



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

*Colegiado de Ciência da Computação*

**Curso de Bacharelado em Ciência da Computação**

## **Sistema de broadcast Bluetooth com sensor óxido metálico para a determinação de gás amônia**

Trabalho de Conclusão de Curso

Lucas Eduardo Fischer Mülling



Cascavel-PR

2021

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE**

**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS**

*Colegiado de Ciência da Computação*

**Curso de Bacharelado em Ciência da Computação**

**Lucas Eduardo Fischer Mülling**

**Sistema de broadcast Bluetooth com sensor óxido metálico  
para a determinação de gás amônia**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação, do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel.

Orientador(a): Marcio Seiji Oyamada  
Coorientador(a): Cleber Antonio Lindino

Cascavel-PR

2021

**LUCAS EDUARDO FISCHER MÜLLING**

**SISTEMA DE BROADCAST BLUETOOTH COM SENSOR ÓXIDO METÁLICO PARA A DETERMINAÇÃO DE GÁS AMÔNIA**

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Ciência da Computação, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, aprovada pela Comissão formada pelos professores:

---

Prof. Dr. Marcio Seiji Oyamada (Orientador)  
Colegiado de Ciência da Computação, UNIOESTE

---

Prof. Dr. Cleber Antonio Lindino (Coorientador)  
Colegiado de Química, UNIOESTE – Toledo

---

Prof. Dr. Luiz Antonio Rodrigues  
Colegiado de Ciência da Computação, UNIOESTE

Cascavel, 28 de julho de 2022

*Dedicado a todos que tornaram este trabalho possível*

*“It is disgraceful for a philosopher to say: the good and the beautiful are one; if he adds ‘also the true’, one ought to beat him. Truth is ugly. We possess art lest we perish of the truth.”*  
*(Nietzsche)*

# Resumo

O uso de sensores óxido metálicos para aplicações de medição de qualidade do ar se mostra vantajoso devido ao baixo custo dos sensores, baixo tempo de resposta e facilidade de operação. O sensor MICS-6814 consiste de um pacote de 3 sensores a base de silício com a capacidade de medição de diversos gases. Devido a composição óxido metálica do sensor, sua resposta sobre influência de diversos fatores externos como, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar. Neste trabalho exploramos o uso e calibração do sensor MICS-6814 em um sistema embarcado em tempo-real para a detecção de amônia ( $\text{NH}_3$ ) em ambientes fechados visando aplicações em cenários industriais. Os dados coletados são enviados por meio do padrão *Bluetooth Environmental Sensing* para dispositivos coletores que também implementam o padrão. O método de calibração utilizado para o sensor MICS-6814 é baseado na correção da influência das variáveis de temperatura ambiente e umidade relativa do ar utilizando o método de regressão linear múltipla; com a calibração da resposta do sensor ao gás amônia realizada utilizando o método dos quadrados mínimos. O processo de calibração foi realizado em laboratório com testes variando a temperatura e umidade relativa do ar em uma câmara de vidro fechada, e dados coletados aplicados a regressão linear múltipla. Calibração da resposta quanto a presença de amônia na câmara fechada foram feitos expondo o sensor a um volume amostral de amônia ( $\text{NH}_3$ ) de  $0.5\text{mL}$  e  $1.0\text{mL}$ , e dados coletados dos testes aplicados ao método dos quadrados mínimos para a geração da curva de resposta do sensor para a concentração de amônia. Os resultados obtidos com a calibração mostram que o método da regressão linear foi capaz de realizar a correção da influência da variação da temperatura e umidade relativa do ar na resposta do sensor. Nos cenários de testes, o sistema foi capaz de detectar a presença de amônia em um ambiente fechado. Os testes realizados com protocolo *Bluetooth* demonstraram um alcance de transmissão de dados de aproximadamente 10 metros, realizado em um laboratório com existência de paredes e obstáculos.

**Palavras-chave:** Sistemas Embarcados, *Bluetooth*, Qualidade do Ar.

# Lista de figuras

Figura 1 – Pacote de dados BLE . . . . .	23
Figura 2 – Sensor MICS-6814 . . . . .	25
Figura 3 – Método de leitura dos dados do sensor. Ao fundo é possível observar a câmara de vidro fechada contendo ambos os sensores, a frente a placa TTGO realizando leitura por meio da porta serial . . . . .	30
Figura 4 – Na figura: (A) sensor, (B) béquer com hidróxido de amônio, dispostos a uma distância de 1 metro . . . . .	34
Figura 5 – Circuito de leitura do sensor MICS-6814 . . . . .	38
Figura 6 – Teste 1 – Variação da umidade. É possível observar que quando a umidade relativa dentro da câmara aumenta a resposta do sensor cai . . . . .	44
Figura 7 – Teste 2 – Variação da umidade. Conforme a umidade relativa dentro da câmara diminui (instante de tempo 1100 após introduzido o ar sintético) a resposta do sensor aumenta . . . . .	44
Figura 8 – Teste 3 – Variação da umidade. Umidade aumenta no instante de tempo 0 de 30% para 72% no instante de tempo 1300 . . . . .	44
Figura 9 – Teste 4 – Variação da umidade. Umidade relativa do ar dentro da câmara diminui, resposta do sensor aumenta . . . . .	44
Figura 10 – Teste 5 – Variação da umidade. Umidade relativa do ar dentro da câmara aumenta, gerando queda na resposta do sensor que volta a subir quando a umidade relativa do ar dentro da câmara volta a aumentar . . . . .	45
Figura 11 – Teste 6 – Variação da umidade. Umidade relativa do ar dentro da câmara aumenta, resposta do sensor cai . . . . .	45
Figura 12 – Teste 7 – Determinação de R0. No gráfico observa-se que ambos a temperatura e a umidade relativa dentro da câmara permanecem constantes . . . . .	45
Figura 13 – Teste 8 – Teste de variação de temperatura, no instante de tempo 0 a câmara fechada é colocada dentro da caixa contendo gelo; no instante de tempo 2200, retira-se a câmara fechada de vidro da caixa contendo gelo, a mesma é colocada em uma bancada . . . . .	45
Figura 14 – Resultado da regressão linear múltipla utilizando com o entrada os resultados dos testes 1 a 6 e 8 . . . . .	46
Figura 15 – Teste 9 – Validação calibração com teste de variação da umidade relativa do ar dentro da câmara fechada. No teste a umidade relativa do ar dentro da câmara varia aproximadamente 55% . . . . .	47
Figura 16 – Teste 10 – Validação calibração com teste de variação da umidade relativa do ar dentro da câmara fechada. No teste a umidade relativa do ar dentro da câmara varia aproximadamente 58% . . . . .	47

Figura 17 – Teste de longa duração para a estabilidade do sistema . . . . .	47
Figura 18 – Teste 11 – Teste com amostra de amônia de $0.5mL$ . No instante de tempo 120 a amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 450 o ar sintético é injetado . . . . .	48
Figura 19 – Teste 12 – Teste com amostra de amônia de $0.5mL$ . No instante de tempo 10 a amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 380 o ar sintético é injetado . . . . .	48
Figura 20 – Teste 13 – Teste com amostra de amônia $1.0mL$ . No instante de tempo 50 a amostra de amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 200 o ar sintético é injetado . . . . .	49
Figura 21 – Teste 14 – Teste com amostra de amônia $1.0mL$ . No instante de tempo 0 a amostra de amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 220 o ar sintético é injetado . . . . .	49
Figura 22 – Curva de concentração para a resposta do sensor ao gás amônia e média dos valores de concentração obtidos para os testes com $0.5mL$ e $1.0mL$ de amônia volatilizada . . . . .	50
Figura 23 – Resultado do teste 3 quanto ao tempo de resposta do sensor MICS-6814. Instante de tempo 675 corresponde a abertura da porta da sala . . . . .	50
Figura 24 – Resposta do sensor perante a presença do agente etanol. No instante de tempo 50 o papel de filtro quantitativo umedecido com etanol é inserido na câmara fechada; no instante de tempo 400, remove-se os sensores da câmara fechada de vidro. . . . .	52
Figura 25 – Na figura: (A) Tela do aplicativo <i>BLE Scanner</i> conectado ao sensor, abaixo no <i>display</i> do sensor é possível observar a que um dispositivo ES esta conectado. (B) Tela do aplicativo <i>BLE Scanner</i> conectado ao sensor com notificações habilitadas, abaixo no <i>display</i> é possível observar que um dispositivo ES esta conectado e recebendo notificações . . . . .	53
Figura 26 – Sala utilizada para os testes de validação da calibração para a amônia . . . . .	64
Figura 27 – Fonte de amônia (hidróxido de amônio) e béquer utilizados para o teste de validação da calibração da amônia . . . . .	64

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Gases e respectivas concentrações medidas pelo sensor MICS-6814 . . . . .	26
Tabela 2 – Testes realizados no dia 24 de Abril de 2022 contemplando a variação da umidade relativa do ar em ambiente com ar sintético . . . . .	30
Tabela 3 – Testes realizados no dia 24 de Abril de 2022 contemplando a variação da temperatura da câmara fechada com ar sintético . . . . .	31
Tabela 4 – Testes realizados no dia 27 de maio de 2022 contemplando a validação da calibração para variação da humidade relativa do ar . . . . .	32
Tabela 5 – Resultados obtidos para a calibração de amônia com volume amostral de 0.5mL e 1.0mL correspondente a leitura do sensor e concentração da amônia calculada . . . . .	49
Tabela 6 – Resultados de validação para a calibração do gás amônia quanto ao tempo de resposta do sensor . . . . .	51

# Lista de códigos

Código 1 – Códigos para a criação das tarefas . . . . .	35
Código 2 – Código da função <code>oprintf_loop</code> . . . . .	36
Código 3 – Código dos macros <code>TASK_DELAY_UNTIL_MS</code> e <code>TASK_DELAY_UNTIL_INIT</code> . . . . .	37
Código 4 – Código da função <code>mics6814_loop</code> . . . . .	39
Código 5 – Código da função <code>am2302_loop</code> . . . . .	40
Código 6 – Código de configuração da interface GAP . . . . .	41
Código 7 – Código dos pacotes de <i>advertisement</i> e <i>scan response</i> . . . . .	42
Código 8 – Código data tabela de serviços e características GATT . . . . .	42
Código 9 – Código da <i>header</i> da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor MICS-6814 . . . . .	59
Código 10 – Código da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor MICS-6814 . . . . .	60
Código 11 – Código da <i>header</i> da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor AM2302 . . . . .	61
Código 12 – Código da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor AM2302 . . . . .	62

# Lista de abreviaturas e siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor analógico digital)
ANN	<i>Artificial Neural Network</i> (Rede Neural Artificial)
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
EC	<i>Eletro Chemical Sensor</i> (Sensor Eletroquímico)
GAP	<i>Generic Access Profile</i>
GATT	<i>Generic Attributes Profile</i>
I <sup>2</sup> C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
KNN	<i>K-Nearest Neighbors</i> (K-ésimo Vizinho mais Próximo)
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i>
MOX	<i>Metal Oxide</i> (Óxido Metálico)
OTP	<i>One Time Programmable</i> (Memória Programável uma Única Vez)
SVR	<i>Support Vector Regression</i> (Regressão por Vetores de Suporte)

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
1.0.1	Objetivos	15
1.0.2	Estrutura do trabalho	15
<b>2</b>	<b>Referencial teórico</b>	<b>17</b>
2.1	Sensores de baixo custo	17
2.1.1	Sensores óxido metálicos	17
2.2	Métodos de calibração	18
2.2.1	Calibração por compensação e ganho	19
2.2.2	Correção de temperatura e umidade	19
2.2.3	Calibração por matrizes de sensores	20
2.2.3.1	Calibração com modelos gerados por redes neurais	21
2.2.4	Calibração por redes de sensores	21
2.3	Redes de sensores e protocolo <i>Bluetooth</i>	22
2.3.1	<i>Bluetooth Low Energy Beacons</i>	22
2.3.1.1	Bluetooth Generic Access Profile (GAP)	24
2.3.1.2	Bluetooth Generic Attribute Profile (GATT)	24
2.3.1.3	Bluetooth Environmental Sensing	24
2.4	<i>Hardware</i>	25
2.4.1	Sensor MICS-6814	25
2.4.2	Sensor de temperatura e umidade AM2302	26
2.4.3	Placa de desenvolvimento TTGO LoRa32	27
<b>3</b>	<b>Materiais de métodos</b>	<b>28</b>
3.1	Método de calibração do sensor MICS-6814	28
3.1.1	Correção de influência da temperatura e umidade relativa do ar	28
3.1.1.1	Calibração da variação de umidade	29
3.1.1.2	Calibração da variação de temperatura	29
3.1.1.3	Metodologia para obtenção de $R_0$	31
3.1.1.4	Metodologia de validação	31
3.1.2	Calibração para o gás amônia	32
3.1.2.1	Metodologia de validação para a calibração de resposta do sensor para amônia	33
3.1.3	Metodologia para testes de sensibilidade cruzada	33
3.2	Metodologia de testes de alcance da comunicação por <i>Bluetooth</i>	34

<b>4</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>35</b>
4.1	Visão geral do sistema	35
4.2	Leitura do sensor MICS-6814	37
4.3	Leitura do sensor AM2302	38
4.4	Protocolo de comunicação <i>Bluetooth</i>	40
4.4.1	Generic Access Profile – GAP	40
4.4.2	Generic Attributes Profile – GATT	41
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>43</b>
5.0.1	Resultados para os testes de variação de umidade e determinação de $R_0$	43
5.0.2	Resultado para os testes da variação de temperatura	43
5.0.3	Resultados para os testes de validação da calibração da temperatura e umidade relativa do ar	44
5.0.4	Resultado para os testes de calibração para a amônia	46
5.1	Resultado para os testes de validação da amônia	49
5.1.1	Resultado para os testes de sensibilidade cruzada com o etanol	51
5.2	Resultados de transmissão de dados do Bluetooth	51
<b>6</b>	<b>Conclusão e Trabalhos futuros</b>	<b>54</b>
	<b>Referências</b>	<b>56</b>
	<b>Anexos</b>	<b>58</b>
	<b>ANEXO A Códigos</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXO B Figuras</b>	<b>64</b>

# 1

## Introdução

A disponibilidade de sensores de baixo custo permite o desenvolvimento de aplicações embarcadas e distribuídas para o monitoramento de métricas como qualidade do ar em cenários urbanos, rurais e industriais. Como exemplo de uso de sensores de baixo custo tem-se o trabalho de [Mois et al. \(2018\)](#), no qual propõem uma rede de sensores baseados no protocolo BLE (*Bluetooth Low Energy*) para medição da temperatura, umidade relativa do ar, incidência solar, CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e compostos orgânicos voláteis. [Ali et al. \(2021\)](#) desenvolve uma rede de sensores colaborativos para o monitoramento de CO (monóxido de carbono) e NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) utilizando sensores de baixo custo do tipo EC (*Electro Chemical*).

