

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Rafael Cabral Pinto

IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTO DE AMÔNIA PARA SISTEMAS DE
REFRIGERAÇÃO EM TEMPO REAL

Divinópolis
2017

Rafael Cabral Pinto

IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTO DE AMÔNIA PARA SISTEMAS DE
REFRIGERAÇÃO EM TEMPO REAL

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Eletrônica, Computação.

Orientador: Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva

Divinópolis
2017

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Monografia intitulada “IDENTIFICAÇÃO DE VAZAMENTO DE AMÔNIA PARA SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO EM TEMPO REAL”, de autoria do graduando Rafael Cabral Pinto, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva - Orientador
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Dr. Ricardo Luiz Ribeiro
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Dr. Valter Júnior de Souza Leite
CEFET/MG *Campus V*

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica
CEFET/MG *Campus V*

Divinópolis
2017

DEDICO ESTE TRABALHO PRIMEI-
RAMENTE A DEUS, ALÉM DOS
MEUS PAIS, IRMÃOS, FAMILIARES,
NAMORADA E AMIGOS QUE DE MUI-
TAS FORMAS ME INCENTIVARAM E
AJUDARAM PARA QUE FOSSE POS-
SÍVEL A CONCRETIZAÇÃO DESTE
TRABALHO.

Agradecimentos

Primeiramente quero agradecer a Deus que esteve comigo ao longo de todo este percurso e tornou possível a realização do meu sonho.

A esta universidade eu deixo meu agradecimento profundo porque sempre encontrei os recursos necessários para evoluir e alcançar todas as metas.

Ao meu lado tive os professores e orientador repletos de sabedoria e paciência e por isso a todos agradeço do fundo do meu coração.

À minha família, namorada e a todos os meus amigos eu deixo uma palavra de gratidão por todo apoio, carinho e inspiração. Sem eles nada de bom teria acontecido.

A todas as pessoas que interferiram nesta minha grande viagem eu agradeço, porque de alguma forma influenciaram meu percurso.

Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes.

Marthin Luther King

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo desenvolver um dispositivo de identificação de vazamento de gás amônia para sistemas de refrigeração industrial. A amônia é muito utilizada nesse setor devido sua capacidade de absorver grande quantidade de calor quando passa do estado líquido para o gasoso. Dessa forma, em virtude do fluido refrigerante de amônia ser classificado como uma substância tóxica e, em concentrações mais elevadas, ocasionar problemas respiratórios e visuais, queimaduras e até ser fatal a seres humanos, constatou-se a necessidade do monitoramento em tempo real de um possível escape dessa substância. Além disso, existem outras razões que evidenciam a necessidade de detectar o vazamento, tais como: custo do consumo de energia ampliado devido à falta de refrigerante e riscos de poluição do meio ambiente e intoxicação das pessoas envolvidas diretamente e indiretamente no processo de refrigeração. Na atualidade, os monitoramentos que mais se destacam são aqueles constituídos de sensores de material semicondutor, devido ao seu custo reduzido. O problema deles, no entanto, é a captação de uma variedade de gases, o que dificulta a precisão da detecção da disseminação exclusivo de amônia. A partir de toda essa análise, o protótipo a ser desenvolvido será incorporado em áreas da eletrônica e programação. Inicialmente, será estudada a utilização de sensor eletroquímico; a partir disso, desenvolvido um *hardware* com três placas modulares, sendo: módulo sensor de gás responsável pela captação do gás reagente, o módulo de comunicação sem fio para transmitir as informações e o módulo principal com microcontrolador responsável por processar as informações do sistema. Além disso, será desenvolvido um *software* para analisar os dados recebidos e apresentar as informações com um alarme pré-definido. Sendo assim, será possível, por meio do *software*, detectar a existência ou não de vazamentos de amônia em pontos diversos, por meio dos dados transmitidos pelos módulos projetados. Após a montagem do protótipo, testes e calibrações serão realizados, para possíveis correções de erros. Espera-se uma captação exclusiva do gás amônia, com precisão e confiabilidade para os usuários, para fins de evitar acidentes envolvendo vazamentos.

Palavras-chave: Identificação de vazamento, Sensoriamento, Amônia.

Abstract

This course completion work aims to develop an ammonia gas leakage identification device for industrial refrigeration systems. Ammonia is widely used in this industry because of its ability to absorb large amounts of heat when it passes from the liquid to the gaseous state. Thus, because the ammonia refrigerant is classified as a toxic substance and, in higher concentrations, cause respiratory and visual problems, burns and even be fatal to humans, it was verified the necessity of the real-time monitoring of a possible escape of this substance. In addition, there are other reasons that demonstrate the need to detect the leak, such as: increased energy consumption cost due to lack of refrigerant and risks of pollution of the environment and intoxication of people directly and indirectly involved in the refrigeration process. At the present time, the most important are the semiconductor sensors, due to their low cost. Their problem, however, is the uptake of a variety of gases, which hinders the accuracy of detecting the exclusive spread of ammonia. From all this analysis, the prototype to be developed will be incorporated into areas of electronics and programming. Initially, the use of electrochemical sensors will be studied; From this, a hardware was developed with three modular boards, being: gas sensor module, wireless communication module and main module. In addition, a textit software will be developed to analyze the received data and display the information on the screen with an alarm set at 20PPM. Thus, it will be possible, through software, to detect the existence or not of ammonia leaks at various points through the data transmitted by the designed modules. After the assembly of the prototype, tests and calibrations will be performed, for possible corrections of errors. A unique capture of ammonia gas is expected, with precision and reliability for the users, in order to avoid accidents involving leaks.

Key words: Identification of leakage, Sensing, Ammonia.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Acrônimos e Notação	xiv
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema	1
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos do Trabalho	2
1.4 Estado da Arte	2
1.5 Organização do Documento	4
2 Fundamentos	5
2.1 Revisão de Literatura	5
2.2 Metodologia	6
2.3 Amônia	8
2.3.1 Estrutura da Molécula de NH ₃	8
2.3.2 Propriedades da Amônia	9
2.3.3 Aplicações da Amônia	9
2.3.4 Efeitos Sobre o Homem e Toxicidade	10
2.3.5 Efeitos Ambientais	11
2.3.6 Fluido Refrigerante R-717	11
2.4 Especificações de Sensores	12
2.4.1 Sensibilidade	12
2.4.2 Faixa de Grandezas	12
2.4.3 Precisão	13
2.4.4 Linearidade	13
2.4.5 Tempos de Resposta	14
2.4.6 Calibração	16
2.5 Sensores de Gás - Princípios e Tecnologias	16
2.5.1 Funcionamento de Sensores de Gases	16
2.5.2 Sensor Catalítico	16
2.5.3 Sensor Semicondutor	17
2.5.4 Sensor Infravermelho (IR)	19
2.5.5 Sensor Eletroquímico	19

2.6	Microcontroladores	20
2.6.1	Amplificador operacional	21
2.7	Processamento de Sinais	23
2.7.1	Amostragem	23
2.7.2	Filtros Analógicos	25
2.7.3	Aquisição de Dados	25
2.7.4	Redes de Comunicação	27
2.7.5	Software de medição	28
3	Desenvolvimento	30
3.1	Comparação de Sensores de Gás de Amônia	30
3.2	Sensor Eletroquímico NE4-NH3	32
3.3	Pré-Requisitos Sistema de Detecção	33
3.3.1	Funcionamento do Sistema de Detecção	34
3.4	Kit de Calibração	36
3.4.1	Cilindro de Gás	36
3.4.2	Válvula Reguladora de Pressão	37
3.4.3	Adaptador	38
3.5	Projeto Eletrônico	39
3.5.1	Módulo Sensor de Gás	40
3.5.2	Módulo Comunicação Sem Fio	49
3.5.3	Módulo Principal	54
3.6	Desenvolvimento do Software	67
3.6.1	Definição das tecnologias	67
3.6.2	Frontend	67
3.6.3	Teste Software	68
3.7	Invólucro de Proteção	72
4	Considerações Finais	76
4.1	Conclusões	76
4.2	Propostas de continuidade	77
A	Tabelas	78
B	Códigos	79
	Referências	81

Lista de Figuras

2.1	Estrutura de uma molécula de amônia.	8
2.2	Desvio da sensibilidade ao longo da faixa de operação de um sensor.	13
2.3	Diferença de linearidade entre um sensor ideal e um sensor real.	14
2.4	Curva exponencial de resposta.	15
2.5	a) Sinal elétrico proporcional b) Sinal da concentração em um certo valor.	17
2.6	Esquemático de funcionamento do sensor catalítico.	18
2.7	Esquemático do sensor semiconductor.	18
2.8	Esquemático de funcionamento do sensor infravermelho.	20
2.9	Esquemático de funcionamento do sensor eletroquímico.	21
2.10	Amplificador inversor.	22
2.11	Amplificador não inversor.	22
2.12	Princípio de Amostragem.	24
2.13	Sinais Amostrados próximos de faixas limite.	25
2.14	Classificações dos filtros quanto a frequência de corte	26
2.15	Diagrama de aquisição.	26
3.1	Espectro de sensibilidade.	30
3.2	Comparação relativa de custo.	31
3.3	Comparação de sensores.	31
3.4	Esquema interno do sensor eletroquímico NE4-NH3.	32
3.5	Membrana hidrofóbica do sensor eletroquímico NE4-NH3.	32
3.6	Sensor eletroquímico NE4-NH3.	33
3.7	Fluxograma do funcionamento do detector de gás.	35
3.8	Cilindro de gás amônia.	36
3.9	Esquemático de Funcionamento da Válvula Reguladora de Pressão.	38
3.10	Válvula Reguladora de Pressão.	39
3.11	Adaptador para o sensor no <i>SolidWorks</i>	39
3.12	Circuito de acionamento para o sensor eletroquímico NE4-NH3.	40
3.13	Placa do circuito de acionamento do sensor eletroquímico NE4-NH3 em 3D.	41
3.14	Simulação do circuito de acionamento do sensor no Proteus.	42
3.15	Esquemático do circuito do sensor completo.	42
3.16	Montagem da placa com camadas isoladas.	43
3.17	Sinal de teste amplificado.	44
3.18	Curva de testes de resposta do sensor.	45
3.19	Simulação do circuito de amplificação.	46
3.20	Esquemático final do módulo de sensoriamento.	47

3.21	Versão em 3D da placa final do sensor.	47
3.22	PCB da placa final do sensor.	48
3.23	Módulo NRF24L01.	49
3.24	Módulo NRF24L01 conectado no Arduíno UNO.	50
3.25	Serial Monitor - Comunicação com módulo NRF24L01	50
3.26	Módulo RFM69HCW.	51
3.27	Módulo RFM69HCW conectado no Arduíno UNO.	52
3.28	Serial Monitor - Comunicação com módulo RFM69HCW.	53
3.29	Esquemático Módulo RFM69HCW.	53
3.30	PCB Módulo RFM69HCW.	54
3.31	Fonte de alimentação AC/DC 12V 1A.	55
3.32	Circuito de funcionamento do regulador de tensão LM2576.	55
3.33	Circuito de funcionamento do regulador de tensão MIC5205.	56
3.34	Esquemático do circuito de alimentação completo.	56
3.35	Conexões dos pinos do LCD 16x2.	57
3.36	Teste no <i>Proteus</i> do <i>display</i> LCD 16x2.	58
3.37	Esquemático do <i>display</i> LCD 16x2.	58
3.38	Esquemático do circuito de LEDs para alarme.	59
3.39	Teclado De Membrana 5 Botões.	60
3.40	Esquemático do circuito do teclado.	60
3.41	Conexão para comunicação cabeado RS-485.	61
3.42	Sirene Piezo de 12V.	61
3.43	Simulação no <i>Proteus</i> do funcionamento da Sirene.	62
3.44	Esquemático para acionamento da sirene.	63
3.45	Esquemático do microcontrolador STM32F030C8T.	64
3.46	Modelo em 3D do módulo principal.	65
3.47	PCB do módulo principal.	65
3.48	Teste do software no menu configurações.	69
3.49	Teste do software no menu sensores.	69
3.50	Teste do software no menu análise.	70
3.51	Acesso ao sistema com a conexão do Arduíno.	70
3.52	Registro dos dispositivos no <i>software</i>	71
3.53	Simulação de sinais senoidais no software.	72
3.54	Projeto do invólucro de proteção no <i>SolidWorks</i>	73
3.55	Caixa com grau de proteção IP65.	73
3.56	Desenho técnico da caixa de proteção.	74
3.57	Desenho técnico da tampa da caixa de proteção.	74
3.58	Protótipo do sistema de detecção.	75

Lista de Tabelas

2.1	Proporções em Unidades de Massa Atômica	8
2.2	Propriedades da Amônia	9
2.3	Principais propriedades do R-717	12
3.1	Orçamentos dos Componentes da Placa do Sensor	48
3.2	Conexões do módulo NRF24L01	49
3.3	Conexões do módulo RFM69HCW	52
3.4	Orçamentos dos componentes da placa do módulo RFM69HCW	54
3.5	Orçamentos dos componentes da placa principal	66
A.1	Especificação do sensor eletroquímico NE4-NH3	78

Lista de Acrônimos e Notação

NH ₃	Composto químico da amônia .
IR	Infravermelho, do inglês <i>Infrared</i> .
R-717	Líquido obtido da amônia.
VSEPR	Teoria de repulsão eletrônica.
CFC	composto orgânico clorofluorcarbonos do inglês <i>Chlorofluorocarbon</i> .
H	Composto químico de hidrogênio.
NHO ₄	Hidróxido de amônia .
PPM	Partículas por milhão .
HEATER	Aquecedor.
T90	tempo para atingir 90% da resposta final.
μA	Símbolo de corrente elétrica, microamperes.
nA	Símbolo de corrente elétrica, nanoamperes.
pA	Símbolo de corrente elétrica, picoamperes.
CPU	unidade central de processamento , do inglês <i>Central Processing Unit</i> .
I/O	sigla para <i>Input/Output</i> , do Português Entrada/Saída.
PWM	Modulação de Largura de Pulso, do inglês <i>Pulse Width Modulation</i> .
USB	Porta Universal, do inglês <i>Universal Serial Bus</i> .
ETHERNET	arquitetura de interconexão para redes locais - Rede de Área Local.
DAQ	aquisição de dados, do inglês <i>data acquisition</i> .
FFT	Transformada Rápida de Fourier, do inglês <i>Fast Fourier Transform</i> .
PPO	Polióxido de Fenileno é um poliéster saturado.
DMA	Acesso direto da memória, do inglês <i>Direct Memory Access</i> .
LCD	Tela de cristal líquido, do inglês <i>Liquid Crystal Display</i> .
Kb	Múltiplo de uma unidade byte.
Ω	Símbolo de resistência elétrica, Ohms.
f_s	Frequência de amostragem.
T_s	Período de amostragem.
f_{max}	Máxima frequência do sinal.
PAM	Pulsos modulados em amplitude.
f_c	Frequência de corte.

Introdução

O processo de refrigeração surgiu no final do século XIV, já utilizando a amônia como elemento principal. Nos períodos seguintes, esse processo evoluiu a partir do surgimento de novas tecnologias que aperfeiçoaram e diminuíram os custos de produção. Essa substância é muito utilizada nesse setor devido à sua capacidade de absorver grande quantidade de calor quando passa do estado líquido para o gasoso (COSTA, 1982). Assim, esse fluido refrigerante é utilizado em larga escala nos sistemas de refrigeração, principalmente nas atividades industriais que trabalham com alimentos perecíveis, como os armazéns frigoríficos, a indústria do pescado, as fábricas de gelo, os laticínios e a indústria de bebidas.

1.1 Definição do Problema

Os vazamentos de amônia em instalações de refrigeração industrial são um problema, pois estas, em condições de temperatura, pressão e umidade diferenciadas do habitual, apresentam riscos específicos à segurança e à saúde.

Além disso, as causas de acidentes são falhas no projeto do sistema e danos aos equipamentos provocados pelo calor, corrosão ou vibração, assim como por manutenção inadequada ou ausência de manutenção de seus componentes, como válvulas de alívio de pressão, compressores, condensadores, vasos de pressão, equipamentos de purga, evaporadores, tubulações, bombas e instrumentos em geral. Desse modo, é importante observar que, mesmo os sistemas de refrigeração industrial mais bem projetados, podem apresentar vazamentos de amônia, se operados e/ou mantidos de forma precária. Sendo assim, mostra-se a importância de monitorar em tempo real possíveis vazamentos de amônia em sistemas de refrigeração industrial.

1.2 Motivação

A amônia possui uma alta toxicidade e torna-se explosiva em concentrações de 15 a 30% em volume, o que requer cuidados específicos na sua utilização. Dessa forma, em virtude de ser classificada como uma substância tóxica e, em concentrações mais elevadas, ocasionarem problemas respiratórios e visuais, queimaduras e até ser fatal a seres humanos, constatou-se uma possível aplicação para solucionar e evitar problemas provenientes de acidentes por escapamento do gás (ENGINEERING-TOMORROW, 2013a).

1.3 Objetivos do Trabalho

O objetivo central desse projeto é desenvolver um dispositivo de detecção de vazamento de gás amônia para sistemas de refrigeração industrial. Sendo assim, os objetivos específicos são:

- Estudar a influência do fluido refrigerante amônia no ambiente e no processo industrial, bem como, riscos e benefícios;
- Estudar os sensores de gases eletroquímicos;
- Projetar os circuitos eletrônicos com microcontroladores;
- Simular os circuitos eletrônicos no *Software Proteus* e/ou *DipTrace*;
- Pesquisar datasheets de microcontroladores;
- Revisar bibliografia de componentes e circuitos eletrônicos;
- Testar o sensor definido;
- Elaborar um protótipo para sensoriamento de gás;
- Desenvolver um software para aquisição e apresentação dos dados; e
- Calibrar com kit de calibração gás padrão de amônia.

1.4 Estado da Arte

No presente momento, podem ser encontrados vários estudos sobre detecção de amônia. Pesquisadores do departamento de Química da USP (CASTRO *et al.*, 2011) desenvolveram e avaliaram filmes para a captação e quantificação de vapores de amônia no ar, com a utilização de um sensor piezolétrico de quartzo. Apesar do sensor apresentar uma alta sensibilidade, resposta rápida e baixo custo de aparelhagem e reagentes, é necessário

após algumas captações do gás, realizar a troca dos filmes utilizados no sensor, devido a ocorrência de saturações. Além disso, esse sensor limita-se a captação apenas de vapores, não sendo aplicado em casos de vazamentos líquidos que torna inviável o seu uso no projeto.

Por outro lado, em busca de um método alternativo para identificação de amônia, o pesquisador (HASHIM, 2015), desenvolveu um material não-transparente conhecido como pellet de madeira (biocombustível) para detectar o NH_3 . O método utiliza-se de uma fibra de espectrofotômetro de refletância óptica que é um instrumento de análise, amplamente utilizado em laboratórios de pesquisa, capaz de medir e comparar a quantidade de luz (radiação eletromagnética) absorvida, transmitida ou refletida por uma determinada amostra, seja ela solução, sólido transparente ou sólido opaco. Assim, por meio desse método realiza-se o monitoramento de evento de transdução de sinal de refletância com a alteração da cor do pellet, de rosa para azul matiz, mediante reação com NH_3 no pH ótimo 13. Esse método apresentou uma boa aplicabilidade e resposta, entretanto, o alto custo para ser realizado, além de problemas diante da falta de informações, em relação a quantidade de concentração captada, inviabiliza a sua utilização no meio industrial para segurança.

Recentemente, em um outro projeto para identificar o NH_3 , (DONG J. X.; GAO, 2016) desenvolveram uma plataforma de sensores simples para detecção altamente seletiva e sensível de amônia dissolvido em soluções aquosas sem pré-tratamento baseado na técnica de micro extração (HS-SDME, do inglês *Headspace Single-Drop Microextraction*). O mecanismo de detecção baseia-se na volatilidade do gás amônia e a resposta ativa da prata nanoclusters (AgNCs) em relação a mudanças de pH causadas pela introdução de amônia. O PH elevado pode fazer a AgNCs aglomerar e originar a óbvia diminuição da intensidade de fluorescência e a absorvância da solução. A partir disso, o método obteve bons resultados nas aplicações, no entanto, por se tratar de um procedimento específico, em que a amônia necessita estar diluída em uma solução aquosa, esse método não poderá ser utilizado para promover segurança nas indústrias.

Além disso, (CARVALHO, 2016) desenvolveu uma tese de doutorado com abordagem em desenvolvimento de sistemas de detecção de gases na região do infravermelho. Com isso, elaborou novos métodos de detecção utilizando fibras ópticas através de simulações de passagem de sinais eletromagnéticos destas fibras e por observações de medições em laboratório com a finalidade para segurança industrial e ambiental, avaliação de riscos de explosões, e no controle de vazamentos, emissões e poluição atmosférica. Dessa forma, os métodos apresentaram respostas rápidas, uma sensibilidade alta e uma faixa grande de intervalos de PPM para detecção. Diante disso, esse seria o método mais indicado para esse projeto, porém, o custo elevadíssimo de aquisição, impossibilita a sua utilização.

Portanto, pelos estudos apresentados nesta seção, verificou-se a necessidade de desenvolver um projeto capaz de captar o gás de amônia de forma a obter respostas rápidas, com uma sensibilidade alta e possuir um custo acessível.

1.5 Organização do Documento

Esse trabalho está dividido em quatro capítulos. O capítulo em questão apresenta a definição do problema, a motivação, os objetivos do trabalho proposto, estado da arte e a organização deste documento. No segundo capítulo são descritos a metodologia e os principais conceitos teóricos necessários para a realização da presente proposta. O terceiro capítulo expõe o desenvolvimento do trabalho em termos de resultados alcançados. Por fim, o quarto capítulo apresenta as conclusões e as sugestões para a continuação do trabalho.

Fundamentos

No presente capítulo, a revisão de literatura, a metodologia e uma abordagem sobre o elemento químico NH_3 (amônia) e suas propriedades são apresentadas. Por seguinte, são mostradas as aplicações da amônia no processo industrial e quais os riscos e benefícios dessas aplicações. Além disso, são apresentados conceitos relacionados as especificações de sensores de forma geral. Na sequência, um estudo sobre o sensoriamento de gases e suas aplicações são apresentados. Por fim, os dispositivos eletrônicos e processamento de sinais, utilizados para aquisição e tratamento dos dados, são expostos.

2.1 Revisão de Literatura

A Amônia foi descoberta por Priestley em 1774. Priestley preparou gás-amônia, reagindo sal amoníaco com cal virgem, recolhendo gás formado sobre mercúrio. Berthollet, em 1784, decompôs o gás por meio de uma centelha elétrica, estabelecendo sua composição como sendo 3 (três) volumes de hidrogênio e 1 (um) volume de nitrogênio. Foi a primeira análise elementar da amônia que proporcionou o conhecimento da fórmula (FELIX; CARDOSO, 2004).

A primeira produção em escala industrial deu-se em 1913 na Alemanha, utilizando-se o processo Harber-Bosch. O processo de produção da amônia consiste essencialmente na reação entre o nitrogênio e o hidrogênio, sob elevada pressão e temperatura, na presença de catalisador. Antes do advento da indústria de amônia sintética, a principal fonte desse derivado nitrogenado era constituída pelos gases provenientes da operação de coqueificação do carvão. O nitrogênio utilizado na síntese da amônia é derivado do ar. Uma grande variedade de fontes, contudo, é usada para obter o nitrogênio exigido pelo processo (AFTALION, 2001).

Assim, a amônia é o refrigerante mais confiável desde o século 19. Todos aqueles que estão envolvidos na preservação dos alimentos e instalações de processos industriais conhecem e escolhem a amônia como refrigerante devido às suas propriedades termodinâmicas

incomparáveis (ENGINEERING-TOMORROW, 2013b). Entretanto, na década de 1920, ocorreram muitos acidentes fatais em função de vazamento em refrigeradores industriais. Devido aos grandes prejuízos e processos judiciais contra as indústrias de refrigeração, estas iniciaram um esforço conjunto para resolver o problema (SARTORI, 2009) .

Diante disso, o sensoriamento de gases nas indústrias de refrigeração vem sendo abordada em vários estudos desde seu surgimento, o que resultou nas aplicações em segurança e prevenção industrial. Nessa situação, para as instalações que utilizam amônia é necessário cuidados preventivos para evitar acidentes, devido à toxicidade e à inflamabilidade da amônia (ENGINEERING-TOMORROW, 2013a).

Dessa forma, dispositivos automáticos de detecção de vazamentos podem ser um investimento atraente. Sob o ponto de vista econômico, deve-se levar em consideração que o inventário de refrigerante pode ser perdido antes da detecção de um vazamento, uma vez que os refrigerantes halogenados são inodoros. Por outro lado, a perda significativa de refrigerante para um ambiente confinado pode elevar sua concentração a níveis perigosos para os colaboradores. No caso da amônia, o seu odor característico pode alertar aos operadores sobre a ocorrência de um escape do gás. Entretanto, como muitas instalações operam sem uma supervisão direta, o monitoramento de vazamento também se justifica (STOECKER W. F.; JABARDO, 1994).

Em 1952, de acordo com (BRATTAM; BARDEEN, 1953), os autores destacaram-se por desenvolver sensores constituídos de material semicondutor que são utilizados até os dias atuais, devido seu baixo custo de aquisição. Seu princípio de funcionamento consiste na variação da resistência elétrica do semicondutor com a quantidade de refrigerante absorvido, que depende da concentração no ambiente. O problema era a captação de uma variedade de gases, o que dificulta e atrapalha a precisão da detecção do vazamento exclusivamente de amônia (LINDBORG, 1982). Além disso, rapidamente verificou-se que existem muitos problemas com sensibilidade à pressão parcial de muitos gases, incluindo o vapor d'água (MORRISON, 1982).

Além de fatores econômicos, no Brasil, a utilização de dispositivos de detecção de vazamento de amônia é obrigatório por lei desde 2013, de acordo com a Norma Regulamentadora (NR36), que regula as condições de Segurança e Saúde do Trabalho nas indústrias de refrigeração (MTE, 2013).

2.2 Metodologia

Para desenvolver o módulo de detecção de vazamento de amônia, estudou-se primeiramente sobre o elemento químico NH_3 (amônia), suas propriedades, aplicações no processo industrial e quais os riscos e benefícios que estão sujeitos. Em seguida, analisou-se quatro

tipos de sensores de gases (Catalítico, Semicondutor, Infravermelho e Eletroquímico), verificando seus princípios de funcionamentos e características para melhor implementação no projeto.

Além disso, na implementação do projeto, necessitou-se de uma revisão bibliográfica a respeito de componentes eletrônicos, circuitos e microcontroladores. Posteriormente, iniciou-se as implementações, que envolveram grande atuação de microcontroladores e programação. Após a decisão de qual sensor e componentes eletrônicos que seriam utilizados no protótipo, desenvolveu-se um projeto eletrônico no *Software Proteus* e *DipTrace*. Desse modo, realizou-se todos os testes do projeto, certificando o funcionamento correto para ser implementado.

Desse modo, com a garantia das simulações realizadas de que o projeto eletrônico poderia ser implementado, inicializou-se a montagem do módulo de identificação de vazamento de amônia. Na composição do *hardware* utilizou-se três placas modulares, sendo: Módulo sensor de gás responsável pela captação do gás reagente, o módulo de comunicação sem fio para transmitir as informações e o módulo principal com microcontrolador responsável por processar as informações do sistema de detecção.

Além disso, ao mesmo tempo desenvolveu-se um *software* para analisar os dados recebidos e apresentar as informações com alarme pré-definido em 20PPM. Na programação do *software* utilizou-se tecnologias *web* (*HTML5*, *CSS* e *JavaScript*) para uma interface simples e intuitiva. Ele recebe as informações dos sensores, transmitido por módulo wireless e mostra os níveis detectados, além de guardar tais informações em banco de dados para processamento futuro. Após finalizada a montagem do protótipo e do desenvolvimento do *software*, realizou-se a calibração e testes. A parte de testes e calibrações é fundamental para fornecer confiabilidade e precisão na detecção de vazamentos de amônia, como proposto desde o início. Para a calibração do dispositivo utilizou-se um kit de calibração de gás padrão. Após calibrado finalizou-se com os testes finais.

