



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Energias Alternativas e Renováveis
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica



Juliane dos Santos Davi Muniz

Desenvolvimento de um Nariz Eletrônico para Monitoramento de Gases Poluentes em Aterros Sanitários

João Pessoa

2023

Juliane dos Santos Davi Muniz

Desenvolvimento de um Nariz Eletrônico para Monitoramento de Gases Poluentes em Aterros Sanitários

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cleonilson Protásio de Souza

João Pessoa

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

M966d Muniz, Juliene dos Santos Davi.

Desenvolvimento de um nariz eletrônico para monitoramento de gases poluentes em aterros sanitários / Juliene dos Santos Davi Muniz. - João Pessoa, 2023. 58 f. : il.

Orientação: Cleonilson Protásio de Souza.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Aterros sanitários. 2. Biogás. 3. Sensores de Gás. 4. Nariz eletrônico. 5. Rede neural artificial. I. Souza, Cleonilson Protásio de. II. Título.

UFPB/BC

CDU 628.472.3(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação


**DESENVOLVIMENTO DE UM NARIZ ELETRÔNICO PARA MONITORAMENTO
DE GASES POLUENTES EM ATERROS SANITÁRIOS**

Elaborada por


JULIENE DOS SANTOS DAVI MUNIZ

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.


COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **CLEONILSON PROTASIO DE SOUZA**
Data: 02/10/2023 11:29:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PROF. DR. CLEONILSON PROTASIO DE SOUZA
Orientador – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **FABRICIO BRAGA SOARES DE CARVALHO**
Data: 02/10/2023 17:41:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PROF. DR. FABRICIO BRAGA SOARES DE CARVALHO
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **WILLIAM DE PAIVA**
Data: 21/11/2023 20:01:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

PROF. DR. WILLIAM DE PAIVA
Examinador Externo – UEPB

Dedico este trabalho aos meus filhos Sara e Marcos, que são a razão de eu continuar acreditando e buscando um futuro melhor a cada dia.

Agradecimentos

A Deus, por me dar a vida, saúde e forças cada dia para continuar seguindo em frente e vencendo os desafios que a vida apresenta.

Aos meus pais, Marilene Rodrigues dos Santos Davi e João Carneiro Davi, pela educação que me deram e por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos.

Ao meu esposo, Alex Muniz da Costa, por todo o apoio e ajuda em diversas etapas da realização deste trabalho.

Ao meu orientador, prof. Cleonilson Protásio de Souza, pela sua excelente orientação e todo o apoio em conhecimento técnico e disponibilização de materiais, tornando possível o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores e alunos envolvidos no projeto do Nariz Eletrônico, em especial, Auri- berto e professor William.

Por fim, a todos que fazem parte do grupo de Microengenharia da UFPB, pelo suporte e apoio sempre disponíveis, que contribuíram muito para a realização deste trabalho.

Resumo

O biogás gerado a partir da degradação de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários é composto por diversos gases, entre eles gases que contribuem para o aquecimento global e gases tóxicos e prejudiciais à saúde das pessoas e dos animais. O monitoramento da concentração desses gases nos aterros sanitários e em seus arredores é de grande importância, pois permite avaliar o potencial de contaminação do ar, causado pela geração de biogás no aterro sanitário, e propor formas de minimizá-lo. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um Nariz Eletrônico capaz de identificar os gases presentes no biogás e estimar suas concentrações, utilizando uma Rede Neural Artificial (RNA). Foram selecionados alguns sensores de gases e foi confeccionada uma placa de circuito impresso com os sensores e os seus circuitos de condicionamento de sinal. Foi desenvolvido um sistema de aquisição de sinais dos sensores utilizando o *software LabVIEW*, o qual coleta os dados lidos pelos sensores e os armazena em uma planilha, utilizada para análise dos dados e treinamento de uma RNA, a qual realiza a identificação dos gases e previsão de suas concentrações. Após algumas sessões de aquisição de dados dos sensores, os dados de entrada e saída foram organizados em uma única planilha, a qual foi utilizada com uma arquitetura neural desenvolvida para prever as concentrações dos gases alvos. Os resultados obtidos do treinamento da RNA mostraram que foi possível fazer medições das concentrações dos gases, com a raiz do erro médio quadrático (RMSE) menor que 1, para a maioria dos gases alvos considerados, o que comprova a acurácia do sistema desenvolvido.

Palavras-chave: Aterros Sanitários, Biogás, Sensores de Gás, Nariz Eletrônico, Rede Neural Artificial.

Abstract

The biogas generated from the degradation of solid urban waste in sanitary landfills is composed of various gases, including gases that contribute to global warming and toxic gases harmful to the health of both people and animals. Monitoring the concentration of these gases in sanitary landfills and their vicinity is of great importance as it allows for the assessment of potential air contamination caused by biogas generation in landfills and the proposal of methods to minimize it. This work aims to develop an Electronic Nose capable of identifying the gases present in biogas and estimating their concentrations using an Artificial Neural Network (ANN). Several gas sensors were selected, and a printed circuit board was constructed with the sensors and their signal conditioning circuits. A signal acquisition system for the sensors was developed using LabVIEW software, which collects data read by the sensors and stores it in a spreadsheet used for data analysis and ANN training. After several data acquisition sessions from the sensors, the input and output data were organized into a single spreadsheet, which was used with a neural architecture developed to predict the concentrations of the target gases. The results obtained from the ANN training showed that it was possible to measure the concentrations of gases with a root mean square error (RMSE) less than 1 for most of the target gases considered, confirming the accuracy of the developed system.

Keywords: Sanitary Landfills, Biogas, Gas Sensors, Electronic Nose, Artificial Neural Network.

Lista de Figuras

1	Seção típica de um aterro sanitário.	15
2	Representação básica de um sensor de gás catalítico.	21
3	Representação de um sensor de condutividade térmica do tipo <i>pellistor</i> .	22
4	Sensor de gás eletroquímico.	23
5	Sensor de gás infravermelho.	24
6	Sensor de gás semicondutor.	26
7	Sensor de gás SAW.	27
8	Configuração do experimento realizado por <i>Moncrieff</i> .	29
9	Semelhança entre o Nariz Biológico e o Nariz Eletrônico.	30
10	Modelo de neurônio artificial.	33
11	Representação de redes neurais simples e profundas.	34
12	Sensibilidade cruzada do sensor MQ4.	36
13	Placa elaborada para a calibração dos sensores do Nariz Eletrônico.	37
14	Dispositivo de aquisição de sinais <i>myDAQ</i> .	38
15	Placa do multiplexador analógico 74HC4067.	39
16	Diagrama de blocos do sistema de calibração dos sensores.	39
17	Diagrama de esquemático do sistema de calibração dos sensores.	40
18	Tela do Painel de Controle da aplicação no <i>LabVIEW</i> .	41
19	Tela do Diagrama de Blocos da aplicação no <i>LabVIEW</i> .	41
20	Caixa construída para a calibração dos sensores no laboratório.	42
21	Sistema de calibração dos sensores montado no laboratório.	43
22	Fluxograma do processo de calibração no <i>Labview</i> .	45
23	Arquitetura da Rede Neural Artificial Utilizada.	46
24	Perdas do Modelo ao longo das épocas.	48
25	Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de CO ₂ (%).	48
26	Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de CH ₄ (%).	48
27	Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de O ₂ (%).	48
28	Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de H ₂ S (ppm).	48
29	Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de CO (ppm).	48

30	Placa de desenvolvimento Adafruit Feather M0 RFM9x	49
----	--	----

Lista de Tabelas

1	Composição do biogás gerado por aterros sanitários.	15
2	Comparativo entre os tipos de sensores de gases.	28
3	Sensores selecionados para o Nariz Eletrônico.	35
4	Raiz do erro médio quadrático por saída para o conjunto completo de sensores.	46
5	Raiz do erro médio quadrático por saída para o conjunto reduzido de sensores.	46

Lista de abreviações, siglas e símbolos

ABNT *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

ARM *Advanced RISC Machine*

CERTBIO *Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste*

CH₄ *Gás Metano*

CI *Circuito Integrado*

CO *Monóxido de Carbono*

CO₂ *Dióxido de Carbono*

DAQ *Data Acquisition*

ELu *Unidade Linear Exponencial*

GGA *Grupo de Geotecnia Ambiental*

H₂S *Gás Sulfídrico*

IDT *Transdutores Interdigitados*

I²C *Inter-Integrated Circuit*

LabVIEW *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*

LEL *Lower Explosive Limit - Limite Inferior de Explosão*

LGAB *Laboratório de Geotecnia Ambiental e Biotecnologia*

MEMS *Micro-Electro-Mechanical Systems*

MOS *Metal-Oxide-Semiconductor*

MSE *Erro Médio Quadrático*

NDIR *Non-Dispersive Infrared*

NI *National Instruments*

O₂ *Oxigênio*

PCI *Placa de Circuito Impresso*

ppm *Partes por Milhão*

RAM *Random Access Memory - Memória de Acesso Aleatório*

ReLU *Unidade Linear Retificada*

RMSE *Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático*

RNA *Rede Neural Artificial*

SAW *Surface Acoustic Wave*

Tanh *Tangente Hiperbólica*

TI *Texas Instruments*

UFCG *Universidade Federal de Campina Grande*

VI *Virtual Instrument*

VOCs *Compostos Orgânicos Voláteis*

USB *Universal Serial Bus*

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	17
1.2	Organização do Texto	17
2	Tipos de Sensores de Gases	19
2.1	Sensores de Gases Catalíticos	20
2.2	Sensores de Gases por Condutividade Térmica	21
2.3	Sensores de Gases Eletroquímicos	21
2.4	Sensores de Gases Infravermelhos	24
2.5	Sensores de Gases Semicondutores	24
2.6	Sensores de Gases por Ondas Acústicas de Superfície (SAW)	26
2.7	Comparativo entre os Sensores de Gases	27
3	Narizes Eletrônicos	29
4	Redes Neurais Artificiais (RNA)	32
4.1	Modelo de um Neurônio Artificial	33
5	Desenvolvimento do Nariz Eletrônico	35
5.1	Desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso	37
5.2	Desenvolvimento do Sistema de Calibração Utilizando o <i>LabVIEW</i>	38
5.3	Resultados e Discussões	43
6	Considerações Finais	50
6.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	50
	Referências	52
	Apêndices	56

1 Introdução

Um dos principais problemas enfrentados pela sociedade atualmente é a poluição, tanto do ar quanto do solo e das águas. Neste contexto, os resíduos gerados pelas residências, indústrias, estabelecimentos comerciais, unidades hospitalares e locais públicos constituem alguns dos principais vilões, fazendo-se necessário que os mesmos sejam devidamente descartados.

A maior parte dos resíduos sólidos provenientes das residências, comércios e locais públicos é depositada em aterros sanitários, os quais constituem uma forma de disposição de resíduos sólidos urbanos ambientalmente adequada, sendo a mais utilizada no Brasil e diversos outros países (JUNIOR, 2020; YANG *et al.*, 2014).

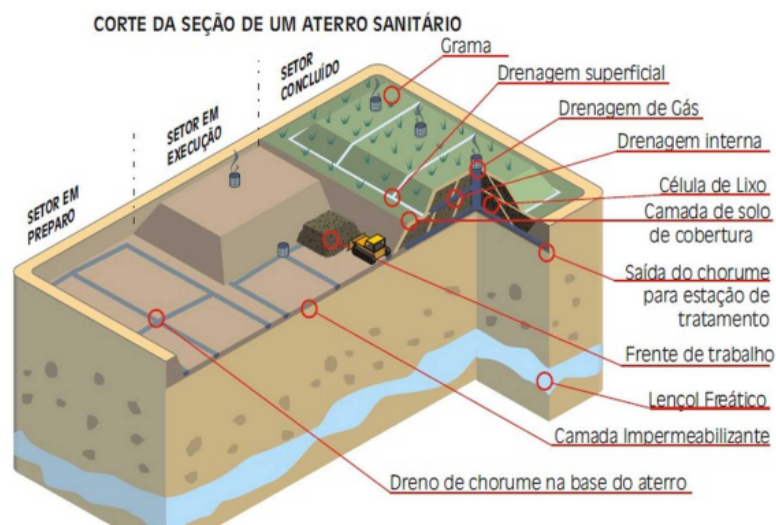
A norma ABNT NBR 8.419/92 (ABNT, 1996) define aterro sanitário como:

“Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário”

Os aterros sanitários são divididos em três setores: setor em preparo, setor em execução e setor concluído. O primeiro é o setor preparatório para o recebimento de resíduos, no qual geralmente é instalada a camada impermeabilizante, denominada geomembrana, e os dutos de drenagem do lixiviado e dos gases. O setor em execução é o local onde ocorrem as operações diárias de disposição, compactação e soterramento dos resíduos com a camada de solo de cobertura. No setor concluído já não ocorre a disposição de resíduos, havendo apenas atividades de monitoramento da drenagem do lixiviado e eliminação dos gases (FERREIRA, A. L., 2018). Na Figura 1 é ilustrada uma seção de um aterro sanitário, destacando as funções de cada elemento.

Os gases gerados nos aterros sanitários constituem o que denominamos biogás. Em sua composição destacam-se o metano (CH_4), cujo percentual varia entre 45% a 60%, e o dióxido de carbono (CO_2), cujo percentual varia de 40% a 60% do volume total. Outros gases como hidrogênio, oxigênio, amônia, monóxido de carbono, enxofre, entre outros,

Figura 1: Seção típica de um aterro sanitário.