*Bluetooth beacons* são dispositivos para a transmissão de pequenos pacotes de informação de dados utilizando o protocolo *Bluetooth*, com enfoque no baixo consumo de energia. *Bluetooth beacons* podem operar de duas maneiras, com ou sem conexão. A primeira, operação com conexão, ou operação em modo periférico, permite não só o envio de pacotes de dados por parte do dispositivo *Bluetooth* mas também o recebimento de pacotes. Já o segundo modo de operação, sem conexão, faz com que o dispositivo *Bluetooth* opere em modo *broadcast*. Em modo *broadcast* não existe a transmissão de pacotes de dados entre ambos dispositivos, a transmissão ocorre apenas do dispositivo *Bluetooth* para o dispositivo receptor. A [subseção 2.3.1](#) descreve o funcionamento de *Bluetooth beacons*. A especificação do protocolo *Bluetooth* define um padrão para a comunicação de sensores ambientais chamado *Environmental Sensing*. Este trabalho explora o uso do padrão para a comunicação de dados com um dispositivo Android.

Sensores óxido metálicos (MOX – *Metal Oxide*) funcionam utilizando o princípio de semi-condutores, nos quais os gases em estudo reagem na superfície dos óxidos alterando a condução eléctrica, que é proporcional à concentração dos gases. A [subseção 2.1.1](#) fornece uma descrição mais detalhada do funcionamento de sensores óxido metálicos. Em consequência do seu baixo custo, sensores MOX possuem diversas limitações e restrições que devem ser tratadas para que sua resposta seja condizente com a esperada para um determinado agente. Entre os

principais problemas, elencados na literatura, enfrentados por sensores de baixo custo MOX estão (MEIXNER; LAMPE, 1996) (WANG et al., 2010) (MASSON; PIEDRAHITA; HANNIGAN, 2015):

- Alta sensibilidade a outros gases (baixa seletividade) pois um mesmo sensor pode ser sensível a diferentes gases;
- Alta sensibilidade às variações na umidade relativa do ar e temperatura ambiente, gerando respostas não-lineares;
- Mudança das propriedades físico/químicas do sensor com o passar do tempo – *sensor drift*;
- Alto tempo de estabilização (*break-in*), um sensor MOX pode requerer uma grande quantidade de tempo até que as reações no sistema químico que o compõe estabilizem;
- Diferentes respostas entre diferentes sensores de mesmo tipo, gerados por imperfeições no processo de fabricação.

A baixa seletividade característica dos sensores óxido metálicos pode ser usada para a medição de vários gases diferentes por um mesmo sensor. No entanto, essa característica pode gerar interferências em cenários nos quais a determinação, com precisão e acurácia, da concentração absoluta de um determinado gás se faz necessária (MAAG; ZHOU; THIELE, 2018). Outro problema é a não-linearidade de resposta característica de sensores de baixo custo, que pode ser causada/agravada por imprecisões no processo de fabricação do sensor e/ou contaminação do sensor por um agente externo<sup>1</sup>.

Este trabalho explora o sensor de óxido metálico MICS-6814 (SGX SENSORTECH, 2015) (CJMCU-6814) para a determinação e monitoramento da concentração de gás amônia (NH<sub>3</sub>). O sensor é desenvolvido por SGX Sensortech (2015), e é composto por três sensores de silício, cada um com um micro diafragma usinado de alta precisão. Cada sensor possui também um resistor de aquecimento, para manter o substrato na temperatura adequada para detecção de gases. O primeiro sensor é responsável pela detecção de gases que sofrem reação de oxidação por um oxidante, como: NO (monóxido de nitrogênio) e NO<sub>2</sub>. O segundo sensor é responsável pela detecção de gases que sofrem reação de redução (mudança no nível de oxidação do átomo), como: CO e H<sub>2</sub>S (sulfeto de hidrogênio). O terceiro sensor é responsável pela detecção de NH<sub>3</sub> (amônia).

Por si próprios, sensores do tipo MOX não são capazes de realizar medições precisas quanto à concentração de um determinado gás sem a utilização de métodos de calibração. Dependendo da composição e fabricação do sensor utilizado, o método de calibração deve ainda levar em conta possíveis agentes externos. Sem um processo de calibração os sensores

<sup>1</sup> Tem-se como agentes externos a influência da temperatura ambiente, umidade relativa do ar, contaminação por outro gás e até mesmo mudanças das características físico-químicas do sensor que ocorrem com sua operação.

MOX, em sua maioria, são capazes de realizar apenas medições relativas. Ou seja, variações da concentração em intervalo de tempo a partir de uma medição inicial  $T_0$  até  $T_1$ , na qual a proporção entre os valores das medições em  $T_1$  e  $T_0$  estabelece a variação relativa da concentração de um determinado gás para o intervalo de tempo  $T_0$  até  $T_1$ .

A variação relativa da concentração de um determinado gás é útil para algumas aplicações, porém, o conhecimento da concentração em valores absolutos é preferível. Para a calibração do sensor MICS-6814, este trabalho explora um método de calibração baseado na correção da influência de temperatura e umidade relativa do ar, processo realizado em uma câmara fechada com ar sintético. Posteriormente, a calibração do sensor para o agente amônia é feita a partir da resposta do sensor corrigida para a influência da temperatura ambiente e umidade relativa do ar utilizando a resposta do sensor perante a presença do gás amônia em diferentes concentrações a fim de gerar a curva de resposta do sensor.

### 1.0.1 Objetivos

Como objetivo principal, este trabalho visa a construção de um sistema embarcado de *broadcast* da concentração do gás amônia utilizando *Bluetooth beacons*. Adicionalmente, este trabalho realiza o estudo e criação de um método/ algoritmo e conseqüentemente criação de uma biblioteca para a calibração do sensor MICS-6814 visando precisão e sensibilidade, e estabelecendo um método viável e reproduzível para a calibração do sensor. A solução proposta tem a finalidade de avaliar uso de sensores de baixo custo para a medição de gases nocivos, o que pode potencialmente auxiliar no monitoramento em ambientes industriais e de socorro a ocorrências com vazamento de gases. Como cenário de teste, explora-se a aplicação do sensor MICS-6814 juntamente com o padrão *Bluetooth Environmental Sensing* para a determinação de gás amônia em ambientes fechados, como por exemplo: salas de maquinários, laboratórios e demais ambientes onde a exposição ao gás amônia pode gerar riscos devido a elevada concentração do gás causada por um possível vazamento, e agravada por ambientes fechados e/ou com pouca ventilação.

### 1.0.2 Estrutura do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- [Capítulo 1](#) fornece uma introdução breve para os assuntos abordados neste trabalho;
- [Capítulo 2](#) da embasamento teórico dos assuntos e trabalhos relevantes;
- [Capítulo 3](#) descreve o método de calibração utilizado e descreve e a metodologia adotada para a os testes realizados;
- [Capítulo 4](#) descreve as etapas e algoritmos utilizados para criação do sistema em tempo-real de monitoramento de gás amônia;

- [Capítulo 5](#) apresenta os resultados obtidos;
- [Capítulo 6](#) dá conclusões dos resultados obtidos e lista trabalhos futuros e possíveis melhorias no processo de calibração visando melhoria na precisão e acurácia da resposta do sensor.

# 2

## Referencial teórico

Este capítulo descreve o *hardware* utilizado neste trabalho e oferece referencial teórico para o embasamento quanto ao funcionamento de sensores óxido metálicos, métodos de calibração e também fornece uma descrição breve de protocolo BLE (*Bluetooth Low Energy*) e padrão *Bluetooth Environmental Sensing*.

### 2.1 Sensores de baixo custo

Sensores de baixo custo são atraentes para o desenvolvimento de aplicações embarcadas para controle da qualidade de ar em ambientes urbanos e ainda cenários industriais/comerciais, devido ao seu inerente baixo custo, baixo tempo de resposta, tamanho e facilidade de uso. Dentre os sensores de baixo custo mais utilizados estão os sensores do tipo MOX – *metal oxide* – e sensores do tipo EC – *electrochemical* (ALI et al., 2021).

#### 2.1.1 Sensores óxido metálicos

Segundo Wang et al. (2010), o princípio de funcionamento de sensores de óxido metálicos não é inteiramente entendido, porém pode ser resumido da seguinte forma: os elétrons contidos nas moléculas e o deslocamento de banda causada pela carga presente nestas moléculas é responsável pela mudança nas propriedades do sistema do sensor, que então causam mudanças na conectividade elétrica e conseqüentemente na resistência do sistema como um todo. A variação da resistência do sistema corresponde a concentração do gás reagente, salvo interferência de fatores externos que levam o sensor a gerar uma resposta não-linear<sup>1</sup> (RAI et al., 2017). Ou seja, para uma dada concentração de um determinado gás a resposta do sensor não reflete a concentração do determinado gás. Em sua maioria, sensores de tipo MOX incluem um mecanismo de aquecimento,

---

<sup>1</sup> Um sistema com resposta não-linear consiste em um determinado sistema cuja resposta para uma determinada entrada não apresenta proporcionalidade com a entrada.

geralmente na forma de um resistor, pois cada tipo de sensor possui um temperatura mínima de ativação de reação para um determinado agente.

Sensores MOX podem ser compostos dos mais variados compostos óxidos-metálicos, incluindo óxidos metálico de transição, óxido metálicos de pré-transição e óxido metálicos de pós-transição (WANG et al., 2010). Meixner e Lampe (1996) identificam mais de 50 compostos óxido metálicos diferentes, suas respostas para diferentes gases, a temperatura de ativação dos sensores, energia de ativação e resistência no ar. Para o gás  $\text{NH}_3$  em específico, entre alguns dos óxidos metálicos identificados, estão:  $\text{SnO}_2$  (Dióxido de estanho),  $\text{WO}_3$  (Trióxido de tungstênio) e  $\text{WNb}_4\text{O}_3$ . Segundo os autores, sensores do tipo MOX estão sujeitos a *drift* (desvios) de resposta devido aos seguintes fatores: mudança no óxido metálico em si; mudança do tamanho do cristalite; reação irreversível com um determinado gás, sólido ou líquido (WANG et al., 2010); reações com o substrato; contato do resistor de aquecimento do sensor com o sensor; instabilidade de conexões e isolamento.

## 2.2 Métodos de calibração

Como identificado por Maag, Zhou e Thiele (2018) e Masson, Piedrahita e Hannigan (2015) a calibração de sensores de baixo custo para a medição da qualidade do ar pode ser categorizada em duas classes distintas, a primeira requer um profundo conhecimento das propriedades químicas do sensor, e da modelagem das  $N$  reações químicas que afetam o seu funcionamento. Também envolve analisar como o sensor reage as variáveis externas e criação de modelos que descrevem o seu comportamento. O principal problema atrelado a este tipo de calibração está no fato de que é praticamente impossível criar um modelo que engloba todas as variáveis que podem afetar o sensor em seu período de funcionamento, tanto pré quanto pós-implantação. A segunda metodologia para a calibração, visa levar em conta o maior número de variáveis possíveis, a fim de que o modelo gerado ao final da calibração englobe todas as possíveis variações de todas as possíveis variáveis que influenciam a resposta do sensor. Devido ao grande volume de dados este processo tende a envolver a criação do modelo por alguma aproximação matemática ou técnicas de aprendizado de máquina e requer uso de sensores de referência pré-calibrados.

Os dados usados na calibração do sensor podem ser obtidos tanto por amostragem laboratorial quanto por amostragem em campo. A principal vantagem da amostragem laboratorial está no controle de variáveis, como temperatura, umidade, etc., que um ambiente de laboratório oferece. Já a principal vantagem da calibração em campo sobre a calibração em laboratório está no volume de dados (que podem ou não incluir agentes externos) coletados, no qual sistemas podem funcionar de forma autônoma por semanas ou até meses. A amostragem em campo requer entretanto o uso de sensores de referência para a coleta dos dados, processo que poder ser realizado em laboratório utilizando gases com concentrações conhecidas caso indisponível o

uso de sensores de referência. Zimmerman et al. (2018) faz uso da calibração em campo para calibração de 15 sensores RAMP para os gases CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> (ozônio) e CO<sub>2</sub>. Com medições sendo realizadas em um estacionamento da universidade de Carnegie Mellon, local que se demonstra interessante para a amostragem, pois a variação no tráfego de veículos no estacionamento reflete nas leituras realizadas pelos sensores e expõem os sensores a possíveis agentes externos.

Maag, Zhou e Thiele (2018) também identificam dois tipos de calibração quanto a implantação de sensores, sendo elas: calibração pré-implantação e calibração pós-implantação. Na calibração pré-implantação, o objetivo principal está na identificação de todas as variáveis que podem afetar a resposta do sensor antes da sua implantação. Estas variáveis podem incluir não-linearidade de resposta do sensor, variação na temperatura ambiente e umidade relativa do ar, podendo ou não fazer uso de sensor de referência. E seu principal objetivo é gerar um modelo que descreve o comportamento do sensor perante o conjunto de variáveis tomadas. A calibração pós-implantação consiste na análise e correção de fatores como *sensor-drift*, contaminação dos elementos sensíveis do sensor por agente externo ou ainda fatores climáticos.

### 2.2.1 Calibração por compensação e ganho

Segundo Maag, Zhou e Thiele (2018), o processo de calibração por compensação e ganho envolve o uso de modelos matemáticos para a correção da não-linearidade de resposta do sensor<sup>2</sup>. A correção da não-linearidade de resposta é feita por meio da resposta do sensor sem a presença de um determinado gás – compensação – comparado com a resposta do sensor na presença do determinado gás – ganho. Dentre os principais modelos usados para a calibração por compensação e ganho estão: Método dos quadrados mínimos; Ajuste de curva exponencial; Ajuste de curva de segunda ordem; Ajuste de curva linear e não-linear; Ajuste de curva por potência; e Ajuste por SVR (Regressão por Vetores de Suporte). Neste trabalho exploramos o método dos quadrados mínimos para calibração da resposta do sensor para a presença do agente amônia. O método dos quadrados mínimos (Equação 1) gera uma aproximação para o comportamento de uma conjunto de dados por meio da aproximação de uma função de estimação  $f(x)$  sobre um conjunto de parâmetros  $\hat{\beta}$  iniciais, onde  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n = 0$ , que são refinados iterativamente através da minimização  $\min(f(x)) = 0.5 \sum_{i=0}^{m-1} f_i(x)^2$ , tendo  $f(x) = \beta_0^2 x + \beta_1 x + \beta_2$ .

$$(J^T J)\Delta\beta = J^T \Delta y \quad (1)$$

### 2.2.2 Correção de temperatura e umidade

Devido a sensibilidade de sensores MOX a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente (WANG et al., 2010) (MAAG; ZHOU; THIELE, 2018), mecanismos de calibração uni-variados acabam perdendo precisão quando expostos a variações destes fatores ambientais.

<sup>2</sup> Em sua maioria sensores de baixo custo do tipo MOX ou EC apresentam resposta linear quanto constantes as variáveis externas. A correção de uma possível não-linearidade tende pode ser feita pelo próprio fabricante.

A influência da temperatura e umidade relativa do ar deve ser considerada com métodos de calibração multi-variados. Dentre os principais modelos empregados para a correção de desvio de resposta quanto a variação de temperatura e umidade estão: Múltiplos quadrados mínimos; K-ésimo Vizinho mais Próximo (KNN); Ajuste de curva linear, não-linear e exponencial; e Ajuste polinomial de alta ordem.