Para a calibração e testes, necessitou-se da utilização do laboratório de química do CEFET-MG *Unidade* Divinópolis e de equipamentos de proteção individual. Assim, para os testes e calibração, utilizou-se a capela de exaustão de gases, que é um equipamento utilizado para realizar trabalhos em materiais, no qual produzem vapores tóxicos e nocivos a saúde. Diante da situação do gás de amônia ser menos denso que o ar e de ser considerado um gás ecologicamente correto por não agredir a camada de ozônio, a eliminação do gás pelo exaustor da capela, não afetará o ambiente, permitindo assim, liberar uma quantidade de gás amônia conhecida dentro da capela para validação dos testes com segurança e entrega do projeto.

2.3 Amônia

A amônia é um gás incolor a temperatura ambiente, que possui um odor extremamente forte e é consideravelmente mais leve que o ar (densidade relativa ao ar, 0,5963). Além disso, é um composto químico relativamente abundante tanto no meio ambiente terrestre quanto em objetos no meio interestelar (FELIX; CARDOSO, 2004). Devido às suas diversas propriedades, a amônia apresenta vasta aplicação, evitando assim os usuais compostos orgânicos clorofluorcarbonos (CFC) (STUERCHLER, 2002). Embora a amônia contribua significativamente no meio industrial, em geral, o gás propriamente dito é cáustico e pode causar danos sérios à saúde. Para humanos, em particular, a exposição a concentrações muito elevadas de amônia gasosa pode causar danos sérios nos pulmões ou ser letal (RODRIGUEZ, 2016).

2.3.1 Estrutura da Molécula de NH₃

A molécula de amônia tem uma forma de pirâmide trigonal, como previsto pela teoria VSEPR. O átomo de nitrogênio tem cinco elétrons de valência e, na amônia, está ligado por covalência a três átomos de hidrogênio para completar as oito posições eletrônicas na camada externa (RODRIGUEZ, 2016). Isso deveria resultar numa geometria tetraédrica regular com ângulos de ligação de aproximadamente 109,5°. Porém, os três átomos de H são repelidos pelo par de elétrons isolado do nitrogênio, modificando a geometria da molécula para uma forma piramidal de base triangular: o ângulo das ligações passa a ser de 107,8°, com o átomo de nitrogênio no ápice e os de H nos vértices da base, como pode ser visto na Figura 2.1.

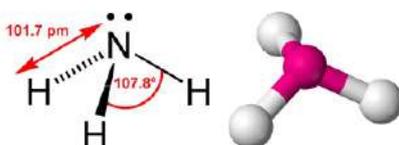


Figura 2.1: Estrutura de uma molécula de amônia. Adaptado de (RODRIGUEZ, 2016)

Como os três átomos dos vértices da base são idênticos, a molécula pertence ao grupo pontual C_{3v}. Essa configuração faz com que a molécula tenha momento dipolo e afinidade por prótons devido ao par de elétrons isolado.

Tabela 2.1: Proporções em Unidades de Massa Atômica

Amônia (NH ₃)			
Átomo	Quantidade	Massa Atômica	Massa Total
Nitrogênio	1	14,0067	14,0067
Hidrogênio	3	1,00794	3,02382

A partir da fórmula química NH_3 , observa-se na Tabela 2.1 as proporções em unidades de massa atômica que totalizam uma massa molecular de 17,0306 g/mol.

2.3.2 Propriedades da Amônia

Além da amônia ser incolor com densidade em torno de 0,589 vezes menor que o ar, ela é facilmente liquefeita devido às fortes ligações de hidrogênio entre as moléculas. Portanto, no estado líquido e a pressão atmosférica a amônia ferve a $-33,3^\circ\text{C}$ e se solidifica a $-77,7^\circ\text{C}$ e, assim, assumindo a forma de um cristal branco. Outro fator importante é que esse gás na forma líquida tem uma entalpia padrão de vaporização de 23.35 kJ/mol, . Note que quando comparado esse valor de entalpia de padrão de vaporização com outros elementos, como: Água 40.65 kJ/mol, metano 8.19 kJ/mol, fosfina 14.6 kJ/mol, percebe-se o quanto a mesma é elevada (BARROS, 1992). Algumas propriedades da amônia estão apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades da Amônia

Propriedades Gerais	Formula Molecular	NH_3
	Massa Molecular	17,0306 g/mol
	Aparência	Gás incolor com forte odor
	Densidade e Fase	0,6942 g/l, como gás.
	Solubilidade em água	89,9 g/100 ml em 0°C .
	Ponto de Fusão	$-77,73^\circ\text{C}$ (195,42 K)
	Ponto de Ebulição	$-33,34^\circ\text{C}$ (239,81 K)
	Acidez (pKa)	9,25
	Basicidade (pKb)	4,75
Estrutura	Grupo Pontual	C_{3v}
	Momento Dipolo	1,42 D
	Ângulo de Ligação	$107,8^\circ$

2.3.3 Aplicações da Amônia

A Amônia é um produto muito versátil e possui uma grande quantidade de aplicações, das quais as mais importantes estão apresentadas a seguir (VERANI, 1998):

- Agente refrigerante (R-717), em unidades de refrigeração industrial;
- Preparação de fertilizantes como nitrato de amônia, sais de amônia e ureia;
- Fertilizantes contendo superfosfato e nitrogerantes que são soluções de amônia e nitrato de amônia;
- Na indústria petroquímica, a amônia anidra é utilizada para neutralização de ácidos constituintes de óleo cru para proteger da corrosão equipamentos tais como:

borbulhadores, pratos de torres de destilação, trocadores de calor, condensadores e tanques de armazenamento;

- Fonte de nitrogênio na fabricação de explosivos tanto industriais como militares; e
- Utilizada na preparação de misturas padrão para calibração e ajuste de instrumentos de medição para controle ambiental.

2.3.4 Efeitos Sobre o Homem e Toxicidade

Em ambientes fechados, o maior problema da amônia para o homem é causado pelo vazamento nos sistemas de refrigeração (STERN, 1976). Por se tratar de um gás tóxico e corrosivo na presença de umidade, agindo principalmente ao sistema respiratório, exercendo uma ação corrosiva e causando grande irritação, pode representar perigos aos trabalhadores do local. Sua inalação causa tosse, dificuldades respiratórias, inflamação aguda do sistema respiratório, edema pulmonar, formação de catarro, secreção de saliva e retenção de urina. Sua presença no ar causa irritação nos olhos imediatamente. No Brasil, o anexo número 11 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2014) determina que no ambiente de trabalho a concentração máxima para uma exposição semanal de até 48 horas é de 20 PPM e na caracterização desta situação o ambiente é considerado medianamente insalubre.

A inalação de amônia em altas concentrações produz um acesso de tosse violento devido à sua ação nas vias respiratórias. Se não for possível escapar rapidamente do local, a vítima sofrerá forte irritação dos pulmões, edema pulmonar e podendo até chegar a falecer. Caso amônia líquida seja engolida, ela causará uma corrosão severa da boca, garganta e estômago. A exposição as altas concentrações do gás pode causar queimadura nos olhos e cegueira temporária. O contato direto dos olhos com amônia líquida causará queimaduras muito sérias nos olhos. O contato da amônia com a pele, dependendo da intensidade, poderá causar irritação ou queimaduras.

Entretanto, um fato positivo a ser mencionado, é que a amônia mesmo em concentrações na faixa de dezenas de ppm, produz um odor extremamente desagradável, facilitando sua detecção (STERN, 1976). Como é comum a perda da sensibilidade específica do olfato após algum tempo de permanência em ambiente contaminado por amônia, torna-se indispensável, além de uma boa ventilação nesses locais, sistemas de detecção química fáceis de operar, de baixo custo e resposta rápida, que permitam avaliar os níveis deste gás em uma ampla faixa de concentrações.

2.3.5 Efeitos Ambientais

Pelo fato da amônia ser altamente volátil, quando liberado no ar, a tendência é de formar o elemento hidróxido de amônia (NH_4OH), ocasionando um comportamento de dissipação rápida da nuvem gasosa. Além disso, as plantas têm uma afinidade elevada com a amônia gasosa, que podem adversamente ser afetadas ou destruídas. Outro fator de risco é devido à natureza corrosiva da amônia, em que animais expostos a esse gás poderão sofrer danos teciduais e ser levados a morte, dependendo da concentração ambiental (BOLAJI B.O.; HUAN, 2013). Por fim, a amônia é muito solúvel em água e mesmo em concentrações baixas se torna prejudicial à vida aquática, podendo contaminar principalmente lençóis freáticos.

2.3.6 Fluido Refrigerante R-717

Conforme a norma 34 da (ANSI/ASHRAE, 34-2013), os fluidos refrigerantes inorgânicos são classificados, somando ao número 700, a massa molecular do composto, antecedendo o mesmo da letra R, de *refrigerant*. Para a amônia, cuja fórmula molecular é NH_3 , o nitrogênio (N) possui massa molecular $M=14$ g/mol e o hidrogênio (H), massa molecular $M=1$ g/mol, de modo que:

$$700 + 14 + (3 \times 1) = 717 \quad (2.1)$$

O R-717 anidro é o líquido obtido do gás amônia puro (99,95%), tecnicamente sem umidade e não é corrosivo, porém na presença de água, forma o hidróxido de amônia (NH_4OH), líquido nas CNTP, que possui as mesmas propriedades químicas da soda cáustica, atacando o cobre, zinco, prata e suas ligas, causando corrosão (RAHN, 2006).

O R-717 é um dos mais eficientes fluidos refrigerantes, dentro de suas características de aplicação, possuindo uma grande capacidade de efeito frigorífico, visto seu elevado calor de vaporização, muito embora os vapores desse fluido possuam um grande volume específico. Outra vantagem do R-717 em relação aos fluidos adotados atualmente, é seu grande apelo ecológico, visto que sua formulação química não provoca reações, quando liberada na atmosfera, que possam agredir o meio ambiente, sem contribuição direta para a destruição da camada de ozônio ou o aquecimento do globo terrestre (efeito estufa) (SILVA, 2011). Na Tabela 2.3 são listadas as principais propriedades físicas e termodinâmicas do fluido refrigerante R-717 .

Tabela 2.3: Principais propriedades do R-717

Fluido Refrigerante R-717	
Propriedade	Valor
Massa molecular (g/mol)	17,03
Constante geral dos gases (J/kg.K)	49,8
Calor específico à pressão constante (J/kg.K)	7,978
Calor específico à volume constante (J/kg.K)	6,081
Coefficiente isentrópico	1,312
Pressão crítica (kPa)	11.297,30
Temperatura crítica (K)	405,55

2.4 Especificações de Sensores

A maioria dos sensores consiste em transdutores que convertem uma forma de energia (correspondente à grandeza que vai ser medida) num sinal elétrico (SEICA, 2011). Para poder trabalhar convenientemente com os sinais elétricos obtidos de um sensor, deve-se entender o significado de todas as características que envolvem a operação do sensor. A seguir, são abordadas as principais operações de sensores, com uma pequena análise de seus significados.

2.4.1 Sensibilidade

A sensibilidade de um transdutor indica qual deve ser a variação menor da intensidade da grandeza medida que o sensor pode detectar, ou seja, a menor variação da grandeza medida que cause uma alteração sensível do sinal elétrico de saída. Este sinal pode ser uma tensão, uma corrente, uma resistência ou ainda uma frequência (BEGA, 2006).

Na prática, os sensores não apresentam a mesma sensibilidade em toda a faixa de grandezas que podem medir. Por exemplo, um sensor pode ser mais sensível numa faixa central de valores que mede e menos sensível nas faixas extremas. Essa característica pode ser mostrada num gráfico como o dado na Figura 2.2.

2.4.2 Faixa de Grandezas

A faixa ou, segundo (BEGA, 2006), “intervalo de medição” (em inglês *range*) diz respeito aos valores máximo e mínimo do parâmetro de entrada que podem ser medidos, por exemplo, um sensor de gás pode ser indicado para uma faixa de 0 PPM a 100 PPM. Não existe a necessidade da faixa incluir valores negativos e positivos, ser simétrica, ou englobar o zero. De qualquer forma a faixa é sempre informada como um intervalo de valores. Em instrumentos completos, onde a saída já é calibrada, a faixa é estipulada com relação a saída. Com relação a sensores e transdutores normalmente o interesse é a grandeza que se deseja medir, ou seja, a entrada.

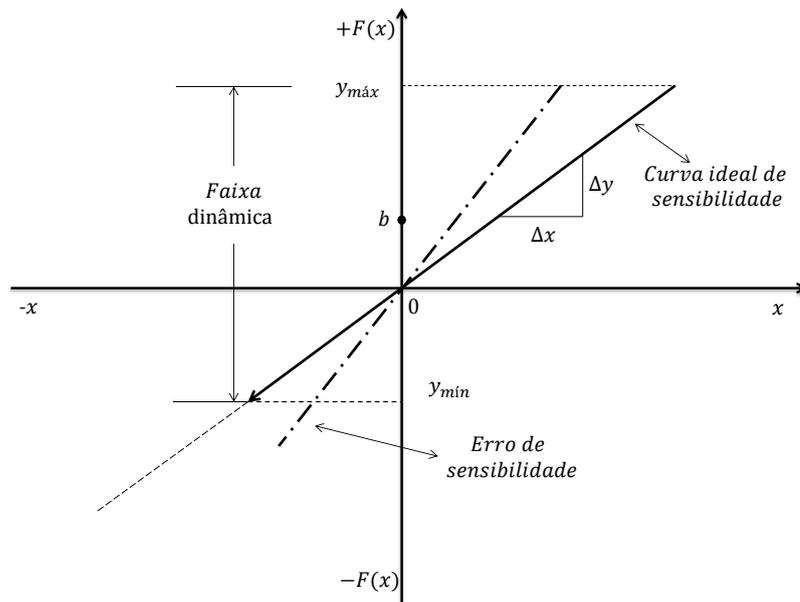


Figura 2.2: Desvio da sensibilidade ao longo da faixa de operação de um sensor. Adaptado de (BRAGA, 2014a)

2.4.3 Precisão

O conceito de precisão refere-se ao grau de concordância de uma medição realizada diversas vezes em condições de repetibilidade (mesmo procedimento, operadores, sistema de medição, condições de operação e local onde são realizadas medidas repetidas de um objeto num curto espaço de tempo) ou reprodutibilidade (diferentes procedimentos, operadores, sistema de medição, condições de operação e local onde são realizadas medidas repetidas do mesmo objeto). A precisão é uma medida de dispersão e geralmente é expressa como um desvio padrão, variância ou coeficiente de variação, além de ser ligada a um erro aleatório (BEGA, 2006).

2.4.4 Linearidade

Muitos sensores devem fornecer um sinal de saída que seja diretamente proporcional à grandeza que está sendo medida. Uma consideração frequentemente feita é a de supor que o sistema sendo modelado comporta-se de forma aproximadamente linear. Tal suposição é normalmente verificada observando-se o comportamento de um sistema numa faixa relativamente estreita de operação.

Formalmente, diz-se que um sistema é linear se ele satisfaz o princípio da superposição. Para entender esse princípio, considere um sistema que ao ser excitado pela entrada $u_1(t)$ produz a saída $y_1(t)$ e quando excitado por $u_2(t)$ produz $y_2(t)$. Se tal sistema satisfizer o princípio da superposição então, quando excitado por $au_1(t) + bu_2(t)$, sua saída será

$ay_1(t) + by_2(t)$, sendo a e b constantes possivelmente complexas. Informalmente, pode-se dizer que um sistema linear tem o mesmo tipo de comportamento, independente do ponto de operação (AGUIRRE, 2007).

A Figura 2.3 exemplifica o que ocorre, mostrado com certo exagero, pois as variações para os sensores normais são bem menores. A linearidade pode ser expressa na forma de uma porcentagem do valor observado no ponto em que o desvio ou erro é máximo, como pode ser visto na Figura 2.3.

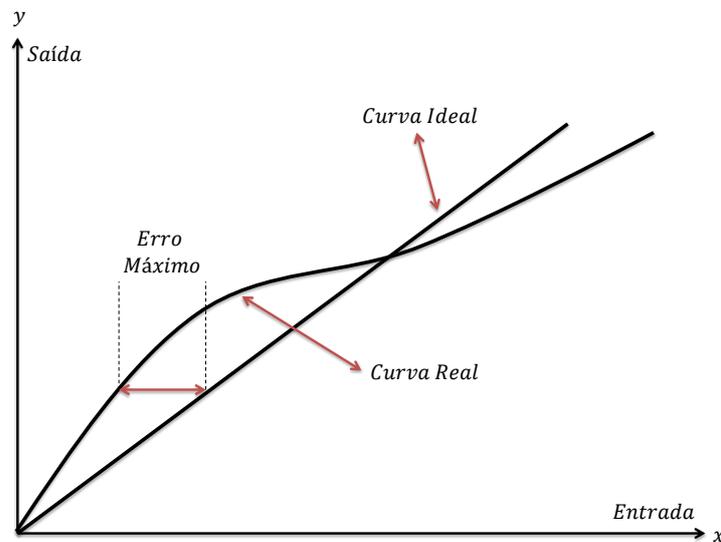


Figura 2.3: Diferença de linearidade entre um sensor ideal e um sensor real. Adaptado de (BRAGA, 2014a)

2.4.5 Tempos de Resposta

Quando uma grandeza varia, os sensores não mudam o estado de sua saída de modo imediato. Dessa forma, demora algum tempo para que o sensor alcance 100% da variação que deve apresentar. Assim, define-se T como a constante de tempo da resposta e descreve-se a constante de tempo como o tempo necessário para que a resposta alcance 63,2 % do valor final.

$$c(t) = 1 - e^{-t/T}, \text{ para } t \geq 0 \quad (2.2)$$

Inicialmente, a resposta $c(t)$ é zero e, no fim, torna-se unitária. Uma característica importante de uma curva de resposta exponencial $c(t)$ é que em $t = T$ o valor de $c(t)$ é 0,632 ou a resposta $c(t)$ alcançou 63,2% de sua variação total. Isso pode ser facilmente comprovado substituindo-se $t = T$ na Equação 2.2. Ou seja,

$$c(T) = 1 - e^{-1} = 0,632 \quad (2.3)$$

Note que, quanto menor a constante de tempo T , mais rapidamente o sistema responde. Outra característica importante da curva exponencial de resposta é que a inclinação da linha tangente em $t = 0$ é $1/T$, uma vez que,

$$\frac{dc}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} e^{-1/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

A saída alcançaria o valor final em $t = T$ se fosse mantida a velocidade inicial de resposta. A partir da Equação 2.4, verifica-se que a inclinação da curva de resposta $c(t)$ decresce monotonicamente de $1/T$ em $t = 0$ e a zero em $t = \infty$.

A curva exponencial de resposta $c(t)$ apresentada pela Equação 2.2 é mostrada na Figura 2.4. Em uma constante de tempo, a curva da resposta exponencial vai de 0% a 63,2% do valor final. Em duas constantes de tempo, a resposta atinge 86,5% da resposta final. Para $t = 3T$, $t = 4T$ e $t = 5T$, a resposta alcança 95%, 98,2% e 99,3%, respectivamente, da resposta final. Assim, para $t \geq 4T$, a resposta se mantém a 2% do valor final. Como se vê na Equação 2.2, o estado permanente é alcançado matematicamente apenas dois de um tempo infinito. Na prática, entretanto, é razoável que o tempo estimado de resposta seja o intervalo de tempo necessário para a curva alcançar e permanecer a 2% da linha do valor final, ou quatro constantes de tempo (OGATA, 2010).

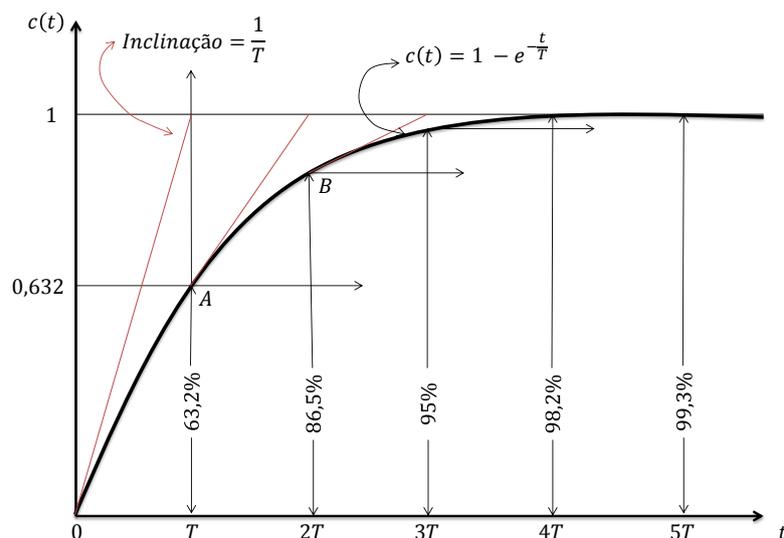


Figura 2.4: Curva exponencial de resposta. Adaptado de (OGATA, 2010).

2.4.6 Calibração

De acordo com (INMETRO, 1995), a calibração consiste em apresentar ao instrumento diferentes valores das grandezas desejadas mantendo constante as entradas modificadoras e as interferências. A relação entre as entradas e saídas é chamada de calibração estática. Este procedimento pode ser repetido várias vezes para cada entrada desejada. A calibração então, pode ser apresentada como uma curva, uma equação ou uma tabela ou ainda como uma família delas.

2.5 Sensores de Gás - Princípios e Tecnologias

Os processos industriais podem envolver o uso e fabricação de substâncias altamente perigosas, especialmente produtos inflamáveis, tóxicos e oxidantes. É comum que gases façam parte desses ambientes como participantes de reações, catalisadores ou produtos finais. Outras vezes são resíduos ou subprodutos indesejáveis. Escapes ocasionais de gás ocorrem, e criam um perigo potencial para a planta industrial, seus funcionários e pessoas que vivem nas proximidades (BJORN T.; WOUTER, 2005). Incidentes e acidentes em todo o mundo, envolvendo asfixia, intoxicação, explosões e perdas de vidas é um lembrete constante desse problema (MACHADO, 2011).

Na maioria das indústrias, uma das peças-chave de qualquer plano de segurança para reduzir os riscos para o pessoal e instalações é o uso de dispositivos de alerta precoce, tais como detectores ou sensores de gás. Isso pode ajudar a proporcionar mais tempo para se tomar uma ação corretiva ou de proteção. Os sensores de gases também podem ser usados como parte das medidas de controle que integram o sistema de segurança de uma planta industrial. Dessa forma, os detectores, têm um papel vital na segurança de instalações e prevenção dos riscos de acidentes (MSA, 2007).

2.5.1 Funcionamento de Sensores de Gases

Existem diversos tipos de sensores de gases, muitos dos quais especialmente indicados para a detecção de gases tóxicos. Esses sensores seletivos são de fundamental importância para garantir a segurança num ambiente em que possam ocorrer vazamentos ou escapes (BRAGA, 2014b). A finalidade de um sensor de gás tóxico ou de outros tipos de gases é fornecer em sua saída um sinal elétrico proporcional à concentração do gás ou ainda um sinal único quando a concentração atinge um certo valor, conforme mostra a Figura 2.5.

2.5.2 Sensor Catalítico

Quase todos os sensores de detecção modernos e de baixo custo para gás combustível são do tipo eletro-catalítico. Eles consistem de um elemento muito pequeno chamado

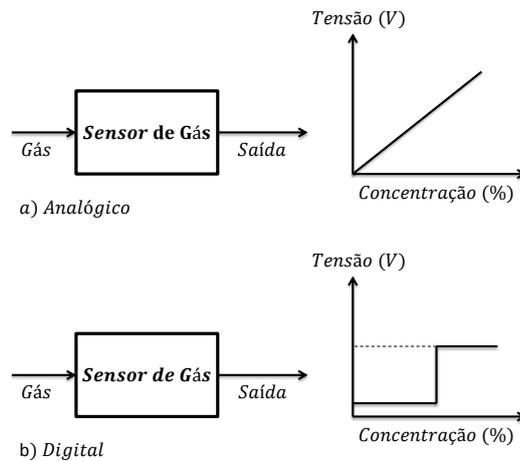


Figura 2.5: a) Sinal elétrico proporcional à concentração do gás b) Sinal único quando a concentração atinge um certo valor. Adaptado de (BRAGA, 2014b).

de “pérola”. Eles são feitos de uma bobina de fio de platina aquecido eletricamente, coberto primeiro com uma base de cerâmica, tais como alumina e, em seguida, com um revestimento final exterior do catalisador de paládio ou ródio disperso em um substrato de tório (MACHADO, 2011).

Quando um gás combustível se combina ao ar sobre a superfície do elemento catalítico quente, ocorre a combustão e o calor desenvolvido aumenta a temperatura da “pérola”. Por sua vez, altera a resistência da bobina de platina que pode ser medida usando a bobina como um termômetro de temperatura em um circuito de ponte elétrica padrão.

A alteração, ou diferencial de resistência normal quando o ar está limpo e isento de gás, até o instante em que houve a combustão resulta em um delta que está diretamente relacionado com a concentração do gás na atmosfera circundante. Esse sinal é tratado para que um dispositivo digital possa interpretá-lo, ou esse sinal é amplificado para que um conversor A/D (analógico/digital) leia esse sinal, interprete-o e represente-o adequadamente ao usuário através de microprocessadores *displays* (ANALYTICS, 2013). Na Figura 2.6 pode-se observar o esquemático de funcionamento do sensor catalítico.

2.5.3 Sensor Semicondutor

Sensores feitos de materiais semicondutores ganharam popularidade durante o final de 1980 uma vez que pareceu oferecer a possibilidade de um detector universal de gás, de baixo custo (MACHADO, 2011). Da mesma forma como os sensores catalíticos, os sensores semicondutores operam em virtude da absorção de gás na superfície de um óxido aquecido. Na verdade, este é um filme de óxido de metal (geralmente óxidos de metais de

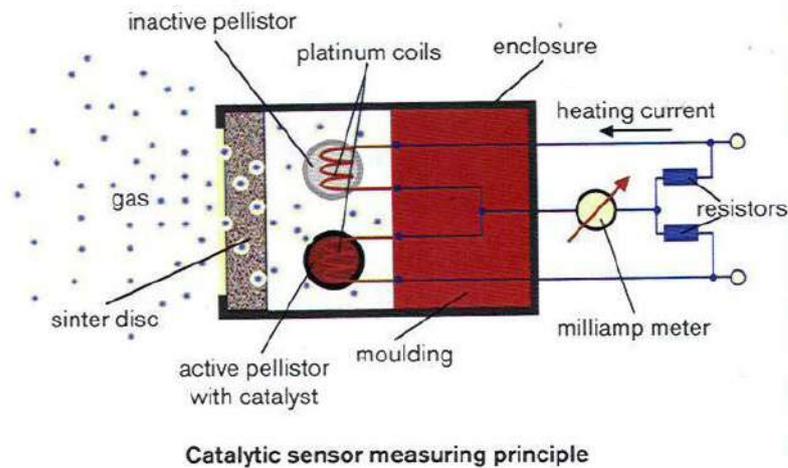


Figura 2.6: Esquemático de funcionamento do sensor catalítico. Adaptado de (JESSEL, 2002).

transição ou metais pesados, tais como estanho) depositado sobre uma fatia de silício. A absorção da amostra de gás na superfície do óxido, seguido por oxidação catalítica, resulta em uma mudança da resistência elétrica do material óxido e pode ser relacionado com a concentração de gás da amostra. A superfície do sensor é aquecida a uma temperatura constante de cerca de 200-250 °C, para acelerar a taxa de reação e reduzir os efeitos das mudanças de temperatura ambiente (WEIMAR, 2007).

Sensores de semicondutor são simples, bastante robusto e podem ter excelente resposta a concentrações baixíssimas. Eles têm sido usados com algum sucesso na detecção de gás sulfídrico, e eles também são amplamente utilizados na fabricação de baixo custo detectores de gás doméstico. No entanto, eles foram considerados pouco viáveis para aplicações industriais, já que são pouco seletivos para um determinado gás e eles podem ser afetados pela temperatura atmosférica e as variações de umidade. O esquemático pode ser visto na Figura 2.7.