Fonte: (FERREIRA, A. L., 2018).

estão presentes em menor percentual (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1994). A Tabela 1 apresenta os principais gases que compõem o biogás e suas concentrações.

Tabela 1: Composição do biogás gerado por aterros sanitários.

Gás	Concentração (%)
Metano (CH_4)	45 - 60
Dióxido de carbono (CO_2)	40 - 60
Hidrogênio (H_2)	0 - 0,2
Oxigênio (O_2)	0,1 - 1,0
Nitrogênio (N_2)	2 - 5
Amônia (NH_3)	0,1 - 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 - 1,0
Monóxido de carbono (CO)	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Fonte: Adaptado de (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1994).

Apresentando uma das maiores concentrações no biogás, o gás metano é um excelente combustível e, dependendo da concentração, pode ocasionar explosões. Por isso, o biogás pode ser aproveitado para a geração de energia, a partir de sua queima. Os gases metano e dióxido de carbono contribuem fortemente para o efeito estufa, especialmente o metano, que apresenta um potencial de aquecimento global de cerca de 28 vezes maior que o CO_2 ((IPCC), 2014). Os aterros sanitários são considerados a terceira maior fonte de emissão

de gases do efeito estufa produzidos pela atividade humana, respondendo por cerca de 13% das emissões (MALANCONI; CABRAL, 2015).

Outros gases presentes no biogás são considerados tóxicos, como o monóxido de carbono, amônia e gases de enxofre, podendo causar graves problemas de saúde, ou até levar à morte, caso sejam inalados. Além disto, alguns gases como o sulfeto de hidrogênio (H_2S), apresentam odor desagradável, causando incômodo à população que vive em áreas próximas ao aterro sanitário (CABRAL, 2009).

Por estes motivos, é necessário tratar o biogás antes de lançá-lo na atmosfera, além de monitorar as concentrações dos gases presentes no biogás, tanto em sua fonte (célula do aterro sanitário) quanto em suas proximidades, com a finalidade de elaborar maneiras de reduzir seus efeitos nocivos ao meio ambiente e os seres vivos.

As técnicas usuais de monitoramento dos gases em um aterro sanitário envolvem a coleta de amostras na saída dos drenos de biogás e a medição das concentrações dos gases por instrumentos de referência, os quais são de elevado custo, demandando gastos com equipe especializada e materiais para a sua realização.

A detecção e medição de substâncias gasosas pode ser realizada de diversas maneiras. Uma forma bastante interessante é utilizar diversos sensores de gases, em conjunto com um sistema computacional, para reconhecer as substâncias e estimar as suas concentrações. Um equipamento deste tipo é denominado Nariz Eletrônico. O reconhecimento dos gases e estimação das concentrações é realizado com a utilização de técnicas de inteligência artificial, sendo as Redes Neurais Artificiais (RNA) uma das técnicas mais utilizadas.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um Nariz Eletrônico para monitoramento dos gases presentes no biogás gerado por aterros sanitários, com o objetivo de medir o potencial de contaminação do mesmo em áreas próximas ao aterro. Este dispositivo será utilizado no aterro sanitário em Campina Grande, para monitorar o alcance da emissão do biogás nos arredores do aterro e gerar dados para a realização de estudos com a finalidade de propor soluções para minimizar os seus efeitos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor o desenvolvimento de um Nariz Eletrônico, composto por um conjunto de sensores de gases de baixa precisão e um sistema computacional inteligente, capaz de estimar a concentração dos gases presentes na atmosfera dos arredores de um aterro sanitário, para obter dados que serão utilizados para o monitoramento do ambiente.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a resposta e o comportamento de sensores de gases semicondutores e eletroquímicos;
- Treinar uma Rede Neural Artificial (RNA) para determinação das concentrações dos gases presentes no biogás do aterro sanitário;
- Selecionar os sensores que apresentam melhor correlação com os dados de concentração dos gases alvos, a fim de diminuir o conjunto de variáveis de entrada da rede neural;
- Adaptar a RNA para funcionar em um microcontrolador de 32 bits com baixo consumo de energia;
- Propor a construção de um protótipo de Nariz Eletrônico e testar seu funcionamento, para validar o sistema.

1.2 Organização do Texto

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, de acordo com a seguinte estrutura: no Capítulo 2 são apresentados os principais tipos de sensores de gás existentes atualmente, destacando seus princípios de funcionamento e características. O Capítulo 3 discute sobre as técnicas utilizadas no desenvolvimento de Narizes Eletrônicos e suas principais áreas de aplicação. O Capítulo 4 apresenta um breve histórico sobre o surgimento e a evolução das Redes Neurais Artificiais (RNA), discutindo também o seu funcionamento

básico e os principais métodos de aprendizagem utilizados. O Capítulo 5 apresenta a metodologia utilizada na pesquisa, descrevendo cada parte do desenvolvimento do sistema, as ferramentas e materiais utilizados e os resultados obtidos. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugeridos possíveis trabalhos futuros, que poderão ajudar a aprimorar o funcionamento do Nariz Eletrônico desenvolvido. Ao final do trabalho, encontram-se os Apêndices A e B, os quais apresentam os esquemáticos das placas de circuito impresso desenvolvidas neste projeto.

2 Tipos de Sensores de Gases

O uso de equipamentos capazes de detectar espécies gasosas e medir sua concentração é muito útil em diversas aplicações, dentre as quais pode-se citar monitoramento de vazamento de gás em indústrias químicas, petroquímicas e farmacêuticas, monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos e externos, procedimentos médicos, aplicações em agricultura, ente outros.

Os principais elementos dos instrumentos de detecção e medição são os sensores de gases, os quais pertencem à categoria de sensores químicos, que são constituídos por um transdutor e uma camada ativa para converter as informações químicas em algum tipo de sinal elétrico, como variação na resistência, frequência, tensão ou corrente elétrica (NAZEMI *et al.*, 2019).

Algumas das principais características dos sensores químicos, são (HUNTER *et al.*, 2020; GOEL *et al.*, 2023):

- **Sensibilidade (S):** é a razão entre a variação do sinal de saída do sensor e a variação da concentração do analito. Dependendo do sinal de saída utilizado no sensor, S pode ser expressa como $S = \frac{\Delta f}{\Delta c}$, ou $S = \frac{\Delta v}{\Delta c}$ ou $S = \frac{\Delta i}{\Delta c}$, onde c representa a concentração e f , v e i , representam a frequência, tensão e corrente elétrica, respectivamente. A unidade da concentração pode ser ppm (partes por milhão) ou vol% (volume percentual).
- **Seletividade:** representa a capacidade do sensor de distinguir uma substância ou grupo de substâncias.
- **Limite de detecção:** é a menor concentração que um sensor pode detectar, sob determinadas condições.
- **Tempo de resposta:** tempo decorrido entre uma variação em degrau da concentração do analito e a resposta do sensor.
- **Tempo de recuperação:** tempo que o sinal de saída do sensor leva para voltar ao seu valor inicial, após uma variação em degrau da concentração.

- **Temperatura de Operação:** faixa de temperatura em que o sensor opera normalmente. Alguns tipos de sensores de gases necessitam de temperatura elevada para viabilizar as reações químicas, e, por isso, utilizam resistência de aquecimento.

Outras características desejáveis em um sensor de gás, que influenciam a escolha por parte dos usuários, são: tamanho reduzido, baixo consumo de potência e capacidade de utilizá-lo em aplicações sem fio.

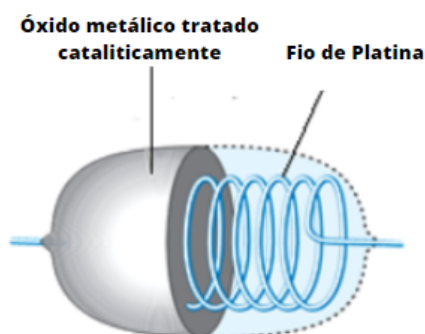
Existem diversos tipos de sensores de gases, com diferentes princípios de funcionamento e tecnologias utilizadas. A seguir serão apresentados alguns dos principais tipos de sensores de gases disponíveis atualmente.

2.1 Sensores de Gases Catalíticos

O primeiro sensor catalítico foi descoberto em 1923, tendo sido utilizado para detectar gás metano em minas (FIRTH; JONES; JONES, 1973). Seu princípio de funcionamento baseia-se na combustão catalítica, processo através do qual um gás combustível pode iniciar a combustão em temperaturas abaixo da sua temperatura de ignição. Muitos óxidos metálicos apresentam propriedades catalíticas e são utilizados nestes sensores.

Os sensores catalíticos são muito utilizados para medir a concentração de gases explosivos e detectar quando ela atinge o limite inferior de explosão (LEL). Existem dois tipos de sensores catalíticos: *pellistor* e termoelétrico. O sensor do tipo *pellistor* utiliza duas bobinas de platina, uma ativa, contendo catalisador feito de metal como platina ou paládio, e uma inativa utilizada como elemento de compensação. Quando o circuito é alimentado por uma fonte de tensão, as bobinas aquecem a uma temperatura entre 300 °C e 500 °C, dependendo do gás alvo. Na presença do gás, ocorre a combustão, aumentando a temperatura na bobina ativa e, conseqüentemente, aumentando também a sua resistência. Uma ponte de *Wheatstone* é utilizada para detectar a diferença de potencial causada pela variação na resistência do sensor. O sensor do tipo termoelétrico utiliza o efeito *Seebeck*, o qual ocorre como resultado de uma diferença de temperatura entre dois pontos de um material condutor ou semicondutor, que gera uma diferença de potencial elétrico nestes pontos. Estes sensores são usados para detectar hidrogênio, oxigênio e compostos orgânicos voláteis (VOCs) (WU *et al.*, 2019; YUNUSA *et al.*, 2014). Na Figura 2 é mostrada uma representação esquemática básica de um sensor de gás catalítico.

Figura 2: Representação básica de um sensor de gás catalítico.



Fonte: Adaptado de (XU *et al.*, 2010).

2.2 Sensores de Gases por Condutividade Térmica

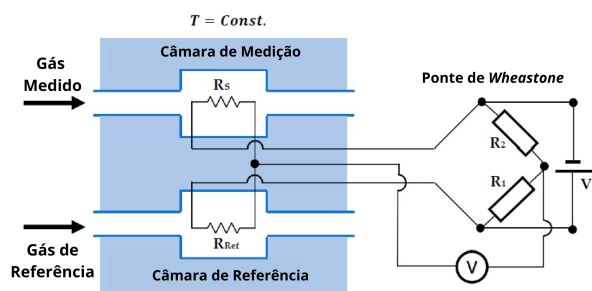
O princípio de funcionamento dos sensores que operam por condutividade térmica é a utilização da transferência de calor de um corpo mais quente para outro mais frio. Neste caso, a diferença de temperatura entre um elemento quente e um elemento frio, resulta na transferência de calor através do gás alvo. As propriedades térmicas do gás alteram os padrões de transferência de calor observados no sistema em estado estacionário, resultando na variação da saída do sensor. Para otimizar a transmissão de calor por meio do gás alvo, a geometria do sensor e as condições de operação devem ser consideradas cuidadosamente (GARDNER; GARDNER; UDREA, 2023).

Existem vários métodos de detecção utilizados em sensores de gases por condutividade térmica, sendo o tipo *pellistor* um dos mais simples, utilizando uma ponte de *Wheatstone* para medir a variação de tensão causada pela mudança na resistência elétrica. A Figura 3 ilustra o princípio de funcionamento de um sensor de condutividade térmica do tipo *pellistor* e o seu circuito de condicionamento de sinal.

2.3 Sensores de Gases Eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos operam por meio de reações de oxidação e redução envolvendo o gás alvo, produzindo assim um sinal elétrico proporcional à concentração do gás. Tipicamente, consiste de um eletrodo sensor e um eletrodo contador, separados por uma fina camada de eletrólito. O gás passa através de uma fina e estreita abertura tipo capilar

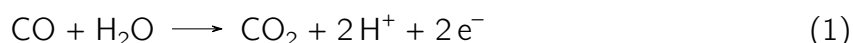
Figura 3: Representação de um sensor de condutividade térmica do tipo *pellistor*.



Fonte: Adaptado de (GARDNER; GARDNER; UDREA, 2023).

e se difunde por meio de uma membrana hidrofóbica até atingir o eletrodo. O sensor também pode conter um eletrodo de referência, cuja função é manter um potencial estável e constante no eletrodo sensível, devido às constantes reações que ocorrem na superfície do eletrodo. As reações eletroquímicas com o gás alvo geram um fluxo de corrente entre o eletrodo sensível e o eletrodo contador e o eletrólito é o responsável por transportar as cargas iônicas através dos eletrodos (HUNTER *et al.*, 2020).

Um exemplo de aplicação de sensores eletroquímicos é o seu uso para medição de monóxido de carbono, cuja reação de oxidação é mostrada na Equação 1:



Para balancear esta reação, no eletrodo contador acontece a reação de redução correspondente, os elétrons e íons são consumidos e a água é gerada. A Equação 2 apresenta a reação de redução:



Existem dois tipos de sensores de gás eletroquímicos: amperométricos e potenciométricos. Os sensores amperométricos operam com uma tensão constante aplicada, tendo como sinal de saída uma corrente elétrica limitada, proporcional à concentração do gás alvo. Consiste basicamente de dois eletrodos, o eletrodo de trabalho e o eletrodo contador, e um eletrodo de referência que fica imerso na solução eletrolítica. São usados para medir vários tipos de gases, alterando-se apenas o eletrólito.