A modelagem da influência da variação da temperatura e umidade relativa do ar na resposta do sensor pode ser realizada por meio da calibração laboratorial, isolando-se as variáveis de temperatura e umidade. Outro método que pode ser aplicado é a calibração em campo utilizando métodos de matrizes de sensores. [Masson, Piedrahita e Hannigan \(2015\)](#) fazem uso da abordagem laboratorial para a criação de um modelo que corrige a resposta de um sensor MICS-5525 para variação de temperatura e *drift* causado por mudanças nas propriedades do resistor de aquecimento do sensor. Os autores utilizam regressão linear da temperatura com resposta do sensor para estimar a resistência  $R_0$  do sensor, e o método dos quadrados mínimos para gerar uma relação entre resistência normalizada e concentração. O modelo final obtido pelos autores é capaz de obter com precisão, valores em concentração **absoluta** do gás  $\text{CO}_2$ . Para a correção da influência os fatores de temperatura ambiente e umidade relativa do ar este trabalho explora a regressão linear múltipla das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar tendo a variável dependente como a resposta do sensor. A regressão linear múltipla permite a estimativa do relacionamento entre uma variável independente  $y$  e duas ou mais variáveis dependentes  $\hat{\beta} = \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$  (Equação 2).

$$y = \sum_{i=0}^n \beta_i \quad (2)$$

A obtenção dos coeficientes  $\beta$  é feita pelo método do quadrados mínimos comuns conforme [Equação 3](#).

$$\hat{\beta} = \beta + (X^T X^{-1}) X^T \varepsilon \quad (3)$$

### 2.2.3 Calibração por matrizes de sensores

A calibração por matrizes de sensores envolve a calibração por compensação e ganho, e a calibração de temperatura e umidade levando em conta influência de agentes externos ([MAAG; ZHOU; THIELE, 2018](#)). Este tipo de calibração geralmente é realizada por meio da calibração em campo. Para a calibração com matrizes de sensores, os métodos mais utilizados são: Múltiplos quadrados mínimos; Ajuste de curva não-linear; Florestas Aleatórias (*Random Forests*); Redes Neurais Artificiais (ANN); e outros métodos de aprendizado de máquina.

Como descrito na [subseção 2.1.1](#) sensores MOX podem sofrer influência de outros gases (baixa seletividade), como é o caso para sensores RED e OX do sensor MICS-6814. A calibração

por matrizes de sensores visa minimizar essa influência utilizando uma matriz de sensores (vários sensores), sendo que a leitura de um sensor pode ser utilizada para corrigir a baixa seletividade dos demais. O mesmo pode ser realizado utilizando-se de um sensor de referência que não sofra influência do determinado agente externo em questão. Em geral, a sensibilidade dos sensores a gases cruzados apresenta um caráter linear. Quando um determinado gás cruzado gera influência não-linear na resposta de um determinado sensor o uso de redes neurais se mostra eficaz.

Zimmerman et al. (2018) utiliza com sucesso um modelo de calibração por matrizes de sensores utilizando uma rede baseada em florestas aleatórias e uma matriz de 15 sensores, com a utilização de sensores de referência. O modelo gerado pelos autores consiste de 100 árvores por dobra com um total de 500 árvores, totalizando 5 dobras, incluindo validação cruzada. Os resultados obtidos pelos autores apresentam em erro fracionário de  $< 5\%$  (10 partes por milhão) para o gás  $\text{CO}_2$ ; 10 – 15% (38 partes por bilhão e 3.4 partes por bilhão) para os gases CO e  $\text{O}_3$ ; e de 30% (3.5 partes por bilhão) para o gás  $\text{NO}_2$ . Este processo de calibração não foi feito localmente, os dados de resposta dos sensores foram enviados para um servidor central para serem processados. Isto se deve ao tamanho da rede de árvores aleatória gerado e custo computacional de execução, impossibilitando a execução em tempo-real.

### 2.2.3.1 Calibração com modelos gerados por redes neurais

Redes neurais artificiais podem ser usadas para modelar o comportamento de sistemas não-lineares multi-variados em cenários de sistemas embarcados em tempo-real, vide, objeto de estudo deste trabalho. Barakeh et al. (2017) utiliza uma rede neural artificial para modelar a resposta de 9 sensores diferentes quanto a predição do índice de poluição. Como parâmetros para a rede neural os autores utilizam a resposta dos 9 sensores, a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente, a hora e se a data da medição é ou não um final de semana. Os autores reportam uma taxa de sucesso de mais de 80% na predição do índice de poluição.

Um dos dos fatores limitantes da calibração através do uso de redes neurais está na necessidade do uso de um sensor de referência para coleta dos dados de treinamento. Ali et al. (2021) demonstra o uso de sensores de CO calibrados com o uso de redes neurais artificiais em tempo-real, obtendo valores de  $\mathcal{R}^2 = 0.78$  para um conjunto de 3 sensores. A rede neural artificial desenvolvida pelos autores é composta de um MLP (*MultiLayer Preceptron*) e utiliza como parâmetros a temperatura ambiente, umidade relativa do ar e a resposta do sensor, a rede proposta pelos autores é composta de 1 camada escondida com 100 nós.

### 2.2.4 Calibração por redes de sensores

A calibração por redes de sensores envolve o processo de calibração pós-implantação, para atenuar possíveis desvios na resposta dos sensores – *sensor drift*. Dentre os possíveis métodos elencados por Maag, Zhou e Thiele (2018) estão:

- **Calibração cega:** Tem por objetivo obter a menor disparidade possível entre as respostas dos sensores que compõem uma determinada rede. Esse método se baseia no princípio que sensores próximos apresentam respostas similares. Quanto maior o número e densidade dos sensores que participam de uma rede cega maior a acurácia e precisão da rede.
- **Calibração colaborativa:** Empregada principalmente no caso de sensores móveis, e baseada no princípio de que quando dois (ou mais) sensores se aproximam (ou permanecem próximos) um do outro as suas respostas devem ser similares (BRIENZA et al., 2015). Este processo pode ser realizado tanto para sensores de baixo custo quanto usando sensores de referência pré-calibrados. É importante notar que quando dois sensores em uma situação de calibração colaborativa se encontram, caso suas respostas apresentem disparidade, não é possível saber qual dos sensores apresenta desvio. Leituras posteriores com diferentes sensores (ou sensores de referência) devem ser realizadas para identificar o sensor com desvio.
- **Calibração por transferência:** Consiste na calibração de sensores, em geral utilizando-se redes neurais, em um ambiente controlado a fim de gerar dados para uma matriz de sensores. Este tipo de calibração é mais eficaz considerando a produção em massa de sensores, onde um mesmo método de treinamento é utilizado para atenuar possíveis desvios e resposta causada por diferenças físico/químicas causadas pelo processo de fabricação do sensor. Comumente utilizado para a calibração de narizes eletrônicos (*e-noses*) utilizados para a detecção de odores em ambientes industriais.

## 2.3 Redes de sensores e protocolo *Bluetooth*

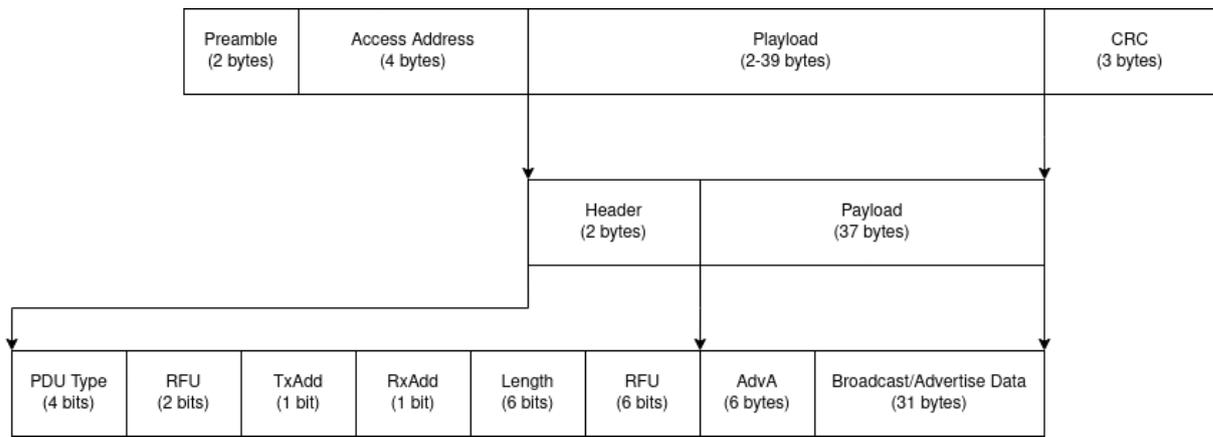
A transmissão de informação entre redes de sensores, tanto para fatores de calibração, quanto para transmissão dos dados de resposta dos sensores requer o uso de um protocolo. Eliasson, Lindgren e Delsing (2008) demonstram o uso do protocolo *Bluetooth* para a criação de redes *Ad-Hoc* de sensores, observando baixo consumo de energia. Mackensen, Lai e Wendt (2012) avalia o uso do protocolo *Bluetooth Low Energy* para a criação de sensores *wireless* com baixo consumo de energia. Os autores identificam um consumo médio de aproximadamente 0.3 mJ para a criação de uma conexão, 0.13 mJ para transmissão de um pacote de dados (com notificação).

### 2.3.1 *Bluetooth Low Energy Beacons*

O protocolo *Bluetooth* pode ser operado em modo *beacon*, neste contexto um *beacon* consiste de um dispositivo que transmite pequenos pacotes de informação. *Beacons Bluetooth* podem ser divididos em duas classes, com e sem conexão. *Beacons* sem conexão consistem em dispositivos operando BLE em modo *broadcast* e apenas transmitem dados, sem a capacidade de recebimento. Isto limita a dinamicidade de informações a disposição do dispositivo, porém,

tem a vantagem do baixo consumo de energia. Adicionalmente, visando reduzir ainda mais o consumo de energia, o dispositivo pode ser programado para entrar em *deep sleep* (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022c), apenas acordando quando a transmissão de dados é necessária (MOIS et al., 2018). Já no modo de operação com conexão o dispositivo tem maior dinamicidade dos dados, ou seja, este pode fazer envio e recebimento de pacotes para, por exemplo: realizar uma atualização de algum parâmetro (neste contexto, por exemplo: tem-se a correção do *drift* de um determinado sensor). O custo do estabelecimento e manutenção de uma conexão está atrelado, no entanto, a um maior consumo de energia.

Figura 1 – Pacote de dados BLE



Fonte: Adaptado de Lindh (2016)

A Figura 1 mostra o pacote de dado usado pelo protocolo BLE, cada pacote tem 48 bytes de tamanho, com 37 bytes disponíveis para o envio de dados. Em modo *broadcast* ambos os campos *Preamble* e *Access Address* tem valor fixo, 0xAA e 0x8E89BED6 respectivamente. O campo *Payload* contém a *Header* e os dados a serem transmitidos (*Payload*). A *Header* indica informações quanto ao tipo de pacote que está sendo enviado. O campo *PDU Type* controla o tipo de conexão e mecanismo de *advertisement*. *TxAdd* indica o tipo de endereço de *advertisement*, público ou aleatório. O campo CRC contém o código de correção de erro para garantir a integridade do pacote. Dentro do pacote de *advertisement* estão os dados do GAP (*Generic Access Profile*) definido pela especificação *Bluetooth*, cada campo do GAT é composto de um identificador de tamanho que informa o tamanho do próximo campo GAP. Em seguida encontra-se um identificador único definido pela especificação. Cada identificador informa o tipo e formato dos dados que seguem. Por último está o dado em si de cada identificador. Por exemplo: os seguintes *bytes* definem a taxa de transmissão do dispositivo por meio do GAP, 0x02 0x0A 0xEB. O primeiro *byte* 0x02 informa o tamanho, o segundo *byte* informa o tipo do dado do pacote, para este caso 0x0A define que o próximo *byte* informa a potência de transmissão 0xEB.

BLE opera na mesma frequência de outros protocolos como *Wi-Fi*, 2.4 GHz ISM a uma potência de 10 dBm (decibel miliwatt). Com isso o protocolo BLE pode operar em distâncias na casa das dezenas de metros. No entanto, o alcance pode ser reduzido devido a fatores como a

sensibilidade do receptor, poder de transmissão do transmissor, fatores ambientais e obstáculos (LINDH, 2016).

### 2.3.1.1 Bluetooth Generic Access Profile (GAP)

Dento do protocolo *Bluetooth* o GAT, ou Generic Access Profile, controla as conexões e modos de *advertisement* que determinam como um dispositivo *Bluetooth* é visto por outros dispositivos e como este ele ira se comunicar com os demais dispositivos. Existem dois mecanismos de *advertisement*, direto por meio de pacotes de propaganda e indireto por meio de pacotes de resposta (*scan-response*).

### 2.3.1.2 Bluetooth Generic Attribute Profile (GATT)

O GATT, ou *Generic Attribute Profile* define como dois ou mais dispositivos *Bluetooth* irão se comunicar um com os outros utilizando de serviços e características, o conjunto de serviços e caraterísticas define a *profile*. O GATT utiliza do ATT (*Attribute protocol*) que funciona por meio de uma tabela de busca utilizando identificadores com tamanho de 16 bits para os serviços e características. Dentro do GATT os serviços são utilizados para dividir logicamente os dados definidos para cada serviço. Serviços são identificados por identificadores numéricos únicos de 16 bits (para serviços oficialmente adotados para dispositivos BLE) e 128 bits (para serviços customizados). O mesmo se aplica para as características dos serviços. Cada característica carrega o dado de um determinado atributo de um serviço.

### 2.3.1.3 Bluetooth Environmental Sensing

O protocolo *Bluetooth* também define um padrão de comunicação genérico para sensores ambientais. Este padrão é chamado de *Environmental Sensing* e está definido em *Environmental Sensing Profile v1.0* (BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP, 2014a) e *Environmental Sensing Service v1.0* (BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP, 2014b). O padrão define os requisitos mínimos que um determinado dispositivo *Bluetooth* deve implementar para possa estar em conformidade com o padrão. No *Environmental Sensing Profile* estão definidos os requisitos que possibilitam a coleta de dados de um sensor que implementa o padrão *Enviromental Sensing*, e requer o GATT (Generic Attribute Profile). O padrão define dois cargos, o de sensor e coletor, neste trabalho apresentaremos apenas do cargo do sensor. A adesão ao padrão depende de um único requisito mandatório, sendo ele o serviço de *Environmental Sensing*, seção 4.4 descreve a implementação do padrão em mais detalhes. O padrão *Environmental Sensing Service* expõe o serviço *Bluetooth* para envio de dados de sensores ambientais por meio de características (valores) definidas para cada serviço. O único serviço mandatório para o padrão é a leitura dos descritores das características, ou seja, a leitura do dado do sensor ambiental estipulado pela sua característica. Por exemplo: o serviço de *Environmental Sensing* tem o valor 0x181A, e dentro

do serviço de sua característica é dada por pelos *bytes* 0xB2CF, que indicam que o valor da característica reflete a concentração de amônia.