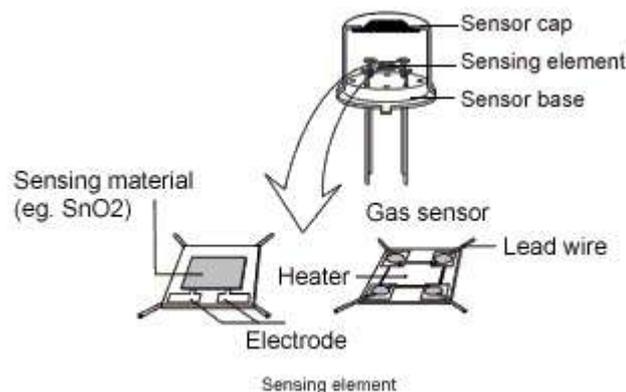


Figura 2.7: Esquemático do sensor semicondutor. Adaptado de (HUSSAIN, 2016).

Esse tipo de sensor precisa de checagem e calibração com mais frequência do que outros tipos de sensores, e são conhecidos por perder a sensibilidade quando ficam desligados. Quando desligados, esses sensores acumulam impurezas sobre sua pastilha semicondutora que contém o elemento detector de gás. O elemento sensor semicondutor, quando ligado, possuem um aquecedor (*heater*) responsável por ajudar a evaporar as impurezas que ficaram depositadas sobre a estrutura sensível ao gás. Esse tipo de sensor pode ser extremamente sensível e rápido na detecção de um determinado gás fazendo dele um excelente detector. De modo geral, a recuperação após a exposição ao gás é rápida, mas de difícil repetibilidade (MSA, 2007).

2.5.4 Sensor Infravermelho (IR)

Muitos gases combustíveis têm bandas de absorção na região do infravermelho (IR) do espectro eletromagnético da luz e do princípio da absorção no infravermelho tem sido utilizada como uma ferramenta de análise de laboratório por muitos anos. Esses sensores possuem uma série de vantagens importantes sobre o tipo de catalítico. Eles incluem uma velocidade muito rápida de resposta (normalmente menos de 10 segundos), baixa manutenção e controle muito simplificado, utilizando o recurso de auto-verificação de equipamentos de controle micro-processado moderno. Eles são à prova de falhas e eles vão operar com sucesso em atmosferas inertes, e sob uma ampla gama de ambientes de pressão, temperatura, interferência eletromagnética e umidade (ANALYTICS, 2013).

A técnica funciona com o princípio da absorção de dois comprimentos de onda infravermelho, onde a luz passa através da mistura da amostra em dois comprimentos de onda, um dos quais é definido no pico de absorção do gás a ser detectado, enquanto o outro não é. As duas fontes de luz pulsada, alternativamente são guiadas por um caminho óptico comum e, em seguida, através da amostra de gás. Os feixes são posteriormente refletidos de volta por um refletor, retornando mais uma vez através da amostra e dentro da unidade. Aqui, um detector compara a intensidade do sinal da amostra e feixes de referência e, por subtração, pode dar uma medida da concentração de gases (MACHADO, 2011). O esquemático do funcionamento está representado na Figura 2.8

2.5.5 Sensor Eletroquímico

Sensores eletroquímicos são compactos, exigem pouca energia, exibem excelente linearidade e repetibilidade e, geralmente, têm uma vida útil longa, tipicamente 1-3 anos. Baseiam-se em reações espontâneas de oxidação e redução, que envolvem um determinado gás para medição de sua concentração. Estas reações geram a circulação de uma corrente entre os eletrodos, a qual é proporcional a concentração do gás que se deseja mensurar (BRAGA, 2014b).

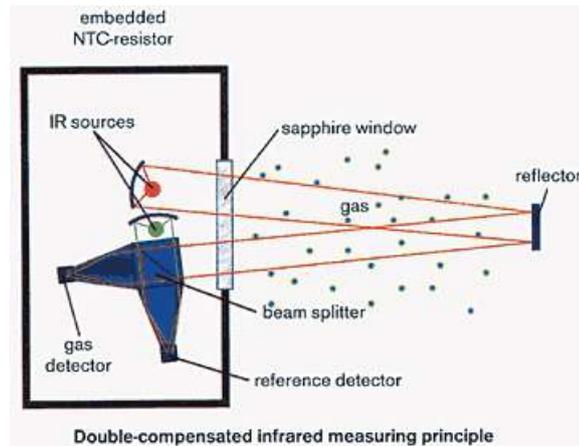


Figura 2.8: Esquemático de funcionamento do sensor infravermelho. Adaptado de (JESSEL, 2002).

As células eletroquímicas são construídas de forma similar a uma bateria, sendo a principal diferença a presença de uma membrana semipermeável de separação das fases líquida (eletrólito) e gasosa (amostra de ar a ser medida). Esta membrana permite a difusão das moléculas gasosas através do eletrólito, evitando ao mesmo tempo a evaporação do eletrólito. Dessa forma, a resposta elétrica é linear com a concentração dos gases e a geração dos sinais é similar a de uma bateria. Para os sensores de concentrações baixas é necessária a amplificação adequada do sinal, pois em alguns casos a geração de corrente pode ser muito baixa (próximo de $0,1 \mu\text{A}/\text{PPM}$ de gás). Além disso, os tempos de resposta, denominado T_{90} , isto é o tempo para atingir 90% da resposta final, são tipicamente de 30-60 segundos e intervalo mínimo de detecção dos limites de 0,02 a 50 PPM, dependendo do tipo de gás alvo (STRADIOTTO; YAMANAKA; ZANONI, 2003).

A maior aplicação destes sensores está voltada para análise de combustão Industrial e emissões ambientais. A vida do sensor eletroquímico é tipicamente garantida por dois anos, mas na prática é comum que esses valores sejam superiores. As exceções são a amônia, oxigênio e hidrogênio sensores de cianeto, onde os componentes da célula são necessariamente consumidos como parte do mecanismo da reação de sensoriamento (ANALYTICS, 2013).

2.6 Microcontroladores

Os microcontroladores são dispositivos amplamente utilizados em circuitos eletrônicos. Por serem dispositivos programáveis, seu uso não se limita a aplicações específicas, podendo ser empregados em praticamente qualquer circuito que demande algum grau de processamento de informações. Seu uso simplifica os projetos eletrônicos, pois reduz significativamente a quantidade de componentes necessários, uma vez que toda a lógica é

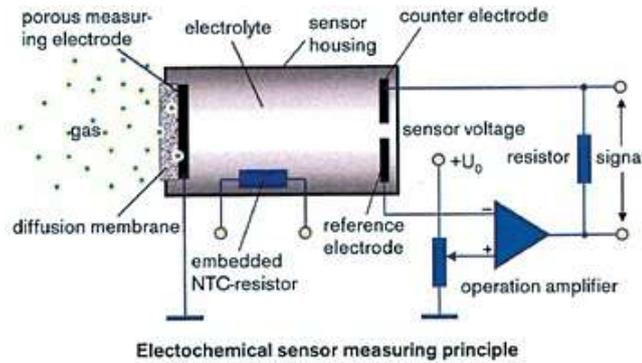


Figura 2.9: Esquemático de funcionamento do sensor eletroquímico. Adaptado de (JESSEL, 2002).

realizada via programação (SOUSA D. R. DE; SOUZA, 2010). Atualmente, os microcontroladores estão integrando uma série de periféricos com o objetivo de centralizar nele a maior parte das funções dos circuitos, tornando-os ainda muito mais versáteis.

Os microcontroladores são constituídos basicamente por uma unidade central de processamento (CPU), a qual executa instruções lógicas e aritméticas; as memórias semicondutoras, que armazenam o programa a ser executado e os registradores de uso geral e específico; e dispositivos de I/O, que realizam a interface com o circuito eletrônico externo e adicionam funcionalidades ao microcontrolador (ROCHA, 2012).

2.6.1 Amplificador operacional

Segundo (BOYLESTAD R. L.; NASHELSKY, 2004), “um amplificador operacional, ou *ampop*, é um amplificador diferencial de ganho muito alto com impedância de entrada muito elevada e impedância de saída baixa”. Dessa forma, é composto por um terminal inversor (-), um terminal não inversor (+) e terminal de saída (V_0). Basicamente, este componente amplifica a diferença de potencial existente entre os terminais inversor e não inversor por um ganho determinado por um circuito externo. Se o sinal for aplicado em sua entrada não inversora o sinal de saída terá a mesma polaridade do sinal de entrada. Caso o sinal seja aplicado em sua entrada inversora, o sinal de saída terá uma polaridade inversa em relação ao sinal de entrada.

Existem diversas configurações e circuito que utilizam as propriedades do amplificador operacional. Entretanto, para este projeto será abordado apenas o circuito básico do amplificador operacional, que é o multiplicador com ganho constante. Este pode se apresentar como amplificador inversor e amplificador não inversor. Segue na Figura 2.10 o circuito do amplificador inversor.

Nesta configuração, o sinal (V_1) é aplicado na entrada inversora, sendo então amplificado por um ganho equivalente a razão entre os resistores R_f e R_1 . O sinal amplificado é

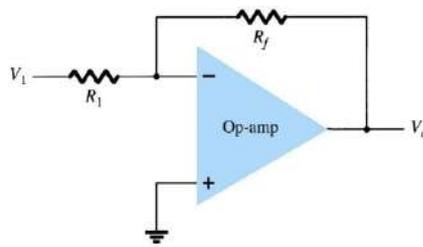


Figura 2.10: Amplificador inversor. Adaptado de (BOYLESTAD R. L.; NASHELSKY, 2004).

enviado para a saída V_0 com sua polaridade invertida. O valor de V_0 pode ser calculado pela Equação 2.5.

$$V_0 = -\frac{R_f}{R_1}V_1 \quad (2.5)$$

Já no amplificador não inversor, o sinal (V_1) é aplicado na entrada não inversora, sendo então amplificado por um ganho equivalente a razão entre os resistores R_f e R_1 acrescida de uma unidade. O sinal amplificado é enviado para a saída V_0 com a mesma polaridade do sinal de entrada. Segue na Figura 2.11 o circuito do amplificador não inversor.

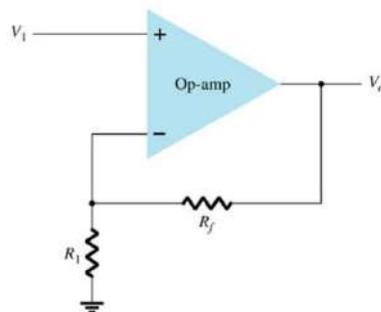


Figura 2.11: Amplificador não inversor. Adaptado de (BOYLESTAD R. L.; NASHELSKY, 2004).

O valor de V_0 pode ser calculado pela Equação 2.6.

$$V_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)V_1 \quad (2.6)$$

Além disso, os amplificadores podem ser utilizados para implementar função de operador, como o processo de integração (soma infinitesimal) dos sinais decorrentes da variação do sinal de entrada conforme sua variação no intervalo de tempo analisado. A integração é uma das operações fundamentais do cálculo, o inverso da diferenciação ou derivação.

Integradores podem ser construídos através de diversos tipos de circuitos, mas a forma mais comum é constituída de um amplificador operacional com realimentação negativa

através de um capacitor. Uma tensão é aplicada, através de um resistor, na entrada inversora deste amplificador operacional e a entrada não inversora é aterrada. A corrente fornecida pela fonte é transmitida ao capacitor que, por sua vez, se carrega.

2.7 Processamento de Sinais

”Os sinais, de uma forma ou de outra, constituem um ingrediente básico de nossa vida diária”(HAYKIN S.; VEEN, 2001). Sua definição formal diz que é uma função de uma ou mais variáveis, a qual veicula informações sobre a natureza de um fenômeno. Denomina-se sinal unidimensional quando depende de uma única variável, e multidimensional, quando a função depende de duas ou mais variáveis (HAYKIN S.; VEEN, 2001).

2.7.1 Amostragem

A amostragem (instantânea) de um sinal ou forma de onda analógica é o processo pelo qual o sinal passa a ser representado por um conjunto discreto de números. Esses números, ou amostras, são iguais ao valor do sinal em instantes bem determinados (os instantes de amostragem). As amostras devem ser obtidas de maneira a que seja possível reconstituir o sinal com exatidão. Ou seja, a forma de onda original, definida em tempo ”*contínuo*”, passa a ser representada em tempo ”*discreto*” por amostras obtidas em instantes de amostragem espaçados convenientemente (LATHI, 2007). O princípio de amostragem está ilustrado na Figura 2.12.

Diante disso, o intervalo de tempo entre amostras denomina-se intervalo de amostragem, T_s . Assim, o seu inverso é a frequência de amostragem, $f_s = 1/T_s$ amostras por segundo. Dessa forma, o teorema da amostragem, demonstrado por Nyquist relata que só é possível fazer uma reconstrução exata de um sinal se a amostragem se realizar a uma frequência f_s superior ao do dobro da componente de máxima frequência do sinal (f_{max})(HAYKIN S.; VEEN, 2001).

$$f_s > 2f_{max} \quad (2.7)$$

Ou seja,

$$f_{max} < 0,5f_s \quad (2.8)$$

Caso contrário, produz-se um fenômeno indesejável, denominado de *aliasing*, que consiste na superposição dos espectros de cada amostra que inviabiliza a correta recuperação do sinal (LATHI, 2007). Assim sendo, o circuito que permite amostrar o sinal é uma simples chave que se fecha por um brevíssimo instante, na cadência da frequência de amostragem. Com isso, se a frequência de amostragem (f_s) for de 8 kHz, a chave se fecha

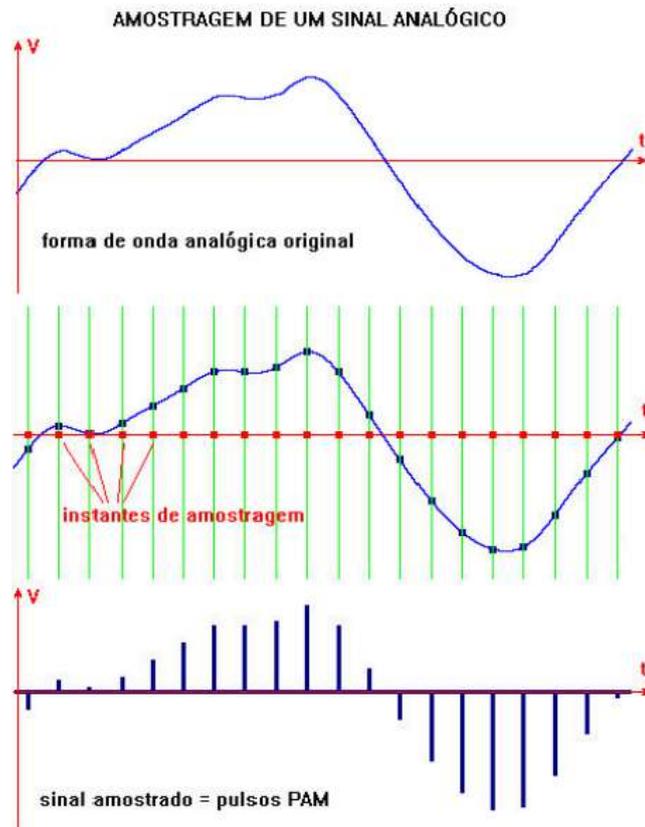


Figura 2.12: Princípio de Amostragem. Adaptado de (HAYKIN S.; VEEN, 2001).

8000 vezes por segundo, ou seja, a cada $125\mu\text{s}$. Como a chave se fecha por um tempo extremamente curto, teremos na sua saída um sinal em forma de pulsos estreitos, com amplitude igual ao valor instantâneo do sinal, chamados pulsos PAM (pulsos modulados em amplitude). Esse novo sinal corresponde ao sinal original definido em instantes isolados de tempo, passando a ser denominado sinal de tempo discreto (COSTA, 2005).

A Figura 2.13 mostra um sinal senoidal sendo amostrado com taxas próximas ao limite. Em T_{a1} , nota-se a amostragem com frequência maior que duas vezes a do sinal, Nesse caso, há amostras suficientes para que o sinal possa ser reproduzido sem erro de *aliasing*. No T_{a2} , a taxa de amostragem é igual a duas vezes a frequência do sinal, assim, não é possível a sua reprodução pois o sinal PAM equivale a zero. Nessa situação, se houvesse um defasamento entre os pontos de amostragem, haveria um sinal PAM, porém com amplitude errada. No último gráfico, T_{a3} , a frequência de amostragem é menor que o dobro da frequência do sinal, dessa forma, a quantidade de amostras é insuficiente e o sinal reproduzido estará errado, em vermelho na Figura 2.13. Este erro é causado pelo fenômeno de *aliasing*.

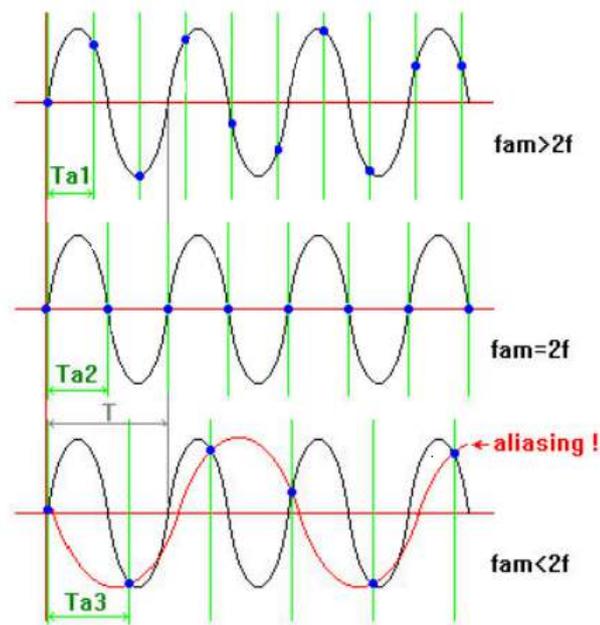


Figura 2.13: Sinais Amostrados próximos de faixas limite. Adaptado de (HAYKIN S.; VEEN, 2001).

2.7.2 Filtros Analógicos

Em sistemas eletrônicos são utilizados filtros com o intuito de ressaltar sinais em determinadas faixas de frequência e rejeitar outras. Além disso, os filtros são conhecidos como seletores de frequência, sendo, classificados quanto a faixa de frequência, ou frequência de corte (f_c) que esses operam. Dessa forma, os filtros ideais são classificados de acordo com a sua magnitude ($|T|$) e frequência (ω), conforme a ilustração da Figura 2.14,.

Diante disso, em (a), o filtro permite a passagem de sinais com frequências abaixo da f_c e atenua sinais com frequências superiores a f_c . Já o filtro (b) proporciona apenas a passagem de sinais de frequências acima da f_c e atenua sinais com frequências inferiores a f_c . Um outro tipo de filtro é o passa faixa (c), que deixa passar sinais de frequências entre duas frequências. Por último, o filtro rejeita faixa (d), que atenua sinais de frequências entre uma determinada faixa de frequência (NILSSON; RIEDEL, 2009).

2.7.3 Aquisição de Dados

A aquisição de dados (DAQ) é o processo pelo qual um fenômeno físico é transformado em um sinal elétrico proporcional e convertido em formato digital, sendo processado, analisado e armazenado através do uso de um computador (GRANDO, 2013). Todo processo de aquisição de dados é formado por blocos funcionais básicos, sendo eles: sensores ou transdutores, condicionamento de sinais, hardware de medição e um computador com software programável como ilustra a Figura 2.15.

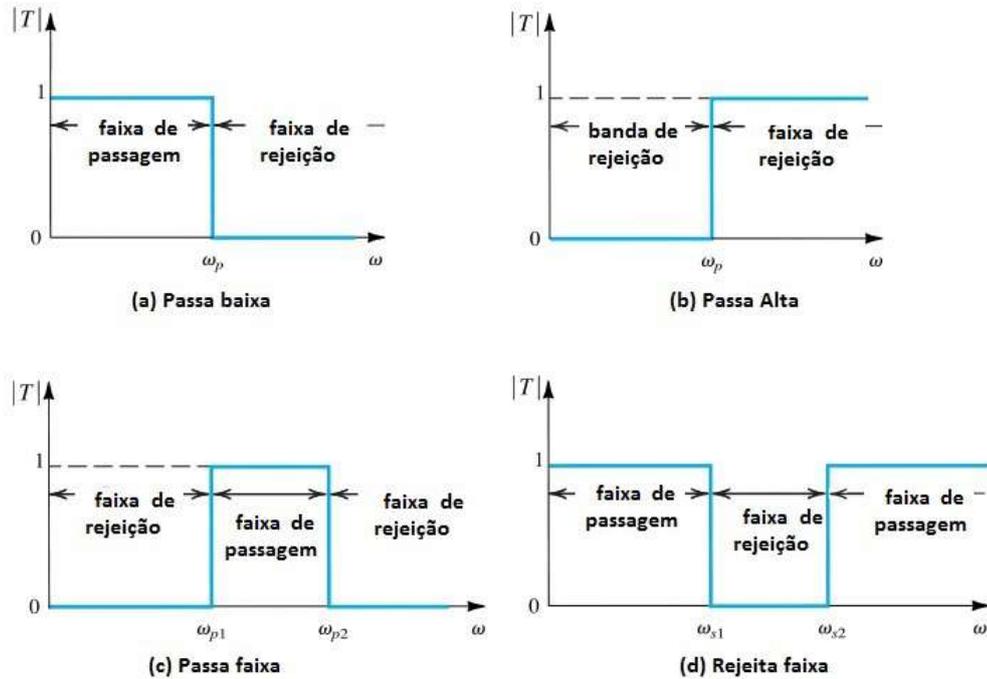


Figura 2.14: (a) Filtro passa baixa, (b) Filtro passa alta, (c) Filtro passa faixa, (d) Filtro rejeita faixa. Adaptado de (SEDRA; SMITH, 2009)



Figura 2.15: Diagrama funcional de um sistema de aquisição baseado num computador pessoal. Adaptado de (INSTRUMENTS, 2012).

2.7.4 Redes de Comunicação

A necessidade de exportar dados do processo local para pontos distantes, seja por questões de segurança ou de redução do custo operacional, seja simplesmente por comodidade ou simplificação no processo, levou à criação das redes industriais. Elas garantem a transmissão de informações relativas ao processo, de maneira rápida, em ambiente eletromagneticamente ruidoso, entre dois ou mais pontos.

Normalmente, a tecnologia física está atrelada ao protocolo de comunicação que vai ser usado na rede industrial. Assim, necessita-se a utilização de um protocolo de comunicação, sendo um conjunto de regras definidas em que consta o formato no qual a mensagem deve ser transmitida entre os participantes da rede. A simbologia e os caracteres usados para questionar sobre certo evento ou responder a determinada questão e a velocidade com que essa informação flui de um lado a outro, por exemplo, são detalhes que devem ser padronizados em um protocolo (GOMES, 1995).

As normas RS485 e RS422 definem esquemas de transmissão de dados balanceados que oferecem soluções robustas para transmitir dados em longas distâncias em ambientes ruidosos. Estas normas não definem qual o protocolo a ser utilizado para a comunicação dos dados, e são adotadas como especificação da camada física de diversos protocolos, como, por exemplo, Modbus, Profibus, DIN-Measurement-Bus e muitos outros.

Outro meio de comunicação é o sistema *wireless* (sem fio) que é caracterizada como um sistema de radiofrequência, comumente utilizada em 900 MHz ou 2,4 GHz, que estabelece links entre dois ou mais pontos. Esse sistema de rádio recebe o sinal digital de uma interface elétrica, decodifica e condiciona o sinal em ondas de rádio e o transmite a um segundo rádio. O segundo rádio capta o sinal transmitido e o codifica e condiciona a uma interface elétrica que deve estar ligada a um dispositivo destinatário (SOARES NETO, 2005).

Vale ressaltar que essa comunicação é bidirecional, ou seja, o rádio que transmite o pacote de dados de perguntas também deve receber um pacote de dados de respostas, assim como o rádio que recebe o pacote de dados de perguntas tem de transmitir outro pacote de dados de respostas. Sistemas de comunicação *wireless* trabalham com interfaces-padrão, normalmente do tipo serial ou *Ethernet*. Como a grande maioria dos protocolos apresentados pode trabalhar com essas interfaces, criou-se a cultura de utilização desse sistema de transmissão e recepção de dados também em áreas industriais. Para isso, esses rádios, comercialmente chamados de rádios bases ou repetidoras, têm se adequados aos padrões exigidos em ambientes industriais.

2.7.5 Software de medição

O equipamento de aquisição não funciona sem software, pois é o software que controla a operação do dispositivo. Além disso, é utilizado para processamento, visualização e armazenamento dos dados adquiridos. Existem diversos tipos de softwares disponíveis para efetuar aquisição de dados, desde os específicos para determinadas aplicações a plataformas de desenvolvimento de aplicações de alto nível e baixo nível (BEGA, 2006).

Para esse projeto, estudou-se desenvolver o Software com a utilização de tecnologia *web* (*JavaScript*, *CSS* e *HTML5*) (MOZILLA, 2017). Diante disso, verificou-se que o *JavaScript* era usado somente para validar formulários e realizar efeitos especiais, além de poder proporcionar uma maior interatividade com os usuários nas páginas *web*. Entretanto, com o aumento de processamento de máquinas e navegadores, o *JavaScript* se tornou uma opção sólida de desenvolvimento, com aplicações inteiras criadas usando a linguagem e novas IDEs sendo lançadas com frequência.

O *JavaScript* é uma linguagem orientada a objetos, ou seja, ela trata todos os elementos como objetos distintos, facilitando a tarefa da programação. Além disso, vale ressaltar que o *JavaScript* não tem nenhuma semelhança com o Java. O Java é uma linguagem *server-side*, como *PHP*, *Ruby*, *Python* e tantas outras. Sabendo disso, o *JavaScript* é uma linguagem de programação *client-side*. Ela é utilizada para controlar o *HTML* e o *CSS* para manipular comportamentos, por exemplo, um submenu. Assim, quando passa-se o mouse em um item do menu, e aparece um submenu com vários outros itens, é obrigação do *JavaScript* fazer aparecer esse submenu.

Além disso, o *Cascading Style Sheets* (*CSS*) é uma linguagem utilizada para definir a apresentação (aparência) de documentos que adotam para o seu desenvolvimento linguagens de marcação (como XML, HTML e XHTML e etc). O *CSS* define como serão exibidos os elementos contidos no código de um documento e sua maior vantagem é efetuar a separação entre o formato e o conteúdo de um documento.

Por fim, o HTML5 é a mais recente evolução do padrão que define o HTML. O termo representa dois conceitos diferentes: É uma nova versão da linguagem HTML, com novos elementos, atributos, e comportamentos e um conjunto maior de tecnologias que permite o desenvolvimento de aplicações e web sites mais diversos e poderosos. Este conjunto é chamado *HTML5 & friends* e muitas vezes abreviado apenas como HTML5. Criada para ser utilizável por todos os desenvolvedores da *Web* Aberta, essa página de referências faz ligações a inúmeros recursos do HTML5, classificados em diversos grupos, baseando-se em suas funções, conforme listagem abaixo:

- Semântica: permite você descrever mais precisamente o seu conteúdo.
- Conectividade: permite uma comunicação com o servidor de formas modernas e

inovadoras.

- Offline e armazenamento: Permite que páginas web armazenem dados localmente do lado do cliente e opere de forma offline mais eficientemente.
- Multimídia: Viabiliza a utilização de áudio e vídeo de forma primorosa na Web Aberta.
- Gráficos e efeitos 2D/3D: viabiliza um leque diversificado de opções de representação gráfica.
- Performance e integração: fornece grande otimização de velocidade e melhor utilização do hardware do computador.
- Acesso ao dispositivo: viabiliza a utilização de diversos métodos e dispositivos de entrada e saída.
- Estilização: permite aos autores a escrita de temas mais sofisticados.

Desenvolvimento

Nesta seção será abordado os requisitos de projeto, testes e experimentos realizados, acompanhados dos respectivos resultados e análises do TCC2.