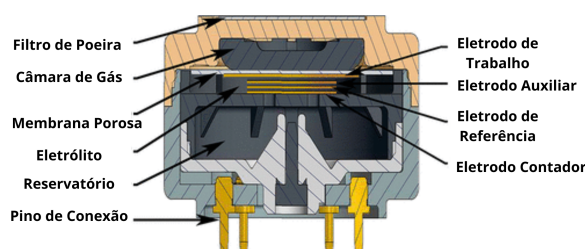
Os sensores potenciométricos são utilizados para medir a concentração de alguns componentes do gás analisado. Podem medir o potencial elétrico de um eletrodo sem um fluxo de corrente, tendo como sinal de saída a diferença de potencial entre o eletrodo de trabalho e o eletrodo de referência. São muito utilizados para medir a concentração de oxigênio, operando usualmente com temperaturas entre 600 °C e 1000 °C (YUNUSA *et al.*, 2014). Os eletrodos mais utilizados são de platina, paládio, ouro ou prata. Diferentes tipos de eletrólitos são utilizados para a detecção de diferentes gases. Um típico sensor potenciométrico para medição de oxigênio é constituído de um eletrólito sólido condutor de íons de oxigênio e dois eletrodos depositados sobre os dois lados do eletrólito. Um eletrodo é o de referência, que fica em contato com uma pressão parcial de oxigênio conhecida, enquanto o eletrodo de trabalho fica em contato com uma pressão desconhecida de oxigênio, a qual deseja-se medir. A diferença de pressão parcial entre os eletrodos do sensor induz uma força eletromotriz no sensor, a qual é descrita pela Equação de *Nernst*:

$$E = \frac{RT}{4F} \ln\left(\frac{P_t}{P_w}\right) \quad (3)$$

em que R é a constante do gás, T é a temperatura em *Kelvin*, F é a constante de Faraday, P_t é a pressão parcial de oxigênio no eletrodo de referência e P_w é a pressão parcial de oxigênio no eletrodo de trabalho.

Na **Figura 4** é mostrada a construção típica de um sensor eletroquímico.

Figura 4: Sensor de gás eletroquímico.



Fonte: Adaptado de (BARON; SAFFELL, 2017).

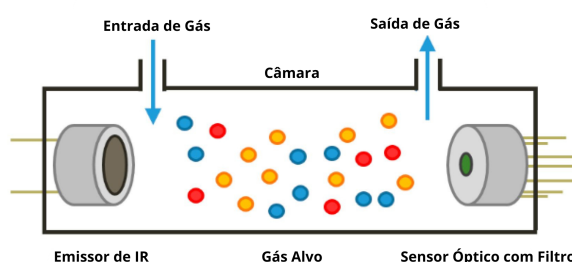
2.4 Sensores de Gases Infravermelhos

São constituídos por uma fonte de luz infravermelha, que pode ser uma lâmpada incandescente regular ou um filamento aquecido, por exemplo, e um detector que converte a energia da radiação eletromagnética em sinais elétricos. Os sensores de gases infravermelhos também possuem uma fibra óptica que pode ser do tipo não-dispersiva ou dispersiva (JHA, 2022).

Os sensores do tipo não-dispersivo (*NDIR - Non-Dispersive Infrared*) são os mais usados e possuem um filtro passa-banda óptico discreto, enquanto o tipo dispersivo usa um dispositivo como uma grade ou um prisma. O último componente de um sensor de gás infravermelho é a célula de gás, que permite a passagem da luz para interagir com o gás alvo (LIU; SHI; WANG, 2020).

Os sensores de gases infravermelhos são usados para detectar e medir a concentração de diferentes gases, como metano, etano, propano, butano, benzeno, tolueno, xileno e álcoois como metanol, etanol, etc. Usualmente, os sensores de gases infravermelhos têm a reputação de serem complicados, pesados e caros, porém, técnicas de desenvolvimento recentes vem trazendo avanços e popularizando o uso deste tipo de sensores (KARTHIKEYAN *et al.*, 2015). Na Figura 5 é mostrado um exemplo de sensor de gás infravermelho.

Figura 5: Sensor de gás infravermelho.



Fonte: Adaptado de (ESFAHANI *et al.*, 2020).

2.5 Sensores de Gases Semicondutores

Os sensores de gases semicondutores (MOS - Metal Oxide Semiconductor) são feitos a partir de óxidos metálicos aquecidos, que são usados para medir a concentração do gás alvo

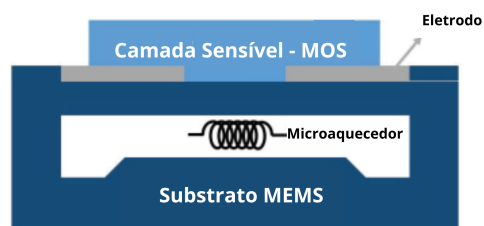
por meio da variação da resistência elétrica do material. Seu princípio de funcionamento baseia-se na adsorção reversível do gás na superfície aquecida do óxido. Geralmente são utilizados óxidos de estanho depositados sobre uma fatia fina de silício, pelo método de deposição de vapor químico. A absorção do gás na superfície do óxido, seguida por oxidação catalítica, resulta na variação da resistência elétrica do material, a qual está relacionada à concentração do gás. Para acelerar a taxa de reação, o sensor é aquecido por uma resistência de aquecimento e sua temperatura de operação fica entre 200 °C e 500 °C (SILVA, 2019).

Semicondutores do tipo n são adequados para detectar gases redutores, devido à alta variação de condutância proporcionada pelos elétrons injetados. Os óxidos mais utilizados para este tipo são: SnO_2 , ZnO, In_2O_3 ou WO_3 . São comumente utilizados para medir a concentração de gases como hidrogênio, oxigênio, álcool e gases tóxicos como monóxido de carbono. De modo similar, semicondutores do tipo p são adequados para detectar gases oxidantes. Gases inflamáveis, como metano e outros hidrocarbonetos, ao entrar em contato com óxidos metálicos excitam um novo nível eletrônico no sólido, variando a resistência elétrica do sensor (NIKOLIC *et al.*, 2020).

O primeiro sensor de gás semicondutor foi proposto por *Seiyama* e *Taguchi*, em 1962. No entanto, melhorias na sensibilidade do sensor também foram obtidas pela adição de agente dopante em semicondutor de filme espesso no sensor de gás desenvolvido para detecção de metano e butano (KARTHIKEYAN *et al.*, 2015). Técnicas de microeletrônica e MEMS têm melhorado o desempenho dos sensores, inclusive desenvolvendo sensores unidimensionais (HUANG; WAN, 2009; NAZEMI *et al.*, 2019). Na Figura 6 é mostrado um exemplo de sensor de gás semicondutor.

Os sensores semicondutores apresentam como vantagens o seu baixo custo, comparado com outros tipos de sensores de gás, e um circuito de condicionamento de sinal simplificado. As principais desvantagens são: limite de detecção de gases mais baixo que os sensores eletroquímicos, baixa seletividade, dificultando a identificação dos gases medidos e alta sensibilidade a variações de temperatura e umidade, podendo afetar os resultados das medições (YUNUSA *et al.*, 2014).

Figura 6: Sensor de gás semicondutor.



Fonte: Adaptado de (NAZEMI *et al.*, 2019).

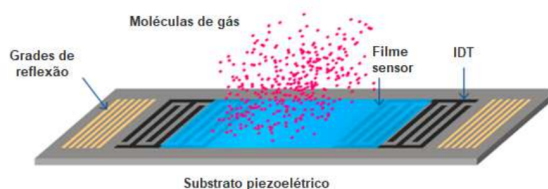
2.6 Sensores de Gases por Ondas Acústicas de Superfície (SAW)

A tecnologia de ondas acústicas de superfície (SAW) teve início em 1885, quando *Lord Rayleigh* descobriu tais ondas. Seu princípio de funcionamento é baseado em dois componentes mecânicos deslocados no plano sagital, ou seja, o plano que contém a direção de propagação e a normal à superfície. Em aplicações de detecção de gás, a escolha do substrato piezoelétrico determina o tipo de onda SAW. As ondas de *Rayleigh* se propagam em uma fina camada superficial, podendo penetrar no substrato em uma distância da ordem de um comprimento de onda. A velocidade de propagação depende do material do substrato, do corte de cristal do substrato e da frequência de trabalho (HUNTER *et al.*, 2020). Desde a descoberta deste princípio, muitas aplicações de sensores têm surgido em diversas áreas, incluindo química, óptica, térmica, pressão, aceleração, torque e biologia. As principais vantagens do uso de dispositivos SAW são: alta sensibilidade, baixo consumo de potência, dispositivos sem fio, podendo ser utilizados em peças rotativas e ambientes perigosos. Seu processo de fabricação é semelhante ao de outros dispositivos microeletrônicos, tornando estes dispositivos tecnologicamente compatíveis com outras tecnologias (HUNTER *et al.*, 2020).

Os sensores de gases por ondas acústicas de superfície, ou *Surface Acoustic Wave* (SAW), operam baseados no princípio da transdução, onde o sensor converte o sinal elétrico em onda mecânica e converte a onda mecânica em sinal elétrico novamente, utilizando transdutores interdigitados (IDT), que usam o efeito piezoelétrico (YUNUSA *et al.*, 2014). A variação da concentração do gás alvo provoca uma variação na velocidade do fluxo

através do sensor. O transdutor piezoelétrico transforma esta variação de velocidade em mudanças na frequência ou na fase do sinal de saída do sensor (SILVA, 2019). A Figura 7 mostra um exemplo de sensor de gás SAW.

Figura 7: Sensor de gás SAW.



Fonte: (SILVA, 2019).

2.7 Comparativo entre os Sensores de Gases

Todos os tipos de sensores de gases apresentados possuem suas vantagens e desvantagens, assim como suas principais indicações e aplicações. A Tabela 2 apresenta um breve comparativo entre os diversos tipos de sensores, destacando suas vantagens e desvantagens e os principais gases detectados.

Tabela 2: Comparativo entre os tipos de sensores de gases.

Tipo de sensor	Vantagens	Desvantagens	Principais gases detectados
Catalítico	Simples, mede a inflamabilidade de gases e tecnologia de baixo custo.	Requer oxigênio para funcionar. Pode ser envenenado por chumbo, cloro e silícios.	Hidrocarbonetos, gases e vapores combustíveis (0 a 100)
Condutividade Térmica	Robusto, mas de simples construção. Fácil de operar na ausência de oxigênio. Ampla faixa de medição.	Reação devido ao aquecimento do fio.	Hidrogênio, teor de CO em hidrogênio e metano.
Eletroquímico	Mede gases tóxicos em concentrações relativamente baixas. Pode detectar uma ampla faixa de gases.	Modos de falhas não são revelados, a menos que sejam utilizadas técnicas avançadas de monitoramento.	% de O_2 e gases tóxicos (CO , Cl_2 , H_2S , SO_2 , NO_2 , etc).
Infravermelho	Usa apenas técnicas físicas. Nenhum modo de falha invisível. Pode ser usado em atmosferas inertes.	Nem todos os gases absorvem o infravermelho. O monitoramento sequencial é mais lento em analisadores multiponto e também é necessária mais experiência do usuário.	Metano, etano, propano, butano, benzeno, tolueno, xileno e álcoois como metanol e etanol.
Semicondutor	Mecanicamente robusto, funciona bem em condições de alta umidade constante.	Suscetível a contaminantes e mudanças devido a condições ambientais. Complexidade de efeitos de resposta não linear	H_2 , O_2 , CO , NO_x , GLP, metano
SAW	Não necessita de bateria e pode ser usado em aplicações sem fio. Pode ser colocado em partes ásperas e rotativas.	Devido ao pequeno tamanho, há dificuldade no manuseio durante o processo de fabricação.	Hidrogênio, CO , CO_2 , NO_2 , compostos orgânicos voláteis, metanol, etanol, álcool isopropílico, acetona, amina e amônia.

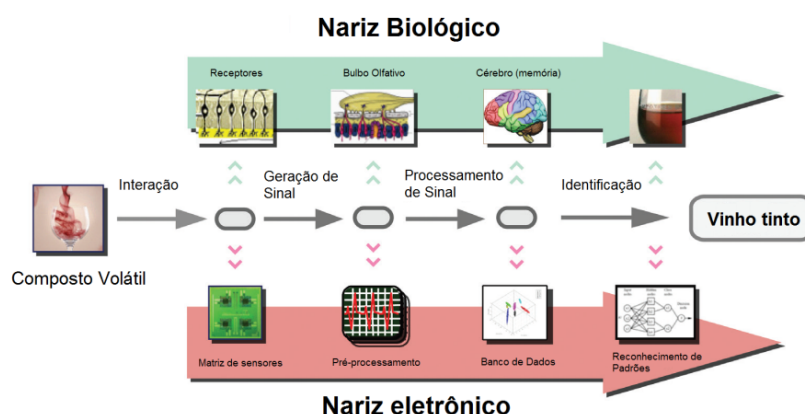
Fonte: Adaptado de (KARTHIKEYAN *et al.*, 2015).

como tema os Narizes Eletrônicos (GARDNER; BARTLETT, 1994). Os primeiros Narizes Eletrônicos comerciais surgiram por volta de 1993. Atualmente, as principais preocupações dos pesquisadores concentram-se na diminuição do tempo das análises, no aumento da sensibilidade, na miniaturização dos componentes e na certificação dos métodos de detecção de substâncias utilizados (SILVA, 2019).