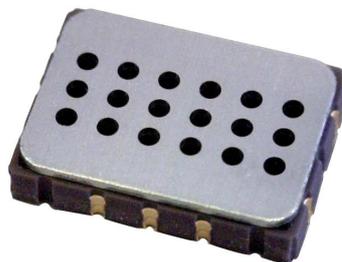
## 2.4 Hardware

Esta seção descreve o *hardware* utilizado neste trabalho e o protocolo de comunicação utilizado. Para o sensor de amônia utilizaremos o sensor MICS-6814. Para a leitura dos valores de temperatura e umidade relativa do ar utilizaremos o sensor AM2302. O sistema sera implementado na placa TTGO LoRa32 com um microcontrolador ESP32 se suporte ao protocolo *Bluetooth*.

### 2.4.1 Sensor MICS-6814

O sensor MICS-6814 (SGX SENSORTECH, 2015) (Figura 2) consiste em um pacote de 3 sensores de óxido metálico com micro diafragmas usinados<sup>3</sup>. Como pode ser observado na Tabela 1, o sensor MICS-6814 é capaz de medir 8 gases diferentes incluindo o gás de objeto de estudo deste trabalho, amônia, entre concentrações de 1 à 500 ppm (partes por milhão).

Figura 2 – Sensor MICS-6814



Fonte: SGX Sensortech (2015)

Cada sensor dentro do pacote possui um resistor de aquecimento único, e existe um tempo mínimo até que a resposta sensor estabilize, o que significa que os resistores de aquecimento estão em temperatura nominal de operação. O primeiro sensor, sensor OX, é sensível a gases oxidantes: NO<sub>2</sub>, H e NO. O segundo sensor, sensor RED, é sensível a gases que sofrem reação de redução: CO, H<sub>2</sub>S, H, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH e C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>. O terceiro e último sensor, sensor NH3, é sensível ao gás NH<sub>3</sub>. Como evidenciado anteriormente, ambos os sensores RED e NH3 são sensíveis ao gás amônia, em primeiro momento este trabalho fará uso somente do sensor NH3 para medição da concentração do gás amônia. Referenciaremos a cada sensor de forma individual no pacote MICS-6814 como OX, RED e NH3, como na ordem descrita anteriormente.

O sensor MICS-6414 não é capaz de realizar medições absolutas quanto a concentração de um determinado gás. Em sua configuração padrão o sensor é capaz de medir apenas variações

<sup>3</sup> Não foi possível determinar com o fabricante do sensor a composição química de cada elemento do sensor, fator que pode afetar o processo de calibração (WANG et al., 2010) (MASSON; PIEDRAHITA; HANNIGAN, 2015).

Tabela 1 – Gases e respectivas concentrações medidas pelo sensor MICS-6814

Gás	Símbolo	Concentração (ppm)
Monóxido de carbono	CO	1000
Dióxido de nitrogênio	NO <sub>2</sub>	0.05 – 10
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	10 – 500
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1 – 1000
Amônia	NH <sub>3</sub>	1 – 500
Metano	CH <sub>4</sub>	>1000
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	>1000
Isobutano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	>1000

relativas na concentração de um determinado gás. A leitura do sensor pode feita por meio de um divisor de tensão, com uma resistência  $R_0$  ligada ao  $V_{cc}$ , que é então ligada ao sensor e a um conversor analógico digital (ADC). A tensão obtida no ADC será proporcional a resistência  $R_s$  do sensor no instante de tempo  $T_0$ . A variação da resistência do sensor  $R_s$  em um período de tempo  $T_0$  até  $T_1$  é proporcional a variação relativa da concentração de um determinado gás. A medição da concentração relativa, pelo método descrito anteriormente, só pode ser realizada se o determinado gás possui uma curva de variação de concentração linear ou suficientemente linear. Neste contexto  $R_0$  pode ser ajustado a fim de se obter uma uma leitura no ADC igual a  $V_{adc} = \frac{V_{cc}}{2}$ . Este ajuste pode ser realizado em condições nominais de operação do sensor onde não há conhecimento da concentração do gás medido, ou por meio da calibração do sensor com concentração de gás conhecida na mediana dos valores mínimos e máximos de concentração medidos pelo sensor para um determinado gás.

Contudo, para o sensor MICS-6814 a linearidade de curva de sensibilidade do sensor é mantida apenas perante a não existência de variações na umidade relativa do ar e temperatura. Para corrigir a não-linearidade de resposta do sensor quanto a estes fatores um método de calibração deve ser empregado. Este trabalho faz uso da placa CJMCU-6814, que consiste no sensor MICS-6814 com devidos resistores ligados aos resistores de aquecimento conforme recomendação do fabricante e permite a medição apenas dos gases CO, NH<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub> (sensores RED, HN3 e OX respectivamente) sem o uso do protocolo I<sup>2</sup>C, como encontrado em outras configurações do sensor. No decorrer do texto, referenciaremos a placa CJMCU-6814 como MICS-6814.

## 2.4.2 Sensor de temperatura e umidade AM2302

O sensor de temperatura e umidade AM2302 (AOSONG, 2015) consiste de um sensor de baixo custo pré-calibrado, as medições geradas pelo sensor apresentam precisão satisfatória no contexto do sistema desenvolvido neste trabalho (umidade  $\pm 2\%$  e temperatura:  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Os elementos sensíveis contidos no sensor estão ligados a uma unidade microcontroladora de 8 bits e os coeficientes de calibração do sensor estão salvos na unidade microcontroladora em memória OTP (*One-Time Programmable*), e foram calibrados em uma câmara selada com valores de temperatura e umidade controlados.

O sensor pode ser operado em um intervalo de temperatura de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $+80^{\circ}\text{C}$ , e umidade 0% até 100%. Vale notar que a resposta do sensor tende a ser não-linear quando esta se aproxima os limites máximos e mínimos de temperatura e umidade (AOSONG, 2015). Para a comunicação dos valores de umidade e temperatura a unidade microcontroladora do sensor utiliza um protocolo *single bus*, sendo enviados 40 bits pela unidade microcontroladora. O envio do estado de cada bit é feito pela duração em microssegundos que o sinal enviado permanece em *high*.

Os valores de temperatura e umidade relativa do ar obtidos pelo sensor AM2302 serão usados no processo de calibração para corrigir a não-linearidade de resposta do sensor quanto a variação de temperatura e umidade. Sua leitura foi feita utilizando o *driver* RMT presente no microcontrolador ESP32, seção 4.3 descreve em detalhes os protocolo e método de comunicação utilizado.

### 2.4.3 Placa de desenvolvimento TTGO LoRa32

A placa *TTGO LoRa32* é uma placa para o desenvolvimento baseada na interface ESP32, com um chip ESP32-D0WDQ6<sup>4</sup>. Por ser baseada na interface ESP32, a placa opera utilizando uma versão modificada do sistema operacional em tempo-real *freeRTOS*. Sendo um sistema operacional em tempo-real, o *freeRTOS* permite a execução de *threads*(ou *tasks*, como definido na documentação do *freeRTOS*) de maneira determinística. O escalonador opera em *ticks*, por padrão cada *tick* tem 1 milissegundo, com cada *thread* sendo atribuída um tempo de execução de um *tick* antes de ser antecipada pelo escalonador e outra *thread* posta em execução após a troca de contextos. Como cada *tick* possui uma duração fixa, pode-se inferir a ordem de execução das *threads*. Além do escalonamento o *freeRTOS* também possui  $N$  níveis de prioridade para as *threads* e estruturas de *kernel*, como: *queues*; *mutexes*; e *semaphores* para a sincronização e troca de informação entre *threads*. O sistema operacional também permite a execução em paralelo em diferentes núcleos (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022d).

A interface ESP32 suporta o protocolo *Bluetooth* por meio do *stack Bluedroid*, com suporte para ambos os modos clássicos e *Bluetooth Low Energy* - BLE (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022b). Também, possui dois conversores analógico digitais de aproximação sucessiva, multiplexados em 18 canais, cada um com uma resolução de 12 bits (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022a).

O software implementado neste trabalho utiliza de um esquema de *soft deadlines*. Diferente de *hard deadlines* que causam falha total do sistema quando um requisito de tempo não é atingido, *soft deadlines* permitem a uma determinada *task* a conclusão de sua tarefa, mesmo que seu prazo de conclusão tenha acabado. A implementação utiliza dos mecanismos de sincronização encontrados no sistema operacional *freeRTOS*, como: notificação de tarefas e sincronização por meio de *queues*.

<sup>4</sup> Informação obtida através do comando `esptool.py chip_id`.

# 3

## Materiais de métodos

Este capítulo descreve os materiais e métodos utilizados para a calibração do sensor MICS-6814. Todos os testes descritos neste capítulo foram realizados no laboratório de pesquisa em Química campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Toledo. Para todos os casos de testes o intervalo de leitura do sensor MICS-6814 foi 1 segundo, e o intervalo de leitura do sensor AM2302 foi de 5 segundos. A coleta dos dados foi feita por meio da porta serial da placa TTGO LoRa32. Neste capítulo iremos nos referir ao conjunto de sensores formado pelo sensor MICS-6814 e sensor AM2302 como – sensores, referiremos a cada sensor de forma individual quando necessário. Para o sensor MICS-6814, todos os testes foram realizados considerando o tempo de aquecimento do sensor recomendado pelo fabricante de aproximadamente 15 a 30 minutos.

### 3.1 Método de calibração do sensor MICS-6814

A metodologia escolhida para calibração do sensor MICS-6814 foi baseada no método descrito por (MASSON; PIEDRAHITA; HANNIGAN, 2015), e consiste na calibração da influência de fatores de temperatura e umidade relativa do ar na resposta do sensor utilizando uma regressão linear múltipla destas variáveis com a resposta do sensor tomada como variável dependente. A resposta do sensor corrigida então é usada como parâmetro para o método dos quadrados mínimos para geração de uma curva que descreve de resposta do sensor perante a presença do agente amônia.

#### 3.1.1 Correção de influência da temperatura e umidade relativa do ar

A calibração do sensor MICS-6814 quanto a sua resposta para variações de temperatura e umidade relativa do ar foi realizada utilizando dois cenários de testes que contemplam a variação da temperatura ambiente e a variação umidade relativa do ar, visando isolar ambas a variáveis

ao máximo possível. Porém, devido a limitações do próprio método e limitações de recursos, ocorrem pequenas variações em ambas as variáveis.

Os dados obtidos com a calibração do sensor quanto a influência da temperatura e da umidade relativa do ar foram utilizados para a determinação dos coeficientes  $\beta_i$  da regressão linear múltipla (Equação 1) subtraindo o valor de resposta do sensor do valor  $R_0$ , onde,  $R_{ganho} = \beta_0 + \beta_1 V_{temp} + \beta_2 V_{umid}$ . Sendo que  $R_{sensor} - R_{ganho}$  fornece a resposta do sensor corrigida para a influência de temperatura e umidade relativa do ar.

### 3.1.1.1 Calibração da variação de umidade

Para obtenção da resposta do sensor MICS-6814 quanto a variação da umidade relativa do ar a seguinte metodologia foi adotada. Os sensores foram inseridos em uma câmara fechada de vidro com volume de  $3.440 \pm 20mL$  (veja Figura 3). A câmara de vidro é ligada, por meio de uma mangueira de silicone com diâmetro de  $3mm$  e válvulas manuais, ao cilindro de ar sintético 4.7 FID (pureza de 99.997%, White Martins), com teor de água menor que 3 ppm, contendo  $20.0 \pm 0.5\%$  de oxigênio ( $O_2$ ) e  $80.0 \pm 0.5\%$  de nitrogênio ( $N_2$ ).

Inicia-se os testes introduzindo ar sintético, o que faz com que a umidade relativa do ar dentro da câmara fechada diminua. O ar sintético é injetado até que ocupe o volume total da câmara de vidro e a resposta do sensor estabilize. Inicia-se a coleta dos dados. Após, introduz-se a câmara, por meio de uma abertura no topo, papel de filtro quantitativo umedecido com água purificada. A evaporação da água presente no papel faz com que a umidade relativa do ar dentro da câmara aumente.

Quando saturada a umidade relativa do ar dentro da câmara (tem-se como saturada quando a umidade relativa do ar, se esta se manteve estável considerando um determinado período de tempo, ou seja, não foi observado mudança significativa na umidade relativa do ar por um período de tempo) introduz-se a mesma uma quantidade arbitraria de sílica em gel (seca a  $100.0^\circ C$  por 24 horas e resfriada em seguida em dessecador), o que induz queda da umidade relativa do ar dentro da câmara. Quando a umidade relativa do ar atinge um patamar estável (deliberado pelos autores), a sílica em gel é então removida da câmara e o processo repetido. Os teste foram realizados no dia 24 de abril de 2022, com cada teste descrito na Tabela 2 seguindo a metodologia estipulada acima. A subseção 5.0.1 descreve os resultados dos testes de calibração para variação da umidade relativa do ar.

### 3.1.1.2 Calibração da variação de temperatura

A metodologia adotada para os testes de variação da temperatura ambiente consiste no resfriamento de uma câmara fechada com volume aproximado de  $1000mL$  contendo os sensores e ar sintético 4.7 FID (pureza de 99.997%, White Martins). Previamente a realização dos testes, a câmara fechada de vidro foi resfriada por um período de 24 horas. A câmara fechada foi colocada dentro de uma caixa de isopor contendo gelo. A câmara contendo ar sintético é introduzida

Figura 3 – Método de leitura dos dados do sensor. Ao fundo é possível observar a câmara de vidro fechada contendo ambos os sensores, a frente a placa TTGO realizando leitura por meio da porta serial

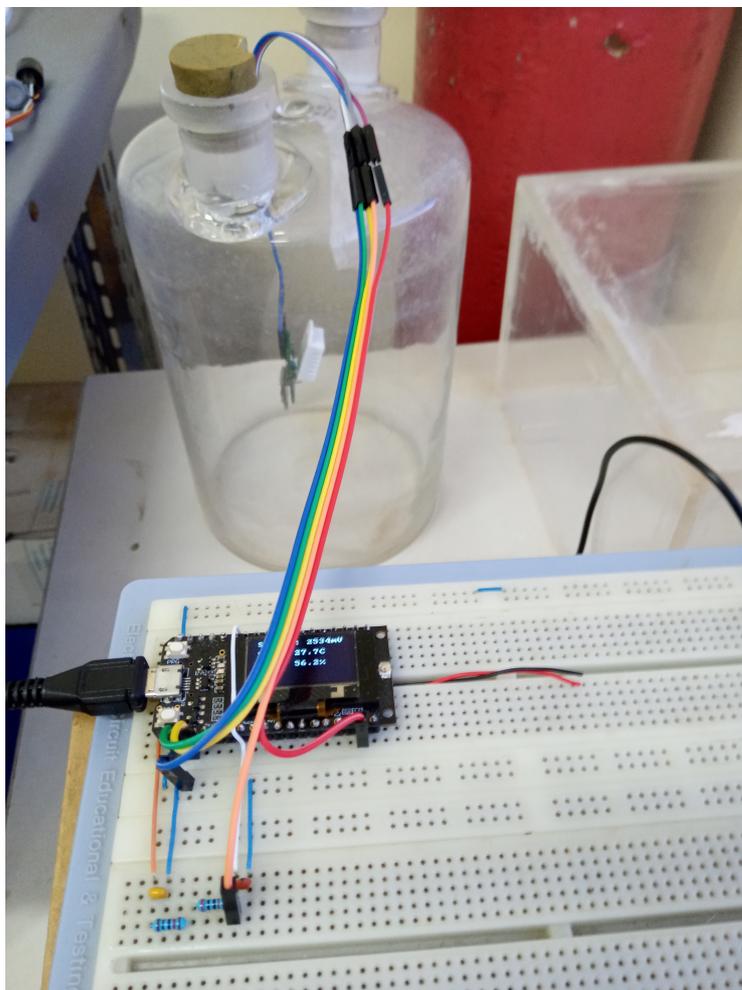


Tabela 2 – Testes realizados no dia 24 de Abril de 2022 contemplando a variação da umidade relativa do ar em ambiente com ar sintético