3.1 Comparação de Sensores de Gás de Amônia

Inicialmente, após os estudos sobre os tipos de sensores de gases de amônia, estabeleceu-se uma comparação para verificar o sensor com uma melhor aplicação para o projeto em desenvolvimento. Diante disso, analisando a Figura 3.1, percebe-se um gráfico de espectro de sensibilidade em relação a uma variedade de tipos de gases.

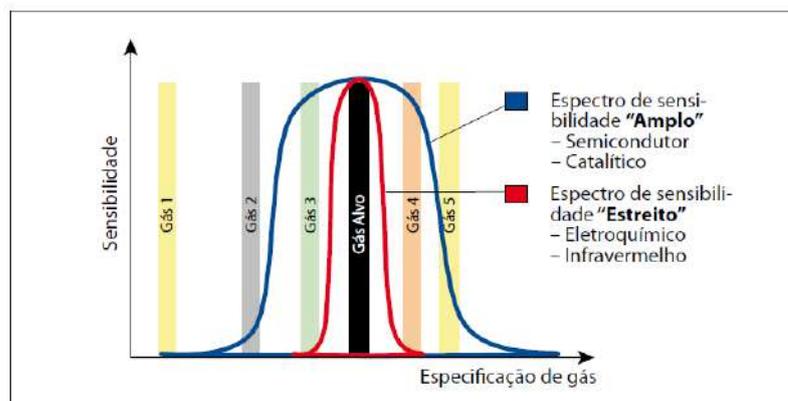


Figura 3.1: Espectro de sensibilidade. Adaptado de (DANFOSS, 2008).

Por meio da curva azul, que trata-se de um espectro de sensibilidade "Ampla", nota-se que, os sensores semicondutores e catalíticos possuem uma sensibilidade na captação para diversos gases. Entretanto, através da linha vermelha que representa o espectro de sensibilidade "Estreita", verifica-se que os sensores eletroquímicos e IR são sensíveis apenas a um tipo de gás, sendo mais indicado a utilização no projeto para fins de confiabilidade.

No entanto, o fator de custo relativo dos sensores também devem ser considerados para a escolha final. Dessa forma, diante da Figura 3.2, observa-se que, devido à captação

3.1. Comparação de Sensores de Gás de Amônia

exclusiva de um gás, os sensores eletroquímicos e IR possuem um custo relativo mais alto do que em relação ao semicondutor e catalítico. Além disso, o valor do sensor eletroquímico quando comparado ao do IR é quase duas vezes menor, aproximadamente.

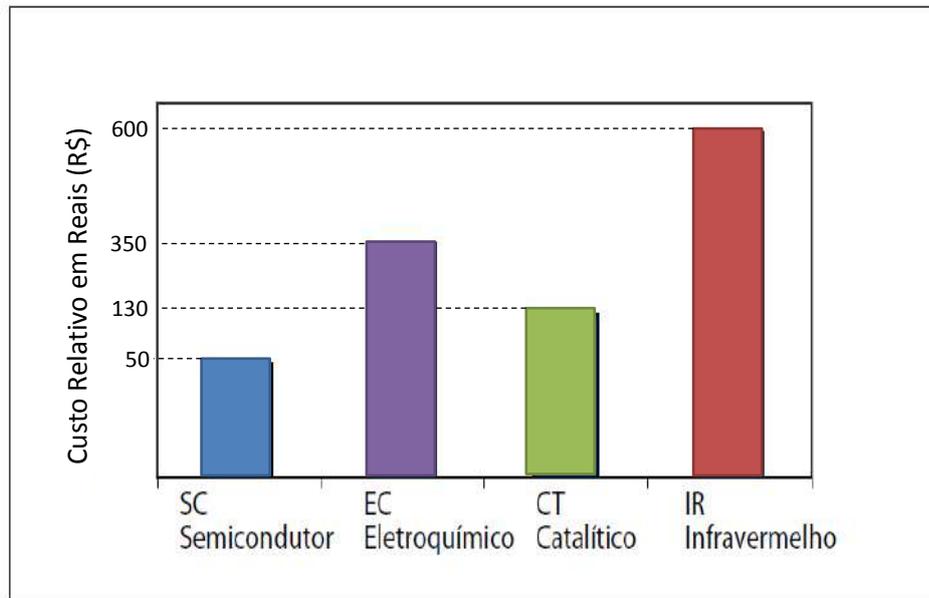


Figura 3.2: Comparação relativa de custo. Adaptado de (DANFOSS, 2008).

Além do mais, como o dispositivo deverá acionar um alarme a baixas concentrações de amônia (20 PPM), verifica-se pela Figura 3.3 que o sensor mais indicado para essa aplicação será o sensor eletroquímico.

	Semicondutor	Eletroquímico	Catalítico	Infravermelho
"Baixa" concentração de amônia (< 100 ppm)	-	✓	-	-
"Média" concentração de amônia (< 1000 ppm) ¹⁾	(✓)	✓	-	(✓)
"Alta" concentração de amônia (< 10000 ppm)	✓	-	✓	(✓)
"Muito alta" concentração de amônia (>10000 ppm)	-	-	✓	(✓)

✓	✓	-
Melhor solução	Adequado - porém menos atrativo	Não apropriado

Figura 3.3: Comparação de sensores mais adequados para determinados níveis de concentrações distintos. Adaptado de (DANFOSS, 2008).

3.2 Sensor Eletroquímico NE4-NH3

O NE4-NH3 é um sensor de gás eletroquímico de 3 eletrodos porosos de metal nobre, separados por um eletrólito aquoso ácido, alojado dentro de um invólucro de plástico (PPO). Sendo assim, projetado para a detecção e medição de amônia no intervalo 0-100 PPM, além de operar reagindo com o gás de interesse e produzindo um sinal elétrico proporcional à concentração de gás. Diante disso, o sensor consiste em um eletrodo de detecção (*Sensing Electrode* ou *Working Electrode*), e um *Counter Electrode* separado por uma fina camada de eletrólito, como pode ser visto na Figura 3.4.

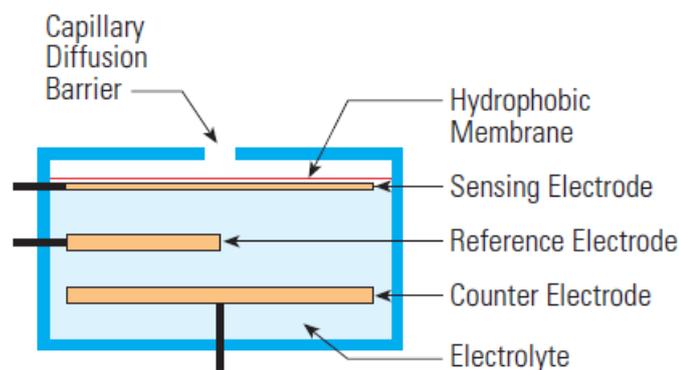


Figura 3.4: Esquema interno do sensor eletroquímico NE4-NH3. Adaptado de (TECHNOLOGY, 2015).

Inicialmente, o gás que entra em contato com o sensor passa por uma pequena abertura de tipo capilar e, em seguida, difunde-se através de uma barreira hidrofóbica até atingir a superfície do eletrodo. Essa abordagem é adotada para permitir que a quantidade apropriada de gás reaja no eletrodo de detecção para produzir um sinal elétrico suficiente enquanto evita que o eletrólito escape do sensor, Figura 3.5.

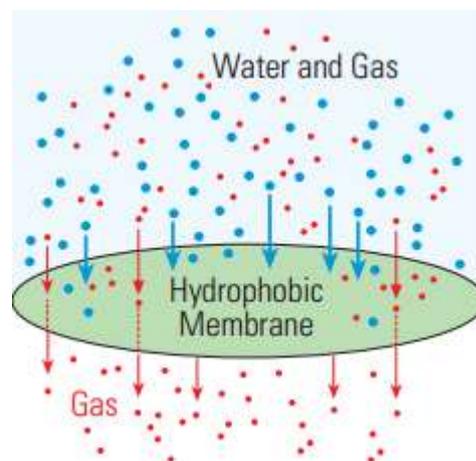


Figura 3.5: Membrana hidrofóbica do sensor eletroquímico NE4-NH3. Adaptado de (TECHNOLOGY, 2015).

O gás que se difunde através da barreira reage na superfície do eletrodo de detecção envolvendo um mecanismo de oxidação ou redução. Assim, essas reações são catalisadas pelo material do eletrodo desenvolvido especificamente para o gás de interesse. Com isso, um resistor é conectado através dos eletrodos e uma corrente proporcional à concentração de gás flui entre o ânodo e o cátodo. Dessa forma, a corrente pode ser medida para determinar a concentração de gás.

Com o propósito de melhorar o desempenho do sensor, um eletrodo de referência (*Reference Electrode*) é introduzido. Esse eletrodo é acrescentado dentro do eletrólito, como ilustrado na Figura 3.4. Assim, é aplicado no *Sensing Electrode* um potencial estável fixo constante e como consequência, nenhuma corrente flui para o eletrodo de referência. Sendo assim, as moléculas de gás reagem no eletrodo de detecção e o fluxo de corrente no sensor é medido normalmente por meio da concentração de gás. Por fim, o sensor NE4-NH3 a ser utilizado no projeto é mostrado na Figura 3.6 e suas especificações na Tabela A.1.



Figura 3.6: Sensor eletroquímico NE4-NH3. Adaptado do Datasheet em (ENGINEERING, 2016).

3.3 Pré-Requisitos Sistema de Detecção

O projeto do sistema de detecção dividiu-se em três partes de desenvolvimento: *Hardware*, *Firmware* e *Software*. Diante disso, definiu-se os pré-requisitos para desenvolver o hardware do dispositivo de detecção que são listados abaixo.

- Microcontrolador;
- Módulo de rádio para comunicação sem fio;
- 2 conexões RS-485;

- Módulo sensor NE4-NH3;
- Display 16x2 (somente conector);
- Teclado direcional de 5 teclas (*up*, *down*, *left*, *right* e *ok*);
- 3 leds de sinalização (verde, amarelo e vermelho);
- Saída de sirene;
- Entrada para fonte de alimentação de 12 Volts;
- Dimensões máximas de 154x110x40mm; e
- Placas modulares.

3.3.1 Funcionamento do Sistema de Detecção

Inicialmente, para desenvolver o *Firmware* estabeleceu-se como seria o funcionamento do sistema de detecção, de acordo com os pré-requisitos determinados. A partir disso, o funcionamento dará-se pela captação do gás reagente por meio do módulo do sensor eletroquímico NE4-NH3, com isso será gerado um valor de corrente que será utilizado como referência para identificação da quantidade de gás no ambiente, conforme calibração. Além disso, serão estipulados dois níveis de alarmes, o principal em 20 PPM indicado por meio da norma de segurança NR-15 (MTE, 2014) e o secundário com um valor de 10 PPM com a finalidade de advertência para um provável problema. O monitoramento será realizado via software, além de possuir um visor LCD no dispositivo para indicação da quantidade de PPM no ambiente e *Leds* indicativos para alarmes visuais.

Dessa forma, na ausência de gás, ou níveis inferiores ao alarme secundário estipulado, o *led* verde manterá aceso indicando funcionamento correto e sem indícios de vazamento. Caso o nível esteja entre os dois níveis de alarme parametrizados, o *led* amarelo acenderá intermitente e o software irá apresentar em sua tela um ponto de atenção para verificar o dispositivo em questão. Caso o nível de gás captado ultrapasse o valor de 20 PPM, deverá ser acionado a sirene e o *led* vermelho, bem como, uma mensagem de alerta será mostrada no software. Na Figura 3.7 apresenta-se o fluxograma do funcionamento do detector de gás.

O visor LCD, além de apresentar a concentração de gás irá mostrar um *menu* de opções para configurações do sistema através do *hardware*. Para acessar essas informações do *menu*, será implementado no dispositivo um teclado direcional de 5 teclas. Assim, uma das configurações que poderão ser realizadas é a identificação (ID) de cada dispositivo, com a opção de registrar ID, exibir o ID e alterar o ID. Além disso, um outro tópico do

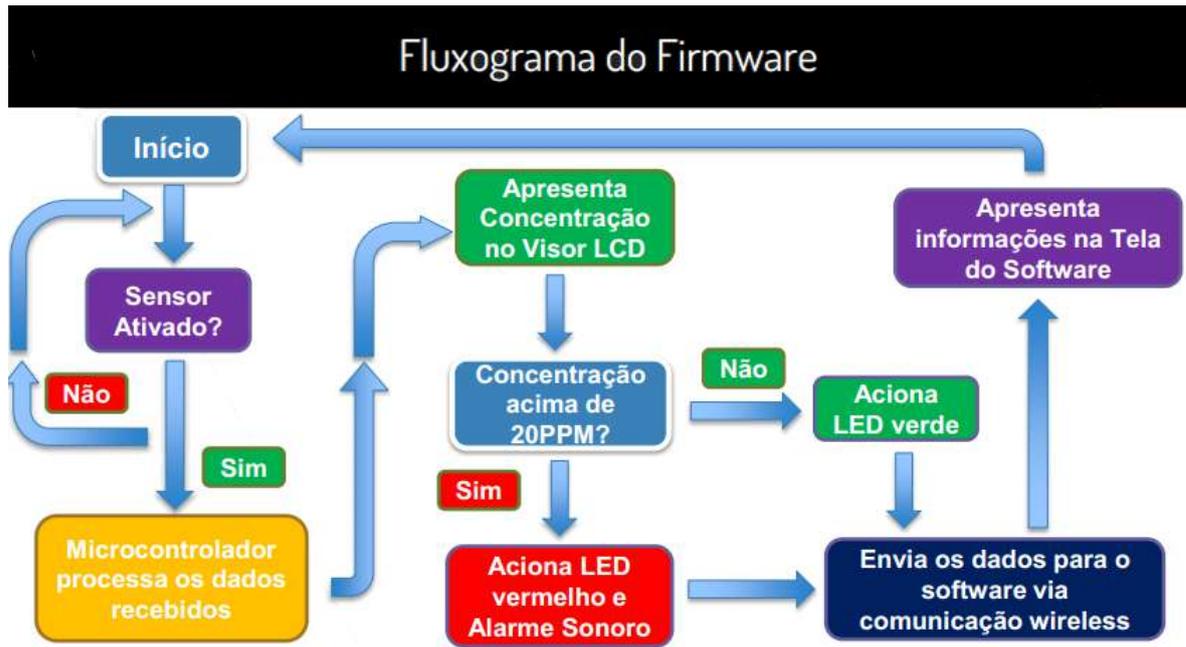


Figura 3.7: Fluxograma do funcionamento do detector de gás.

menu é a visualização de níveis de alarme setados no sistema e também a verificação da data da última calibração realizada.

Uma outra implementação no *menu* é o de teste de resposta, do inglês *Bump test*, que são respostas que confirmam a capacidade do detector de gás responder ao gás alvo. O teste de resposta expõe o detector a concentrações de gás que excedem as definições de alarme confirmando a capacidade do sensor de responder ao gás. Portanto, esse teste consiste em aplicar o gás de referência no equipamento, para verificar a resposta do detector, avaliar a operação dos alarmes, e se a leitura indicada no *display* atinge os níveis de referência.

Para realizar o teste, basta conectar a válvula reguladora na mangueira e no adaptador de calibração, e conectar esse conjunto no cilindro de gás. Em seguida, deve-se abrir totalmente a válvula do regulador e conectar o adaptador de calibração diretamente no detector. A resposta ao gás de teste deverá ser quase imediata. Se os sensores não responderem, demorarem mais de um minuto para responder ou se as leituras não corresponderem as concentrações do gás de teste, deve-se calibrar o detector e fazer um novo teste de resposta. Assim, para esse modo de operação, o acionamento dos alarmes serão desabilitados.

Por fim, a última opção do *menu* será o modo de manutenção, que ao ser selecionado, os alarmes serão desativados para realização das manutenções preditivas ou corretivas na infraestrutura do ambiente. Entretanto, para fins de segurança, será pré especificado um valor alto de 50 PPM no dispositivo, como tolerância máxima, pois, durante as manutenções, o vazamento torna-se comum. Assim, caso ultrapasse a tolerância máxima, o

dispositivo desativa o modo de manutenção e aciona os alarmes. Além disso, terá a opção de sair desse modo ou especificar um tempo de 0 a 60 minutos de operação para encerrar em seguida ao finalizar esse tempo.

3.4 Kit de Calibração

A Calibração é uma atividade extremamente importante e necessária para quem utiliza detectores de gases, nos diversos tipos de aplicação. A finalidade do kit (cilindro de gás, válvula reguladora, mangueira e adaptador), além da calibração, é realizar testes com uma amostra de gás conhecida para garantir a eficácia do instrumento. Desta forma, o usuário trabalha sempre com segurança de resultados, afinal, os Detectores têm como objetivo principal prevenir acidentes. Atualmente, a norma da ABNT sobre “Espaço Confinado” (NBR 16.577) define que a verificação e a calibração são obrigatórias e devem fazer parte da rotina do usuário de detectores de gases.

3.4.1 Cilindro de Gás



Figura 3.8: Cilindro de gás amônia. Adaptado de (INSTRUMENTS, 2016a).

O cilindro da Figura 3.8 adquirido para a calibração do projeto possui as seguintes especificações:

- Especificação: Tipo ALUMINIO descartável, com rosca dedicada padrão CGA 600 cilindro descartável, conforme ISO 11118;
- Material: Alumínio (116 Litros);
- Peso: 1,480 Kg (116 Litros);
- Dimensões: Diâmetro 90 mm, Comprimento 360 mm;

- Pressão de Serviço: 1000 psig (68 BAR); e
- Capacidade Volumétrica do Gás: 116 Litros.

Os cilindros descartáveis de alumínio, com 116 litros são fabricados para garantir a capacidade de produzir misturas com o mais alto nível de precisão, podendo personalizar as misturas para cada necessidade. Todos os cilindros são fornecidos com uma etiqueta a prova de intempéries, produzida para aguentar temperaturas abaixo de zero, condições tropicais úmidas ou calor intenso de desertos. Os cilindros têm certificados rastreáveis a pesos calibrados pelo *National Physical Laboratory* (NPL). Os padrões do NPL são internacionalmente conhecidos e são equivalentes diretos aos padrões do *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Para o pleno funcionamento dos detectores de amônia, é necessário realizar a calibração de detector de amônia regularmente para que, dessa forma, seja possível verificar as incertezas de medições fazendo as alterações e ajustes necessários para o bom funcionamento do equipamento.

3.4.2 Válvula Reguladora de Pressão

A válvula reguladora de pressão, faz parte do kit de calibração e tem encaixe para o cilindro de gás padrão. A válvula reguladora de pressão dos cilindros de gás tem a função de regular a saída do fluxo tornando-o constante. Servem para calibração e teste de resposta em detectores de NH_3 . Essa válvula mantém o fluxo pré-ajustado, mesmo quando a pressão do Cilindro de Gás estiver esgotada.

Conforme ilustrado na Figura 3.9, o ar comprimido entra por (P) e pode sair por (P') apenas se a válvula de assento estiver aberta. A secção de passagem regulável está situada abaixo da válvula de assento (C). Girando totalmente a manopla (D) no sentido anti-horário (mola sem compressão), o conjunto da válvula de assento (C) estará fechado. Girando a manopla no sentido horário, aplica-se uma carga numa mola calibrada de regulagem (A), fazendo com que o diafragma (B) e a válvula de assento (C) se desloquem para baixo, permitindo a passagem do fluxo de ar comprimido para a utilização (H).

A pressão sobre o diafragma (B) está balanceada através do orifício de equilíbrio (G) quando o regulador está em operação. A pressão secundária, ao exceder a pressão regulada, causará, por meio do orifício (G), ao diafragma (B), um movimento ascendente contra a mola de regulagem (A), abrindo o orifício de sangria (F) contido no diafragma. O excesso de ar é lançado para a atmosfera através do orifício (E) presente na tampa do regulador. Portanto, uma saída de pressão pré-regulada é um processo de abre e fecha da válvula de assento (C), que poderia causar certa vibração.

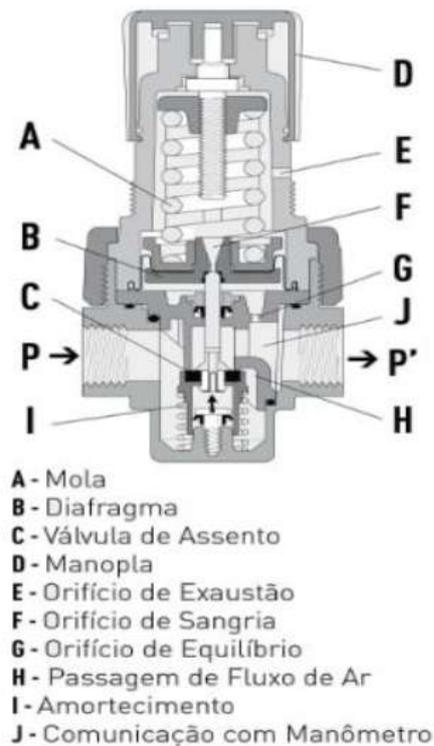


Figura 3.9: Esquemático de Funcionamento da Válvula Reguladora de Pressão. Adaptado de (MOVIMOC, 2015).

Isto é evitado porque certos reguladores são equipados com um sistema de amortecimento (I) por mola ou ar comprimido. Por sua vez, o dispositivo auto compensador (CI) permite montar o regulador em qualquer posição, e confere ao equipamento um pequeno tempo de resposta. A pressão de saída é alterada pela atuação da manopla (D), não importa se para decréscimo quando a pressão secundária regulada é maior, o ar excedente desta regulagem é automaticamente expulso para o exterior através do orifício (F), até que a pressão desejada seja atingida ou acréscimo. Neste caso, o aumento da pressão se processa normalmente, atuando-se a manopla (D) e comprimindo-se a mola (A) da forma já mencionada, onde através de um manômetro (J) registram-se as pressões secundárias reguladas.

3.4.3 Adaptador

Para complementar o kit de calibração, projetou-se no *SolidWorks*, um adaptador para encaixar sob medida no sensor de gás. Esse projeto consistiu em desenvolver nas extremidades do adaptador um encaixe para a mangueira e a para o sensor. Assim, por meio das medidas de 20.5mm de diâmetro externo do sensor e 5mm de diâmetro interno da mangueira, desenvolveu-se o acoplador da Figura 3.11. A partir do projeto, realizou-se



Figura 3.10: Válvula Reguladora de Pressão. Adaptado de (INSTRUMENTS, 2017).

a impressão da peça em 3D de material ABS.

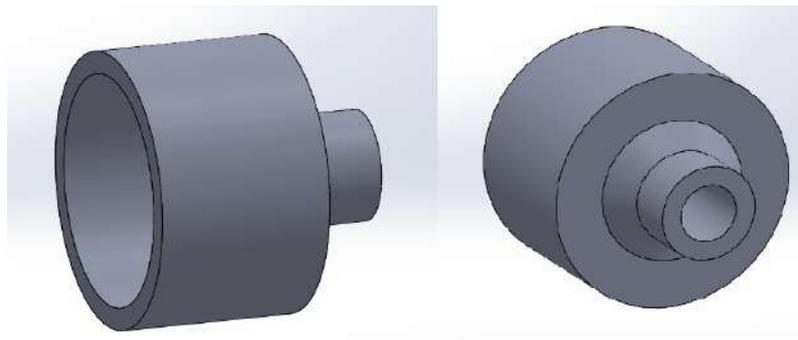


Figura 3.11: Adaptador para o sensor no *SolidWorks*.

3.5 Projeto Eletrônico

Como parte dos pré-requisitos, definiu-se projetar as placas do sistema de detecção subdivididos em módulos, no intuito de facilitar a manutenção ou reparo em caso de algum problema não previsto. Além disso, todas essas placas deveriam possuir dimensões inferiores a 154x110x40mm. Essas dimensões foram definidas devido ao tamanho do gabinete de proteção escolhido para utilização no projeto.

Assim, projetou-se 3 placas distintas no *software DipTrace* com licença para estudantes, sendo uma com o circuito de acionamento do sensor, outra com o módulo de comunicação sem fio e por último a placa principal com microcontrolador.

3.5.1 Módulo Sensor de Gás

Para realizar o acionamento do sensor NE4-NH₃, o seu *datasheet* disponibiliza o esquemático do circuito para montagem, como ilustrado na Figura 3.12.

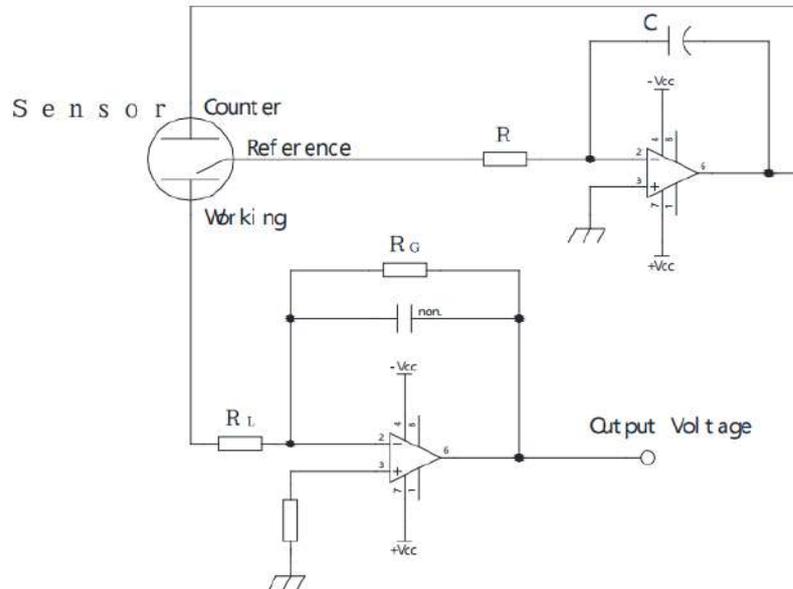


Figura 3.12: Circuito de acionamento para o sensor eletroquímico NE4-NH₃. Adaptado do Datasheet de (ENGINEERING, 2016).

Assim, pode-se verificar os 3 eletrodos citados anteriormente conectados ao circuito. Além disso, observa-se que o *Reference Electrode*, que tem a função de melhorar o desempenho do sensor, está conectado a um amplificador integrador inversor. A partir disso, o integrador é capaz de produzir uma tensão de saída que é proporcional à integral da tensão de entrada, ou seja, a magnitude da saída é função da magnitude da tensão de entrada e do período pelo qual esta tensão foi aplicada ao circuito. Se uma tensão fixa for aplicada na entrada, o módulo da tensão de saída aumenta sobre um intervalo de tempo, apresentando a forma de uma rampa. Dessa forma, a Equação 3.1 define a relação entre entrada e saída em função do tempo para a configuração de integrador inversor. Nesse caso, o capacitor é utilizado para integrar corrente e o resistor é utilizado para transformar V_i em corrente. Dessa maneira, a saída do circuito será proporcional a integral da tensão V_i .

$$V_o(t) = -\frac{1}{RC} \int V_i(t) dt \quad (3.1)$$

Além disso, os amplificadores a serem utilizados nesse circuito devem ser de alta qualidade de precisão e com baixo desvio de entrada. Sendo assim, o amplificador OP97 foi selecionado, como uma alternativa de baixa potência e de precisão. O OP97 mantém os padrões de desempenho definidos, enquanto utiliza apenas uma corrente de alimentação

de $600\mu\text{A}$. Diante disso, é notável analisar que a corrente de polarização permanece abaixo de 250pA em toda a sua faixa de temperatura, sendo ideal para o uso em integradores de precisão de longo prazo.