Um Nariz Eletrônico pode ser definido como um sistema eletrônico capaz de identificar substâncias gasosas e medir suas concentrações, utilizando um conjunto de sensores e um sistema computacional que realiza a leitura dos sensores e processa as informações obtidas por meio de algoritmos de reconhecimento de padrões (XU *et al.*, 2018).

É possível estabelecer um paralelo entre um Nariz Eletrônico e um Nariz Biológico. No Nariz Biológico, a amostra é detectada pelos receptores, gerando um sinal que é enviado ao bulbo olfativo, o qual processa os sinais e os envia para o cérebro, que utiliza a memória para identificar a amostra. No Nariz Eletrônico, a amostra gasosa interage com a matriz de sensores, gerando sinal em sua saída, o qual é pré-processado por algoritmos específicos, criando dados que são armazenados em um banco de dados e, por fim, a identificação dos gases é feita utilizando um algoritmo de reconhecimento de padrões (VOSS, 2019). A Figura 9 mostra esta semelhança entre os narizes biológico e eletrônico.

Figura 9: Semelhança entre o Nariz Biológico e o Nariz Eletrônico.



Fonte: (VOSS, 2019).

O principal desafio na implementação de um Nariz Eletrônico é obter uma resposta ótima utilizando sensores de baixa precisão. Em geral, os sensores mais utilizados no desenvolvimento de Narizes Eletrônicos são os de semicondutores de óxidos metálicos (*MOS - Metal Oxide Semiconductor*), devido ao seu baixo custo e tamanho reduzido (VILLARIM,

2020). No entanto, estes sensores apresentam como desvantagem a baixa seletividade, o que não permite determinar a concentração de um determinado gás utilizando apenas um sensor individualmente.

A escolha dos sensores a serem utilizados e o pré-processamento dos dados são etapas de extrema importância no desenvolvimento de um Nariz Eletrônico, pois permitem filtrar as principais características obtidas das medições e eliminar possíveis redundâncias (YAN *et al.*, 2015).

As principais técnicas de reconhecimento de padrões utilizadas em Narizes Eletrônicos são Redes Neurais Artificiais (RNA), lógica *Fuzzy*, *K-Nearest Neighbors (KNN)*, entre outras (XU *et al.*, 2018).

As aplicações de Narizes Eletrônicos são bastante amplas, envolvendo diversas áreas como detecção de frutas maduras (VOSS, 2019; SILVA, 2020), determinação da qualidade de bebidas (BANERJEE(ROY) *et al.*, 2014), monitoramento da qualidade do ar (JASINSKI *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ, 2018), inclusive sendo utilizado para medir a concentração dos gases em um aterro sanitário.

O desenvolvimento de um Nariz Eletrônico envolve conhecimentos multidisciplinares, como o comportamento e os efeitos causados pelos gases na saúde e no meio ambiente, os princípios de funcionamento dos sensores, estatística e análise de dados e técnicas de inteligência artificial.

4 Redes Neurais Artificiais (RNA)

O estudo das Redes Neurais Artificiais (RNA) teve início com a motivação de desenvolver um sistema computacional com processamento semelhante ao cérebro humano, ou seja, de maneira complexa, não-linear e paralela (HAYKIN, 2001). O neurofisiologista *Warren McCulloch* e o matemático *Walter Pitts* escreveram um artigo, em 1943, descrevendo o funcionamento de um neurônio e apresentando uma modelagem de uma rede neural simples utilizando circuitos elétricos, criando um modelo matemático de redes neurais baseado em algoritmos denominados lógica de limiar (*threshold logic*) (MCCULLOCH; PITTS, 1943; DATA SCIENCE ACADEMY, 2022a).

Em 1949, *Donald Hebb* propôs uma teoria para explicar o aprendizado baseada no reforço das ligações sinápticas em nós biológicos excitados, mostrando que a plasticidade da aprendizagem é obtida através da variação dos pesos de entrada dos nós (HEBB, 1949; BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000). Mais tarde, *Widrow* e *Hoff* sugeriram uma nova regra de aprendizado, conhecida como regra delta, baseada no método do gradiente para minimização do erro, a qual ainda é bastante utilizada atualmente (WIDROW, 1960; BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000).

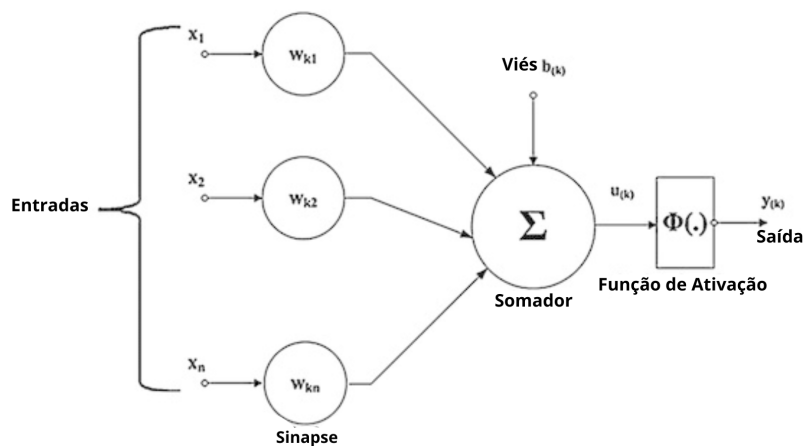
Em 1957, *Frank Rosenblatt* propôs o modelo do *Perceptron*, que foi utilizado para classificar um conjunto de entrada de valor contínuo em duas classes (ROSENBLATT, 1957; DATA SCIENCE ACADEMY, 2022a). No entanto, o *Perceptron* de uma única camada possuía muitas limitações, como demonstrado por *Minsky* e *Papert*, pois o mesmo só é capaz de resolver problemas linearmente separáveis (MINSKY; PAPERT, 1969; BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000).

Durante alguns anos, a pesquisa com as redes neurais não teve muito avanço, devido às limitações computacionais da época. No entanto, em 1982, *John Hopfield* publicou um artigo mostrando a relação entre redes recorrentes e sistemas físicos, abrindo caminho para que novas possibilidades fossem exploradas nessa área de estudo (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000). A partir de então, novos avanços no estudo das redes neurais, como o algoritmo de *backpropagation*, ajudaram a impulsionar o desenvolvimento de novas pesquisas e aplicações nesta área.

4.1 Modelo de um Neurônio Artificial

O funcionamento de um neurônio artificial baseia-se em três elementos básicos: as sinapses, que são as conexões entre os neurônios, sendo representadas por um sinal de entrada multiplicado por um peso sináptico; um somador que faz a combinação linear das entradas e uma função de ativação, que limita o sinal de saída do neurônio a um valor finito, muitas vezes normalizado entre 0 e 1 (HAYKIN, 2001). A Figura 10 apresenta o modelo de neurônio proposto por McCulloch e Pitts.

Figura 10: Modelo de neurônio artificial.



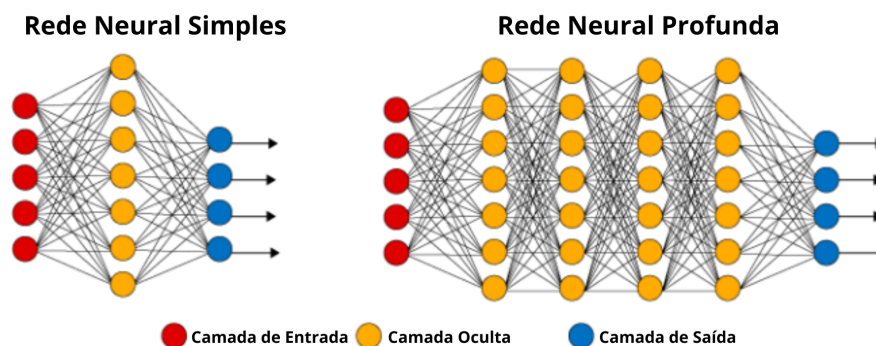
Fonte: Adaptado de (DATA SCIENCE ACADEMY, 2022c).

A partir deste modelo simples de neurônio, foram desenvolvidas as redes neurais, as quais são formadas por através da ligação de vários neurônios em camadas, podendo ser redes simples, com uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída, ou profundas, com várias camadas ocultas, conforme ilustrado na Figura 11.

Com o desenvolvimento das Redes Neurais Profundas, surgiram várias técnicas diferentes de aprendizado de máquina, tais como Redes Neurais Convolucionais, Redes Neurais Recorrentes, *Auto Encoders*, *Generative Adversarial Networks*, *Memory Networks*, entre outras (DATA SCIENCE ACADEMY, 2022b).

O método de aprendizado de uma rede neural pode ser do tipo supervisionado, quando a entrada e a saída da rede são fornecidas por um supervisor (professor) externo, ou não supervisionado, quando não há um supervisor externo para acompanhar o processo

Figura 11: Representação de redes neurais simples e profundas.



Fonte: Adaptado de ([DATA SCIENCE ACADEMY, 2022b](#)).

de aprendizado. Neste caso, aplicam-se outras técnicas, como aprendizado *hebbiano*, aprendizado por competição, aprendizado por reforço, entre outras ([BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000](#)).

Atualmente, existem diversas aplicações que utilizam redes neurais artificiais, sobretudo os modelos de aprendizado não supervisionado, devido ao enorme volume de dados produzidos a cada momento.

Este trabalho utiliza um modelo de Rede Neural Artificial profunda baseado em aprendizado supervisionado, onde as entradas para a rede são as tensões de saída dos sensores e as saídas da rede são os valores de concentração dos gases, medidos por um instrumento de referência, o qual atua como o professor da RNA, auxiliando no processo de calibração dos sensores.

5 Desenvolvimento do Nariz Eletrônico

O desenvolvimento do Nariz Eletrônico teve início com a realização de uma extensa pesquisa sobre os sensores de gases e suas principais aplicações. Em seguida foi selecionado um conjunto abrangente de sensores, contendo inclusive sensores redundantes, que detectam as mesmas espécies gasosas, com o intuito de estudar as respostas dos sensores para diferentes concentrações de biogás e reduzir as variáveis, excluindo aqueles sensores que não apresentassem resposta considerável para os gases que se deseja medir. Além dos sensores de gases, também foi utilizado um sensor que mede a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e ainda a concentração de compostos orgânicos voláteis (VOCs). A utilização deste sensor é importante, pois variações na temperatura e umidade podem alterar a resposta dos sensores de gases, o que poderia gerar falsas medidas. O conjunto inicial de sensores escolhido para compor a placa do Nariz Eletrônico é descrito na [Tabela 3](#).

Tabela 3: Sensores selecionados para o Nariz Eletrônico.

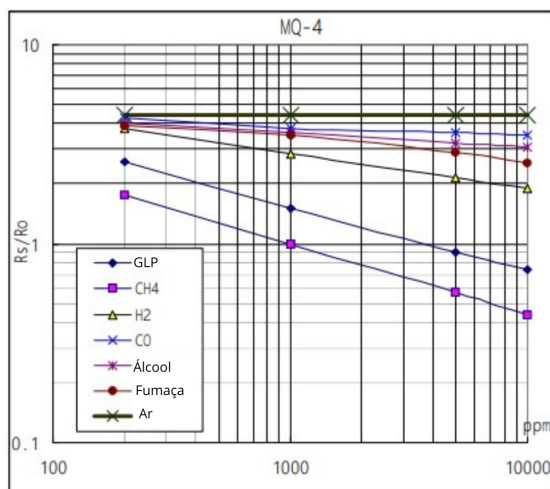
Nome do Sensor / Fabricante	Tipo do Sensor	Gases detectáveis
TGS2600 / Figaro	Semicondutor	Hidrogênio, Etanol, etc.
TGS2602 / Figaro	Semicondutor	VOCs
TGS2611 / Figaro	Semicondutor	Metano, Etanol, Hidrogênio, etc.
MQ2 / Hanway	Semicondutor	GLP, Propano, Metano, etc.
MQ4 / Hanway	Semicondutor	Metano, Gás natural.
MQ6 / Hanway	Semicondutor	GLP, Iso-butano, Propano, etc.
MQ7 / Hanway	Semicondutor	Monóxido de Carbono (CO)
MQ136 / Hanway	Semicondutor	Gás Sulfídrico (H_2S)
MQ138 / Hanway	Semicondutor	Benzeno, álcool, amônia, etc.
MG811 / Winsen	Eletroquímico	Dióxido de Carbono (CO_2)
KE-25 / Figaro	Eletroquímico	Oxigênio (O_2)
ME2CO / Winsen	Eletroquímico	Monóxido de Carbono (CO)
MQ135 / Hanway	Semicondutor	Dióxido de Carbono (CO_2) / NH_3 / Benzeno / NO_x
BME680 / Bosch	Semicondutor	VOCs / Temperatura, Umidade, Pressão atmosférica.

Fonte: Elaborada pela autora.

Os sensores semicondutores apresentam a característica de sensibilidade cruzada, ou

seja, o mesmo sensor pode responder a diferentes gases, o que dificulta a identificação de um determinado gás utilizando um único sensor. Por este motivo, utiliza-se um conjunto de sensores para aumentar a precisão das medições. Para ilustrar este fenômeno, a característica de sensibilidade cruzada do sensor MQ4 é apresentada na [Figura 12](#)

Figura 12: Sensibilidade cruzada do sensor MQ4.