Horário	Descrição do teste
9:00	Teste para a obtenção de $R_0$ . Sensor dentro da câmara com ar sintético.
9:39	Câmara com ar sintético, tira de papel quantitativo umedecido e umidade relativa do ar a 69.1%.
9:58	Introduz-se a câmara a sílica em gel. Umidade relativa o ar em 75.1%.
10:18	Umidade relativa do ar em 25.0%, remove-se a sílica em gel.
10:40	Após elevada a umidade, introduz-se novamente a sílica em gel.
11:03	Umidade relativa do ar a 18.2%, remove-se a sílica em gel.
11:21	Após introdução da tira de papel quantitativo umedecido a umidade volta a subir para 70.0%.
11:27	Introduz-se a sílica em gel. Fim dos testes.

na caixa de isopor. Aguarda-se até que a temperatura dentro da câmara diminua. Quando a temperatura do ar dentro da câmara atinge um limite mínimo (deliberado a critério dos autores), remove-se a câmara – ainda contendo os sensores – da caixa de isopor. Após removida da caixa de isopor, a câmara fechada é posta em uma bancada a temperatura ambiente. Esse processo faz com que a temperatura dentro da câmara aumente gradativamente. Dados são coletados até que a temperatura dentro da câmara coincida com a temperatura ambiente. A [Tabela 3](#) descreve

Tabela 3 – Testes realizados no dia 24 de Abril de 2022 contemplando a variação da temperatura da câmara fechada com ar sintético

Horário	Descrição do teste
12:44	Coloca-se a câmara contendo ambos os sensores dentro da caixa de isopor contendo gelo, introduz-se a câmara ar sintético.
13:39	Remove-se a câmara ainda contendo os dois sensores e ar sintético da caixa de isopor.
14:10	Fim dos testes de variação de temperatura.

a linha do tempo da execução dos testes seguindo a metodologia descrita nessa subseção. A [subseção 5.0.2](#) descreve os resultados. Os testes foram realizado no dia 24 de abril de 2022.

Devido limitações da metodologia proposta, é impossível o isolamento da variável temperatura no interior da câmara da variável umidade relativa do ar. Isso se deve ao fato que a umidade dentro da câmara ira aumentar assim que a esta for removida da caixa de isopor contendo gelo, e a temperatura no interior da câmara começar a aumentar. Esse comportamento ocorre pois o aumento da temperatura faz com que a água condensada nas paredes da câmara evapore, o que consequentemente faz com que a umidade relativa no seu interior aumente.

### 3.1.1.3 Metodologia para obtenção de $R_0$

A metodologia para a obtenção de  $R_0$  do sensor MICS-6814 foi a mesma utilizada para a calibração da influência da variação da umidade relativa dor ar na resposta do sensor (descrita na [subseção 3.1.1.1](#)). Para obtenção de  $R_0$ , colocam-se os sensores dentro da câmara fechada de vidro com volume  $3.440 \pm 20mL$ , sendo somente introduzido a câmara o ar sintético e uma tira de papel de filtro quantitativo umedecido, o papel permaneceu na câmara até que a umidade relativa do ar dentro da câmara atingiu um patamar de aproximadamente 50%. O processo de calibração foi realizado após um período de 1 hora considerando o tempo de aquecimento do sensor seguindo recomendação do fabricante. A [subseção 5.0.1](#) descreve os resultados obtidos para a determinação de  $R_0$ . Os testes para a obtenção de  $R_0$  foram realizados no dia 24 de abril de 2022.

### 3.1.1.4 Metodologia de validação

A validação da calibração foi realizada por meio da variação da umidade relativa do ar conforme metodologia descrita na [subseção 3.1.1.1](#). A [Tabela 4](#) mostra a linha do tempo para a execução dos testes de validação. Os resultados para o teste de validação foram então comparados com o valor de  $R_0$  obtido seguindo a metodologia descrita em [subseção 3.1.1.3](#). Resultados para os teste de validação quanto a calibração para a correção de influência da variação da temperatura ambiente e umidade relativa do ar são descritos na [subseção 5.0.3](#).

Tabela 4 – Testes realizados no dia 27 de maio de 2022 contemplando a validação da calibração para variação da humidade relativa do ar

Horário	Descrição do teste
9:40	Inicia-se os testes com ar sintético na câmara fechada, umidade relativa do ar em 22.7%.
9:53	Introduz-se uma tira de papel de filtro quantitativo umedecida.
10:23	Umidade relativa do ar em 70.8%. Introduz-se a câmara sílica em gel.
10:45	Umidade relativa do ar a 23.2%.
11:14	Remoção da sílica, introduz-se tira de papel de filtro quantitativo umedecida.
12:02	Umidade relativa do ar a 72.3%. Introduz-se sílica em gel.
12:15	Fim dos testes.

### 3.1.2 Calibração para o gás amônia

A fonte do gás  $\text{NH}_3$  (amônia) foi o reagente hidróxido de amônio  $\text{NH}_4\text{OH}$  a 28%, grau PA (para análise) (Figura 27). Colocou-se 1 mL do reagente em tubo de PET à vácuo de coleta de sangue de 4.5 mL com tampa vedada. Volumes conhecidos do gás volatilizado no tubo foram obtidos por seringa hipodérmica de polipropileno e injetados na câmara de testes de vidro de volume de 3.440 mL, para prover adequada diluição. A concentração do gás em  $\text{mgm}^{-3}$  foi determinada por meio do volume de gás diluído na câmara, a partir da Equação 4 e Equação 5,  $T$  temperatura ambiente, medida com termômetro termopar digital ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ), sendo que  $T_K = T_C + 273.15$ .

Os sensores foram inseridos em uma câmara fechada de vidro com volume de  $3.440 \pm 20 \text{ mL}$ . A câmara de vidro é ligada, por meio de mangueira de silicone com diâmetro de 3 mm e válvulas manuais, ao cilindro de ar sintético 4.7 FID (pureza de 99.997%, White Martins), com teor de água menor que 3 ppm, contendo  $20.0 \pm 0.5\%$  de oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e  $80.0 \pm 0.5\%$  de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ). Para alterações na umidade interna da câmara utilizou-se sílica gel (seca a  $100.0^\circ\text{C}$  por 24 horas e resfriada em seguida em dessecador) e papel de filtro quantitativo umedecido com água purificada.

Para o teste, injeta-se o ar sintético na câmara, após, utilizando uma seringa hipodérmica de polipropileno retira-se 0.5 mL ou 1.0 mL do reagente em tubo de PET. Volumes conhecidos do gás volatilizado no tubo foram obtidos por seringa hipodérmica de polipropileno e injetados na câmara de testes de vidro de volume de 3.440 mL. Este procedimento foi realizado um total de 10 vezes com 4 repetições para 0.5 mL e 6 repetições para 1.0 mL. A concentração calculada para cada caso de teste pode ser encontrada na Tabela 5. Os dados de resposta do sensor na presença do agente amônia utilizando para geração da curva de resposta do sensor por meio da Equação 3, e função de estimação  $y = a^2x + bx + c$ .

$$PV = nRT \quad (4)$$

Na Equação 4:

- $P$  – pressão atmosférica (atm) para o local das medidas, obtida de Simepar<sup>1</sup>;
- $V$  – volume em litros;
- $N$  – quantidade de substância (mol);
- $R$  – constante universal dos gases  $0.082 \text{ atm L K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ .

$$C_{mg\ m^3} = 0,0409 C_{ppm} M \quad (5)$$

Na [Equação 5](#):

- $C$  – concentração;
- $M$  – massa molar da substância medida,  $M_{\text{NH}_3} = 17.0307 \text{ g mol}^{-1}$ .

### 3.1.2.1 Metodologia de validação para a calibração de resposta do sensor para amônia

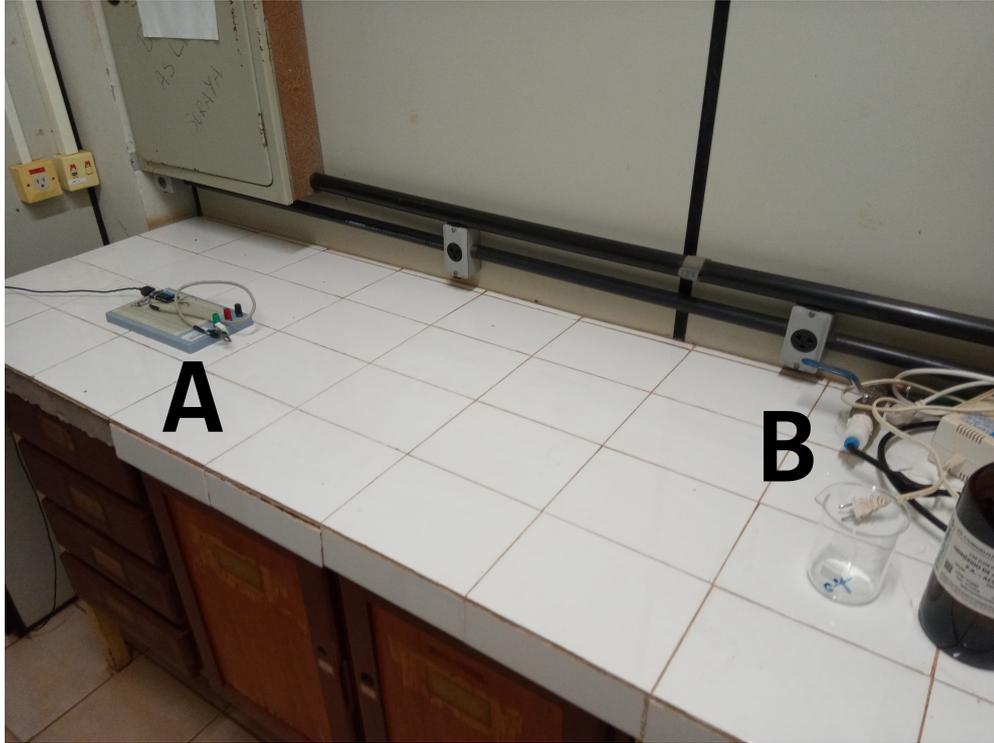
Visando simular um ambiente de aplicação real do sensor, simulou-se um vazamento de amônia em um ambiente fechado. Essa simulação foi feita utilizando uma sala fechada, com uma pequena abertura de ventilação próxima ao teto ([Figura 26](#)). A sala possui aproximadamente  $12.49 \text{ m}^3$  com uma pequena bancada. Em cima da bancada fora colocados um béquer com diâmetro interno de  $7.5 \text{ cm}$ , com os sensores sendo dispostos a uma distância de 1 metro do centro do béquer conforme [Figura 4](#). Inicia-se os testes despejando um volume de aproximadamente  $50 \text{ mL}$  de  $\text{NH}_3$  (amônia) dentro do béquer, o reagente usado para volatilização da amônia no ambiente foi o hidróxido de amônio  $\text{NH}_4\text{OH}$  a 28%, grau PA (para análise). Inicia-se a coleta dos dados pela porta serial da placa TTGO LoRa32 após aberto o frasco contendo o hidróxido de amônio. Depois de posto ao béquer o hidróxido de amônio, a porta da sala foi então fechada e utilizando um cronometro, o tempo de resposta do sensor é medido. Tem-se como tempo de resposta o tempo que o sensor leva para reagir ao gás amônia volatilizado na sala. Os resultados dos teste estão disponíveis na [subseção 5.0.4](#).

### 3.1.3 Metodologia para testes de sensibilidade cruzada

Como elencado anteriormente o sensor  $\text{NH}_3$  do sensor MICS-6814 também é sensível a outros gases, dentre eles o etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ). Para os testes de sensibilidade cruzada utilizando a câmara fechada de vidro com volume de  $3.440 \pm 20 \text{ mL}$  contendo ambos os sensores, introduziu-se o ar sintético a câmara. Após, papel de filtro quantitativo com etanol (PA 99%) foi introduzido na câmara por meio de uma abertura no topo. Quando saturado a câmara (resposta do sensor permanece estável por determinado período de tempo), os sensores foram removidos da câmara. Os de sensibilidade cruzada do sensor MICS-6814 estão disponíveis na [subseção 5.1.1](#).

<sup>1</sup> Simepar. Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná. Disponível em: [www.simepar.br](http://www.simepar.br).

Figura 4 – Na figura: (A) sensor, (B) béquer com hidróxido de amônio, dispostos a uma distância de 1 metro



### 3.2 Metodologia de testes de alcance da comunicação por *Bluetooth*

O teste do alcance do protocolo *Bluetooth* foi realizado de maneira empírica, com o sensor sendo colocado dentro da sala do laboratório LSC no bloco F do campus da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Cascavel. O laboratório permaneceu com a porta fechada durante o período de realização dos testes. Mediu-se então a distância que a conexão com o sensor se mantém com um dispositivo Android conectado ao sensor por meio de *Bluetooth* e realizando a coleta dos dados por meio do padrão *Environmental Sensing*. Para os testes foi utilizado o aplicativo *BLE Scanner* versão 3.21.

# 4

## Desenvolvimento

Este capítulo descreve o desenvolvimento do sistema embarcado para a placa TTGO LoRa32 utilizando o sistema operacional e tempo-real *freeRTOS* juntamente com o *stack bluedroid* para a implementação das funcionalidades *Bluetooth*. Também estão descritas neste capítulo as decisões tomadas em cada um de seus componentes. O código fonte completo do sistema implementado está disponível em: <https://github.com/mulling/mics6814>.

### 4.1 Visão geral do sistema

O sistema foi implementado utilizando o *framework* de desenvolvimento *esp-idf*<sup>1</sup>. A implementação visa garantir as metas temporais de medição para a leitura do sensor. E foi implementado de tal forma a ser não-bloqueante e permitir que o sistema se comporte em tempo real, respeitando o tempo de leitura de ambos os sensores, tanto do sensor de temperatura e umidade relativa do ar AM2302, quanto do sensor MICS-6814. Para isso todas as operações foram implementadas utilizando *tasks* (tarefas) assíncronas, sendo elas designadas a núcleos específicos do microcontrolador ESP32. Cada tarefa recebe uma prioridade dentro do escalonador de tarefas do sistema operacional *freeRTOS*, com as tarefas mais importantes recebendo prioridades mais altas.