Outro ponto a ser analisado, é quanto a tensão de saída que é definida pela equação 3.2, sendo PPM a concentração de gás, I_{out} a corrente de saída do sensor e R_G como valor de resistência a ser estabelecido.

$$V_{out} = PPM \times I_{out} \times R_G \quad (3.2)$$

Portanto, se atribuir para R_G o valor de $10\text{K}\Omega$ e considerar a concentração de gás de 100PPM , que é o máximo que o sensor pode captar sem saturar, conseqüentemente, a corrente de saída será de 40nA/PPM de acordo com o *datasheet*, assim, a tensão de saída será:

$$V_{out} = 100 \times 40 \times 10^{-9} \times 10 \times 10^3 = 40\text{mV} \quad (3.3)$$

Além disso, identificou-se que R_L é o resistor de carga do sensor, possuindo um valor entre $7,5\text{-}33\Omega$. Dessa maneira, a velocidade de resposta pode ser aumentada ao reduzir o valor de R_L , porém, o ruído de sinal pode ser aumentado como consequência. Por outro lado, esse sensor requer um circuito de compensação de temperatura. Para isso, uma rede de compensação simples pode ser incorporada substituindo R_G por um termistor. Normalmente, de acordo com (ENGINEERING, 2016), utiliza-se um termistor NTC que possui uma constante $B=3435\text{K}$, ajustando a precisão de saída dentro de $\pm 10\%$ na faixa de $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$. Assim, qualquer termistor com uma constante B em torno de 3500K e um valor de resistência (R_{25}) de $10\text{K}\Omega$ podem ser usados. Por fim, desenhou-se o circuito de acionamento do sensor no *Software Proteus* para testes. Na Figura 3.13 é ilustrado a visualização em 3D da primeira versão da placa do módulo do sensor.

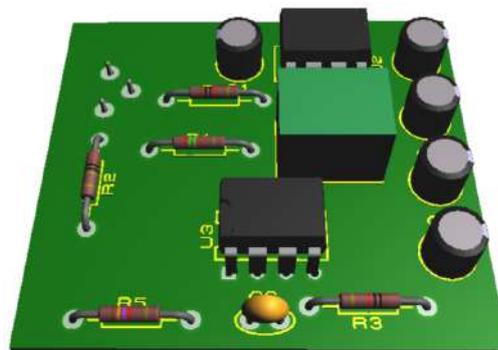


Figura 3.13: Placa do circuito de acionamento do sensor eletroquímico NE4-NH3 em 3D.

Após realizar um estudo sobre o funcionamento do sensor NE4-NH3 e analisar o seu *datasheet*, implementou-se o circuito em uma simulação no *Proteus*. Como o *Proteus* não

possui o modelo do sensor em sua biblioteca, utilizou-se uma fonte de corrente com valor de 40nA para analisar o funcionamento do circuito. O esquemático pode ser visto na Figura 3.14. Nesse teste, verificou-se o valor de tensão amplificado na saída do circuito.

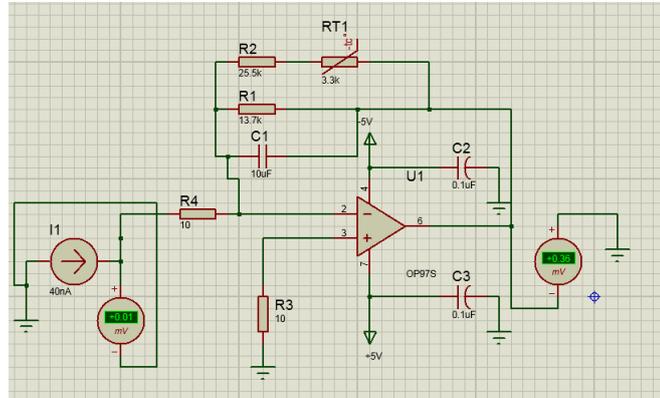


Figura 3.14: Simulação do circuito de acionamento do sensor no Proteus.

Assim, realizou-se a montagem desse circuito. Como esse circuito possui implementado componentes smd, do inglês *Surface Mounting Devices*, seria necessário a utilização de uma placa dupla face. Além disso, com a utilização desses componentes SMD, os testes na *protoboard* não seria possível. Com isso, deveria ser montado uma placa para os testes e caso ocorresse algum imprevisto, outra placa deveria ser fabricada e montada, gerando um custo e prazo maior de desenvolvimento do projeto. Diante disso, implementou-se o circuito do sensor no *Software DipTrace*. Dessa forma, na Figura 3.15 apresenta-se o circuito completo de acionamento do sensor.

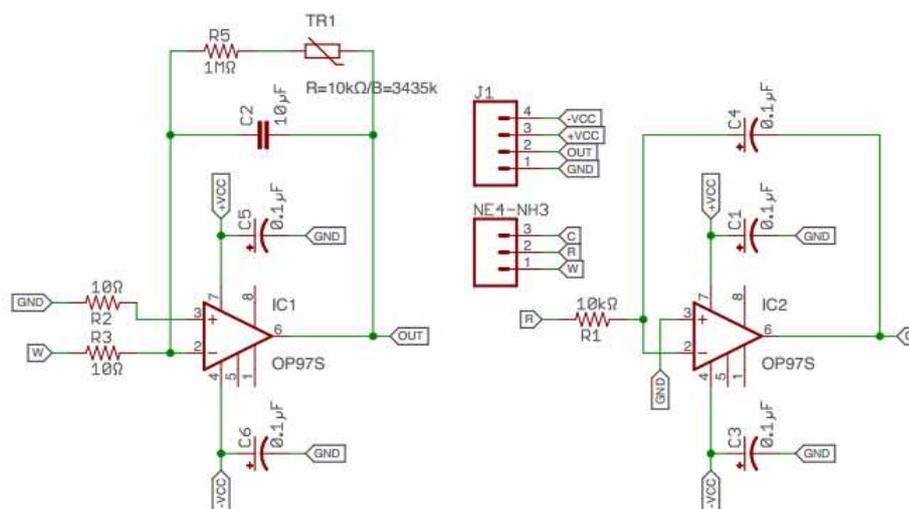


Figura 3.15: Esquemático do circuito do sensor completo.

Um ponto importante a ser notado é que reduziu-se a quantidade de cabos a serem

conectados, além de utilizar pinos para as conexões, visto que, o sensor não pode ser soldado pelas características dos eletrodos. Ao testar o funcionamento da placa, verificou-se alguns problemas, e como mencionado anteriormente, seria necessário a fabricação de outra. Nesse caso, identificou-se como problema um curto circuito na trilha de uma das portas do amplificador operacional, que acabou queimando esse componente.

Após isso, decidiu-se mandar fabricar as PCBs desse circuito com camadas de isolamento para não ter mais erros com curto. Assim, realizou-se a montagem e novos testes. A nova PCB pode ser vista na Figura 3.16. No teste com a nova placa, não se conectou o sensor com o intuito de preservá-lo em caso de algum problema, devido o seu alto custo de aquisição. Dessa forma, para representar o sensor nesse teste e validar o funcionamento da placa, usou-se um gerador de sinal. Além disso, utilizou-se também o osciloscópio e uma fonte de bancada, ambos do Laboratório de Eletrônica do *CEFET-MG*, campus Divinópolis.

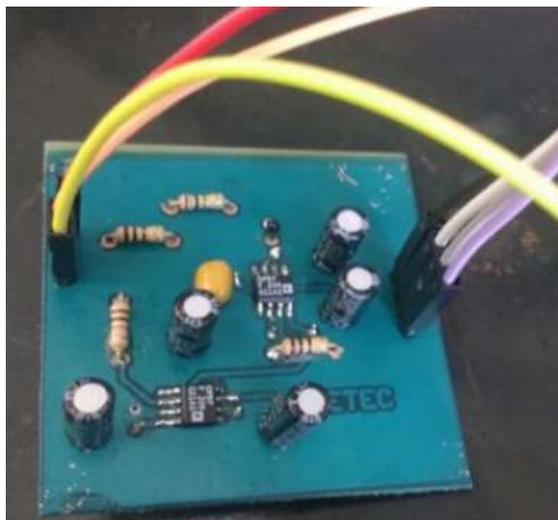


Figura 3.16: Montagem da placa com camadas isoladas.

Diante disso, parametrizou-se o gerador de sinal com valor mínimo de tensão que o equipamento consegue gerar, sendo o valor de 5mV com uma frequência de 1kHz. Com isso, obteve-se o resultado da Figura 3.17.

Do mesmo modo que na simulação do *Proteus* que o amplificador aumentou a saída em 3 vezes, percebe-se que na prática também ocorreu isso, sendo o sinal amplificado de 5mV para 15.2mV. Diante disso, concluiu-se que a placa está funcionando normalmente.

Inicialmente, realizou-se o primeiro teste com a solução clareadora de pelos, por não ser nocivo a saúde, enquanto aguardava-se a chegada do kit de calibração. Para esse teste, não se necessitou de equipamentos de segurança, pelo fato da solução aplicada não gerar riscos ou danos a saúde. Desse modo, molhou-se um algodão com a solução e aproximou-se do sensor. Com a utilização de um multímetro, realizou-se a medição da

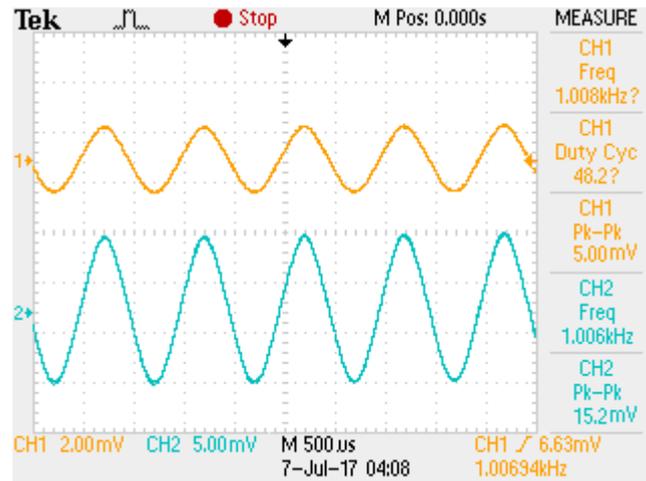


Figura 3.17: Sinal de teste amplificado.

tensão na saída no circuito. Como resultado, apresentou-se valores baixos e variáveis de tensão entre 0.4mV e 3.6mV, devido a concentração de gás no ambiente não ser constante e evaporar a medida do tempo. Por se tratar de uma solução de amônia diluída em água, a concentração de gás será realmente baixa.

Além disso, um ponto a ser destacado no projeto é a relação do processo químico envolvendo amônia e água, com a formação do hidróxido de amônio (NH_4OH). Para isso ocorrer é necessário que a água esteja em sua forma líquida. Dessa forma, o NH_4OH não será um problema para o dispositivo de detecção, por se tratar de ambientes que utilizam apenas gases, não permitindo a formação completa desse composto.

Com a chegada do kit de calibração e utilizando o adaptador impresso em 3D, realizou-se outros testes. Através do adaptador com encaixe sob medida no sensor, reduziu-se riscos de segurança no manuseio do cilindro de gás, visto que, o gás eliminado no ar é reduzido consideravelmente. Mesmo assim, por questão de segurança, utilizou-se um jaleco, luvas descartáveis, óculos de proteção e máscara descartável, evitando-se qualquer tipo de contato direto com o gás, em caso de problemas no manuseio do cilindro. Com todo o procedimento de segurança realizado e com auxílio do monitor de química do CEFET-MG, campus Divinópolis, inicializou-se os testes no laboratório de química da instituição, com a utilização da capela de exaustão de gases.

Para garantir uma segurança maior, modificou-se a posição da capela dentro do laboratório, aproximando-a das janelas. Desse modo, caso ocorresse algum problema com o adaptador conectado ao kit de calibração durante os testes, o gás seria evacuado para o ambiente externo com mais rapidez e facilidade. Após a modificação, utilizou-se uma fonte para gerar uma tensão de $\pm 5\text{V}$ no amplificador da placa. Além disso, realizou-se todas as conexões de cabeamento e do kit de calibração (cilindro, válvula, mangueira e adaptador), sendo o adaptador acoplado diretamente no sensor. Após verificação de todas

as conexões corretamente, realizou-se a abertura da válvula durante um período de tempo de 20s, com um fluxo constante. Durante esse tempo, conectou-se na saída do circuito, um multímetro para verificação dos valores de tensão.

Inicialmente, sem a aplicação da amônia, verificou-se que a saída não apresentou valores. Após realizar a abertura da válvula, apresentou-se instantaneamente um valor baixo de tensão de 20.03mV e manteve-se nesse valor durante os 20s estabelecidos anteriormente.

Dessa forma, repetiu-se o procedimento em mais dois testes e obteve como resultado no segundo teste, um valor de tensão de 19.98mV e no terceiro um valor de 20mV, resultando em uma média de 20.003mV. Como no cilindro de gás é especificado o valor de 50PPM, a medição média realizada de 20.003mV será equivalente a essa concentração de gás.

Diante do *datasheet* do sensor, apresenta-se que o sinal de saída é linear para uma concentração máxima de 100PPM, sendo o valor de tensão equivalente a 40mV. Além disso, como verificado nos testes em um ambiente limpo de gás tóxico, ou seja, equivalente a 0PPM, a tensão será igual a zero. Com isso, resultou-se no gráfico dos testes de respostas do sensor, conforme Figura 3.18.

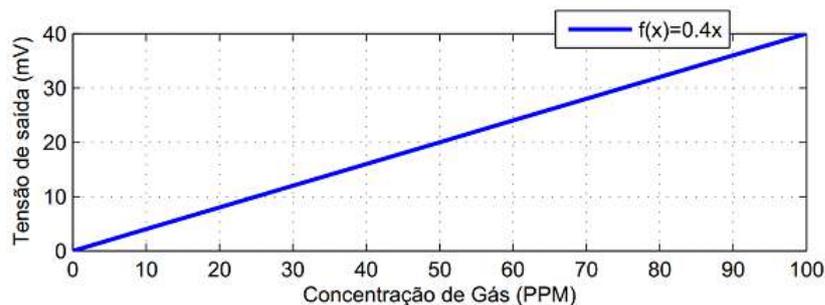


Figura 3.18: Curva de testes de resposta do sensor.

Como o cilindro de gás garante a calibração apenas para o valor intermediário de 50PPM e por se tratar de um componente com custo elevado de aquisição, não sendo viável adquirir cilindros de outros valores, a calibração desse sistema tornou-se inviável por questões financeiras disponíveis para o projeto, possibilitando apenas a aplicação dos testes de resposta do sensor.

Em continuidade do projeto, verificou-se que o valor máximo de tensão de saída é de 40mV. Com isso, para evitar falhas do processamento do microcontrolador pelo baixo valor de tensão, acrescentou-se na saída do circuito mais um amplificador operacional no intuito de aumentar o sinal de saída, sendo utilizado o MCP6001T por operar com valores de tensões baixas. Assim, projetou-se o circuito de amplificação, calculando seu ganho através da Equação 2.6. Atribuindo-se, o valor de R_f como 4.7k Ω e R_1 como 1k Ω , tem-se uma relação de ganho de 5.7 vezes a tensão de entrada.

Diante disso, implementou-se esse circuito de amplificação no *Proteus* para realizar a

simulação. Na Figura 3.19, percebeu-se que o sinal amplificou-se como desejado, entretanto, com um ganho de 4 vezes, aproximadamente.

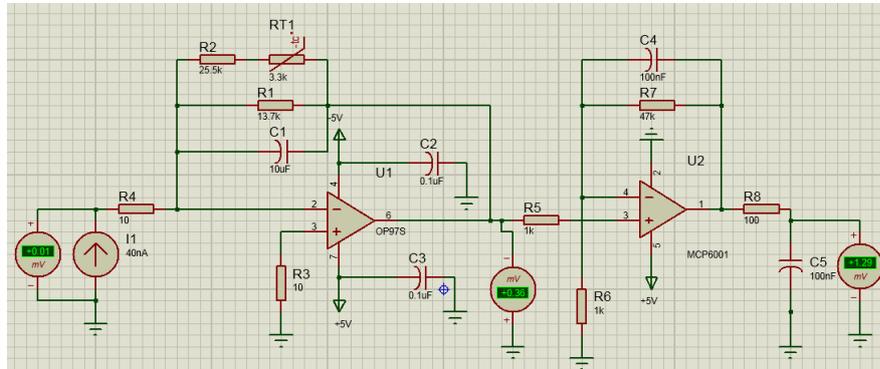


Figura 3.19: Simulação do circuito de amplificação.

Acrescentou-se no projeto também, o componente LMC7660 (SRU1) que é um conversor de tensão CMOS capaz de converter uma tensão positiva na faixa de + 1.5V a + 10V para a tensão negativa correspondente de -1.5V a -10V, não sendo mais necessário a utilização da fonte simétrica por meio da fonte de bancada.

A partir dos testes e modificações, desenvolveu-se um novo esquemático da placa no *DipTrace* com a finalidade de otimizar e reduzir custos para o projeto. O novo esquemático pode ser visto na Figura 3.20.

Outro ponto do projeto é o fato que, como os eletrodos do sensor não podem ser soldados na placa, implementou-se pinos receptores, com medida de 1.63mm de diâmetro interno para encaixe sem folga dos eletrodos. Dessa forma, utilizou-se três pinos receptores distanciados entre si conforme desenho técnico fornecido pelo *datasheet*.

Assim, esses pinos sendo soldados na placa, o sensor poderá ser conectado a placa facilmente, garantindo as conexões corretas dos seus eletrodos. Por fim, acrescentou-se um conector de 5 vias para ser conectado via cabo a placa principal do microcontrolador. Essa conexão fornece uma flexibilidade para a placa do sensor para posicionar dentro do invólucro de proteção. Após implementar esses pontos no esquemático da placa do sensor, gerou-se uma prévia em 3D da placa final do sensor, conforme pode ser visto na Figura 3.21.

Com a finalidade de reduzir os custos ao máximo e por se tratar de um projeto que visa se tornar um produto, importou-se todos os componentes dessa placa, além de adquirir componentes SMD, por possuírem um custo mais acessível e contribuir na redução do tamanho da placa. A relação de componentes dessa placa e valores em dólar gastos podem ser vistos na Tabela 3.1.

Com a finalização do esquemático da placa, gerou-se a sua PCB, conforme Figura 3.22. Como é inviável a fabricação manual dessa placa, terceirizou-se a sua fabricação

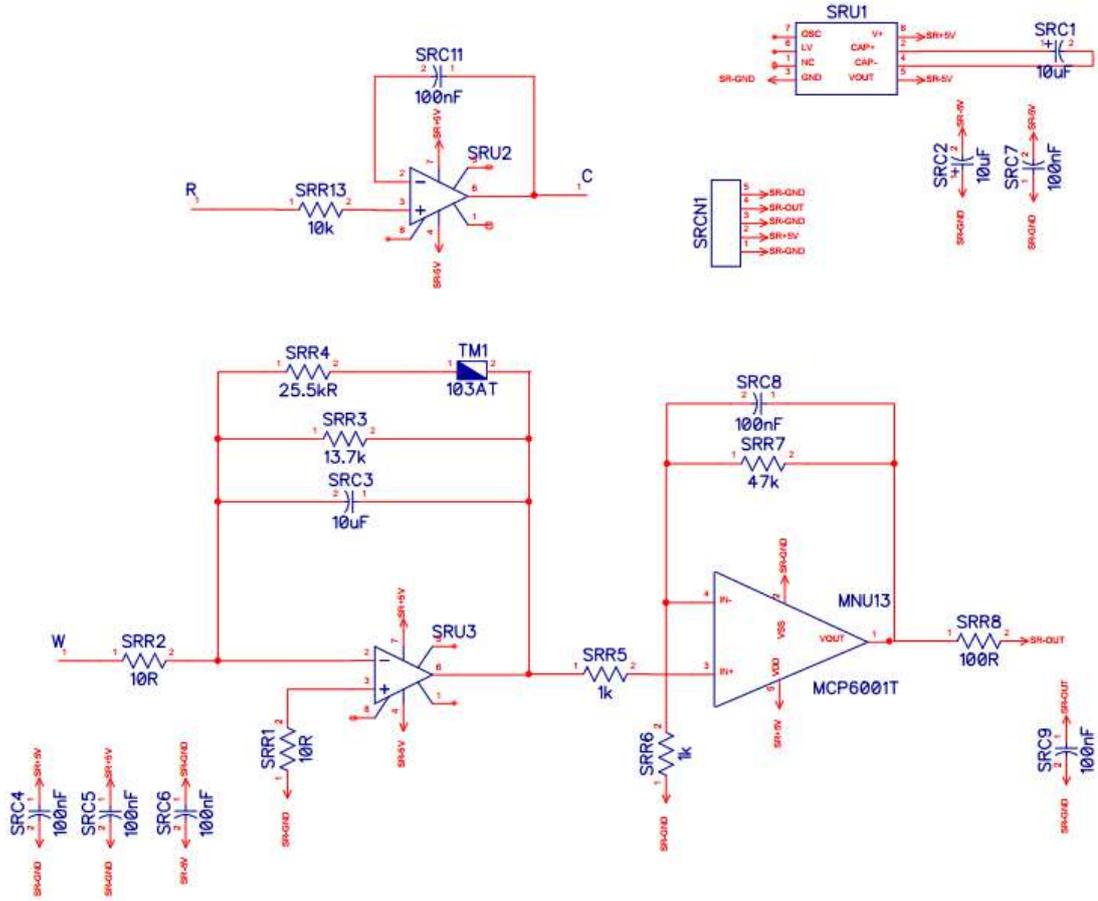


Figura 3.20: Esquemático final do módulo de sensoriamento.

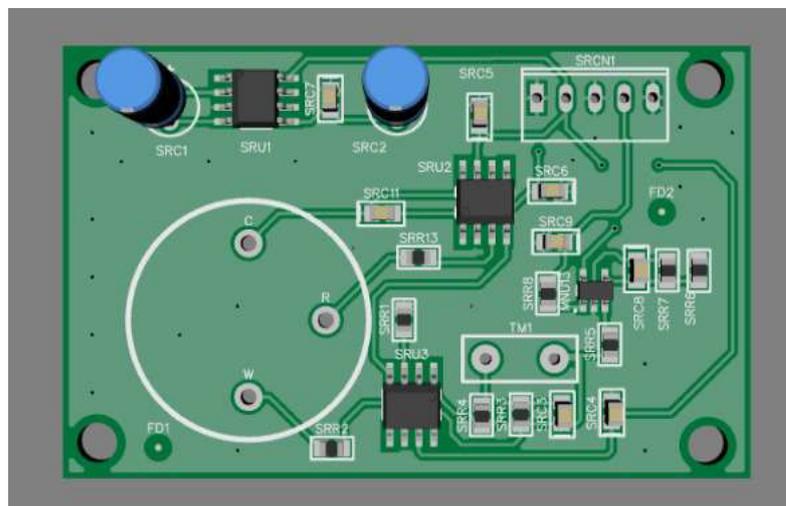


Figura 3.21: Versão em 3D da placa final do sensor.

Tabela 3.1: Orçamentos dos Componentes da Placa do Sensor

Placa Sensor NE4-NH3			
Componente	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Pino Receptor (C,R,W)	3	\$ 0.31	\$ 0.93
MCP6001T-I/OT	1	\$ 0.21	\$ 0.21
Capacitor Alumínio 10uF	2	\$ 0.22	\$ 0.44
Capacitor Cerâmica 10uF	1	\$ 0.10	\$ 0.10
Capacitor Cerâmica 100nF	7	\$ 0.02	\$ 0.14
Pino conector 5 vias	1	\$ 0.23	\$ 0.23
Resistor 10 ohms	2	\$ 0.02	\$ 0.04
Resistor 13.7 Kohms	1	\$ 0.09	\$ 0.09
Resistor 25.5 Kohms	1	\$ 0.004	\$ 0.004
Resistor 1 Kohms	2	\$ 0.02	\$ 0.04
Resistor 47 Kohms	1	\$ 0.02	\$ 0.02
Resistor 10 Kohms	1	\$ 0.002	\$ 0.002
LMC7660	1	\$ 0.90	\$ 0.90
OP97FSZ	2	\$ 1.60	\$ 3.20
Termistor	1	\$ 2.25	\$ 2.25
Sensor NE4-NH3	1	\$ 90.00	\$ 90.00
TOTAL			\$ 98.60

com empresas especializadas no ramo.

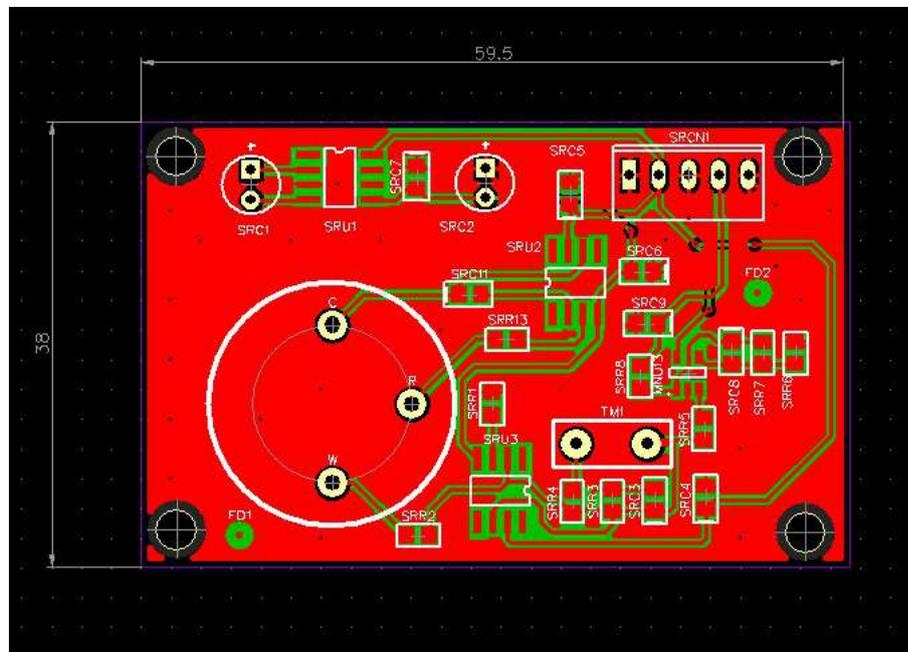


Figura 3.22: PCB da placa final do sensor.

3.5.2 Módulo Comunicação Sem Fio

Para realizar a transmissão dos dados da placa do microcontrolador para o software desenvolvido, projetou-se um módulo de comunicação sem fio. De início, avaliou-se a utilização do módulo NRF24L01 que é um módulo *Wireless* transmissor. Seu alcance pode chegar a 10 metros em ambientes internos e 50 metros em campo aberto. Esse módulo acompanha uma antena embutida que opera na frequência de 2,4GHz com velocidade de operação de 2Mbps, habilidade de anti-interferência, comunicação multi-ponto de 125 canais e possui um conector de 10 pinos, conforme Figura 3.23.



Figura 3.23: Módulo NRF24L01. Adaptado de (THOMSEN, 2014).

Dos 10 pinos do conector, serão utilizados 9. Como o módulo utiliza a interface SPI do Arduíno, será necessário utilizar os pinos 11, 12, e 13 para os sinais MOSI, MISO e SCK, respectivamente. Os pinos CSN e CE serão ligados aos pinos 7 e 8 do Arduíno. A relação das conexões podem ser vistas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Conexões do módulo NRF24L01

NRF24L01			
Pino	Nome	Função	Ligação Arduíno
1	VCC	Alimentação	3.3V
2	VCC	Alimentação	3.3V
3	CE	Chip Enable RX/TX	Pino 8
4	CSN	SPI Chip Select	Pino 7
5	SCK	SPI Clock	Pino 13
6	MOSI	SPI Slave Data Input	Pino 11
7	MISO	SPI Slave Data Output	Pino 12
8	IRQ	Interrupção	Não Utilizado
9	GND	Terra	GND
10	GND	Terra	GND

A partir disso, realizou-se a montagem do módulo NRF24L01 com Arduíno para testar utilizando a biblioteca RF24. Para esse teste, utilizou-se 2 módulos com 2 Arduínos diferentes, sendo um para transmitir informação e outro para receber os dados. Como o mesmo módulo pode ser utilizado tanto para transmissão como para recepção, a ligação será a mesma, conforme Figura 3.24.