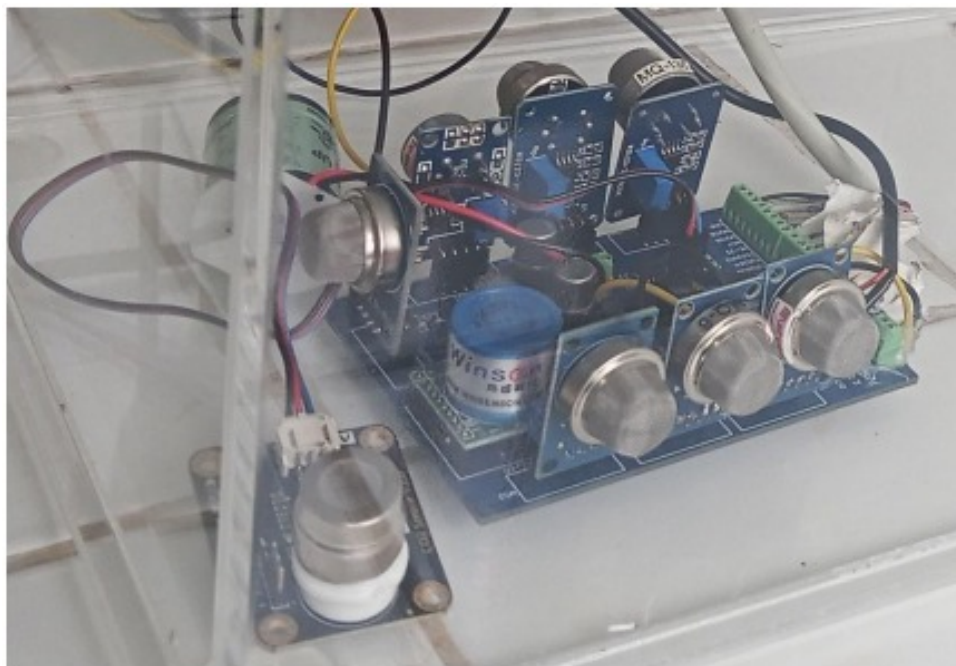
Fonte: Adaptado de ([HANWAY ELECTRONICS](#)).

Todos os sensores utilizados operam com tensão de alimentação de 5V, com tolerância de $\pm 0,2V$, com exceção do BME680, o qual opera com tensão de alimentação de 3,3V. Na placa dos sensores foi utilizado um regulador de tensão para 3,3V, com o intuito de fornecer a alimentação para este sensor. Para garantir que os sensores recebam uma tensão de alimentação estável, foi utilizado um módulo contendo o circuito integrado (CI) TPS63060, fabricado pela *Texas Instruments* (TI), o qual é um conversor chaveado do tipo *buck-boost*, ou seja, ele pode abaixar ou elevar a tensão, com a tensão de saída ajustada para 5,2V. Este CI é capaz de garantir que a tensão de saída permaneça estável quando a tensão de entrada varia entre 4V e 12V. Inicialmente, o circuito de alimentação foi projetado e montado na própria placa de calibração, utilizando a princípio, o CI TPS63060 e depois modificado para o CI TPS63070, do mesmo fabricante. No entanto, devido às dificuldades de layout e sintonia entre carga e tensão de saída, optou-se por utilizar o módulo pronto, ajustando apenas o valor da tensão de saída do mesmo.

5.1 Desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso

A segunda etapa do projeto foi o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI) para a calibração dos sensores, a qual foi feita utilizando a ferramenta online e gratuita *EasyEDA*, disponível no endereço eletrônico <https://easyeda.com/>. Antes da confecção da placa, foram feitos alguns testes com os sensores em matriz de contatos, nos quais foi possível observar características dos sensores, como consumo de potência, amplitude do sinal de saída, sensibilidade a mudanças na atmosfera, repetibilidade do sinal de saída. A placa desenvolvida foi confeccionada e entregue pela loja JLCPCB, localizada na China, a qual tem uma parceria com o *software EasyEDA*, o que permite que as placas sejam encomendadas diretamente do *site*, assim que o *layout* é finalizado. A **Figura 13** mostra a placa já com os sensores conectados. O esquemático da placa é apresentado no Apêndice A.

Figura 13: Placa elaborada para a calibração dos sensores do Nariz Eletrônico.



Fonte: Arquivo pessoal.

5.2 Desenvolvimento do Sistema de Calibração Utilizando o LabVIEW

Para a aquisição dos dados dos sensores foi criado um Instrumento Virtual (VI - *Virtual Instrument*) utilizando o *software LabVIEW*, desenvolvido e distribuído pela empresa *National Instruments* (NI). A interface entre os sensores e o *software* é feita por meio do dispositivo *myDAQ*, também desenvolvido pela *National Instruments*. Este dispositivo dispõe de portas analógicas e digitais tanto para entrada quanto para saída de dados e comunica-se com o computador por uma porta USB. A [Figura 14](#) apresenta o dispositivo *myDAQ*.

Figura 14: Dispositivo de aquisição de sinais *myDAQ*.



Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2022).

Como o *myDAQ* possui apenas 2 (duas) entradas analógicas e a placa dos sensores inicialmente teria 13 sensores, foi necessário utilizar um circuito multiplexador analógico para ter acesso a todos os sinais dos sensores no *LabVIEW*. Para esta finalidade, foi utilizada uma placa eletrônica baseada no circuito integrado 74HC4067, o qual possui 16 entradas analógicas / digitais e uma saída do mesmo tipo. Por meio de 4 entradas digitais de seleção é possível qual entrada terá seu sinal disponibilizado na saída. A placa

do multiplexador pode ser vista na [Figura 15](#).

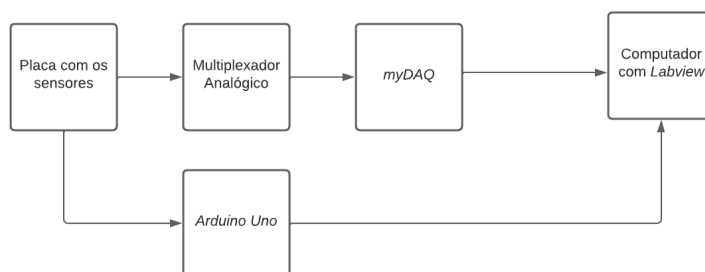
Figura 15: Placa do multiplexador analógico 74HC4067.



Fonte: ([USINAINFO](#), 2022).

Para realizar a leitura das medições do sensor BME680, foi utilizada uma placa de desenvolvimento *Arduino Uno*, pois a saída do sensor utiliza o protocolo de comunicação *I²C (Inter-Integrated Circuit)*, o qual não é compatível com o *Hardware* do *myDAQ*. A [Figura 16](#) e a [Figura 17](#) apresentam o diagrama de blocos e o diagrama esquemático do sistema de calibração desenvolvido.

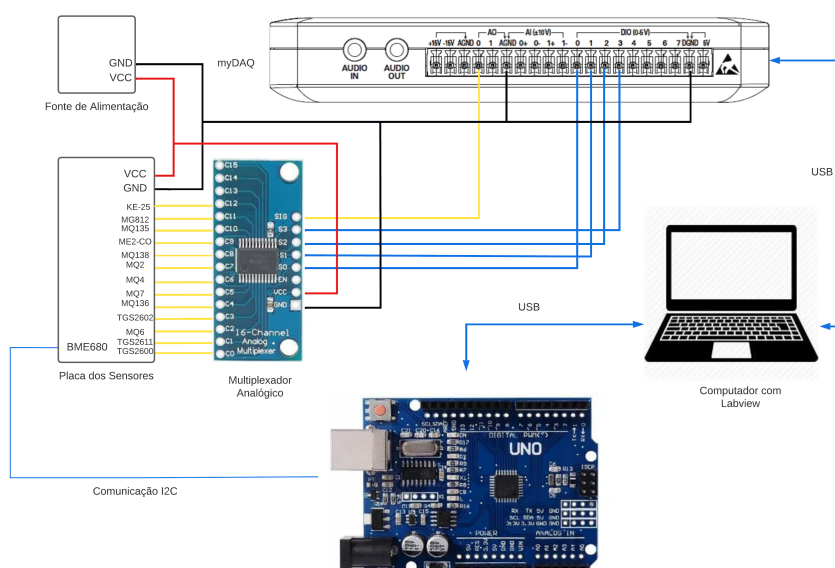
Figura 16: Diagrama de blocos do sistema de calibração dos sensores.



Fonte: Elaborado pela autora.

A aplicação desenvolvida no *LabVIEW* chaveia entre as saídas dos sensores, a uma taxa de amostragem que pode ser configurada no *software*, inicialmente definida em 10Hz,

Figura 17: Diagrama de esquemático do sistema de calibração dos sensores.

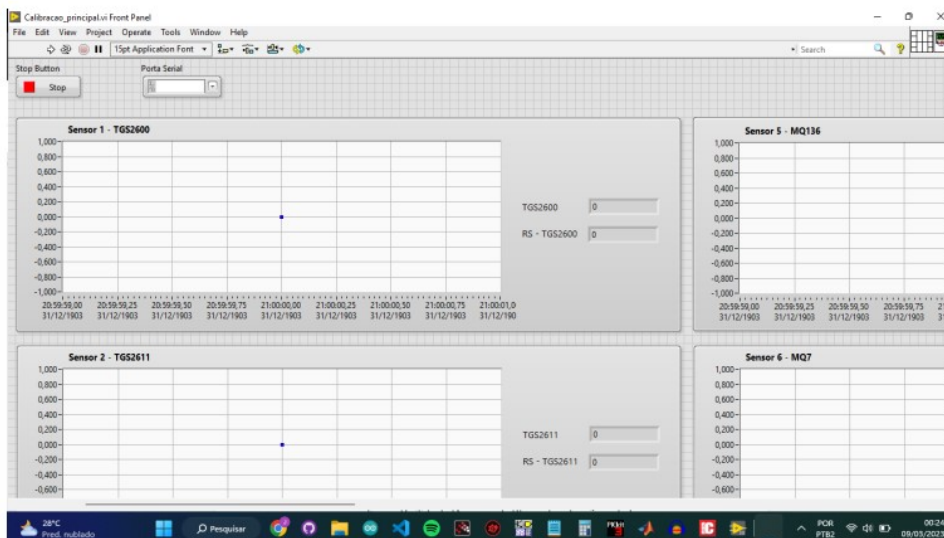


Fonte: Elaborado pela autora.

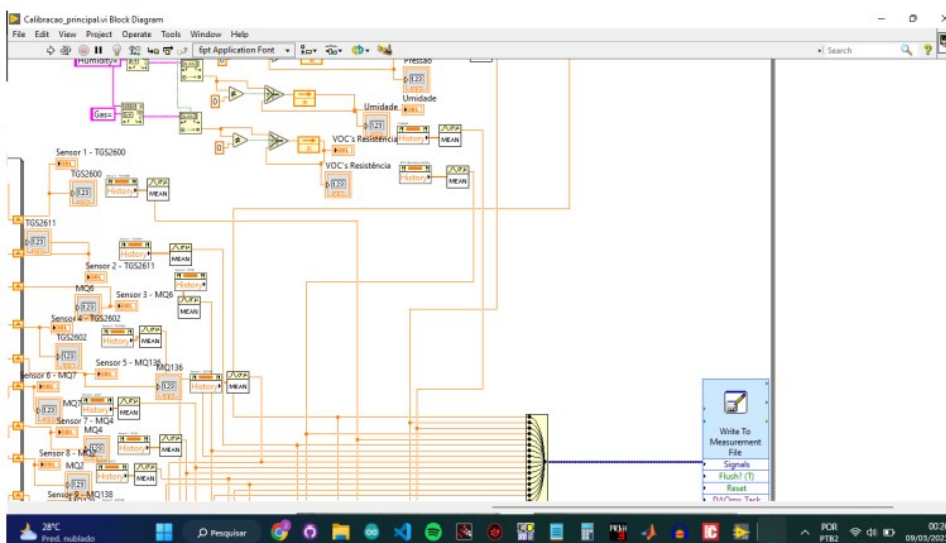
para cada leitura do canal de entrada, e um tempo total de 1,2 segundos para a leitura de todos os sensores. Para suavizar as curvas de variação nas medições e evitar falsos picos de leitura, foi utilizada uma média móvel, com comprimento de 100 (cem) medidas. A cada minuto, os valores médios adquiridos dos sensores são salvos em uma planilha para posterior pré-processamento dos dados e utilização na RNA. A [Figura 18](#) e a [Figura 19](#) mostram, respectivamente, as telas do painel de controle e diagrama de blocos da aplicação desenvolvidas no *LabVIEW*.

O biogás utilizado no processo de calibração foi coletado no Aterro Sanitário em Campina Grande-PB, localizado no Nordeste brasileiro, com o auxílio de uma bomba de sucção, uma mangueira de 5 metros e um saco amostrador para biogás. A mangueira foi conectada na bomba de sucção e inserida em drenos verticais de biogás no Aterro, para que os gases fossem sugados do interior das células de resíduos e armazenados no saco amostrador, para então serem encaminhados ao laboratório.

O sistema de calibração foi montado no Laboratório de Geotecnia Ambiental e Biotecnologia (LGAB), o qual fica localizado no prédio do Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), dentro de uma caixa hermética construída especialmente para a realização da calibração dos sensores do Nariz Eletrônico. A caixa foi projetada com uma

Figura 18: Tela do Painel de Controle da aplicação no *LabVIEW*.

