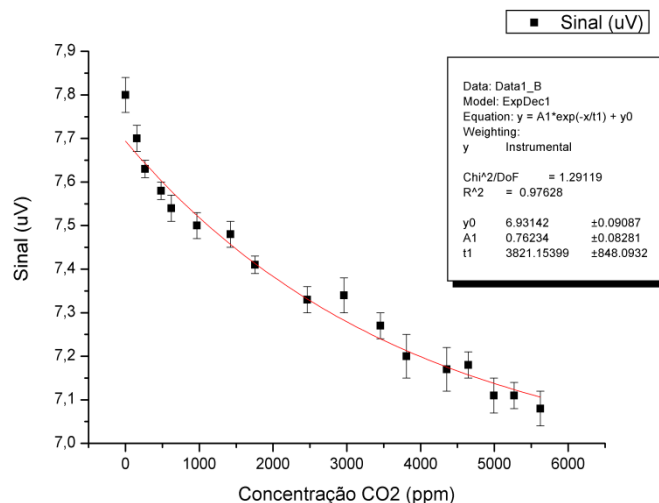


Figura 25: Sinal detectado em função da concentração de CO₂ - versão simplificada

Utilizando uma versão simplificada do sistema foi possível obter um gráfico que demonstra o comportamento exponencialmente decrescente da intensidade de luz com o aumento da concentração de gás.

Algumas considerações devem ser feitas para a análise do gráfico: na época dessa medida não haviam sido criados os espelhos de ouro nem o circuito retificador, então as medições foram feitas com a incidência em linha reta da luz do LED sobre o detector e com um filtro amplificador *Lock-In*.

A equação obtida através de um *fitting* dos pontos do gráfico foi:

$$I_L = 0,762 \cdot e^{-0,1 \cdot C \cdot 0,00261} + 6,931 \text{ (}\mu\text{V)}$$

Equação 12: Sinal detectado em função da concentração

Analisando por partes a equação, existe um nível mínimo de sinal, 6,931 μV que se deve à radiação que o LED emite mas não é absorvida por dióxido de carbono. Como o caminho óptico utilizado foi de 10 centímetros existe um fator 0,1(m) no expoente multiplicado pela concentração em partes por milhão(PPM) e multiplicada pelo coeficiente de absorção do gás carbônico, 0,00261, em (PPM⁻¹.m⁻¹). A amplitude máxima de variação do sinal será o valor da amplitude inicial, ou seja, 0,762 μV .

b. Equipamento completo

O equipamento detector completo foi testado e foi possível obter 3 caminhos ópticos diferentes, com comprimentos de 38, 71 e 110 centímetros. Nos três casos há um nível mínimo de sinal de aproximadamente 1.1V, presente mesmo na ausência de luz. A incidência da radiação aumenta o sinal para 4V, 2.5V e 1.5V, respectivamente, com um ruído de $\pm 0.1V$.

A introdução do gás carbônico no sistema em baixas concentrações não afeta o sinal significativamente, o que indica uma baixa sensibilidade. Várias medições foram realizadas e nenhuma delas se mostrou conclusiva. É mostrado o gráfico (figura 26) obtido para o sinal elétrico em função da concentração do dióxido de carbono, de 0 a 4000 ppm:

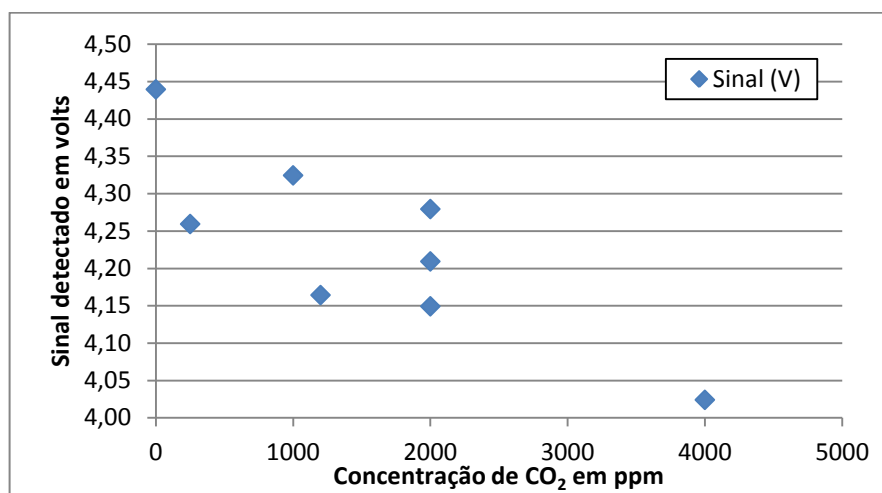


Figura 26: Sinal detectado (V) em função da concentração de CO₂ (ppm) - equipamento completo

Apesar de tudo o que foi levado em conta para a elaboração do protótipo, as medidas realizadas não foram suficientes para uma calibração ótima, não sendo possível obter um gráfico que demonstre o comportamento esperado de decaimento exponencial do sinal em função do aumento da concentração de gás.

c. Melhorias possíveis

O tempo de resposta à mudança na concentração é muito grande, causado pelo grande volume da câmara de gás. Para solucionar esse problema a altura da câmara poderia ser reduzida de 85 para 35 milímetros e o espaço entre os espelhos e as paredes laterais também poderiam ser alterados de 30 para 5 milímetros, diminuindo em aproximadamente 63% o volume de gás necessário, sem alterar o comprimento do caminho óptico. Essas alterações só seriam possíveis com a metalização de novos espelhos, com altura reduzida, o que não pôde ser realizado em tempo hábil.

Para a redução do ruído presente no sinal elétrico, seriam necessárias baterias como fonte de tensão, em vez de uma fonte de alimentação convencional, ligada à rede elétrica, que apresenta componentes de ruído capazes de afetar um sistema sensível como o utilizado.

O espectro de emissão do LED (3,0 a 5,2 μm) é muito mais largo do que a faixa de absorção do CO₂ (4,2 a 4,4 μm), causando a detecção constante de um sinal proveniente dos outros comprimentos de onda emitidos pelo LED e absorvidos pelo detector, mas não absorvidos pelo dióxido de carbono. A utilização de um filtro óptico centrado em 4,3 μm poderia melhorar a resolução obtida através da redução do nível de sinal correspondente a radiação que não é de interesse. Outra possibilidade é a troca do fotodetector empregado por um fotodetector de infravermelho baseado em poços ou pontos quânticos (QWIP, do inglês *quantum well infrared photodetector*, e QDIP, do inglês *quantum dot infrared photodetector*), estreitando a faixa espectral detectada: de 1,0 a 5,0 μm , com o fotodetector, para 3,25 a 5,2 μm com o QWIP [4] ou 3,5 a 5,2 μm com o QDIP [15].

7. Considerações finais

a. Aplicações práticas

Com a capacidade de medir uma ampla faixa de concentrações de dióxido de carbono, um sistema pode ser utilizado de diferentes maneiras:

- Monitoramento ambiental

Instalado em um local fixo, é capaz de monitorar a variação da concentração de dióxido de carbono ao longo do tempo, indicando assim possíveis problemas como queimadas ou grande emissão de gases veiculares e industriais.

- Saúde e bem-estar

Em casos onde o paciente está ligado a equipamentos de ventilação mecânica, a análise do nível de dióxido de carbono presente no ar exalado é uma maneira de se identificar problemas no processo de instalação do aparelho de respiração que devem ser prontamente resolvidos, sob pena de óbito por falta de oxigenação. [2]

Ambientes que concentram um grande número de pessoas podem precisar de ventilação auxiliar caso haja uma alta concentração de CO₂. Um sistema automatizado pode funcionar baseado na variação detectada pelo equipamento, melhorando a qualidade do ar. [11]

- Teste de emissão veicular

Em motores a combustão, a eficiência da queima pode ser analisada através da concentração de CO₂ presente nos gases da exaustão. O balanço ideal entre ar e combustível é atingido quando a percentagem de dióxido de carbono é maximizada, reduzindo a emissão de outros componentes nocivos, como monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio. [12, 3]

- Vazamentos em tubulações

Em plantas industriais onde a utilização de CO₂ passa por tubulações, pode ser de interesse instalar detectores em juntas e conexões ou locais mais propícios a vazamentos. A detecção de um problema pode ser informada a um sistema automático de alarme capaz de prevenir acidentes mais graves.