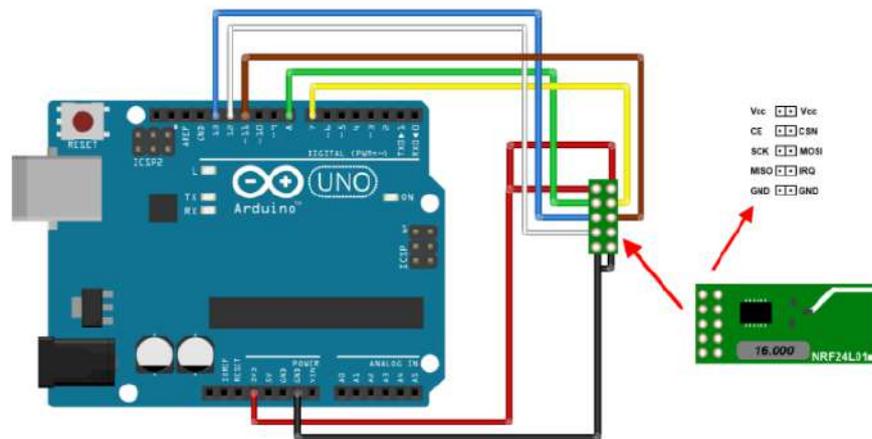


Figura 3.24: Módulo NRF24L01 conectado no Arduino UNO. Adaptado de (THOMSEN, 2014).

Após as ligações no Arduino, realizou-se o teste a partir da programação realizada em ambos os Arduínos. Esse teste consistiu em algumas etapas de validação, sendo a primeira com os dois módulos um do lado do outro. Desse modo, o Arduino realizou a comunicação com o módulo NRF24L01 e apresentou os dados na tela do serial monitor, indicando o status do módulo, conforme Figura 3.25. Assim, no serial monitor, ao pressionar a tecla T e clicar em “enviar” em um dos Arduínos, o processo de transmissão de dados será inicializado. No outro Arduino, ao pressionar a tecla R, inicializará o processo de recepção.

```

COM3
RF24/examples/GettingStarted/
ROLE: Pong back
*** PRESS 'T' to begin transmitting to the other node
STATUS      = 0x00 RX_DR=0 TX_DS=0 MAX_RT=0 RX_P_NO=0 TX_FULL=0
RX_ADDR_P0-1 = 0x00000000 0x00000000
RX_ADDR_P2-5 = 0x00 0x00 0x00 0x00
TX_ADDR      = 0x00000000
RX_PW_P0-6   = 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00
EH_AA        = 0x00
EH_RXADDR    = 0x00
RF_CH         = 0x00
RF_SETUP      = 0x00
CONFIG        = 0x00
DYNPD/FEATURE = 0x00 0x00
Data Rate     = 1MBPS
Mode          = nRF24L01
CRC Length    = Disabled
PA Power      = PA_MIN
  
```

Figura 3.25: Serial Monitor - Comunicação com módulo NRF24L01

Diante disso, os módulos responderam de forma satisfatória sendo colocados um do lado do outro. Entretanto, algumas outras etapas precisavam ser validadas, como: Distâncias diversas com obstáculos e sem obstáculos. Dessa forma, esses testes foram realizados em um dos prédios do CEFET-MG, campus Divinópolis. Em um dos testes, os módulos foram distanciados, em um corredor sem obstáculos, com uma variação de 10 a 70 metros entre eles. Nesse intervalo de distâncias, transmitiu-se as informações de um módulo

para o outro sem problemas. Porém, a medida que a distância aumentava a partir de 70 metros, verificou-se atrasos na recepção ou em distâncias maiores ainda a informação não conseguiu chegar.

Além disso, realizou-se esses testes com obstáculos também, transmitindo informações de uma sala para outra, por exemplo. Nessa validação, com a mesma variação de distâncias, percebeu-se que o módulo funcionava da mesma forma sem interferências, não alterando a informação recebida. Entretanto, do mesmo modo que no primeiro teste, a medida que a distância aumentava, dificultava-se a recepção dos dados.

Após os testes, verificou-se a viabilidade da utilização desse módulo no projeto. Como pontos positivos, analisou-se que o módulo possui um custo baixo de aquisição e uma fácil implementação, porém, a limitação de transmissão de dados em apenas distâncias pequenas e a limitação do módulo receptor receber dados de no máximo 4 transmissores, são alguns pontos negativos da sua utilização.

Dessa forma, buscou-se alternativas de módulos de comunicação sem fio, que tenham os mesmos pontos positivos do módulo NRF24L01, além de solucionar os pontos negativos. Assim, encontrou-se o módulo RFM69HCW, Figura 3.26, baseado na tecnologia LoRa, que é uma radio frequência que permite comunicação a longas distâncias, com consumo mínimo de energia. Baseia-se em uma rede com topologia estrela, similar a uma rede de telefonia celular.

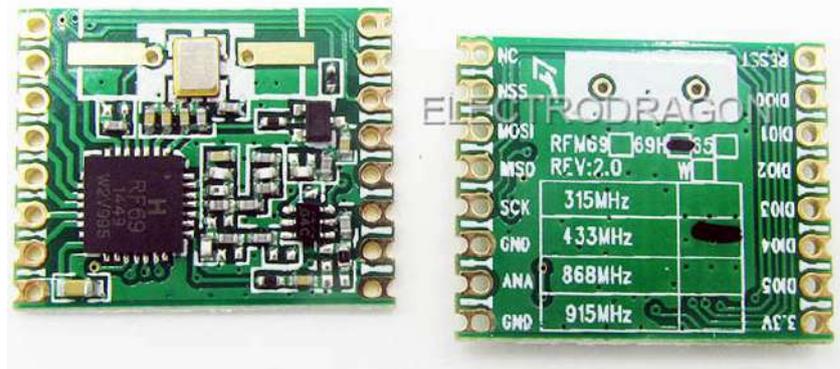


Figura 3.26: Módulo RFM69HCW. Adaptado de (ELECTRONICS, 2017).

Os módulos enviam e recebem dados de *Gateways* (receptores) específicos (similar as redes wifi, mas com alcance muito maior), que os encaminham via conexão IP para servidores locais ou remotos. Assim, essa é uma das vantagens desse módulo em relação ao NRF24L01. Além de alcançar distâncias que dependendo das condições de instalação (bloqueios por prédios, topologia de terrenos, etc) pode-se conseguir em áreas urbanas 3-4 Km de alcance, e em áreas rurais, até 12 Km (ou mais), o receptor desse módulo também não possui uma limitação, podendo enviar dados de texto ou binários entre dois ou centenas de módulos.

O módulo RFM69HCW não pode fazer nada por si só, assim como o NRF24L01, ele precisa ser conectado a um microcontrolador, como um Arduino. O RFM69HCW usa uma interface periférica síncrona de quatro fios (SPI) mais uma linha de interrupção. A maioria dos microcontroladores, incluindo o Arduino, oferecem uma interface SPI. Dessa forma, para fins de teste com esse módulo, realizou-se as conexões no Arduino, conforme a Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Conexões do módulo RFM69HCW

RFM69HCW			
Pino	Nome	Função	Ligação Arduino
3.3V	VCC	Alimentação	3.3V
O/MISO	MISO	SPI Slave Data Output	Pino 12
I/MOSI	MOSI	SPI Slave Data Input	Pino 11
C/SCK	SCK	SPI Clock	Pino 13
S/NSS	Slave Select	Select signal	Pino 10
0/DIO0	Digital I/O 0 RX interrupt	Received data	Pino 2
A/ANT	ANTENA	Antena de fio	Pino 9
G/GND	GND	Terra	GND

Na Figura 3.27, apresenta-se a montagem do módulo conectado ao Arduino UNO. Nota-se, que a antena é simples, sendo um corte de fio para o comprimento adequado e soldado ao pino A/ANT. O comprimento depende da frequência determinada, como será utilizada para testes a frequência de 433MHz, o comprimento indicado será de 164mm.

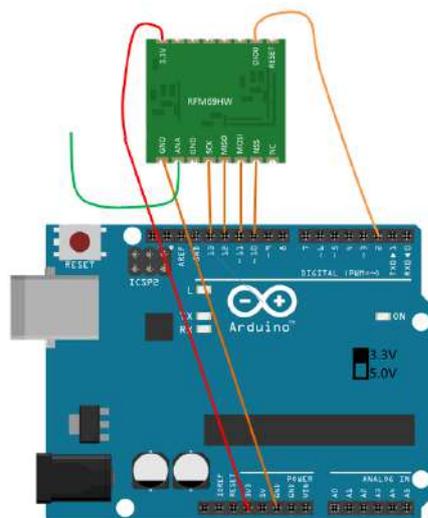


Figura 3.27: Módulo RFM69HCW conectado no Arduino UNO. Adaptado de (ELECTRONICS, 2017).

Assim, montou-se dois módulos com dois Arduínos, sendo, um o transmissor e o outro, o receptor. Dessa forma, repetiu-se o mesmo teste realizado para o módulo NRF24L01. O teste baseou-se, simplesmente, em transmitir uma informação e receber a informação

com uma confirmação, conforme Figura 3.28. Com isso, analisou-se o seu funcionamento alterando as distâncias e implementando obstáculos. Diante disso, esse módulo apresentou um alcance superior quando comparado ao NRF24L01, com uma abrangência de toda a área do CEFET-MG, campus Divinópolis. A partir disso, validou-se sua utilização no projeto.

```

COM3 (Arduino/Genuino Uno)

client mqtt not connected, trying to connect
connected
subscription OK to
home/MQTTto433/
Hey I got a callback
Receiving data by MQTT
home/MQTTto433/
1315156
Send received data by RF 433
1315156
Hey I got a callback
Receiving data by MQTT
home/MQTTto433/
1315156
Send received data by RF 433
1315156

```

Figura 3.28: Serial Monitor - Comunicação com módulo RFM69HCW.

Dessa forma, decidiu-se utilizar esse módulo pelas suas vantagens, além de possuir o mesmo preço de aquisição do NRF24L01. Com isso, projetou-se a placa do módulo RFM69HCW por meio de informações fornecidas pelo fabricante e que pode ser visto o esquemático na Figura 3.29.

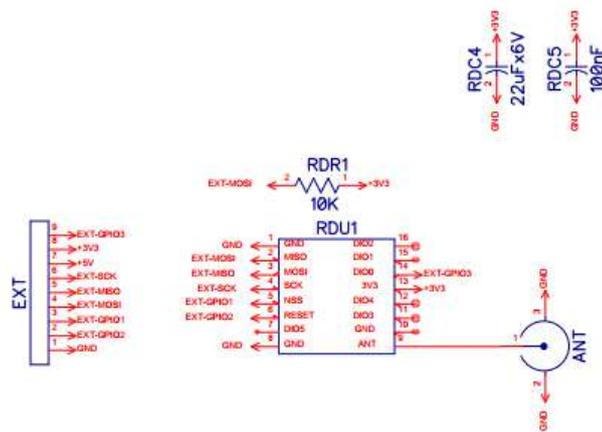


Figura 3.29: Esquemático Módulo RFM69HCW.

A partir do esquemático do módulo, gerou-se a PCB da Figura 3.30, com a finalidade de otimizar o tamanho da placa e conseqüentemente, reduzir os custos de fabricação. Além disso, o tamanho da placa será de 42x30mm, sendo abaixo das dimensões máximas estipuladas anteriormente.

Para a fabricação da placa, realizou-se orçamentos para adquirir seus componentes,

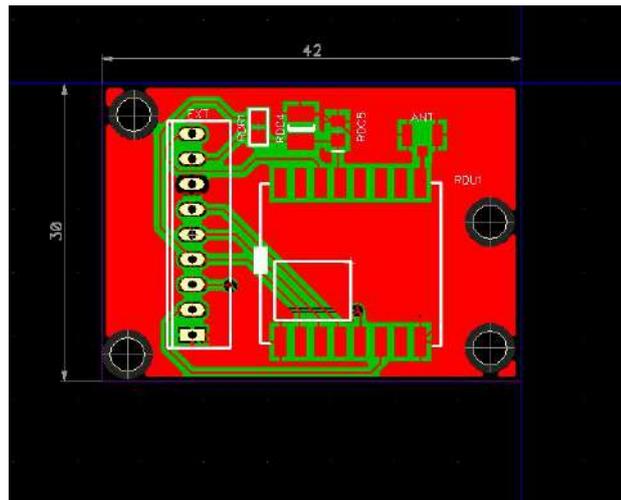


Figura 3.30: PCB Módulo RFM69HCW.

conforme Tabela 3.4. Por fim, o valor final para montagem desse módulo será de aproximadamente R\$ 22.00.

Tabela 3.4: Orçamentos dos componentes da placa do módulo RFM69HCW

Placa módulo RFM69HCW			
Componente	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
RFM69HCW 433Mhz	1	\$ 4.95	\$ 4.95
Capacitor Eletrolítico 22uF	1	\$ 0.37	\$ 0.37
Antena	1	\$ 1.19	\$ 1.19
Capacitor Cerâmica 100nF	1	\$ 0.02	\$ 0.02
Pino conector 9 vias	1	\$ 0.50	\$ 0.50
Resistor 10 Kohms	1	\$ 0.002	\$ 0.002
TOTAL			\$ 7.03

3.5.3 Módulo Principal

Para esse módulo, inicialmente, definiu-se alguns requisitos de projeto: Possuir entrada para alimentação, saída para sirene, conectores para os módulos, LCD e teclado.

Dessa forma, subdividiu-se o projeto em etapas. Como primeira etapa, realizou-se o projeto de alimentação do sistema. De início, verificou-se a viabilidade de projetar e construir uma fonte de alimentação, porém, o custo de produção teria um valor de R\$ 8.55 a mais do que a compra de uma fonte no mercado. Por se tratar de um componente de baixo custo, decidiu-se adquirir uma fonte de alimentação para converter a tensão da rede de 110/220V para um valor menor.

Para definir qual seria o valor de saída da fonte convertida em DC, analisou-se previamente todos os componentes que seriam utilizados no projeto. Diante disso, verificou-se que a sirene demanda um valor de tensão de 12V, de acordo com seu *datasheet*. Dessa

forma, a saída de acionamento a ser projetado para a sirene, demandaria o maior valor de tensão nesse projeto. Assim, definiu-se que a fonte a ser adquirida deveria possuir um valor de saída de 12V. Com isso, através de uma pesquisa de fontes no mercado e verificando a viabilidade dos custos, adquiriu-se a fonte da Figura 3.31, com entrada bivolt e saída de 12V e 1A.

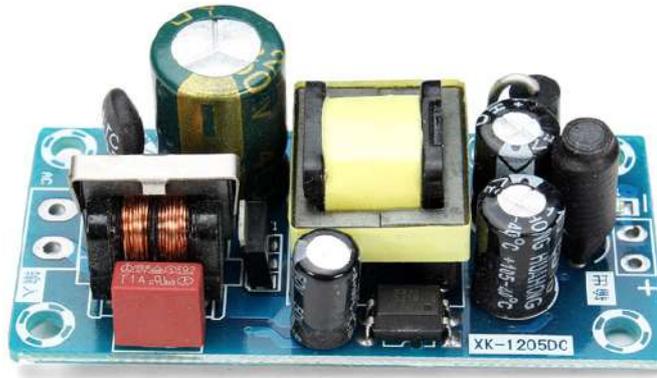


Figura 3.31: Fonte de alimentação AC/DC 12V 1A. Adaptado de (ELDOER, 2016).

Para uma maior redução de custos, adquiriu-se a placa da fonte aberta, sem um invólucro de proteção, pois, planeja-se inserir esse módulo de alimentação juntamente com os outros módulos dentro da caixa de proteção do dispositivo. Dessa forma, apenas o cabo de alimentação que conectará a rede na fonte ficará na parte externa do dispositivo, sendo, disponibilizado um furo na base da caixa para passar o cabeamento e este isolado com prensa-cabos para evitar que poeira e jatos d'água entre no dispositivo.

A partir disso, acrescentou-se um conector na placa principal para alimentação da fonte e implementou-se um diodo para estabilizar o sinal de entrada. Como nem todos os componentes desse circuito irá operar em 12V, necessita-se acrescentar reguladores de tensão. Dessa forma, será utilizado o circuito integrado LM2576, com tensão de saída fixada em 5V através do sistema de fonte chaveada, na modalidade “*step down*”, onde uma tensão maior de entrada é convertida em uma tensão menor à saída. Com isso, na Figura 3.32 apresenta-se o circuito do LM2576, fornecido no seu *datasheet*.

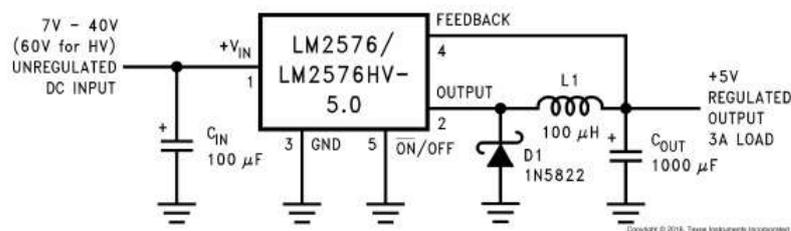


Figura 3.32: Circuito de funcionamento do regulador de tensão LM2576. Adaptado do datasheet (INSTRUMENTS, 2016b).

Diante da Figura 3.32, analisou-se que para manter a estabilidade, o pino de entrada

do regulador deve estar desacoplado por um capacitor eletrolítico. Além disso, o capacitor C_{out} , localizado na saída do regulador, determinará a quantidade de tensão de “ripple”(ondulação) que aparecerá na saída do sistema. Para operação normal, o pino ON/OFF deve ser aterrado ou levado a uma tensão de nível TTL baixo. Enquanto isso, o diodo do circuito provê uma via de retorno para a corrente de carga quando a chave do LM2575 está em OFF. Por fim, o indutor de potência será utilizado para armazenar energia, proporcionar uma menor perda de sinal na concepção do sistema e filtrar possíveis ruídos.

Além da tensão de 5V fornecida pelo regulador de tensão LM2575, será necessário uma tensão de 3.3V. Com isso, será implementado no projeto o MIC5205, que é um regulador de tensão linear e eficiente com saída de ruído ultra baixo. Assim, desenvolveu-se o circuito por meio da Figura 3.33 identificado no *datasheet* do MIC5205.

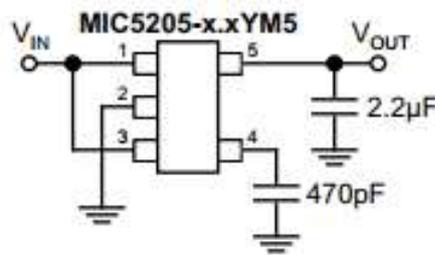


Figura 3.33: Circuito de funcionamento do regulador de tensão MIC5205. Adaptado do *datasheet* (MICROCHIP, 2017).

Diante da Figura 3.33, verificou-se a necessidade de um capacitor de saída entre OUT e GND para evitar a oscilação, além do *datasheet* sugerir conectar um capacitor externo de 470 pF entre GND e o pino 4 para reduzir o ruído de saída. Com isso, incluiu todos esses circuitos em apenas um no *DipTrace*. Dessa forma, o esquemático de alimentação completo, pode ser visto na Figura 3.34.

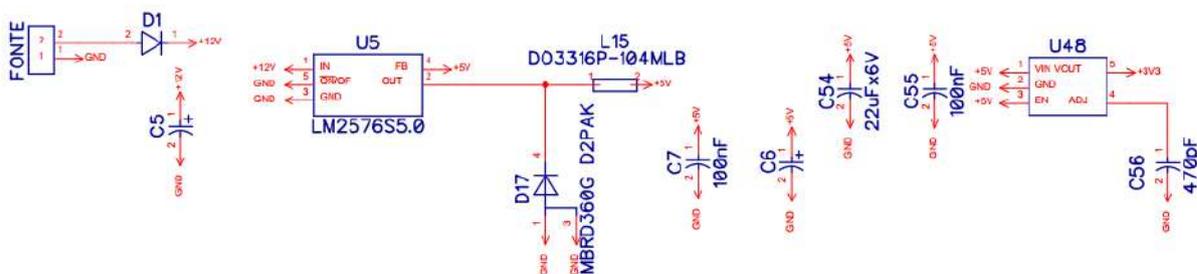


Figura 3.34: Esquemático do circuito de alimentação completo.

Em seguida, projetou-se o circuito do visor LCD 16x2, de acordo com seu *datasheet* que fornece as conexões dos pinos, conforme Figura 3.35. Esse LCD possui 2 linhas de 16

caracteres paralelos, uma luz de fundo azul e usa a interface comum HD44780, de modo que o código da amostra de interface está amplamente disponível para uma variedade de microcontroladores.

PIN CONNECTIONS			
PIN	Symbol	Level	Function
1	VSS		GND(0V)
2	VDD		Supply Voltage for Logic(+5V)
3	V0		Power supply for LCD
4	RS	H/L	H: Data# L: Instruction Code
5	R/W	H/L	H: Read# L: Write
6	E	H/L	Enable Signal
7	DB0	H/L	Data Bus Line
8	DB1	H/L	
9	DB2	H/L	
10	DB3	H/L	
11	DB4	H/L	
12	DB5	H/L	
13	DB6	H/L	
14	DB7	H/L	
15	BL1		Backlight Power(+5V)
16	BL2		Backlight Power(0V)

Figura 3.35: Conexões dos pinos do LCD 16x2.

Desse modo, o visor deverá ser alimentado no pino 2 por 5V e os sinais de E/S FPGA serão alimentados por 3.3V, ambos fornecido pelos reguladores de tensão. No entanto, os níveis de saída do FPGA serão reconhecidos como níveis de lógica baixos ou baixos válidos pelo LCD. Assim, o controlador do LCD aceitará níveis de sinal TTL de 5V e as saídas LVCMOS de 3.3V fornecidas pelo FPGA atenderão aos requisitos de nível de tensão TTL de 5V. Para isso, implementou-se resistores de 10kΩ nas linhas de dados para impedir o excesso de intensidade nos pinos de E/S FPGA quando o LCD possuir um alto valor lógico. Dessa forma, o LCD acionará as linhas de dados quando o nível do pino RW é Alto.

Além disso, acrescentou-se um potenciômetro cuja saída está conectada ao pino 3 (V0) para permitir a definição do contraste para visualização ideal da tela. A luz de fundo desse LCD é composta por LEDs em série. Assim, será utilizado o transistor NPN BC846ALT1G controlado por uma porta PWM do microcontrolador para alcançar o escurecimento variável da luz de fundo se assim desejar. Para sua programação, o endereço DDRAM 0x00 corresponde ao primeiro caractere da linha superior, o endereço 0x0F corresponde ao último caractere da linha superior, enquanto isso, o endereço 0x40 corresponde ao primeiro caractere da segunda linha e o endereço 0x4F corresponde ao último caractere da segunda linha. Como teste, simulou-se no *Proteus* um esquemático do visor para apresentar informações de detecção. Na Figura 3.36 é apresentado a simulação realizada.

Após a simulação, desenvolveu-se o circuito do *display* como pode ser visto na Figura 3.37. Além disso, no intuito de tornar o posicionamento do *display* flexível, não

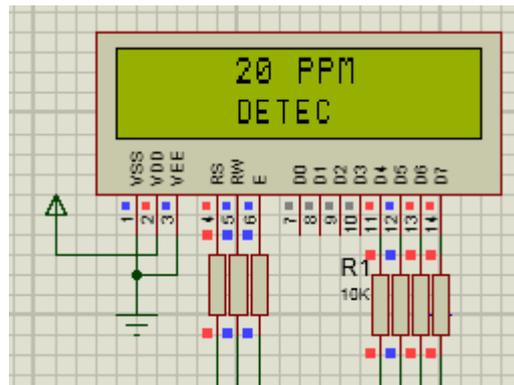


Figura 3.36: Teste no *Proteus* do *display* LCD 16x2.

implementou-se o visor diretamente na placa, sendo incluído no circuito um conector de 16 pinos para conectar o visor LCD por cabos.

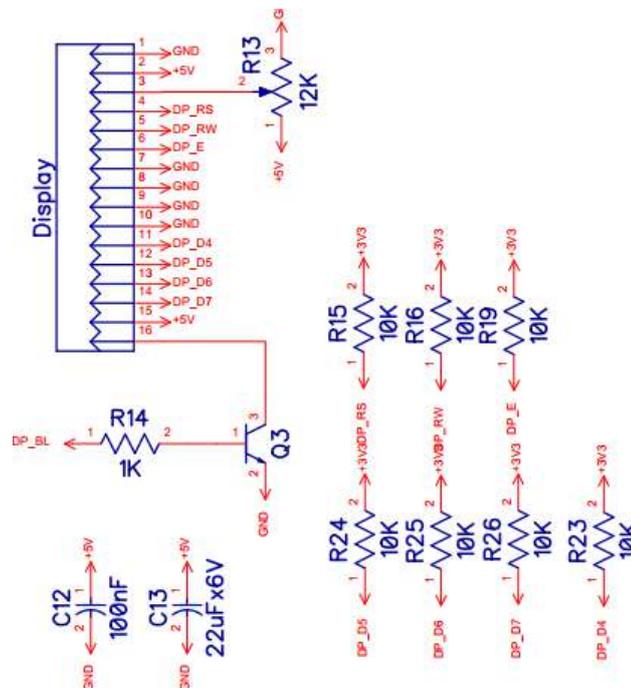


Figura 3.37: Esquemático do *display* LCD 16x2.

Em continuidade ao desenvolvimento do projeto, nota-se que é comum na montagem de circuitos eletrônicos o uso de LEDs, para por exemplo indicar que o circuito está ligado, ou no caso desse projeto para indicar alarmes. Para aproveitar ao máximo o brilho do LED, sem o perigo de causar danos ao componente, calculou-se o valor de resistência adequada. Para calcular o valor de cada resistor é necessário conhecer a tensão da fonte de alimentação, a tensão suportada pelo LED em volts e a corrente suportada pelo LED em amperes. A fórmula para calcular o resistor adequado para cada LED é representado na Equação 3.4.

$$R = \frac{V_{in} - V_{led}}{I} \quad (3.4)$$

Sendo:

- **R** a resistência em ohms do resistor adequado para o LED;
- V_{in} a tensão em volts da fonte de alimentação que será aplicado no LED;
- V_{led} a tensão em volts do LED; e
- **I** a corrente do LED em amperes.

Analisando o *datasheet* do LED, verificou-se que a tensão de funcionamento é de 1.8V e a corrente de 10mA. Como essa parte do circuito será conectada ao 5V, aplicou-se os valores acima na Equação 3.4 e encontrou um valor de resistência de 320Ω. Porém, esse valor de resistência é difícil de ser encontrada para aquisição. Diante disso, decidiu-se utilizar um valor próximo dessa resistência, sendo de 330Ω. Assim, desenvolveu-se o circuito da Figura 3.38, sendo alimentado por 5V e conectado a 3 portas do microcontrolador.

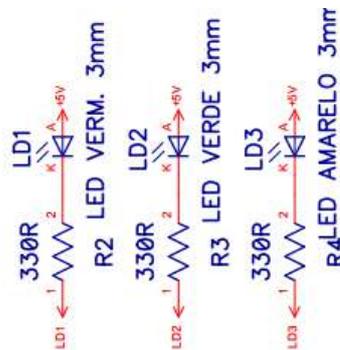


Figura 3.38: Esquemático do circuito de LEDs para alarme.

Para implementar o teclado de membrana de 5 botões, da Figura 3.39, necessitou-se avaliar o seu *datasheet*.

Diante disso, sugere-se conectar entre as portas definidas no microcontrolador para essa finalidade e para cada pino, a utilização de um resistor de 330Ω, com exceção do pino 6 que é conectado somente ao GND. Além disso, do mesmo modo que no visor, acrescentou-se no circuito do teclado um conector de 6 pinos para ser conectado por cabos, e assim, manter a flexibilidade do posicionamento do teclado na caixa de proteção, visto que, será mantido no lado externo da caixa. O esquemático desenvolvido referente ao teclado é apresentado na Figura 3.40.

Inicialmente, pretendia-se implementar dois tipos de comunicação no dispositivo, sendo um cabeado e a outra sem fio. Essa ideia surgiu para garantir que em ambientes que



Figura 3.39: Teclado De Membrana 5 Botões. Adaptado de (EGOTO, 2017).