Fonte: Elaborada pela autora.

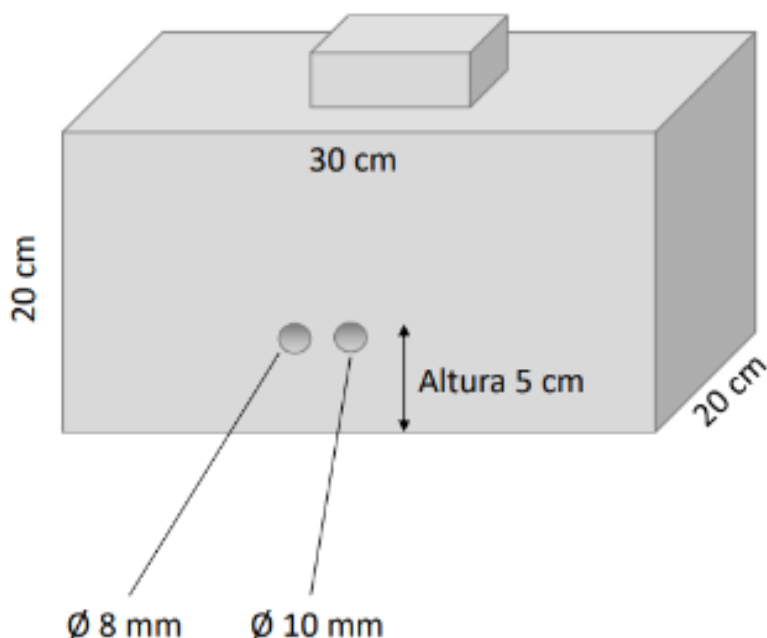
Figura 19: Tela do Diagrama de Blocos da aplicação no *LabVIEW*.

Fonte: Elaborada pela autora.

tampa por onde a placa com os sensores e o instrumento de referência são inseridos, uma membrana por meio da qual o biogás é inserido e dois furos para a passagem dos cabos de alimentação e sinal. A [Figura 20](#) mostra as dimensões da caixa.

As medições dos sensores foram salvas em planilhas de dados, assim como as medições do dispositivo de referência *Dräger X-am 8000*, o qual mede as concentrações de gases como dióxido de carbono, metano, oxigênio, monóxido de carbono, gás sulfídrico, dentre

Figura 20: Caixa construída para a calibração dos sensores no laboratório.



Fonte: Arquivo GGA.

outros, para a análise e comparação dos dados. Os experimentos foram realizados durante o mês de julho de 2023, com o apoio de alunos ligados ao Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), da UFCG. A [Figura 21](#) mostra o sistema de calibração montado no laboratório.

O sistema realiza a leitura das tensões nos sensores e salva os dados em uma planilha. Os dados das resistências dos sensores semicondutores e da concentração calculada para os sensores eletroquímicos são salvos em uma outra planilha, gerando assim duas bases de dados para alimentar a Rede Neural Artificial e avaliar qual delas oferece o melhor resultado. Para a realização do procedimento de calibração, foram feitas medições em ar limpo e com a injeção de biogás. Os valores lidos pelo *Dräger X-am 8000* foram salvos em uma planilha à parte para servir como dados de saída da RNA, funcionando como o professor da rede supervisionada.

Figura 21: Sistema de calibração dos sensores montado no laboratório.



Fonte: Arquivo GGA.

5.3 Resultados e Discussões

Antes de iniciar a aquisição dos dados, a placa com os sensores deve ficar alimentada por, no mínimo, 24 horas, conforme recomendado pelos fabricantes dos sensores MOS. Após este período de pré-aquecimento, os sensores adquirem a estabilidade necessária para funcionar. O procedimento de calibração inicia com a medição da concentração dos gases no ar limpo, antes que seja aplicado o biogás, com o intuito de obter valores de referência para as tensões de saída dos sensores e as concentrações dos gases, medidas pelo instrumento de referência. Após alguns minutos de aquisição de dados com o ar limpo, o biogás é inserido aos poucos, com o auxílio de uma seringa, por meio de uma membrana existente na parte superior da caixa. O volume do biogás no interior da caixa é monitorado pela quantidade de seringas inseridas. Ao final dos experimentos, é utilizado um exaustor para retirar todo o biogás e renovar o ar no sistema de calibração. O sistema de aquisição coleta dados das tensões nas saídas dos sensores, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, resistência dos sensores MOS e concentração de CO estimada para o sensor ME2-CO. A [Equação 4](#) e a [Equação 5](#) representam os cálculos da resistência

do sensor (R_S) para os sensores semicondutores e da concentração de CO para o sensor ME2-CO, respectivamente.

$$R_S = \frac{V_C - V_{OUT}}{V_{OUT}} \times R_L \quad (4)$$

$$[C_{(CO)}]_{ppm} = \frac{V_{OUT} - 0,4}{1,6} \times 500 \quad (5)$$

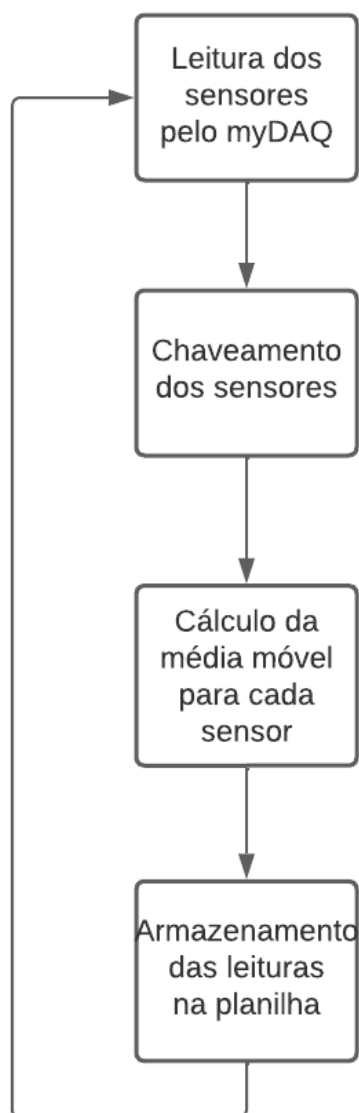
onde R_L é a resistência de carga do sensor, V_C é a tensão de alimentação do circuito, V_{OUT} é a tensão de saída do sensor e $[C_{(CO)}]_{ppm}$ é a concentração de monóxido de carbono medida pelo sensor em ppm. A tensão de alimentação dos sensores é 5V e a saída do sensor ME2-CO varia de 0,4 a 2V. A faixa de operação do mesmo vai de 0 a 500 ppm.

Os dados coletados foram salvos nas planilhas, em intervalos de 1 (um) minuto entre as medições. Para facilitar a análise dos dados, inicialmente, foram consideradas apenas as medidas das tensões dos sensores de gases e as medidas das concentrações dos gases, dadas pelo instrumento de referência. As medições da temperatura e umidade relativa serão consideradas posteriormente, caso seja necessário melhorar a precisão da rede neural.

Os dados utilizados para o treinamento da rede neural foram coletados no laboratório durante o mês de julho de 2023. Para a análise, os dados foram compilados em uma única planilha, na qual as medições dos 13 (treze) sensores de gás foram utilizadas como entradas para a rede neural e as concentrações dos 5 (cinco) gases medidos pelo instrumento de referência (CO_2 , CH_4 , O_2 , H_2S e CO) foram utilizadas como saídas. A [Figura 22](#) apresenta os passos utilizados no procedimento de aquisição de dados pelo *Labview*.

Para a construção da RNA, foi utilizada a linguagem de programação *Python*, juntamente com os pacotes de treinamento de redes neurais *TensorFlow* e *Keras*. Foram variados diversos parâmetros da rede, como número de camadas ocultas, número de neurônios por camadas, funções de ativação para as camadas ocultas e número de épocas para o treinamento.

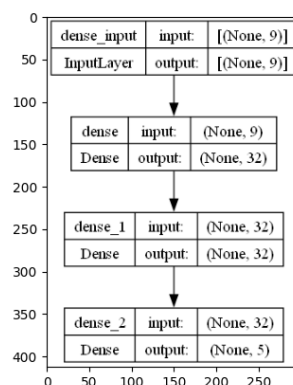
Inicialmente, foram realizados treinamentos da rede completa, com todos os sensores de entrada e todos os gases alvos de saída, e posteriormente, foram feitos alguns testes específicos com conjuntos menores de sensores, para avaliar a correlação dos sensores com os valores de saída e determinar os mais adaptados para compor a configuração final

Figura 22: Fluxograma do processo de calibração no *Labview*.

Fonte: Elaborada pela autora.

do Nariz Eletrônico. As funções de ativação que proporcionaram melhores resultados e, portanto, foram utilizadas para a análise, foram: “Tanh” (Tangente Hiperbólica), “ReLu” (Linear Retificada) e “ELu” (Unidade Linear Exponencial). A configuração escolhida para a rede neural foi de 32 camadas ocultas, com 32 neurônios cada. Foi utilizado o otimizador *Adam*, com 10000 épocas de treinamento, para aumentar a precisão dos resultados. Foram separados 80% dos dados para treinamento da rede e 20% para teste, sendo estes selecionados de maneira aleatória. A [Figura 23](#) mostra a arquitetura da RNA utilizada.

Figura 23: Arquitetura da Rede Neural Artificial Utilizada.



Fonte: Elaborada pela autora.

A [Tabela 4](#) e a [Tabela 5](#) apresentam os valores da raiz do erro médio quadrático para cada saída, considerando o conjunto completo de 13 sensores e um conjunto reduzido com 9 sensores (MQ6, MQ136, MQ7, MQ4, MQ2, MQ138, ME2-CO, MQ135 e KE-25). Os resultados sugerem que é possível diminuir o conjunto de sensores de entrada sem perdas de precisão.

Tabela 4: Raiz do erro médio quadrático por saída para o conjunto completo de sensores.

Saída	Função Tanh	Função ReLu	Função ELu
CO_2	0.143889	0.218858	0.26288
CH_4	0.215752	0.28693	0.26971
O_2	0.226674	0.232409	0.22473
H_2S	1.135174	1.484994	1.28467
CO	0.357171	0.469556	0.42463

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5: Raiz do erro médio quadrático por saída para o conjunto reduzido de sensores.

Saída	Função Tanh	Função ReLu	Função ELu
CO_2	0.226627	0.36059	0.20335
CH_4	0.316394	0.283753	0.24983
O_2	0.241981	0.266079	0.2445
H_2S	1.24759	1.606923	1.47209
CO	0.505918	0.477124	0.49647

Fonte: Elaborada pela autora.

Considerando o erro por saída para o conjunto reduzido de sensores, a função de ativação “ELu” fornece os melhores resultados para os gases em maior concentração nas amostras analisadas (CO_2 , CH_4 e O_2), e por este motivo foi a escolhida para realizar as previsões.

As Figuras 24 a 29 apresentam as perdas do modelo ao longo das épocas de treinamento e a relação entre os valores reais e preditos para cada saída, utilizando os 9 sensores de entrada e a função de ativação “ELu”.

Conforme pode ser observado nas figuras, o modelo de RNA foi capaz de fornecer uma resposta para a concentração dos gases alvos muito próxima à fornecida pelo instrumento padrão.

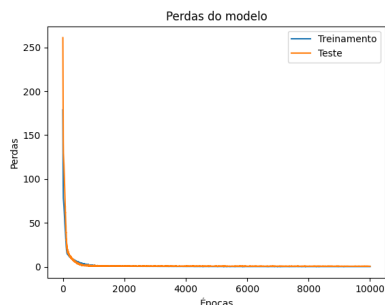
Após a obtenção do modelo de rede neural, foi utilizado um *script* em *Python* que converte um modelo de rede neural gerado pelo *TensorFlow* para um modelo do *TensorFlow Lite*, o qual é mais leve e pode ser utilizado em sistemas embarcados com baixa densidade de memória. Em seguida, foi executado outro *script*, o qual fornece um arquivo do tipo *header* (.h), a partir de um modelo de rede do *TensorFlow Lite*, o qual pode ser utilizado diretamente como uma biblioteca em linguagem C, para qualquer microcontrolador em que se deseje embarcar a rede, desde que o dispositivo possua requisitos de memória suficientes para suportar o modelo gerado.

Para a construção do sistema embarcado que irá constituir o Nariz Eletrônico, foi utilizada a placa de desenvolvimento *Feather M0 RFM95*, fabricada pela *Adafruit*, a qual contém o microcontrolador *ARM Cortex M0+ ATSAMD21G18*, da *Microchip*, o qual opera com frequência de 48MHz e tensão de alimentação de 3,3V, possuindo memória *flash* de 256 kB e memória *RAM* de 32 kB (ADAFRUIT, 2023). A Figura 30 mostra a placa *Adafruit Feather M0 RFM9x*.

O arquivo *header* gerado pelo *script* ocupa 49 kB de memória *flash*, possibilitando que o mesmo seja utilizado no código do microcontrolador escolhido.