- Outros tipos de gases

Como citado na seção 3.e, o sistema pode ser adaptado através da mudança do emissor e/ou do detector para outros gases e a sua utilidade ter uma enorme gama de aplicações, dependendo do gás escolhido.

b. Produção nacional do fotodetector

Para a criação do protótipo inicial, apresentado nesse trabalho, foi utilizado um fotodetector comercial, importado. Uma linha de desenvolvimento possível a partir deste modelo é a troca do componente de origem estrangeira por um fabricado no Brasil.

Através da tecnologia de produção existente no Laboratório de Semicondutores (LabSem) da PUC-Rio, será possível criar detectores de IV capazes de substituir o adotado neste equipamento. Os fotodetectores de infravermelho baseados em poços e pontos quânticos são fabricados por deposição epitaxial de camadas de material semicondutor, realizada em um equipamento Aixtron AIX200.

Bibliografia

- [1] IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, "FAQ 1.3 What is the Greenhouse Effect?," [Online]. Available: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-3.html. [Accessed 21 February 2013].
- [2] Clinical Monograph, "CO2 Detection: Intubation and Cardiopulmonary Resuscitation," [Online]. Available: <http://www.mastertrain.8m.com/articles02/co2%20and%20cpr.pdf>. [Accessed 23 05 2013].
- [3] Z. D. Ristovski, E. R. Jayaratne, L. Morawska, G. A. Ayoko and M. Lim, "PARTICLE AND CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM PASSENGER VEHICLES OPERATING ON UNLEADED PETROL AND LPG FUEL," [Online]. Available: http://eprints.qut.edu.au/1121/1/1121_2.pdf. [Accessed 23 5 2013].
- [4] D. N. Micha, Fabricação de fotodetectores de radiação infravermelha baseados em poços quânticos para detecção de gases, Rio de Janeiro: UFRJ / IF, 2010.
- [5] R. R. Robert Eisberg, Física Quântica, Rio de Janeiro: Campus, 1988.
- [6] HITRAN, "Gas Mixture Spectra," [Online]. Available: <http://hitran.iao.ru/gasmixture>. [Accessed 23 05 2013].
- [7] Newport, The Newport Resource, Newport, 2008.
- [8] J. B. William Hayt, Eletromagnetismo, Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- [9] Edmund Optics, "Infrared Optics," [Online]. Available: <http://www.edmundoptics.com/learning-and-support/technical/learning-center/marketing-literature/?mlid=138>. [Accessed 26 03 2013].
- [10] II-IV Infrared, "Optical Materials," [Online]. Available: <http://www.iiviiinfrared.com/>. [Accessed 28 05 2013].
- [11] HITRAN, "Molecular Absorption Spectra," [Online]. Available: <http://www.coe.ou.edu/sserg/web/Results/results.htm>. [Accessed 12 03 2013].
- [12] T. R. B. Bruce Carter, Handbook of Operational Amplifier Applications, Texas Instruments, 2001.
- [13] R. C. Dorf and J. A. Svoboda, Introdução aos Circuitos Elétricos, LTC, 2008.
- [14] Arduino, "Arduino - Home Page," [Online]. Available: <http://arduino.cc/>. [Accessed 07 06 2013].
- [15] Á. D. B. Maia, *Crescimento, fabricação e teste de fotodetectores infravermelhos de alto desempenho baseados em pontos quânticos*, São Paulo, 2012.