Código 1 – Códigos para a criação das tarefas

```
1 xTaskCreatePinnedToCore(oprintf_loop, "oprintf_loop", 1024, NULL, 1, &
  opritnf_loop_handle, 1);
2 xTaskCreatePinnedToCore(am2302_loop, "am2302_loop", 2048, NULL, 23, &
  am2302_loop_handle, 1);
3 xTaskCreatePinnedToCore(mics6814_loop, "mics_loop", 2048, NULL, 24, &
  mics6814_loop_handle, 1);
```

<sup>1</sup> <https://github.com/espressif/esp-idf>

O [Código 1](#) mostra o trecho de código é responsável por designar as tarefas `oprintf_loop`, `am2302_loop` e `mics6814_loop` para o núcleo 1 do microcontrolador ESP32, ou seja, estas tarefas serão escalonadas apenas dentro do núcleo 1. Tendo prioridade de execução de 1 (mais baixo), 23 e 24 (mais alto) – respectivamente. A comunicação entre as tarefas é realizada por meio de *queues*, utilizando as estruturas de *kernel* presentes no *freeRTOS*. A comunicação entre as tarefas segue um modelo de produtor consumidor. Tenhamos por exemplo a tarefa `oprintf_loop` que imprime os dados do sensor no *display* `ssd1306` da placa TTGO, conforme o [Código 2](#), a tarefa espera indefinidamente (`portMAX_DELAY`) até que um item seja adicionado na *queue* `oprintf_loop_queue`. Quando um item é adicionado a *queue*, a tarefa é desbloqueada e as informações contidas no item recebido da *queue* são dispostas no *display*.

### Código 2 – Código da função `oprintf_loop`

```

1 static
2 void oprintf_loop(void *args){
3     struct oled_text_row oled_row;
4
5     while (1){
6         // try to consume all from the queue
7         while (xQueueReceive(oprintf_loop_queue, (void *)&oled_row, (
8             TickType_t)portMAX_DELAY) == pdPASS){
9             ssd1306_display_text(&ssd1306_dev, oled_row.row, oled_row.msg,
10                SSD1306_CHAR_LINE , false);
11         }
12     }
13 }
```

Por decisão de projeto, a troca de mensagens entre as tarefas `mics6814_loop` ([Código 4](#)) e `am2302_loop` ([Código 5](#)) foi realizada utilizando um esquema de notificações através das funções `xTaskNotify` e `xTaskNotifyWait`. A tarefa `am2302_loop` faz o envio dos dados de temperatura e umidade relativa do ar para a tarefa `mics6814_loop` utilizando a função `xTaskNotify`, que recebe os dados através da função `xTaskNotifyWait`. Como o tempo de leitura do sensor MICS-6814 é menor que o do sensor AM2302, e essa invariante se mantém, o sensor MICS-6814 sempre receberá os dados mais recentes de temperatura e umidade relativa do ar, salvo falha na leitura do sensor AM2302 o que faz com que a tarefa `mics6814_loop` utilize dados de temperatura e umidade relativa do ar lidos previamente.

A periodicidade de leitura dos sensores, tendo em contexto um sistema em tempo-real, foi definida por meio dos macros `TASK_DELAY_UNTIL_MS` ([Código 3](#)), que faz uso da função `vTaskDelayUntil` utilizando a contagem de *ticks* que se passaram entre a ultima chamada e o valor de tempo periódico de leitura em *ticks* do determinado sensor, com isso pode-se estipular um intervalo e leitura para os sensores que leva em conta o tempo de execução da própria leitura com uma granularidade de erro definida pela duração de cada *tick*<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Por padrão no *freeRTOS* cada *tick* tem 1ms, este parâmetro não foi alterado.

## Código 3 – Código dos macros TASK\_DELAY\_UNTIL\_MS e TASK\_DELAY\_UNTIL\_INIT

```

1 #define TASK_DELAY_UNTIL_INIT() TickType_t __prev = xTaskGetTickCount()
2 #define TASK_DELAY_UNTIL_MS(ms) do { \
3     vTaskDelayUntil(&__prev, pdMS_TO_TICKS((ms))); \
4     __prev = xTaskGetTickCount(); \
5 } while(0);

```

## 4.2 Leitura do sensor MICS-6814

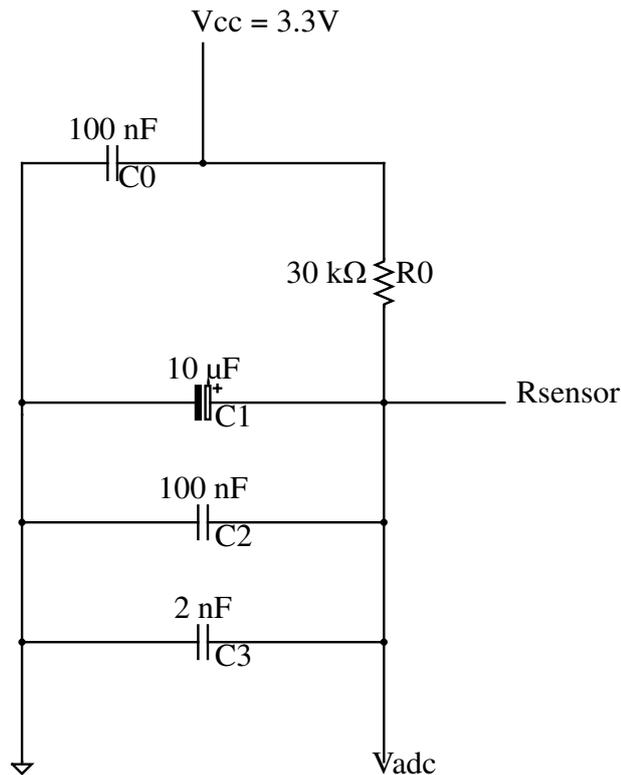
O sensor foi ligado a placa TTGO em uma configuração de divisor de tensão. Nesta configuração o  $V_{adc}$  (veja [Figura 5](#)) do divisor foi ligado a ADC da placa (ADC1\_CHANNEL\_0), ligado entre o  $V_{cc}$  e o resistor  $R_0 = 30k\Omega$  está um capacitor ( $C_0$  na [Figura 5](#)) de cerâmica número 104 (capacitância de  $100 \mu F$ ) em configuração de desacoplamento com o *ground*. O capacitor de desacoplamento foi utilizado para remover ruídos de sinal o que conseqüentemente melhora a resposta do conversor analógico digital. Os demais capacitores ( $C_1 C_2 C_3$  estão ligados em configuração de *bypass*, sua função também é de reduzir o ruído do circuito principalmente para ruído de alta frequência e variações de suprimento de carga da placa TTGO. O outro resistor do divisor de tensão consiste do próprio sensor  $R_s$ . Para facilitar a construção do circuito a voltagem nominal suprida ao sensor NH3 foi de  $V_{cc} = 3.3V^3$ .

A tarefa `mic6814_loop` [Código 4](#) é responsável pela leitura periódica do sensor. Inicialmente são alocados os coeficientes  $\beta$  da regressão linear múltipla referente a calibração de influência de temperatura e umidade relativa do ar, para isso utiliza-se o macro `MICS6814_ALLOC_BETAS`, os coeficientes  $\beta$  alocados são respectivamente o coeficiente de interceptação  $\beta_0$ , o coeficiente da regressão para a temperatura  $\beta_1$  e o coeficiente da regressão para a umidade relativa do ar  $\beta_2$ . Em seguida são alocados os coeficientes da calibração de resposta do sensor seguindo a equação do método dos quadrados mínimos  $ppm = a^2x + bx + c$ , para isso é utilizado o macro `MICS6814_ALLOC_LSTSQ`. Dentro do laço *while*, checa-se pela notificação de novos valores de temperatura e umidade relativa do ar, caso não haja novos valores os antigos são utilizados. Essa decisão de projeto convém ao fato de que o sensor AM2302 pode espontaneamente sofrer *bit-flips* devido a inúmeros fatores, o que causa um erro de leitura. Em seguida, é feita a leitura do sensor utilizando a função `mic6814_read_voltage` (para mais detalhes da implementação veja o [Código 10](#)) que faz a leitura do sensor através do conversor analógico digital no canal 1, fazendo-se uma média aritmética de  $N$  leituras do sensor. Se a leitura do sensor é realizada com sucesso, é então feita a correção da influência de temperatura e umidade relativa do ar utilizando a função `mic6814_vraw_to_vreg` ( $v_{reg} = v_{raw} - \beta_0 + \beta_1 x_{temp} + \beta_2 x_{umid}$ ), após feita a correção, o valor obtido é transformado em concentração (ppm) utilizando a função `mic6814_to_ppm`.

<sup>3</sup> Não foi possível verificar com o fabricante do sensor se a operação do mesmo a uma voltagem inferior a 5.0V (voltagem nominal para os resistores de aquecimento do sensor) tem efeito nas características operacionais do sensor. Assume-se que não pois a energia de ativação permanece a mesma. Os resistores de aquecimento foram operados a um voltagem de 5.0V

Para a atualização dos valores de concentração da amônia no pacote de *advertisement*, *scan-response* e característica do serviço de *environmental sensing* do *Bluetooth* são utilizadas as funções: `ble_set_nh3_attr` e `ble_update_adv_msg`, ambas as funções utilizam de uma *queue* para o envio de dados para o controlador Bluetooth de maneira assíncrona, este processo é feito por meio de eventos GATT do controlador *bluedroid*.

Figura 5 – Circuito de leitura do sensor MICS-6814



### 4.3 Leitura do sensor AM2302

Devido a problemas como perda de bits na comunicação com o sensor e *bugs* de sincronização com a biblioteca *Bluetooth*, optou-se pela implementação de uma biblioteca <sup>4</sup> para a leitura do sensor AM2301. A implementação (Código 11 e Código 12) utiliza do *driver* de RMT (*Remote Controller*) para realizar a leitura do sensor. O sensor foi ligado a uma porta da placa TTGO em uma configuração de *pull-up* com um resistor de  $4.6\text{ k}\Omega$ . Como a leitura do sensor AM2302 é feita por um protocolo de comunicação *one-wire* assíncrono, a leitura baseada em interrupções que o módulo de RMT possibilita garante menor perda de dados na leitura do sensor. As configurações relevantes adotadas para *driver* RMT foram: Utilização de um divisor de *clock* com valor  $80^5$ . O divisor de *clock* permite a granularidade de leitura dos tempos de interrupção gerados pela comunicação com o sensor de  $1\text{ Mhz}$  (ou  $1\text{ }\mu\text{s}$ ). A tarefa `am2302_loop` é responsável pela leitura periódica do sensor. A leitura é feita utilizando a função `am2302_read`, os valores de

<sup>4</sup> A biblioteca esta disponível em: <https://github.com/mulling/am2302>.

<sup>5</sup> Quando em operação nominal o microcontrolador ESP32 utiliza *clock source* de  $80\text{ Mhz}$ .

## Código 4 – Código da função mics6814\_loop

```

1 void mics6814_loop(void *args){
2     uint32_t vraw; // raw voltage reading
3     uint32_t vreg; // corrected voltage for temperature and humidity
4     uint32_t cppm;
5
6     float fppm;
7
8     uint32_t n;
9
10    int16_t t = 0;
11    int16_t h = 0;
12
13    MICS6814_ALLOC_BETAS(1323.56724301, -26.46680528, -9.315224);
14    MICS6814_ALLOC_LSTSQ(0.00005043, -0.33039421, 501.52061563);
15
16    mics6814_init();
17
18    TASK_DELAY_UNTIL_INIT();
19    while (1){
20        if (xTaskNotifyWait(0, 0, &n, 0) == pdPASS){
21            t = 0xFFFF & (n >> 16);
22            h = 0xFFFF & n;
23        }
24
25        if ((vraw = mics6814_read_voltage()) >> 31){
26            fprintf(0, SENSOR_WARMUP_FMT, MICS6814_WARMUP_TIME - time(NULL)
27        );
28            fprintf(1, "");
29        } else {
30            vreg = (uint32_t)mics6814_vraw_to_vreg(&vraw, &t, &h);
31            fppm = mics6814_to_ppm(&vraw, &t, &h);
32            cppm = fppm <= 0 ? 0 : (uint32_t)fppm;
33            cppm %= 500;
34
35            char sppm[3];
36            ppm_to_string(sppm, cppm);
37            ble_set_nh3_attr((uint8_t *)&cppm, sizeof(uint8_t) * 2);
38
39            uint16_t vreg_sfloat16 = to_sfloat16(cppm);
40
41            ble_update_adv_msg(vreg_sfloat16, SENSOR_BLE_MSG_FMT, cppm);
42
43            fprintf(0, SENSOR_RAW_FMT, vraw);
44            fprintf(1, SENSOR_REG_FMT, vreg);
45            fprintf(6, SENSOR_PPM_FMT, cppm);
46
47            #ifndef LOG_CSV
48                printf("%u,%.1f,%.1f,%u,%u\n", vraw, t / 10.0, h / 10.0, vreg,
49                cppm);
50            #endif
51        }
52        TASK_DELAY_UNTIL_MS(MICS6814_READ_TIME);
53    }
54 }

```

temperatura e umidade relativa do ar são então informados a tarefa `mics6814_loop` por meio da função `xTaskNotify`.

Código 5 – Código da função `am2302_loop`

```

1 void am2302_loop(void *args){
2     int16_t t = 0;
3     int16_t h = 0;
4
5     am2302_init();
6
7     TASK_DELAY_MS(10); // NOTE: wait for the mics task to be created
8
9     TASK_DELAY_UNTIL_INIT();
10    while (1){
11        if (am2302_read(&t, &h) == ESP_OK){
12            oprintf(2, TEMPERATURE_HUMIDITY_FMT, t / 10.0f, h / 10.0f);
13
14            xTaskNotify(mics6814_loop_handle, (((uint32_t)t) << 16) | h,
15                eSetValueWithOverwrite);
16        }
17        TASK_DELAY_UNTIL_MS(AM2302_READ_TIME);
18    }
19 }

```

## 4.4 Protocolo de comunicação *Bluetooth*

O Desenvolvimento das funcionalidades *Bluetooth* do sistema foi feito utilizando o *stack blueandroid* do *framework esp-idf*. Todas as funcionalidades *Bluetooth* foram pinadas ao núcleo zero do microcontrolador ESP32 por meio da opção `CONFIG_BT_BLUEDROID_PINNED_TO_CORE = 0`. Para a interface GAP (*Generic Access Profile*) foram implementados os dois mecanismos de *advertisement* suportados, por meio de notificação de propaganda diretas e por meio de resposta de *scan*.

### 4.4.1 Generic Access Profile – GAP

O Código 6 mostra as configurações de *advertisement* utilizadas no sistema. No código temos:

- `adv_int_min` – Número mínimo de intervalo de propaganda para o ciclo de propaganda direcionado, valor:  $N = 0x20$  com o tempo dado pela equação  $N \cdot 0.625ms$ ;
- `adv_int_max` – Número máximo de intervalo de propaganda para o ciclo de resposta de *scan*, valor:  $N = 0x40$  com o tempo dado pela equação  $N \cdot 0.625ms$ ;
- `adv_type` – Tipo do pacote de propaganda, valor: `ADV_TYPE_IND`;

- `own_addr_type` – Tipo do endereço do dispositivo *host*, valor: `BLE_ADDR_TYPE_PUBLIC`;
- `channel_map` – Mapa para direcionamento de pacotes de propaganda para determinado canal, valor: `ADV_CHNL_ALL` propaganda em todos os canais;
- `adv_filter_policy` – Política de filtro, valor: `ADV_FILTER_ALLOW_SCAN_ANY_CON_ANY` todos os dispositivos podem conectar e todos os dispositivos pode requisitar pacotes de *scan*.