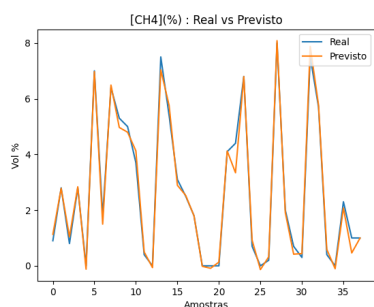
A plataforma *Arduino IDE* foi utilizada para programar a placa, devido ao suporte oferecido pelo fabricante, à facilidade de utilizar bibliotecas que auxiliam no desenvolvimento do código e à possibilidade de realizar a gravação do microcontrolador e testar seu funcionamento no mesmo ambiente. A biblioteca *Eloquent TinyML*, a qual encontra-se disponível para a instalação na própria plataforma do *Arduino*, foi utilizada para facilitar a implemen-

Figura 24: Perdas do Modelo ao longo das épocas.



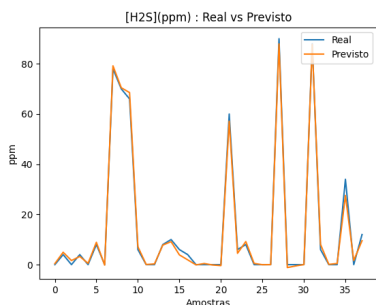
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 26: Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de CH4 (%).



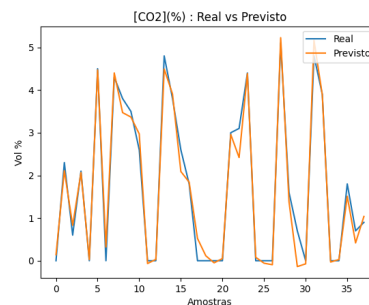
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 28: Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de H2S (ppm).



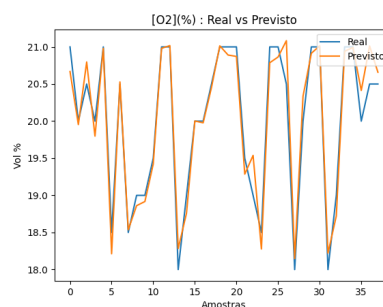
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 25: Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de CO2 (%).



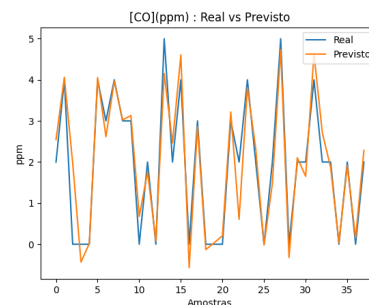
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 27: Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de O2 (%).



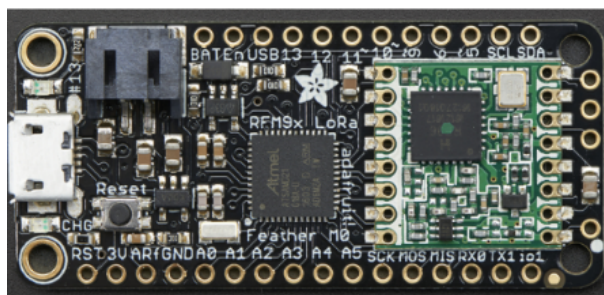
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 29: Comparação entre o valor real e o previsto para a concentração de CO (ppm).



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 30: Placa de desenvolvimento Adafruit Feather M0 RFM9x.



Fonte: (ADAFRUIT, 2023).

tação de modelos do *TensorFlow Lite* em microcontroladores suportados pela plataforma, no entanto, algumas versões mais recentes da biblioteca *EloquentTinyML* apresentaram instabilidade durante a compilação do código, por isso foi utilizada uma versão mais antiga da biblioteca (0.0.10.0), juntamente com o modelo de placa *Arduino Zero*, que possui o mesmo microcontrolador da placa da *Adafruit* e é compatível com a mesma, desde que observadas algumas questões, como o mapeamento dos pinos de entrada e saída e a maneira de referenciar a comunicação serial.

Para testar a rede embarcada na placa, foram utilizados novos dados coletados no laboratório, os quais não foram utilizados para o treinamento da rede. Os valores de saída obtidos pela rede neural embarcada ficaram suficientemente próximos dos valores lidos pelo instrumento de referência, mostrando a eficácia do modelo.

Para concluir a validação do Nariz Eletrônico, uma nova placa contendo os sensores selecionados e a placa com o microcontrolador foi projetada e está sendo confeccionada. Assim que estiver pronta, será possível obter em tempo real as leituras dos sensores e a previsão da concentração dada pela RNA, para assim determinar a acurácia geral do sistema. O esquemático da nova placa é apresentado no Apêndice B.

6 Considerações Finais

O monitoramento da concentração de gases nocivos no ambiente é uma tarefa muito importante e que, muitas vezes, necessita de instrumentos complexos e de custo elevado. Desta forma, o desenvolvimento de sistemas de medição que operem de maneira mais simples e forneçam resultados precisos, como o Nariz Eletrônico proposto neste trabalho, é um desafio bastante relevante.

O sistema desenvolvido utiliza um conjunto de sensores de gases dos tipos eletroquímicos e semicondutores, sendo que os últimos possuem baixa seletividade e precisão, e uma aplicação desenvolvida no *LabVIEW* para aquisição dos sinais de saída dos sensores. Os dados coletados pelos sensores foram utilizados como entrada para o treinamento de uma Rede Neural Artificial, tendo como saídas da mesma os valores de concentração dos gases alvos, medidos pelo instrumento de referência.

A Rede Neural Artificial treinada foi capaz de fornecer previsões precisas das concentrações dos gases analisados e ainda foi possível diminuir a quantidade de sensores utilizados, sem perda significativa de acurácia. Após a definição da arquitetura neural no computador, desenvolvida em linguagem *Python*, foi obtido um modelo de rede adaptado para funcionar em um microcontrolador *ARM Cortex M0*, de 32 bits. Os testes com o modelo embarcado da RNA também apresentaram bons resultados, com um erro muito baixo, com o RMSE menor que 1, para a maioria dos casos, mostrando que é possível utilizar o Nariz Eletrônico projetado para a medição dos gases presentes no biogás do aterro sanitário.

Para obter melhores resultados, deverão ser coletados novos dados, utilizando diferentes composições de biogás, preferencialmente obtidos em períodos diferentes do dia e épocas distintas do ano, para garantir melhor precisão na previsão dos resultados.

A utilização do Nariz Eletrônico para o monitoramento da contaminação pelo biogás do aterro sanitário irá proporcionar maior agilidade e facilidade nas medições, permitindo que novas áreas sejam monitoradas, e de maneira rápida e acessível.

6.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

Algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Analisar a influência das medições de temperatura e umidade sobre o modelo de

RNA, com a finalidade de melhorar a acurácia do sistema;

- Analisar a possibilidade de uma redução ainda maior no conjunto de sensores, buscando otimizar a relação custo benefício do sistema;
- Testar o Nariz Eletrônico em outros ambientes, como estações de esgoto, indústrias e outros locais que geram poluição do ar, ampliando assim as possibilidades de uso do sistema.

Referências

- ADAFRUIT, I. *Adafruit Feather M0 Radio with LoRa Radio Module*. New York, 2023. 81 p. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-radio-with-lora-radio->
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – procedimento*. Rio de Janeiro, 1996.
- BANERJEE(ROY), R. *et al.* Artificial flavor perception of black tea using fusion of electronic nose and tongue response: A bayesian statistical approach. *Journal of Food Engineering*, v. 142, p. 87–93, 2014. ISSN 0260-8774. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877414002453>
- BARON, R.; SAFFELL, J. Amperometric gas sensors as a low cost emerging technology platform for air quality monitoring applications: A review. *ACS Sensors*, v. 2, n. 11, p. 1553–1566, 2017. PMID: 29025261. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acssensors.7b00620>
- BRAGA, A. d. P.; CARVALHO, A. P. d. L. d. F.; LUDERMIR, T. B. *Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 2000. v. 1. 248 p.
- CABRAL, R. C. *Aproveitamento do biogás em aterros sanitários: especificações construtivas beneficiando aspectos ambientais e energéticos*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009. 138 p.
- DATA SCIENCE ACADEMY. *Capítulo 2 - Uma Breve História das Redes Neurais Artificiais*. 2022. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.com.br/uma-breve-historia-das-redes-neurais-artificiais/>
- DATA SCIENCE ACADEMY. *Capítulo 3 – O Que São Redes Neurais Artificiais Profundas ou Deep Learning?* 2022. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.com.br/o-neuronio-biologico-e-matematico/>
- DATA SCIENCE ACADEMY. *Capítulo 4 - O Neurônio, Biológico e Matemático*. 2022. Disponível em: <https://www.deeplearningbook.com.br/o-que-sao-redes-neurais-artificiais-profundas/>
- ESFAHANI, S. *et al.* Development of a tuneable ndir optical electronic nose. *Sensors*, v. 20, n. 23, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6875>
- FERREIRA, A. L. *Aterro Sanitário*. 2018. Disponível em: <https://portalresiduossolidos.com/aterro-sanitario/>
- FIRTH, J.; JONES, A.; JONES, T. The principles of the detection of flammable atmospheres by catalytic devices. *Combustion and Flame*, v. 20, n. 3, p. 303–311, 1973. ISSN 0010-2180. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0010218073900217>

GARDNER, E. L. W.; GARDNER, J. W.; UDREA, F. Micromachined thermal gas sensors: A review. *Sensors*, v. 23, n. 2, 2023. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/681>.

GARDNER, J. W.; BARTLETT, P. N. A brief history of electronic noses. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 18, n. 1, p. 210–211, 1994. ISSN 0925-4005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925400594870853>.

GOEL, N. *et al.* Metal oxide semiconductors for gas sensing. *Engineering Reports*, v. 5, n. 6, p. e12604, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eng2.12604>.

HANWAY ELECTRONICS. *Technical Data for MQ-4 Gas Sensor*. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4.pdf>.

HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e Práticas*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. v. 1. 898 p.

HEBB, D. O. *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. New York: John Wiley And Sons, Inc., 1949. v. 1. 365 p.

HUANG, J.; WAN, Q. Gas sensors based on semiconducting metal oxide one-dimensional nanostructures. *Sensors*, v. 9, n. 12, p. 9903–9924, 2009. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/9/12/9903>.

HUNTER, G. W. *et al.* Editors' choice—critical review—a critical review of solid state gas sensors. *Journal of The Electrochemical Society*, IOP Publishing, v. 167, n. 3, p. 037570, feb 2020. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1149/1945-7111/ab729c>.

(IPCC), I. P. on C. C. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

JASINSKI, G. *et al.* Evaluation of the electronic nose used for monitoring environmental pollution. In: *2018 XV International Scientific Conference on Optoelectronic and Electronic Sensors (COE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.

JHA, R. K. Non-dispersive infrared gas sensing technology: A review. *IEEE Sensors Journal*, v. 22, n. 1, p. 6–15, 2022.

JUNIOR, F. A. F. M. *Condições intervenientes na geração de biogás de resíduos recém dispostos em aterro sanitário e com um ano de aterramento*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

KARTHIKEYAN, S. *et al.* Gas sensors - a review. *J. Environ. Nanotechnol.*, v. 4, n. 4, p. 01–14, 2015.

LIU, H.; SHI, Y.; WANG, T. Design of a six-gas ndir gas sensor using an integrated optical gas chamber. *Opt. Express*, Optica Publishing Group, v. 28, n. 8, p. 11451–11462, Apr 2020. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-28-8-11451>.

MALANCONI, R.; CABRAL, R. Impactos e benefícios da produtividade de biogás em aterro sanitário. *Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade*, v. 5, 06 2015.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, v. 5, n. 4, p. 115–133, 1943.

MINSKY, M.; PAPERT. *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press, 1969. v. 1. 316 p.

MONCRIEFF, R. W. An instrument for measuring and classifying odours. *Journal of Applied Physiology*, v. 16, p. 742–749, 1961.

NATIONAL INSTRUMENTS. *myDAQ - Dispositivo de aquisição de dados para estudantes*. 2022. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/model/mydaq-university-kit.html>.

NAZEMI, H. *et al.* Advanced micro- and nano-gas sensor technology: A review. *Sensors*, v. 19, n. 6, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/6/1285>.

NIKOLIC, M. V. *et al.* Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application. *Sensors*, v. 20, n. 22, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/22/6694>.

RODRÍGUEZ, A. B. *Contribuições ao desenvolvimento de um nariz eletrônico para análises de odores ambientais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

ROSENBLATT, F. *The perceptron - A perceiving and recognizing automaton*. Ithaca, New York, 1957.

SILVA, B. S. F. d. A. *Análise de Circuitos Osciladores com Sensores SAW para a Utilização em Narizes Eletrônicos*. Dissertação (Mestrado) — UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2019.

SILVA, P. d. B. S. *Identificação automática de frutas com um nariz eletrônico e métodos avançados de aprendizagem de máquina*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. *Gestión Integral de residuos sólidos*. São Paulo: McGraw-Hill, 1994.

USINAINFO. *Módulo Multiplexador 74HC4067 / HP4067 CMOS Analógico Digital 16 Canais*. 2022. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/outros-modulos-arduino/modulo-multiplexador-74hc4067-hp4067-cmos-analogico-digital-16-canais-4759.html>.

VILLARIM, M. R. *Estudo e desenvolvimento de um sensor sem fio inteligente para monitoramento distribuído de poluentes atmosféricos no contexto de cidades inteligentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

VOSS, H. G. J. *Desenvolvimento de um Nariz Eletrônico aplicado à determinação do estágio de maturação em pessegueiros*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2019.