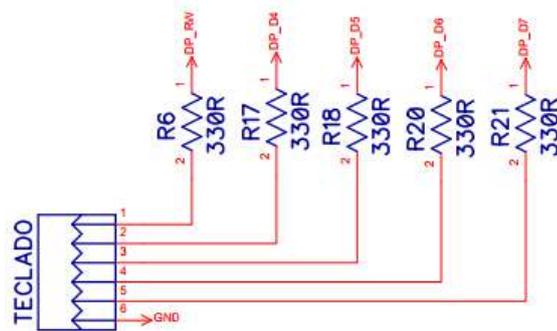


Figura 3.40: Esquemático do circuito do teclado.

viesses a ter problemas com interferências de algum meio, teria-se a opção de utilizar o meio de comunicação cabeado como solução. Um exemplo disso, seria a instalação desse dispositivo dentro de câmaras de refrigeração que possuem em suas paredes materiais isolantes. Desse modo, o sinal via *wireless* possivelmente não conseguirá ultrapassar essa barreira, devido a formação de uma blindagem eletrostática conhecida como gaiola de Faraday. Assim, com a implementação de uma comunicação cabeada, seria possível levar o sinal de dentro da câmara para o lado externo, sem sofrer com interferências. Porém, por questões de prazos de desenvolvimento do projeto, não acrescentou-se essa comunicação, entretanto, inicializou-se um esquemático com conexão para cabeamento RS-485 para implementar essa comunicação posteriormente. Na Figura 3.41 pode ser visto essa conexão disponibilizada.



Figura 3.41: Conexão para comunicação cabeado RS-485.

Em seguida, desenvolveu-se o projeto do circuito do alarme sonoro, sendo uma sirene Piezo de tom único. A sirene possui alimentação de 12V e consumo de 8mA de corrente, além de operar com frequência de 2.8kHz e intensidade de 100dB. Diante disso, esse componente é ilustrado na Figura 3.42.



Figura 3.42: Sirene Piezo de 12V. Adaptado do datasheet (SOBERTON, 2017).

A partir disso, construiu-se o circuito de alarme usando o componente BCV26, que é um transistor BJT PNP que suporta uma tensão máxima de 40V no seu emissor. Dessa forma, utilizou-se como alimentação os 12V, para que excite a sirene com bom rendimento.

Assim, inseriu-se dois resistores de $1k\Omega$ conectado na base do BCV26 para limitar a corrente que vai para a sirene. Nessa parte é importante descrever a importância de ter

uma resistência nessa posição, pois, caso não tenha, o transistor pode queimar por causa da alta corrente gerada.

De acordo com seu *datasheet*, o circuito integrado do BCV26 possui dois transistores conectados internamente entre si. Dessa forma, existe uma corrente na base do transistor, produzida a partir da fonte de tensão de entrada. A corrente da fonte de tensão de entrada é necessária para disparar o circuito. E a corrente da saída do BCV26 é necessária para manter o circuito travado. Dessa forma, o transistor fornecerá a corrente contínua para que permaneça continuamente ligado, uma vez que é inicialmente alimentado pela fonte de tensão de entrada. Com isso, a sirene juntamente com o resistor de 47Ω formarão a saída do circuito.

Assim, o circuito funcionará com alimentação na base do transistor, que consequentemente, será acionado. Uma vez ligado, a corrente do coletor flui em direção a carga, que neste caso é a sirene. A partir disso, implementou-se esse circuito no *Proteus* para simular seu funcionamento. Essa simulação pode ser vista na Figura 3.43.

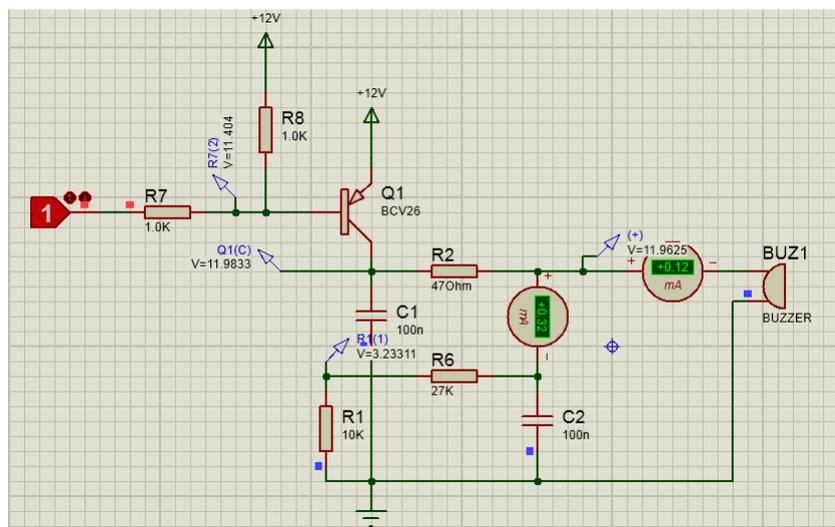


Figura 3.43: Simulação no *Proteus* do funcionamento da Sirene.

Assim, implementou-se um capacitor de 100nF com a finalidade de melhorar a estabilidade e evitar problemas, como oscilações. Nesse caso, a oscilação pode distorcer os sinais de som, tornando-os pouco claros ou ininteligíveis. Acrescentou-se também, um resistor de 47Ω , no intuito de reduzir a corrente de entrada na sirene. Além disso, o *datasheet* da sirene indica a utilização de um circuito de proteção contra curto circuito, que o mesmo apresenta em seu documento. Dessa forma, para a simulação, representou-se o comando a ser enviado pelo microcontrolador através de um bloco de estado de lógica. Sendo assim, quando o nível lógico for igual a 1, a sirene será ativada, e caso contrário, a sirene será desativada. Por fim, a sirene funcionou corretamente na simulação com um consumo de corrente de 0.12mA . A partir disso, desenvolveu-se o circuito no *DipTrace*, como pode ser

visto na Figura 3.44. Na saída do esquemático do circuito, implementou-se um conector de 2 vias para conectar posteriormente a sirene.

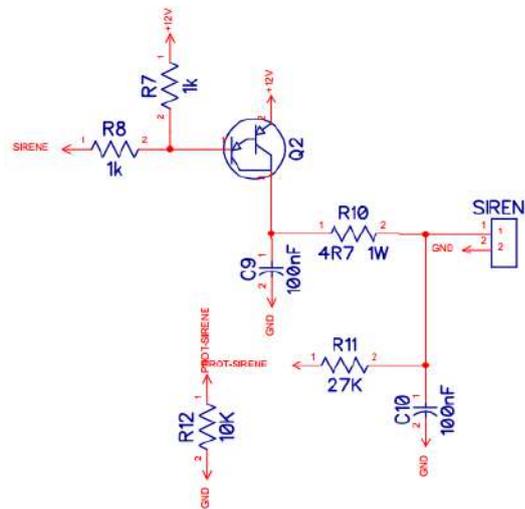


Figura 3.44: Esquemático para acionamento da sirene.

Por fim, após o desenvolvimento de todos os requisitos propostos inicialmente, restou inserir o microcontrolador escolhido para conectar todos os circuitos. Inicialmente, definiu-se como microcontrolador o PIC 24FJ128GC006 da Microchip. Este modelo foi escolhido devido à literatura específica existente sobre ele e também pelos recursos adicionais presentes na família 24F como, por exemplo, uma seleção completa de periféricos analógicos avançados aos seus recursos digitais existentes, recursos de ultra baixa potência, DMA (*Direct Memory Access*) para periféricos, USB *On-The-Go* (OTG) e um controlador e *driver* de LCD incorporados.

Por meio dos pré-requisitos definidos e busca por orçamentos, verificou-se que o microcontrolador escolhido inicialmente, o PIC 24FJ128GC006, possuía um valor de 12 dólares, não sendo encontrado no Brasil para aquisição direta, assim sendo necessário a realização da importação. Dessa forma, por meio de um cálculo simples de tributação, mais frete e conversão para moeda real, notou-se que esse componente estava com um custo muito alto para um projeto que visa a redução de custo de desenvolvimento.

Com isso, escolheu-se o microcontrolador STM32F030C8T6TR (ARM-M0) com 64 *Kbytes Flash* e 48 MHz CPU. Esse microcontrolador é mais simples, não possuindo tantas funcionalidades e aplicações como o primeiro, porém, satisfaz para a aplicação do sistema de detecção de amônia proposto. Além disso, o ARM-M0 possuía um valor de 2.82 dólares para importação. Dessa forma, a mudança de microcontrolador se justifica principalmente por questão de redução de custo, diminuindo o valor final de compra em aproximadamente 4 vezes.

Dessa forma, na Figura 3.45 é apresentado o circuito com o microcontrolador STM32F030C8T

e suas respectivas ligações. Assim, para a alimentação do microcontrolador será utilizado a tensão de 3.3V por indicação do *datasheet*. Além disso, para cada par de fonte de alimentação de energia (VDD/VSS, VDDA/VSSA, etc.) acrescentou-se capacitores de cerâmica filtrantes (22uF e 100nF), para garantir a boa funcionalidade do dispositivo.

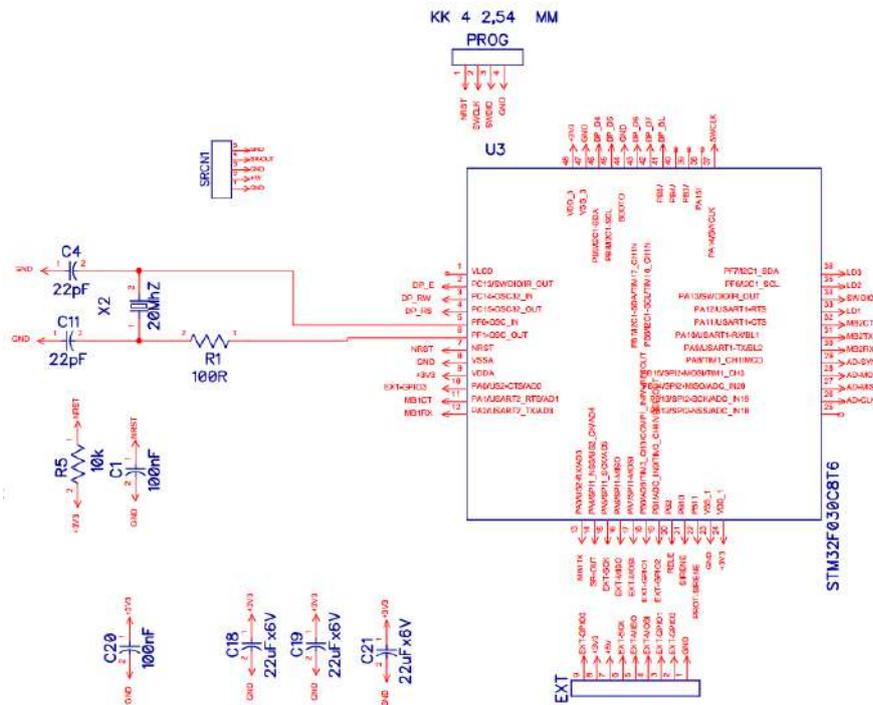


Figura 3.45: Esquemático do microcontrolador STM32F030C8T.

A partir do *datasheet* do microcontrolador, acrescentou-se também um circuito para o relógio externo de alta velocidade gerado a partir de um de cristal 20 MHz. Assim, o cristal e os capacitores de carga irão minimizar a distorção de saída e o tempo de estabilização de inicialização.

Outro ponto implementado, são os conectores dos módulos de rádio e do sensor que serão conectados ao microcontrolador. Além disso, acrescentou-se mais um conector, sendo de 4 pinos, com a finalidade de inserir ou alterar as programações no microcontrolador. Por fim, realizou-se as ligações de todos os circuitos apresentado até o momento no microcontrolador e montou-se a PCB do circuito principal. Dessa forma, a Figura 3.46 apresenta o modelo em 3D do módulo principal e a Figura 3.47 a PCB referente para fabricação.

Como pode ser visto nas Figuras 3.46 e 3.47, respeitou-se as medidas estipuladas inicialmente, devido ao tamanho do gabinete de proteção, sendo o tamanho da placa de 95x73mm. Além disso, optou-se por implementar componentes SMD nessa placa com a finalidade de reduzir custos na compra dos componentes utilizados. Dessa forma, na Tabela 3.5 apresenta-se os valores de orçamentos dos componentes da placa principal, bem

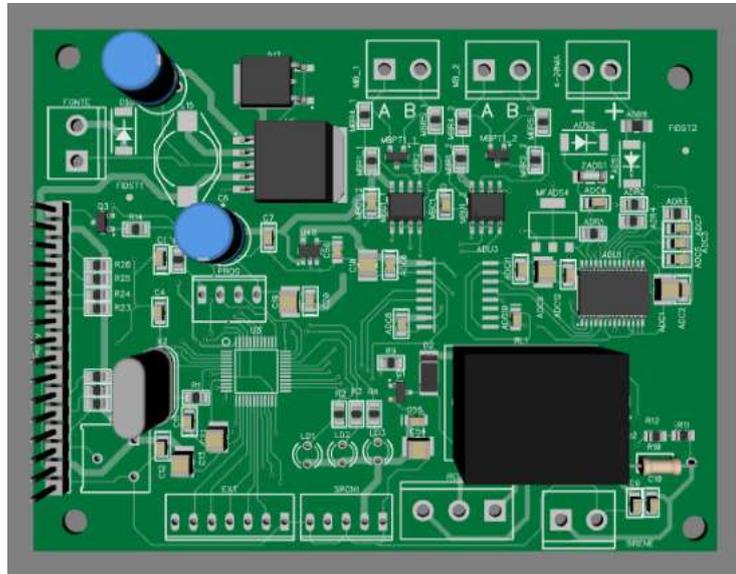


Figura 3.46: Modelo em 3D do módulo principal.

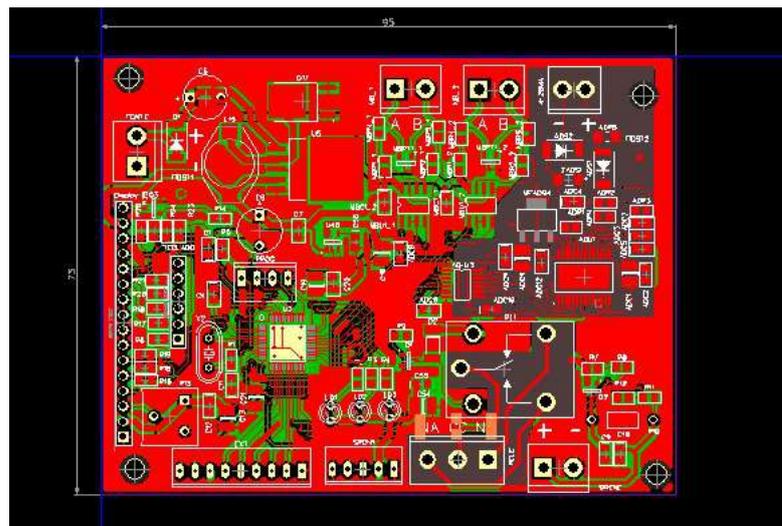


Figura 3.47: PCB do módulo principal.

como o valor total.

Tabela 3.5: Orçamentos dos componentes da placa principal

Placa Principal (CPU)			
Componente	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Diodo 220uF 35V	1	\$ 0.29	\$ 0.29
Diodo 25V 200 uA	1	\$ 0.048	\$ 0.048
Capacitor Cerâmica 22pF	2	\$ 0.05	\$ 0.10
Capacitor Alumínio 220uF	2	\$ 0.42	\$ 0.84
Capacitor Tântalo 22uF	5	\$ 0.37	\$ 1.85
Capacitor Cerâmica 100nF	9	\$ 0.02	\$ 0.18
Capacitor Cerâmica 470pF	1	\$ 0.09	\$ 0.09
MBRD360G	1	\$ 0.37	\$ 0.37
Pino conector 16 vias	1	\$ 1.34	\$ 1.34
Pino conector 9 vias	1	\$ 0.50	\$ 0.50
Pino conector 2 vias	4	\$ 0.26	\$ 1.04
Indutor	1	\$ 1.28	\$ 1.28
Led Vermelho	1	\$ 0.17	\$ 0.17
Led Amarelo	1	\$ 0.17	\$ 0.17
Led verde	1	\$ 0.12	\$ 0.12
Resistor 680 ohms	4	\$ 0.02	\$ 0.08
Resistor 10 ohms	4	\$ 0.02	\$ 0.08
Resistor 100 ohms	1	\$ 0.02	\$ 0.02
Resistor 330 ohms	8	\$ 0.02	\$ 0.16
Resistor 1 kohms	4	\$ 0.02	\$ 0.08
Resistor 47 kohms	1	\$ 0.08	\$ 0.08
Resistor 27 kohms	1	\$ 0.02	\$ 0.02
Resistor 10 kohms	8	\$ 0.002	\$ 0.016
Trimpont 10k	1	\$ 1.45	\$ 1.45
Pino conector 4 vias	1	\$ 0.17	\$ 0.17
Pino receptor 3 vias	1	\$ 0.63	\$ 0.63
Pino conector 5 vias	1	\$ 0.23	\$ 0.23
Pino conector 6 vias	1	\$ 0.24	\$ 0.24
NPN Bipolar Transistor	2	\$ 0.05	\$ 0.10
PNP Transistor	1	\$ 0.02	\$ 0.02
STM32F030C8T6	1	\$ 2.02	\$ 2.02
LM2576S5	1	\$ 3.16	\$ 3.16
Cristal	1	\$ 0.29	\$ 0.29
Zener 4V7 1W	1	\$ 0.05	\$ 0.05
Visor LCD	1	\$ 3.20	\$ 3.20
Membrana Teclado	1	\$ 4.56	\$ 4.56
Sirene	1	\$ 3.55	\$ 3.55
Fonte	1	\$ 3.60	\$ 3.60
TOTAL			\$ 31.91

Do mesmo modo dos outros módulos, pelo nível de complexidade de fabricação das placas por meios manuais e necessitar de camadas isolantes, decidiu-se encaminhar a

fabricação das placas para empresas especializadas.

3.6 Desenvolvimento do Software

O projeto consiste no desenvolvimento de um software que permite ao usuário verificar as informações recebidas da placa de detecção de amônia, utilizando uma interface simples e intuitiva.

Assim, definiu-se que o software seria composto por uma *frontend* (interface de usuário, nomeado *Lachesis*). Assim, possibilitará o acesso remoto e facilitará o acesso ao hardware. Para melhor organização do software, manter legível e capaz de ser modificado no futuro, subdividiu-se o *frontend* em módulos, como *communication*, responsável pelo login e troca de mensagens com o servidor, e *hardware*, responsável pela configuração do hardware no servidor. Esses módulos, no entanto, não são isolados e acessam APIs uns dos outros diretamente, que é um conjunto de rotinas e padrões de programação para acesso a um aplicativo de software ou plataforma baseado na *Web*.

3.6.1 Definição das tecnologias

De início, analisou-se a implementação por meio da linguagem de programação *Python*. No entanto, tendo em vista a riqueza de tecnologias disponíveis atualmente, decidiu-se fazer o *frontend* utilizando tecnologias *web* (*HTML5*, *CSS* e *JavaScript*). Essa escolha baseia-se no fato que essas tecnologias permitem a criação de interfaces ricas, dinâmicas e com estilo personalizado de forma simples, o que não seria possível ou muito difícil utilizando tecnologias nativas.

3.6.2 Frontend

Uma vez decidido que o *frontend* seria desenvolvido com tecnologias *web*, iniciou-se uma pesquisa para decidir qual a melhor tecnologia de suporte. Assim, descartou-se a implementação de um servidor *HTTP* local e utilização do *browser* do usuário por ser pouco profissional e requerer o desenvolvimento para *browsers* variados, além de restringir o código que pode ser executado por questões de segurança.

Dessa forma, realizou-se um levantamento de tecnologias que permitissem empacotar um navegador minimalista junto ao projeto, de forma a se limitar as tecnologias envolvidas (*web engines*) e permitir maior liberdade na execução do *JavaScript*. Esse tipo de *framework* permite que a interface *web* seja enclausurada em uma janela própria, o que passa mais confiança ao usuário.

Com base nesses critérios, vários *frameworks* foram encontrados. Nenhum deles, no entanto, permite a criação de aplicativos para *desktop* e *mobile* ao mesmo tempo para

uma futura implementação. Diante disso, escolheu-se o *Electron* da *GitHub*. O *Electron* enclausura o navegador *Chromium* (projeto base do *Google Chrome*) e o *NodeJS* (*runtime Javascript*) para executar aplicativos com tecnologias *web* em *desktop*, além de possuir sistemas que utilizam a *WebKit* como *engine*, a mesma do *Chromium*.

Devido a necessidade de utilizar dois *frameworks* no desenvolvimento do *frontend*, desenvolveu-se um esquema de compilação para manter a base de código do projeto única, instalando os arquivos compilados no lugar certo do projeto *desktop* antes de executar e/ou criar os pacotes de distribuição.

A compilação é necessária, pois as linguagens *CSS* e *JavaScript* não são usadas diretamente. O *software* é escrito utilizando *SCSS/SASS*, que compila para *CSS*, e *CoffeeScript*, que compila para *JavaScript*. O motivo para tal é a maior facilidade de programar com essas linguagens.

Uma vez necessário um processo de compilação, o mesmo foi estendido para oferecer outras funções. Esse processo, chamado *build* (construção) em inglês, consiste na compilação dos códigos *SCSS* e *CoffeeScript*, na criação do ícone para *desktop* a partir de uma imagem *SVG*, na instalação de dependências *JavaScript*, na minificação do *HTML*, *CSS* e *JavaScript* finais e na cópia de todos os produtos para seu respectivo diretório no projeto *Electron*.

O empacotamento e distribuição do *software* é algo importante e muitas vezes ignorado no início do projeto. Isso pode, no entanto, causar problemas no futuro. Por isso, levou-se em conta esses fatores na escolha dos *frameworks*. O projeto *Electron* não oferece solução própria, mas existem *plug-ins* que o fazem. Diante disso, escolheu-se o *plug-in electron-builder* por ser configurável e automatizar o processo de empacotamento pra *Linux*, *Windows*, *macOS* e *BSD*. O *plug-in* também permite a criação de formas de atualização automática do *software*. Entretanto, isso requer um servidor e pode ser estudado e implementado posteriormente.

Esse projeto depende da biblioteca *NodeJS net* em sua versão *desktop*. A *NodeJS* utiliza um sistema chamado *npm* para gerenciamento de dependências, que é utilizado para gerenciar as dependências do sistema de *build*. Inicialmente as dependências previstas para a interface são a biblioteca *jQuery*, que facilita o desenvolvimento com *JavaScript* e o *framework*.

3.6.3 Teste Software

Em seguida, implementou-se o software na prática para verificação das telas de apresentação. Dessa forma, não configurou-se funcionalidades na primeira versão do software. Sendo assim, programou-se três submenus para acesso, sendo: Configuração, Sensores e Análise. Na Figura 3.48, apresenta-se a tela de configurações dos dispositivos. Nesse

ambiente, informa-se o registro ID de cada dispositivo com a finalidade de identificar de qual dispositivo as informações estão sendo recebidas pelo *software*. Além disso, nas configurações poderá ser informado o local que o dispositivo está instalado para facilitar a identificação.



Figura 3.48: Teste do software no menu configurações.

Na opção sensores, conforme Figura 3.49, pode-se visualizar todos os dispositivos instalados, além de apresentar as informações referentes a captações de gás. Nesse caso, foram gerados valores aleatórios para visualização da tela, sendo, o indicativo verde para informar que não tem problemas e o indicativo vermelho para informar que existe um vazamento naquele ponto.

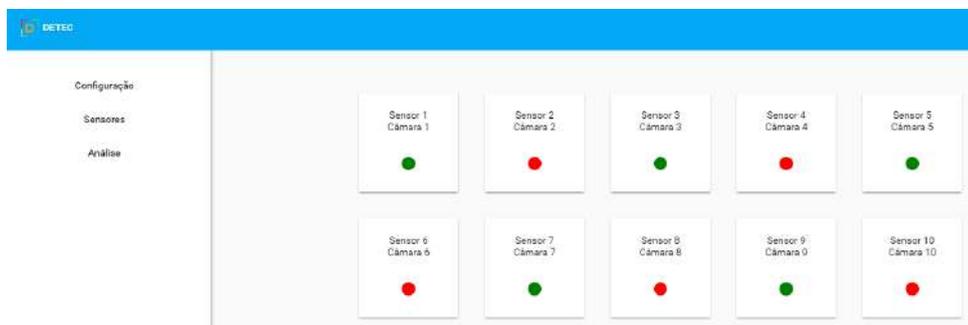


Figura 3.49: Teste do software no menu sensores.

Por fim, na última opção, análise, apresenta-se graficamente as informações de concentrações de gás em um determinado período de tempo. Diante disso, na Figura 3.50, gerou-se informações aleatórias para visualização do formato do gráfico. Assim, nesse teste verificou-se registros de dispositivos, além das formas de apresentação dos dados recebidos no *software*.

A partir da primeira versão do *software* e validação das suas telas, inicializou-se a implementação da sua segunda versão. Desse modo, o primeiro ponto a ser identificado para realizar nessa nova versão, é de tornar o software funcional. Assim, implementou as configurações no sistema. Inicialmente, para acessar o *software* é necessário conectar um Arduino no USB. Na Figura 3.51, tem-se a representação do acesso ao sistema.



Figura 3.50: Teste do software no menu análise.

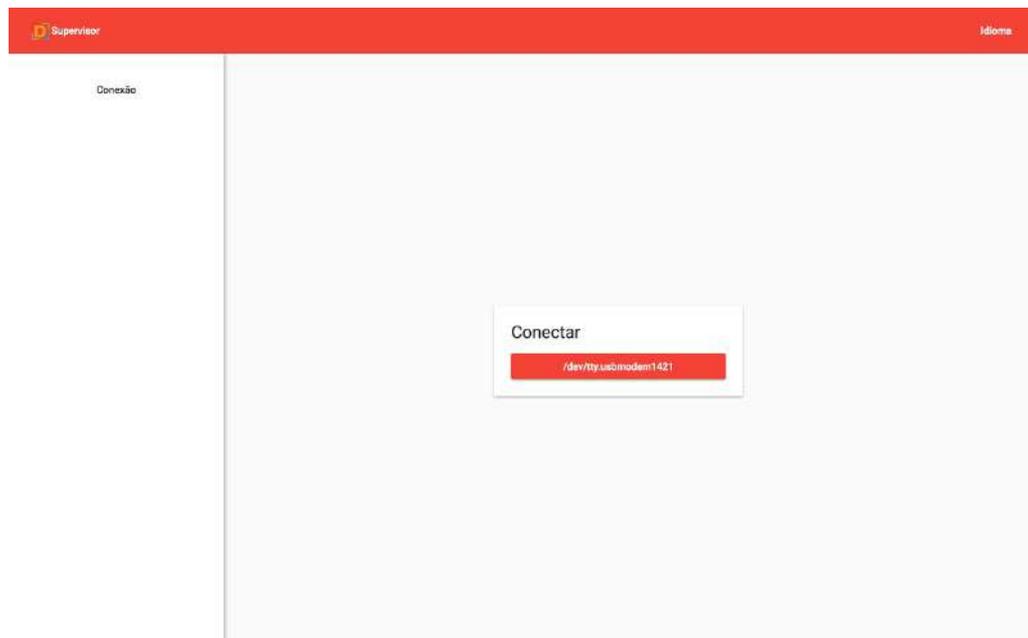


Figura 3.51: Acesso ao sistema com a conexão do Arduino.

Essa aplicação, simula como se estivesse conectando o módulo de comunicação receptor no computador para receber os dados dos dispositivos. Para isso, desenvolveu-se um código em Arduíno que insere dados no software. Esse código pode ser visto no Apêndice B.1. Assim, ao reconhecer o programa e a conexão do Arduíno, o software permite acesso as suas funcionalidades.

Além disso, programou-se o *software* para salvar os dados de identificação referente a cada dispositivo inserido. Desse modo, possibilitou-se inserir o número referente ao sensor e o local que o dispositivo de detecção será instalado. Na Figura 3.52, registrou-se 3 dispositivos, sendo identificados por número e apresentando informação dos locais que estão instalados.