Código 6 – Código de configuração da interface GAP

```

1 static esp_ble_adv_params_t ble_adv_params = {
2     .adv_int_min       = 0x20,
3     .adv_int_max       = 0x40,
4     .adv_type          = ADV_TYPE_IND,
5     .own_addr_type     = BLE_ADDR_TYPE_PUBLIC,
6     .channel_map       = ADV_CHNL_ALL,
7     .adv_filter_policy = ADV_FILTER_ALLOW_SCAN_ANY_CON_ANY
8 };

```

Código 7 mostra o formato dos pacotes de propaganda (*advertisement*) *Bluetooth* do sistema. O primeiro pacote, `raw_adv_data` corresponde aos dados crus da propaganda direcionada do protocolo *Bluetooth*. Dentro do pacote são definidos os parâmetros de potência de transmissão, o UUID do serviço de *Ammonia Concentration*, seguido dos valores de aparência *Air quality Sensor* e valores de nome completo local. O campo de nome completo local definido pelo *byte* `0x09` é dinâmico durante a execução de programa, este sendo atualizado para conter os valores de concentração do agente amônia lidos pelo sensor. Esta decisão decore do fato de que as informações de nome completo local podem ser lidas pela maioria dos dispositivos *Bluetooth*, incluindo a interface presente na maioria dos dispositivos Android. O segundo pacotes de dados (Código 7), referente a resposta de *scan* contém a potência de transmissão, o UUID do serviço de *Ammonia Concentration*, seguido dos valores de aparência *Air quality Sensor* além do valor da característica do serviço GATT em formato SFLOAT16<sup>6</sup>.

#### 4.4.2 Generic Attributes Profile – GATT

A tabela de atributos (ATT) implementada (veja Código 8) contempla os serviço de *environmental sensing* e a característica de concentração de amônia. A característica implementada permite a leitura por meio do dispositivo conectado e também permite a leitura por meio de notificações. Relevante a implementação, dispositivos podem optar por habilitar ou não o mecanismo de notificação.

<sup>6</sup> O formato SFLOAT16 consiste de um tipo para dados de tipo ponto flutuante, onde: o expoente tem 4 bits e a mantissa 12.

Código 7 – Código dos pacotes de *advertisement* e *scan response*

```

1 static uint8_t raw_adv_data[31] = {
2     0x02, 0x0A, 0xEB,          // tx power
3     0x03, 0x03, 0x2B, 0xCF, // 16-bit service uuid
4     0x03, 0x19, 0x05, 0x42, // appearance values
5     0x0A, 0x09, 'M', 'I', 'C', 'S', '-', '6', '8', '1', '4'
6 };
7
8 static uint8_t raw_scan_rsp_data[] = {
9     0x02, 0x0A, 0xEB,          // tx power
10    0x03, 0x03, 0x2B, 0xCF, // 16-bit service uuid
11    0x03, 0x19, 0x05, 0x42, // appearance value
12    0x03, 0x16, 0x00, 0x00 // service data
13 };

```

Código 8 – Código data tabela de serviços e características GATT

```

1 static const esp_gatts_attr_db_t gatt_db[IDX_SIZE] = {
2     [IDX_SVC] = {{ .auto_rsp = ESP_GATT_AUTO_RSP }, {
3         .uuid_length = ESP_UUID_LEN_16,
4         .uuid_p      = (uint8_t*)&esp_gatt_uuid_pri_service,
5         .perm        = ESP_GATT_PERM_READ,
6         .max_length  = sizeof(uint16_t),
7         .length      = sizeof(svc_uuid),
8         .value       = (uint8_t *)&svc_uuid }}},
9     [IDX_CHAR_NH3] = {{ .auto_rsp = ESP_GATT_AUTO_RSP }, {
10        .uuid_length = ESP_UUID_LEN_16,
11        .uuid_p      = (uint8_t*)&esp_gatt_uuid_char_declare,
12        .perm        = ESP_GATT_PERM_READ,
13        .max_length  = sizeof(uint8_t),
14        .length      = sizeof(esp_gatt_uuid_char_declare),
15        .value       = (uint8_t*)&esp_gatt_char_prop_bit_rn }}},
16    [IDX_CHAR_NH3_VAL] = {{ .auto_rsp = ESP_GATT_AUTO_RSP }, {
17        .uuid_length = ESP_UUID_LEN_16,
18        .uuid_p      = (uint8_t*)&char_uuid,
19        .perm        = ESP_GATT_PERM_READ,
20        .max_length  = CHAR_VAL_LEN_MAX,
21        .length      = sizeof(nh3_value),
22        .value       = (uint8_t*)&nh3_value }}},
23    [IDX_CHAR_NH3_CFG] = {{ .auto_rsp = ESP_GATT_AUTO_RSP }, {
24        .uuid_length = ESP_UUID_LEN_16,
25        .uuid_p      = (uint8_t*)&esp_gatt_uuid_char_client_config,
26        .perm        = ESP_GATT_PERM_READ | ESP_GATT_PERM_WRITE,
27        .max_length  = sizeof(uint16_t),
28        .length      = sizeof(nh3_ccc),
29        .value       = (uint8_t*)&nh3_ccc }}
30 };

```

# 5

## Resultados

Este capítulo descreve os resultados dos testes com metodologias descritas no [Capítulo 3](#). São apresentados argumentos para os resultados obtidos para cada teste e possíveis melhorias na metodologia de calibração também são propostas.

### 5.0.1 Resultados para os testes de variação de umidade e determinação de $R_0$

Como pode ser observado na [Figura 6](#) e [Figura 7](#) referentes aos testes 1 e 2, conforme a umidade relativa do ar aumenta a resposta não corrigida (crua) lida do sensor cai, conforme a umidade relativa do ar diminui a resposta crua do sensor aumenta. Ou seja, a resistência do sensor aumenta conforme a umidade relativa do ar diminui e a resistência do sensor diminui conforme a umidade aumenta. Esse comportamento condiz com o esperado levando em conta a configuração de divisor de tensão utilizado para a leitura do sensor. O mesmo comportamento pode ser observado nos testes 3, 4, 5 e 6 ([Figura 8](#), [Figura 9](#), [Figura 10](#) e [Figura 11](#) – respectivamente). [Figura 12](#) mostra o resultado para a obtenção de  $R_0$  da calibração, com o cálculo de  $R_0 = 2423.2836mV \pm 7.2376 (\pm 0.30\%)$  sendo obtido pela média aritmética da leitura do sensor por um período de tempo de aproximadamente 10 minutos, conforme o teste 7.

### 5.0.2 Resultado para os testes da variação de temperatura

[Figura 13](#) mostra os resultados para os teste de calibração quanto a variação da temperatura, como mencionado anteriormente não foi possível isolar completamente a variável de temperatura da umidade relativa do ar devido a limitações da metologia e recursos disponíveis. O teste, porém, permite capturar a influência do fator de variação de temperatura e umidade relativa do ar na resposta do sensor.

Figura 6 – Teste 1 – Variação da umidade. É possível observar que quando a umidade relativa dentro da câmara aumenta a resposta do sensor cai

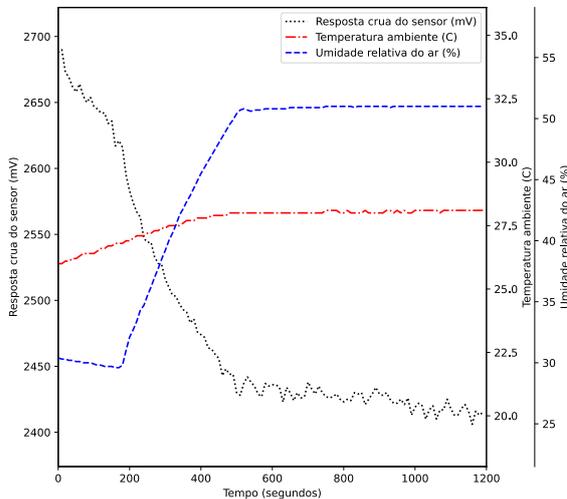


Figura 7 – Teste 2 – Variação da umidade. Conforme a umidade relativa dentro da câmara diminui (instante de tempo 1100 após introduzido o ar sintético) a resposta do sensor aumenta

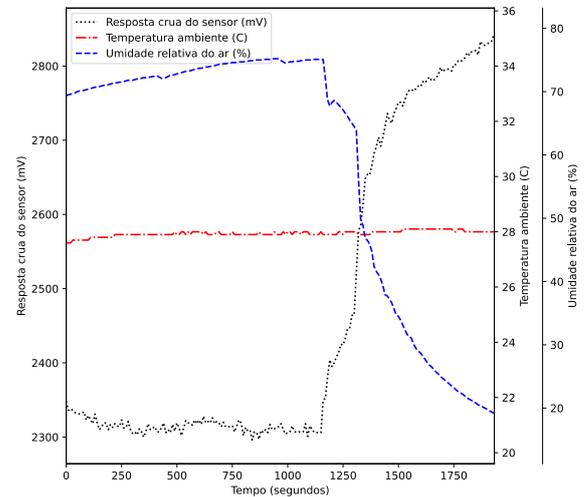


Figura 8 – Teste 3 – Variação da umidade. Umidade aumenta no instante de tempo 0 de 30% para 72% no instante de tempo 1300

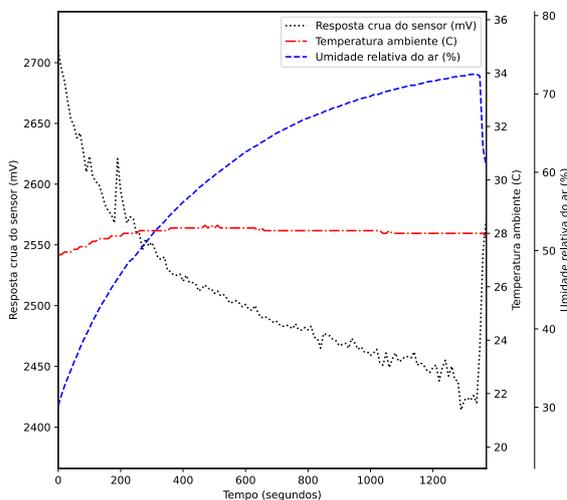
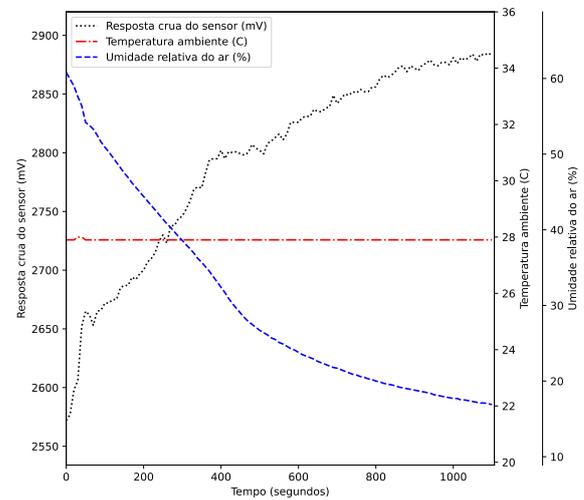


Figura 9 – Teste 4 – Variação da umidade. Umidade relativa do ar dentro da câmara diminui, resposta do sensor aumenta



### 5.0.3 Resultados para os testes de validação da calibração da temperatura e umidade relativa do ar

Os resultados de resposta combinados do sensor, referentes aos testes 1 a 6 e 8, foram utilizados para determinar os coeficientes  $\beta$  da regressão para a correção da influência da temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Figura 14 mostra todos os testes e resultados da regressão aplicada sobre os mesmos parâmetros de entrada, foi obtido um  $R^2 = 0.89$  com os

Figura 10 – Teste 5 – Variação da unidade. Umidade relativa do ar dentro da câmara aumenta, gerando queda na resposta do sensor que volta a subir quando a umidade relativa do ar dentro da câmara volta a aumentar

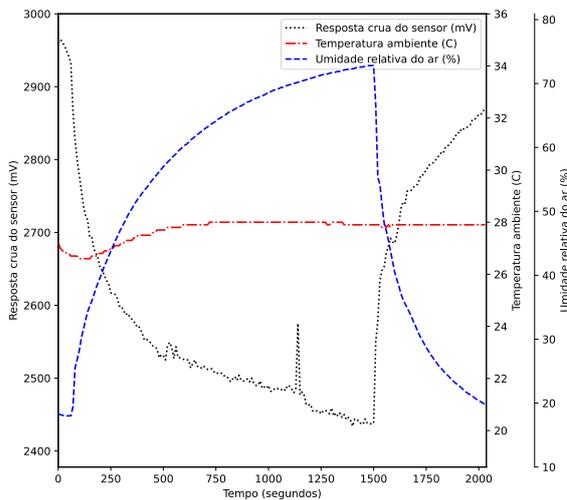


Figura 11 – Teste 6 – Variação da umidade. Umidade relativa do ar dentro da câmara aumenta, resposta do sensor cai

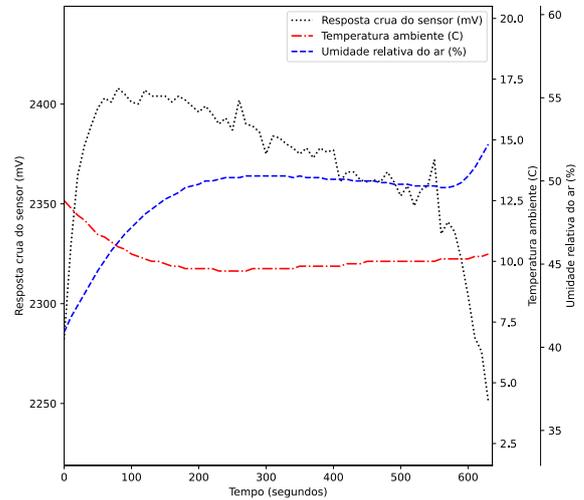


Figura 12 – Teste 7 – Determinação de R0. No gráfico observa-se que ambos a temperatura e a umidade relativa dentro da câmara permanecem constantes