WIDROW, B. *Adaptive 'Adaline' Neuron using Chemical 'Memistors'*. Stanford, CA, 1960.

WU, L. *et al.* A novel fabricating process of catalytic gas sensor based on droplet generating technology. *Micromachines*, v. 10, n. 1, 2019. ISSN 2072-666X. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2072-666X/10/1/71>>.

XU, L. *et al.* Behaviour of a catalytic combustion methane gas sensor working on pulse mode. In: *SENSORS, 2010 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 391–394.

XU, Y. *et al.* Research on a mixed gas recognition and concentration detection algorithm based on a metal oxide semiconductor olfactory system sensor array. *Sensors*, v. 18, n. 10, 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/10/3264>>.

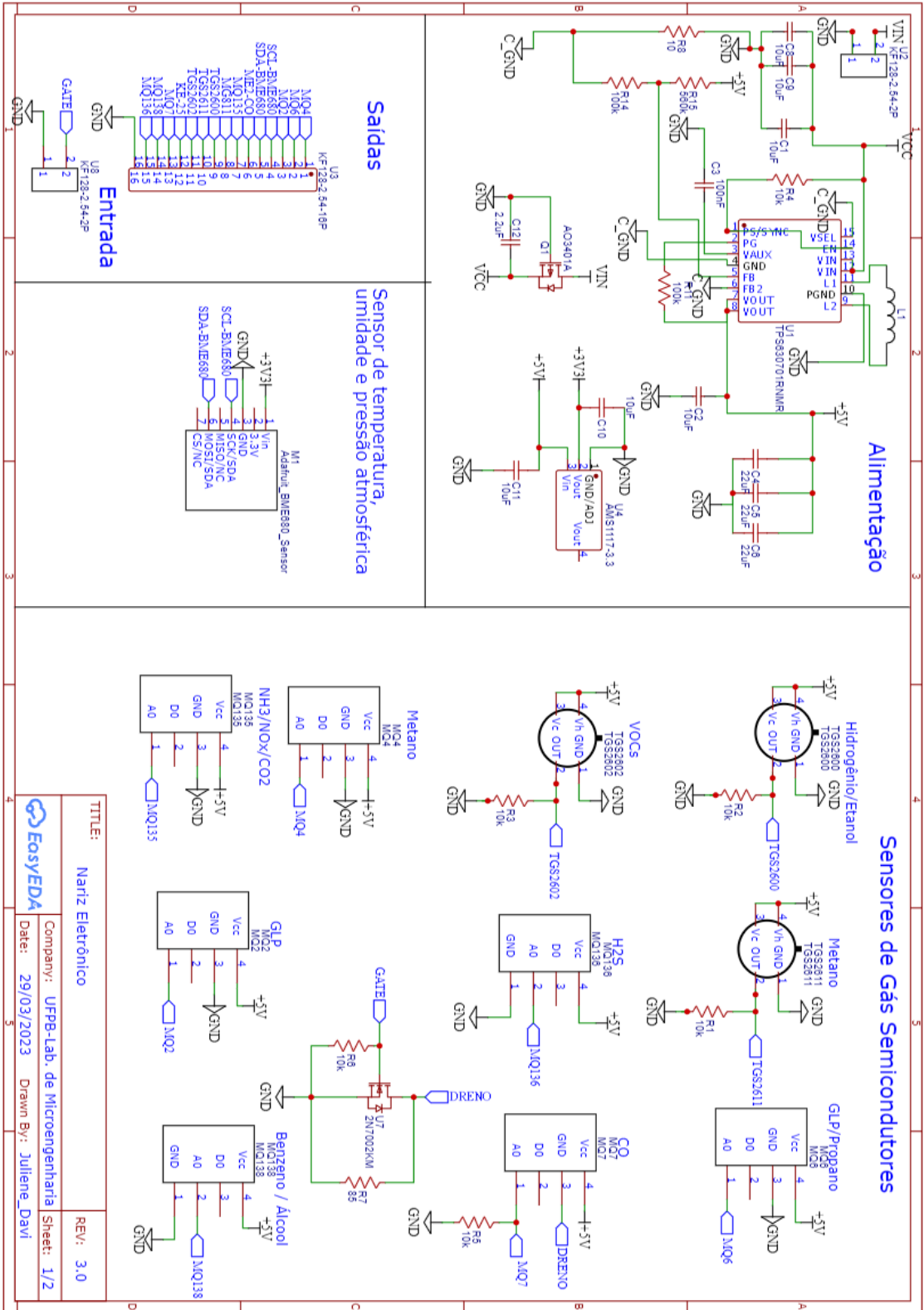
YAN, J. *et al.* Electronic nose feature extraction methods: A review. *Sensors*, v. 15, n. 11, p. 27804–27831, 2015. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/27804>>.

YANG, N. *et al.* Environmental impact assessment on the construction and operation of municipal solid waste sanitary landfills in developing countries: China case study. *Waste Management*, v. 34, n. 5, p. 929–937, 2014. ISSN 0956-053X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X14000695>>.

YUNUSA, Z. *et al.* Gas sensors: A review. *Sensors and Transducers*, v. 168, p. 61–75, 04 2014.

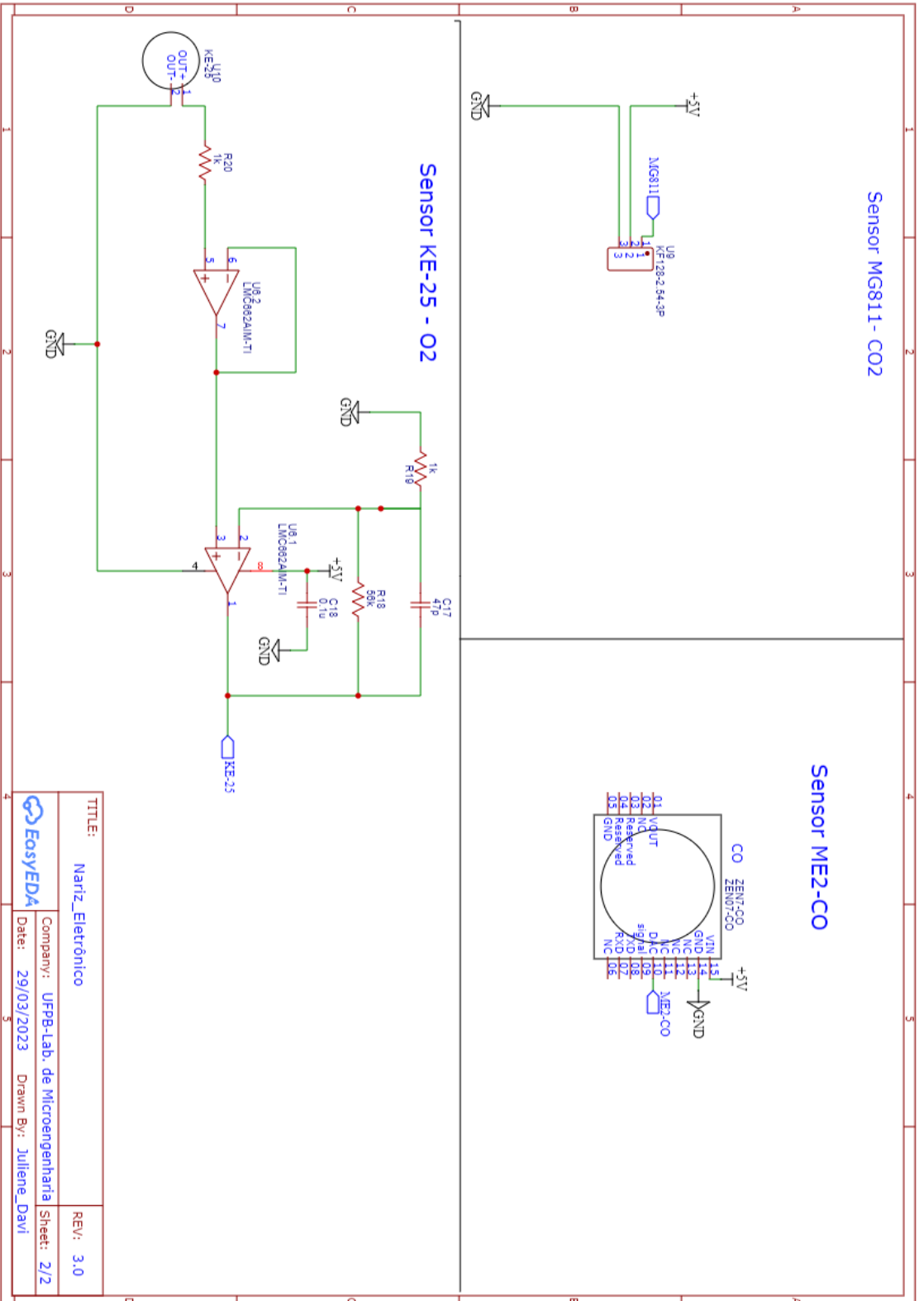
Apêndices

Apêndice A - Esquemático da placa de calibração dos sensores



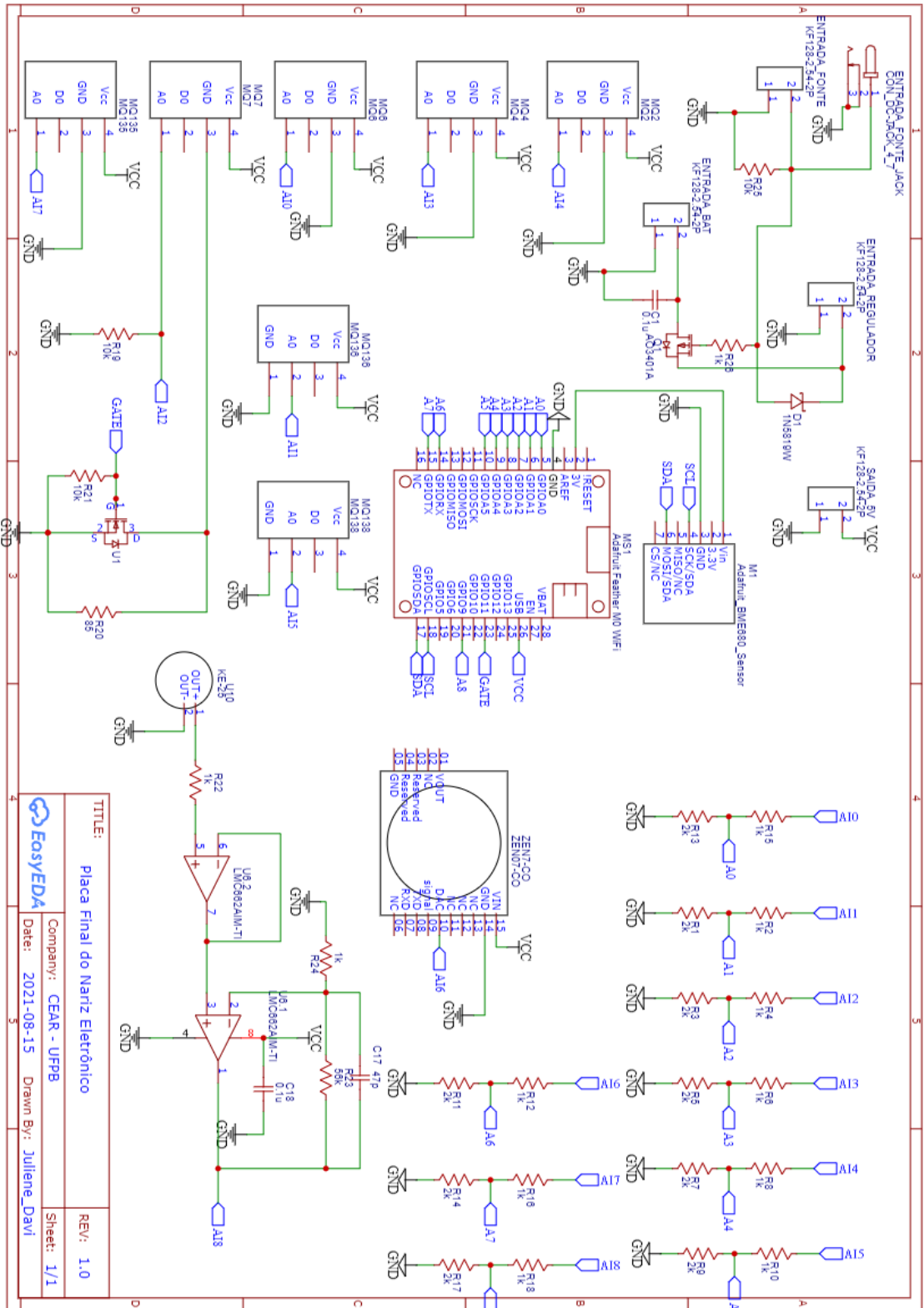
TITLE:	Nariz Eletrônico
Company:	UFPP- Lab. de Microengenharia
Date:	29/03/2023
Drawn By:	Juliene_Davi
REV:	3.0
Sheet:	1/2





TITLE:	Nantz_Electrónico	REV:	3.0
		Company:	UFPP-Lab. de Microingeniería
Date:	29/03/2023	Drawn By:	Juliene Davi
		Sheet:	2/2

Apêndice B - Esquemático da placa final do Nariz Eletrônico



TITLE: Placa Final do Nariz Eletrônico		REV: 1.0
Company: CEAR - UFPP		Sheet: 1/1
Date: 2021-08-15		Drawn By: Juliene_Davi