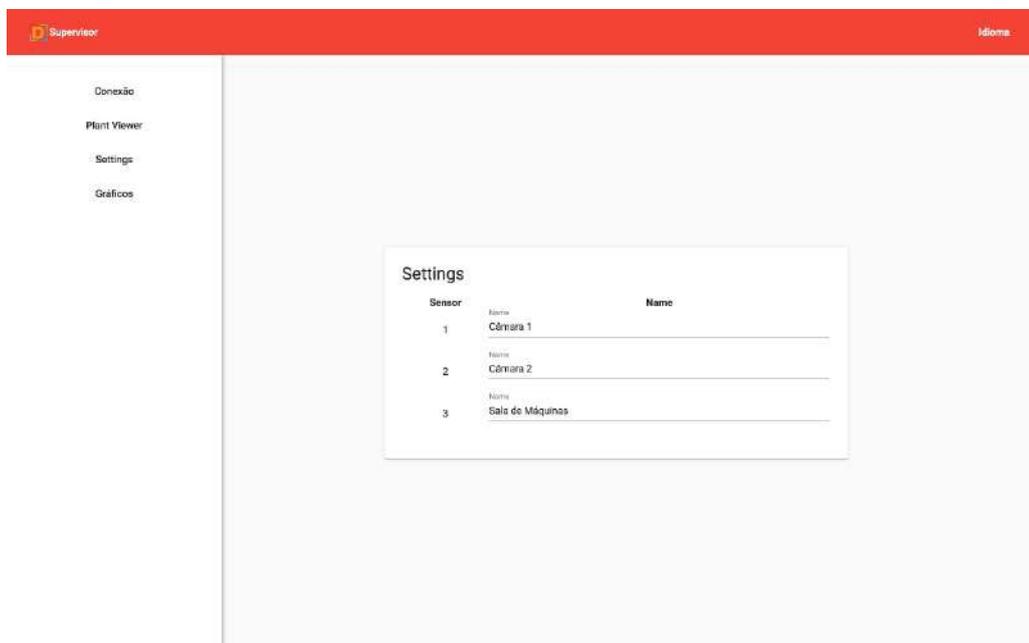


Figura 3.52: Registro dos dispositivos no *software*.

A partir do código em Arduíno, além de permitir o acesso ao software, configurou-se ele para gerar valores de concentrações de gás no software. Assim, esse valores variam de 0 a 100PPM no formato de sinal senoidal. Desse modo, esses valores são apresentados de forma mais organizada, que na primeira versão, no menu de gráficos do sistema. Além disso, as leituras dos dados são realizadas a cada segundo pelo software em tempo real. Porém, por questões de otimização do processamento de dados, essas informações são apresentadas de 10 em 10 segundos na tela. Assim, para uma melhor visualização, a Figura 3.53 ilustra essa funcionalidade.

Após essas implementações, finalizou-se o desenvolvimento do software para esse trabalho, estando de acordo com o cronograma proposto inicialmente.

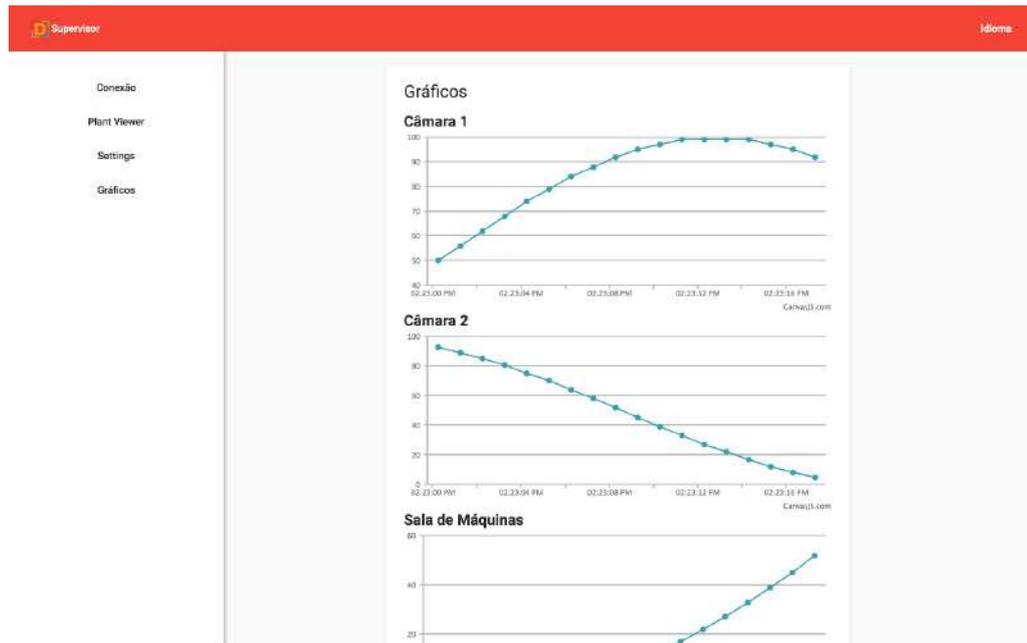


Figura 3.53: Simulação de sinais senoidais no software.

3.7 Invólucro de Proteção

Uma das principais características construtivas de um equipamento elétrico a ser analisada em um projeto, instalação ou manutenção é o grau de proteção. A proteção de um produto bem projetada é capaz de evitar danos ao equipamento, pela penetração de corpos sólidos estranhos ou água, que muitas vezes pode prejudicar o seu funcionamento. Para esse projeto desenvolveu-se um invólucro com grau de proteção IP65, sendo, totalmente protegido contra poeira e contra jatos d'água.

Diante disso, realizou-se o projeto no *Software SolidWorks* na versão para estudante. Assim, desenvolveu-se um gabinete para atender os requisitos, tais como: Corte para o Led, furos para o sensor, saídas de cabos de alimentação e, furos para leds no diâmetro certo, além de não ultrapassar a medida máxima estipulada. Dessa forma, a primeira versão da caixa pode ser vista na Figura 3.54.

Inicialmente, planejou-se imprimir esse gabinete na impressora 3D, porém, o alto custo de impressão inviabilizou esse projeto. A média dos orçamentos realizados giraram em torno de R\$ 150,00. Dessa forma, buscou-se novas alternativas para implementação de baixo custo. Com isso, encontrou-se caixas de plástico com grau de proteção IP65 de fábrica e indicado para equipamentos elétricos. Além disso, o custo para adquirir uma dessas caixa é 10 vezes menor do que fabricar por impressora 3D. Essa caixa pode ser vista na Figura 3.55.

Após isso, avaliou-se os processos de fabricação para realizar os cortes e furos necessários na caixa. Para isso, verificou-se como uma solução viável e de baixo custo, o corte

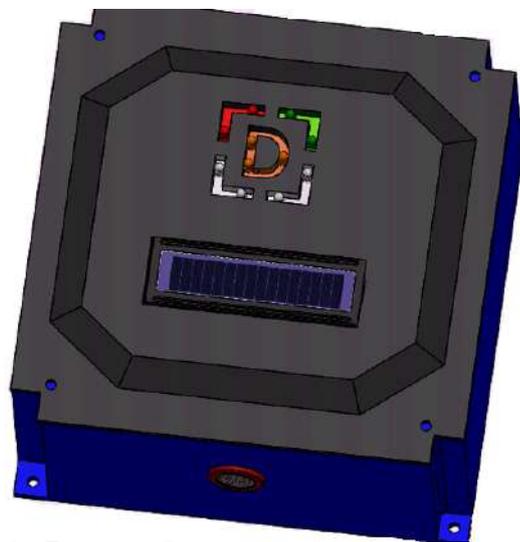


Figura 3.54: Projeto do invólucro de proteção no *SolidWorks*.



Figura 3.55: Caixa com grau de proteção IP65. Adaptado de (KRAUS-MULLER, 2015).

a laser. Inicialmente, realizou-se testes para analisar se o material da caixa resistiria a uma temperatura elevada. Assim, obteve-se um bom resultado no corte, tornando esse processo viável. Com isso, realizou-se o desenho técnico divididos em caixa e tampa, sendo ilustrados com os cortes e furos nas Figuras 3.56 e 3.57, respectivamente.

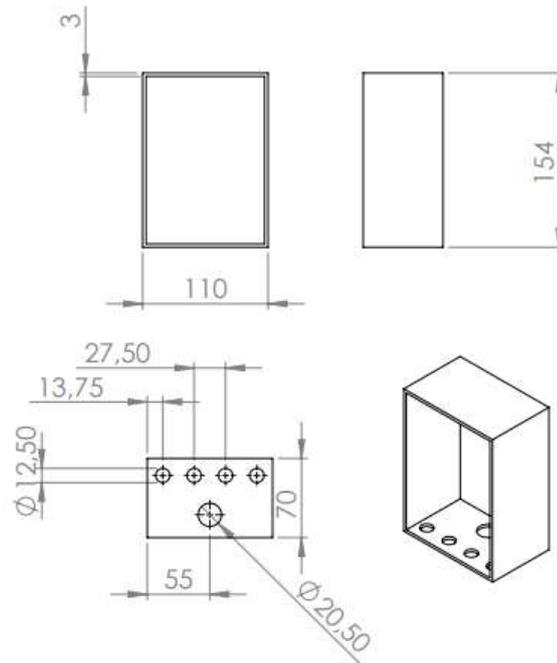


Figura 3.56: Desenho técnico da caixa de proteção.

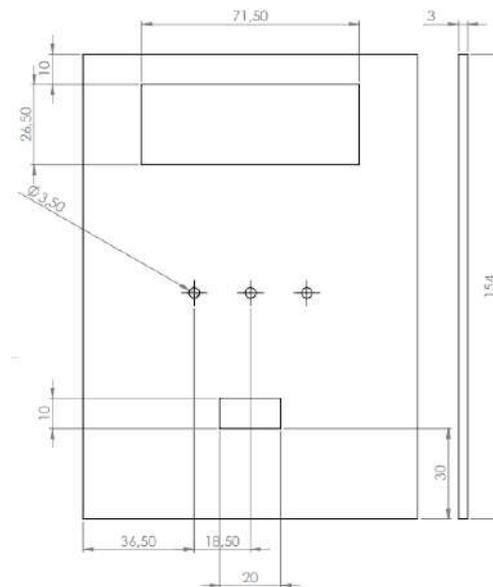


Figura 3.57: Desenho técnico da tampa da caixa de proteção.

Através dos furos e cortes realizados na caixa, perde-se o grau de proteção, permitindo a entrada de água e/ou poeira. Para isso, será acrescentado uma película transparente

adesiva para proteção e permitir a visualização dos componentes, como: Leds e LCD. Além da película, será utilizado prensa-cabos para isolar os furos do cabo de alimentação e comunicação RS-485. Assim, o protótipo do sistema de detecção pode ser visto na Figura 3.58.



Figura 3.58: Protótipo do sistema de detecção.

Considerações Finais

Neste capítulo são apresentadas as conclusões sobre o trabalho e as sugestões para a sua continuidade.

4.1 Conclusões

Em suma, a amônia é muito utilizada em sistemas de refrigeração, principalmente nas atividades industriais que trabalham com alimentos perecíveis, devido à sua capacidade de absorver grande quantidade de calor quando passa do estado líquido para o gasoso. Assim, realizou-se um estudo sobre a amônia, suas propriedades, riscos e benefícios, que mostraram a importância da utilização de um dispositivo de identificação de vazamento nessas indústrias. Dessa forma, além do dispositivo promover a segurança para os seres humanos, visto que, em concentrações mais elevadas, ocasionam problemas respiratórios e visuais, queimaduras e até serem fatais, também auxilia na prevenção de sérios riscos de contaminações ambientais.

Por outro lado, elaborou-se a metodologia a ser seguida durante o desenvolvimento do projeto e uma revisão de literatura. A partir disso, revisou-se conteúdos bibliográficos a respeito das especificações de sensores para assimilar o significado de todas as características que envolvem a operação do sensor de gás. Diante disso, após captar um sinal de gás é necessário realizar o seu processamento. Assim, investigou-se técnicas de amostragem para o processamento de dados do sistema, além de, uma análise de filtros analógicos com o intuito de ressaltar os sinais em determinadas faixas de frequência e rejeitar outras.

Desse modo, dividiu-se o sistema de detecção e dividiu-se em três partes de desenvolvimento: *Hardware*, *Firmware* e *Software*. Diante disso, definiu-se os pré-requisitos para desenvolver o hardware do dispositivo de detecção, como: escolha do microcontrolador, dos componentes das placas modulares, sensor eletroquímico NE4-NH₃, etc. Dessa forma, projetou-se os módulos do sensor de gás, da comunicação sem fio e a CPU. Após aquisição de componentes e montagens, realizou-se simulações e testes nos módulos para avaliar o

funcionamento, além dos testes de resposta no módulo do sensor, obtendo os resultados como esperados e apresentados na seção anterior.

O projeto consistiu também, no desenvolvimento de um software, para permitir ao usuário, verificar as informações recebidas da placa de detecção de amônia, implementando uma interface simples e intuitiva. Com isso, implementou-se funcionalidades nas configurações do software e obteve-se resultados com base em código. Após o desenvolvimento do hardware e software, projetou-se um gabinete de proteção para os circuitos eletrônicos, com a finalidade de resistir a jatos d'água e poeira. Dessa maneira, finalizou-se todas as tarefas proposto para esse projeto, como previsto no cronograma. Sendo assim, o projeto finaliza-se em dia com os prazos propostos inicialmente.

4.2 Propostas de continuidade

Em função da indisponibilidade de algumas informações e do tempo para conclusão dessa monografia, recomenda-se para trabalhos futuros a realização da calibração com valores diferentes de concentração de gás para uma precisão maior. Além disso, aconselha-se realizar testes de sensoriamento em condições adversas e ambientes diferentes para uma validação mais completa do sistema. Outro ponto, seria a implementação de uma comunicação cabeada para o sistema. Quanto ao software, sugere-se implementar uma solução *mobile* com a mesma aplicação. Para o hardware, indica-se realizar um estudo e análise de componentes para permitir que esse dispositivo seja instalado em câmaras congeladas a -30°C .

Como sugestão final de continuidade, tem-se o estudo de viabilidade e o projeto de implementação de sensores eletroquímicos para outros gases tóxicos reagentes. Sendo assim, um mesmo dispositivo será capaz de captar vários gases tóxicos, podendo ser aplicado em diferentes ambientes e situações.

Tabelas

Tabela A.1: Especificação do sensor eletroquímico NE4-NH3

Especificação	
Output signal	40+/-12 nA/ppm NH3 (Linear to 100ppm)
Zero offset in clear air	< +/-5ppm equivalent
Response time (T90)	< 90sec
Repeatability	< +/- 10%
Long Term Stability	< +/- 2% signal / month
Temperature dependence	< +/-10ppm (-30°C to +50°C)
Temperature range	-30°C to +50°C
Humidity range	15 - 90% RH (non-condensing)
Pressure range in service	0.9 - 1.1 atm
Detection range	0 - 100ppm
Recommended load resistor	10Ω
Recommended maximum storage time	6 months
Expected Lifetime	24 months
Warranty	12 months

Apêndice B

Códigos

```
1 #include "RF24Network.h"
3 #include "RF24.h"
4 #include "RF24Mesh.h"
5 #include <SPI.h>
6 #include <EEPROM.h>
7
8 // RF24          radio(9, 10);
9 // RF24Network  network(radio);
10 // RF24Mesh     mesh(radio, network);
11
12 struct payload
13 {
14     uint8_t id = 0;
15     uint8_t ppm = 0;
16 };
17
18 /*uint32_t*/ double timer = 0;
19
20 char *payloadToJSON(payload &data)
21 {
22     // 2 braces + 4 digits int + 4 digits int + null terminator
23     char *json = new char[11];
24
25     sprintf(json, "{\"id\":%d,\"ppm\":%d}", data.id, data.ppm);
26     return json;
27 }
28
29 void setup()
30 {
31     Serial.begin(115200);
32
33     // NodeID 0 is master
34     // mesh.setNodeID(0);
35     // mesh.begin();
36 }
37
38 void loop()
39 {
40     // mesh.update();
41     // mesh.DHCP();
```

```

43 // if ( network.available() ) {
44 //   RF24NetworkHeader header;
45 //   network.peek(header);
46
47 //   payload data;
48 //   switch ( header.type ) {
49 //     case 'S':
50 //     {
51 //       network.read(header, &data, sizeof(data) );
52 //       char *json = payloadToJSON(data);
53 //       Serial.print(json);
54 //       delete json;
55 //       break;
56 //     }
57
58 //     default:
59 //     {
60 //       break;
61 //     }
62 //   }
63
64   payload d1, d2, d3;
65
66   d1.id = 1;
67   d1.ppm = 50 + 50 * sin(4 * PI * timer / 100);
68   d2.id = 2;
69   d2.ppm = 50 + 50 * sin(4 * PI * timer / 100 + 120 * PI / 180);
70   d3.id = 3;
71   d3.ppm = 50 + 50 * sin(4 * PI * timer++ / 100 + 240 * PI / 180);
72
73   char *json = payloadToJSON(d1);
74   Serial.println(json);
75   delete json;
76
77   json = payloadToJSON(d2);
78   Serial.println(json);
79   delete json;
80
81   json = payloadToJSON(d3);
82   Serial.println(json);
83   delete json;
84
85   delay(1000);
86 }

```

Listing B.1: Código Teste para Simulação de Valores de PPM.

Referências

- AFTALION, F. *A history of the international chemical industry, 2nd edition, Philadelphia, PA: chemical heritage press.* [S.l.: s.n.], 2001.
- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais.* 2a ed. Belo Horizonte, MG: Ed. UFMG.ed. [S.l.: s.n.], 2007.
- ANALYTICS, H. *Honeywell Gas Detection.* 1.ed. [S.l.]: Lincolnshire, IL, 2013.
- ANSI/ASHRAE. *Designation and Safety Classification of Refrigerants.* [Acessado dia 28 de março de 2017], <http://bit.ly/2z0J4nw>.
- BARROS, H. L. C. *Química Inorgânica: uma introdução,* livraria triângulo editora ltda: belo horizonte. [S.l.: s.n.], 1992.
- BEGA, E. A. *Instrumentação Industrial, Editora Interferência, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), ISBN 85-7605-019-2.* [S.l.: s.n.], 2006.
- BJORN T.; WOUTER, O. A. B. Ammonia sensors and their applications, a review. *Sensors and Actuators B: Chemical,* [S.l.], 2005.
- BOLAJI B.O.; HUAN, Z. Ozone depletion and global warming: case for the use of natural refrigerant, a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* [S.l.], 2013.
- BOYLESTAD R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos.* 8.ed. [S.l.]: Pearson, 2004.
- BRAGA, N. C. *Entenda as especificações dos sensores (ART645).* [Acessado dia 19 de maio de 2017], <http://bit.ly/2zLnXoi>.
- BRAGA, N. C. *Como Funcionam os Sensores de Gases Tóxicos (ART2860).* [Acessado dia 20 de abril de 2017], <http://bit.ly/2in2AjA>.
- BRATTAM, W. H.; BARDEEN, J. *Bell System Tech J.* [S.l.: s.n.], 1953.

- CARVALHO, J. B. Desenvolvimento de Sistemas de Detecção de Gases na Região do Infravermelho. *PUC-Rio*, [S.l.], 2016.
- CASTRO, J. *et al.* Determinação de amônia no ar utilizando um sensor piezelétrico de quartzo. *Eclética Química*, [S.l.], v.36, p.21 – 49, 00 2011.
- COSTA, E. C. *Refrigeração*. [S.l.]: Edgard Blucher, 1982.
- COSTA, L. R. M. *Sistema de Geração, Transmissão, Recepção e Armazenamento de Informações Médicas via Web Centro Médico. 2005. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Redes de Comunicação)*. Brasília: Universidade de Brasília, 2005.
- DANFOSS. *Detecção de gás em sistemas de refrigeração*. [S.l.]: MWA, 2008.
- DONG J. X.; GAO, Z. F. A selective and sensitive optical sensor for dissolved ammonia detection via agglomeration of fluorescent Ag nanoclusters and temperature gradient headspace single drop microextraction. *Biosensors and Bioelectronics*, [S.l.], 11 2016.
- EGOTO. *Teclado Interruptor de Membrana Do Teclado*. [Acessado dia 29 de Outubro de 2017], <http://bit.ly/2imMgzx>.
- ELDOER. *Comutação Placa de Alimentação da Placa de Circuito*. [Acessado dia 15 de Setembro de 2017], <http://bit.ly/2hwNUb>.
- ELECTRONICS, S. *RFM69HCW Hookup Guide*. [Acessado dia 21 de Setembro de 2017], <http://bit.ly/2jveN9f>.
- ENGINEERING, N. S. *Technical Information and User Manual NE4-NH3 Electrochemical Ammonia (NH3) Gas Sensor*. [Acessado dia 25 de maio de 2017], <http://www.nemoto.eu/ne4-nh3-manual.pdf>.
- ENGINEERING-TOMORROW, D. *Amônia (NH3)*. [Acessado dia 05 de maio de 2017], <http://bit.ly/2zN2idi>.
- ENGINEERING-TOMORROW, D. *Amônia na Refrigeração Industrial*. [Acessado dia 05 de maio de 2017], <http://bit.ly/2zFYr45>.
- FELIX, E. P.; CARDOSO, A. A. Amônia (NH₃) atmosférica: fontes, transformação, sorvedouros e métodos de análise. *Química Nova*, [S.l.], v.27, p.123 – 130, 02 2004.
- GOMES, A. T. *Telecomunicações: transmissão e recepção*. 1.ed. [S.l.]: São Paulo: Érica, 1995.

- GRANDO, F. L. *Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em ambiente LabView para aquecedores Soalres - Trabalho de Conclusão de Curso*. [S.l.: s.n.], 2013.
- HASHIM, M. A. *ICGSCE 2014 || Reflectometric Optosensor for Visual Detection of Ammonia Based on Silica Pellet Sensing Material*. [S.l.: s.n.], 2015. v.10.1007/978-981-287-505-1.
- HAYKIN S.; VEEN, B. V. *Sinais e Sistemas*. 5.ed. [S.l.]: Tradução José Carlos Barbosa dos Santos. Porto Alegre: Bookman. 668p., il., 2001.
- HUSSAIN, S. A. R. [IEEE 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC) - Muscat, Oman (2016.3.15-2016.3.16)] 2016 3rd MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC) - Milk products monitoring system with arm processor for early detection of microbial activity. In: *Anais...* [S.l.: s.n.], 2016.
- INMETRO. *INMETRO: vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*. [S.l.]: Rio de Janeiro, 1995.
- INSTRUMENTS, G. *Cilindros de Gás para Calibração e Bump Test*. [Acessado dia 09 de Setembro de 2017], <http://bit.ly/2A40hwv>.
- INSTRUMENTS, G. *Válvula Reguladora de Pressão*. [Acessado dia 05 de Novembro de 2017], <http://bit.ly/2hF3YRB>.
- INSTRUMENTS, N. *NI Developer Zone. National Instruments*. [Acessado dia 20 de maio de 2017], <http://bit.ly/2zMSNux>.
- INSTRUMENTS, T. *LM2576*. [Acessado dia 10 de Outubro de 2017], <http://bit.ly/2mwxILH>.
- JESSEL, W. *Planning and Designing Gas Detection Systems, Drager Safety*. [Acessado dia 09 de maio de 2017], <http://bit.ly/2z98cIw>.
- KRAUS-MULLER. *Caixas de Passagem*. [Acessado dia 20 de Outubro de 2017], <http://bit.ly/2z81mG2>.
- LATHI, B. P. B. P. *Sinais e Sistemas Lineares*. 2.ed.ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
- LINDBORG, A. *Ammonia Safety in Refrigerated Warehouses*. [S.l.]: International Institute of Refrigeration, 1982.
- MACHADO, C. *Sensores de gás, Princípios e tecnologias*. [Acessado dia 16 de abril de 2017], <http://bit.ly/2y0EkNy>.

- MICROCHIP. *Datasheet PIC 24FJ128GC006*. [Acessado dia 02 de Junho de 2017], <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC24FJ128GC006>.
- MORRISON, S. Semiconductor gas sensors. *Sensors and Actuators*, [S.l.], v.2, 1982.
- MOVIMOC. *Como Funciona um Regulador de Pressão*. [Acessado dia 30 de Outubro de 2017], <http://bit.ly/2inW8sL>.
- MOZILLA. *Tecnologia da Web para programadores*. [Acessado dia 07 de Agosto de 2017], <https://developer.mozilla.org/pt-PT/docs/Web>.
- MSA. *Gas Detection handbook*. 5.ed. [S.l.]: Pittsburgh, 2007.
- MTE, P. *Segurança e saúde no trabalho em empresas de abate e processamento de carnes e derivados*. [Acessado dia 15 de março de 2017], <http://bit.ly/2A4EsNb>.
- MTE, P. *NR 15 - Atividades e opercoes insalubres*. [Acessado dia 22 de março de 2017], <http://bit.ly/2j0E1IG>.
- NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. *Circuitos Eléctricos*. 10 ed..ed. [S.l.]: Livros Técnicos e Cient'íficos Editora Ltda, 2009.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5.ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010.
- RAHN, M. A. S. *Estudo da eficiência energética em sistemas de refrigeração mecânica que utilizam R-717 contaminado por água: uma aplicação para indústria pesqueira do rio grande*. [S.l.]: UFRG, 2006.
- ROCHA, R. D. C. *Trabalho de Conclusão de Curso: projeto de controlador de temperatura para mantas termoelétricas*. [S.l.: s.n.], 2012.
- RODRIGUEZ, R. M. *Estudo Teórico E Experimental De Agregados Iônicos (Nh3)Nnhm Dessorvidos De Amônia Sólida Bombardeada Por Íons De 65 Mev*. *PUC-Rio*, [S.l.], 2016.
- SARTORI, C. *Ciclos de refrigeração*. [Acessado dia 11 de maio de 2017], <http://bit.ly/2zNRT18>.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microelectronic Circuits*. sixth.ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2009.
- SEICA, A. *Transdução: processos de transferência na literatura e arte digitais, universidade de Évora*. [S.l.: s.n.], 2011.

- SILVA, A. *Aplicação de Fluidos Naturais na Refrigeração de Supermercados: sistemas cascata com co2/nh3, uso de fluidos naturais em sistemas de refrigeração e ar condicionado*. 1.ed. [S.l.]: Ministério do Meio Ambiente, MMA, Publicação Técnica, 2011.
- SOARES NETO, V. *Telecomunicações: sistemas de modulação*. 1.ed. [S.l.]: São Paulo: Érica, 2005.
- SOBERTON. *Piezo Buzzer*. [Acessado dia 28 de Outubro de 2017], <http://bit.ly/2hydrqi>.
- SOUSA D. R. DE; SOUZA, D. J. d. L. N. C. *Desbravando o microcontrolador PIC18: recursos avançados*. 1.ed. [S.l.]: São Paulo: Érica, 2010.
- STERN, A. C. *Air Pollution: measuring, monitoring, and surveillance of air pollution*. [S.l.: s.n.], 1976.
- STOECKER W. F.; JABARDO, J. M. *Refrigeração Industrial Tradicional*. [S.l.]: Edgard Blucher, 1994.
- STRADIOTTO, N. R.; YAMANAKA, H.; ZANONI, M. V. B. Electrochemical sensors: a powerful tool in analytical chemistry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, [S.l.], v.14, p.159 – 173, 04 2003.
- STUERCHLER, P. Safety measures for refrigerants NH3 and CFC/HCFC. *Int. Environ. Technol.*, [S.l.], v.55, 02 2002.
- TECHNOLOGY, I. S. *Electrochemical Sensor*. [Acessado dia 25 de maio de 2017], <http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>.
- THOMSEN, A. *Tutorial: comunicação wireless com arduino e módulo nrf24l01*. [Acessado dia 15 de Setembro de 2017], <http://bit.ly/2yORn0W>.
- VERANI, L. H. W. *Emergência com amônia*. [Acessado dia 19 de maio de 2017], <http://bit.ly/2zHstVb>.
- WEIMAR, N. B. D. K. U. *Metal oxide-based gas sensor research: how to, elsevier science, sensors and actuators b: chemical*. [S.l.: s.n.], 2007.