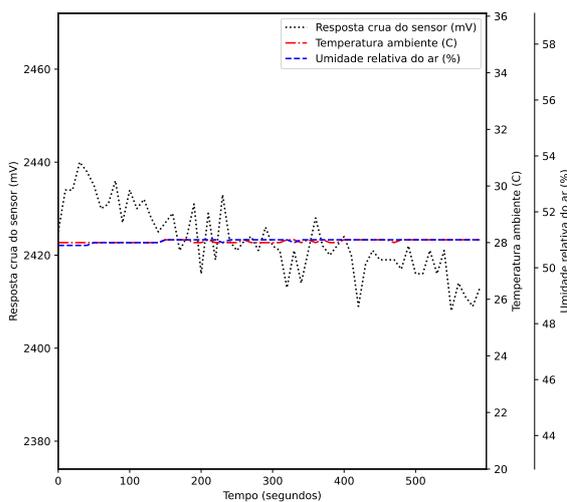
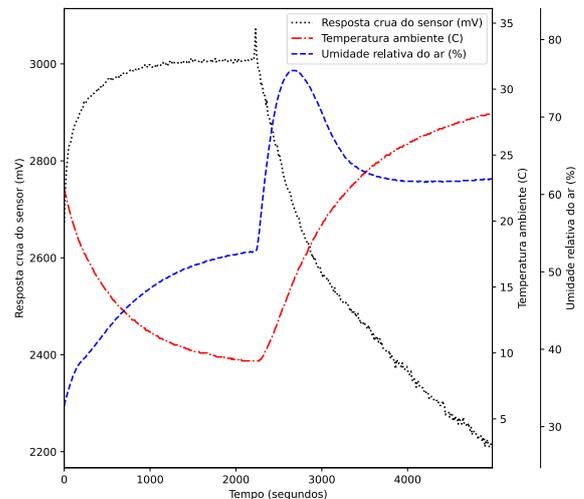
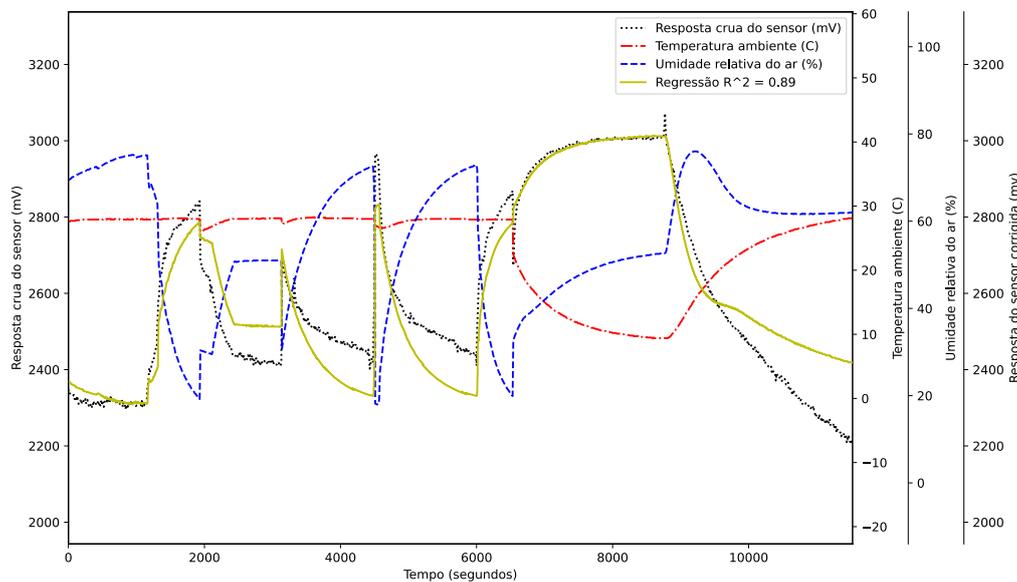


Figura 13 – Teste 8 – Teste de variação de temperatura, no instante de tempo 0 a câmara fechada é colocada dentro da caixa contendo gelo; no instante de tempo 2200, retira-se a câmara fechada de vidro da caixa contendo gelo, a mesma é colocada em uma bancada



coeficientes  $\beta$  da regressão,  $\hat{\beta} = [1295.4989, -27.389898, -8.556168]$ . Os valores obtidos com a regressão foram utilizados então para corrigir a resposta do sensor, os testes de validação da

Figura 14 – Resultado da regressão linear múltipla utilizando com o entrada os resultados dos testes 1 a 6 e 8



calibração foram então comparados com o valor obtido para  $R_0$ . A Figura 15 mostra os resultados do teste 9 para a correção da influência da temperatura ambiente e umidade relativa do ar, a média de resposta do sensor para o teste foi de  $2326.2258 \pm 19.28mV$  ( $\pm 0.8298\%$ ). Figura 16 mostra os resultados do teste 10, a média de resposta do sensor para o teste foi de  $2365.5712 \pm 34.8084mV$  ( $\pm 1.47\%$ ). Os resultados obtidos com os testes são satisfatórios considerando que a resposta do sensor permaneceu relativamente constante mesmo com a variação da umidade relativa do ar. Observa-se que a calibração não conseguiu reproduzir os valores obtidos de  $R_0$  com um erro médio de  $97.0578mV$  para o teste 9 e  $57.7124mV$  para o teste 10, porém, considerando as limitações e recursos para a calibração, julga-se os resultados como promissores.

A Figura 17 mostra o resultado da leitura do sensor por um período de 3 dias consecutivos, observa-se uma variação da resposta quanto a calibração para  $R_0$ , acredita-se que devido a calibração ser feita em ambiente com ar sintético, possíveis variações da composição do ar no ambiente onde o teste foi realizado possam ter levado o sensor a gerar uma resposta maior que o valor nominal de  $R_0$ . No entanto, a faixa de valores obtida ainda condiz com a não presença do agente amônia no ambiente onde o teste foi realizado, uma vez que esta foi menor que o valor nominal de  $R_0$ . Devido ao possível alto tempo de *break-in* do sensor, uma futura recalibração de  $R_0$  pode ser necessária.

#### 5.0.4 Resultado para os testes de calibração para a amônia

As Figura 18 e Figura 19 mostram os resultados da injeção, conforme o método descrito anteriormente, de  $0.5mL$  de amônia na câmara fechada de vidro. Observa-se que em ambos os testes 11 e 12, a resposta do sensor caiu como esperado, permanecendo constante quanto o

Figura 15 – Teste 9 – Validação calibração com teste de variação da umidade relativa do ar dentro da câmara fechada. No teste a umidade relativa do ar dentro da câmara varia aproximadamente 55%

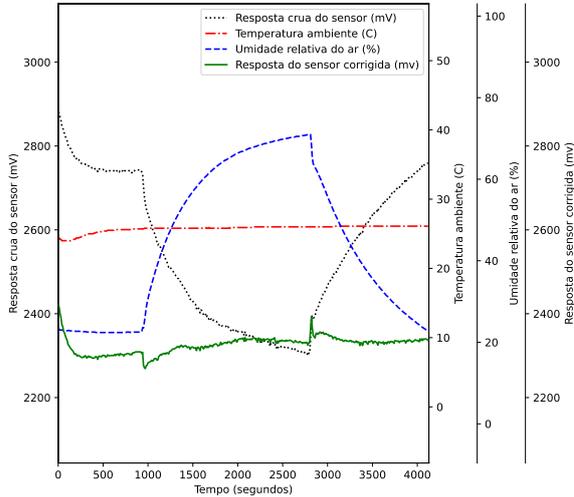


Figura 16 – Teste 10 – Validação calibração com teste de variação da umidade relativa do ar dentro da câmara fechada. No teste a umidade relativa do ar dentro da câmara varia aproximadamente 58%

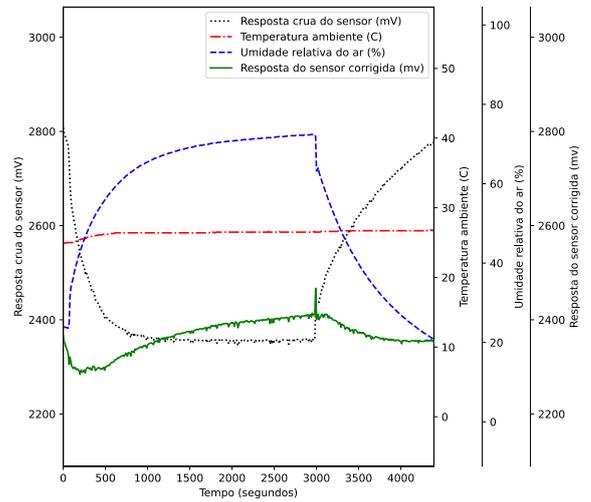
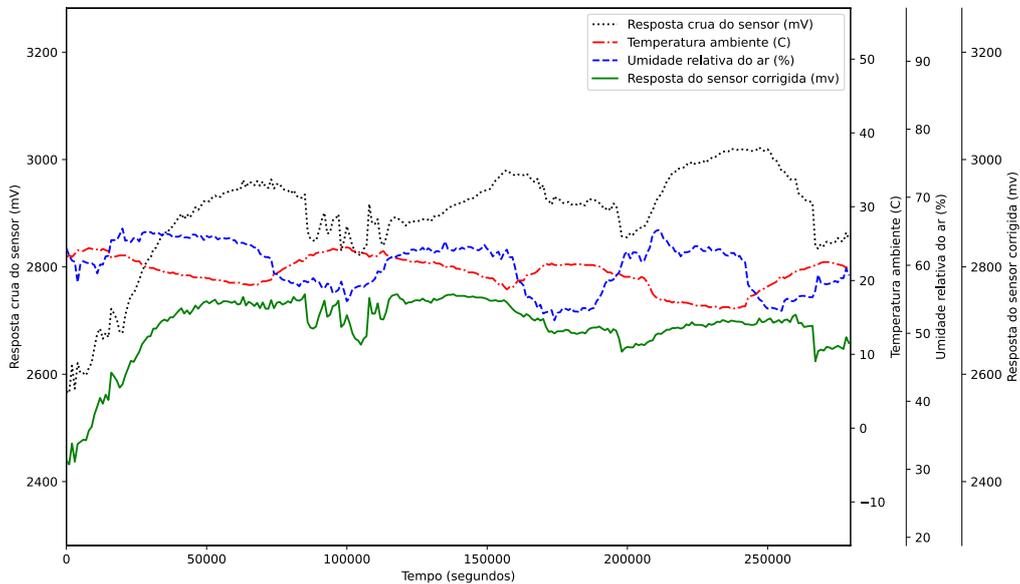


Figura 17 – Teste de longa duração para a estabilidade do sistema



ambiente dentro do sensor ficou homogêneo. Para o teste 11, no instante de tempo 450 injeta-se o ar sintético na câmara fechada o que faz com que resposta do sensor aumente e a umidade relativa do ar diminua, porém, esta voltou ao valor inicial devido ao processo de calibração de influência de temperatura e umidade na resposta do sensor. O mesmo pode ser observado para o teste 12.

Assim como nos testes 11 e 12 os testes 13 e 14 para a amônia (1.0mL) apresentaram o comportamento esperado para o sensor. Para o caso do teste 13 após injetado a amônia a resposta

Figura 18 – Teste 11 – Teste com amostra de amônia de 0.5mL. No instante de tempo 120 a amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 450 o ar sintético é injetado

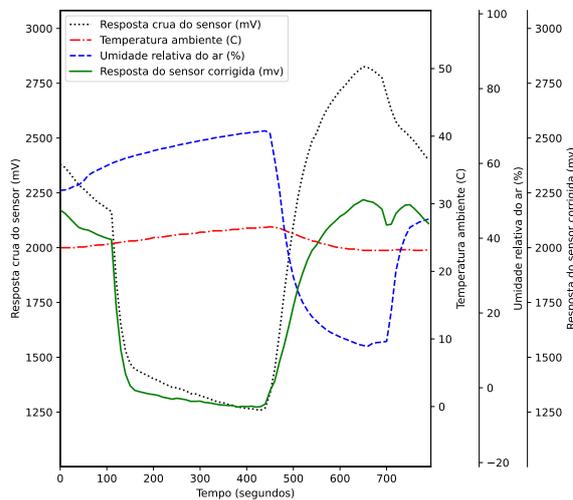
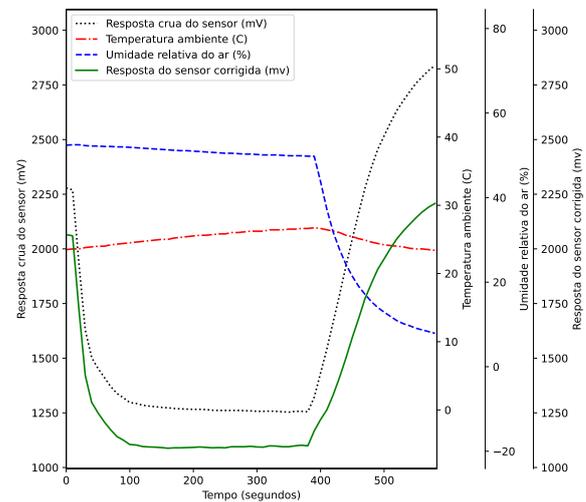


Figura 19 – Teste 12 – Teste com amostra de amônia de 0.5mL. No instante de tempo 10 a amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 380 o ar sintético é injetado



do sensor cai até que o ambiente dentro do frasco fechado fique homogêneo, no momento de tempo 200 (Figura 20) injeta-se o ar sintético dentro da câmara fechada de vidro o que faz com que a resposta do sensor volte a subir, retornando ao valor inicial. O mesmo se aplica para o teste 14, no momento de tempo 230 injeta-se o ar sintético dentro da câmara fechada de vidro e a resposta do sensor volta a valores iniciais. Além dos testes 13 e 14, foram realizados um total de 6 testes para a amônia na concentração 1.0mL e 4 testes para a concentração de 0.5mL, conforme a Tabela 5. A concentração obtida para cada caso de teste foi usada juntamente com o valor mínimo da resposta do sensor para obter a curva de resposta do sensor para o agente amônia utilizando o método dos quadrados mínimos. Os coeficientes obtidos por meio do método dos quadrados mínimos são:  $a = 0.00005043$ ,  $b = -0.33039421$  e  $c = 501.52061563$ , com a curva de resposta obtida pela equação  $R_{ppm}(R_{cor}) = 0.00005043^2 R_{cor} - 0.33039421 R_{cor} + 501.52061563$  sendo que  $R_{cor}$  é a resposta do sensor corrigida para a influência de temperatura e umidade relativa do ar.

A curva de resposta do sensor obtida por meio do método dos quadrados mínimos (Figura 22) condiz em natureza com a curva fornecida pelo fabricante do sensor (SGX SENSOR-TECH, 2015) com ambas as respostas apresentando caráter logarítmico. Ou seja, a medida que a concentração aumenta a variação relativa da resposta do sensor diminui.

Figura 20 – Teste 13 – Teste com amostra de amônia 1.0mL. No instante de tempo 50 a amostra de amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 200 o ar sintético é injetado

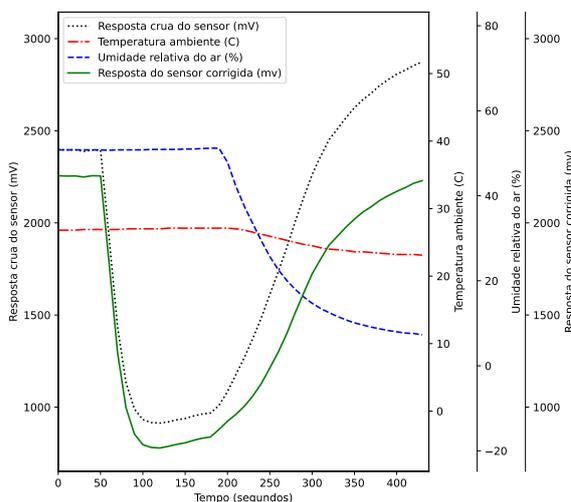


Figura 21 – Teste 14 – Teste com amostra de amônia 1.0mL. No instante de tempo 0 a amostra de amônia é injetada na câmara fechada; no instante de tempo 220 o ar sintético é injetado

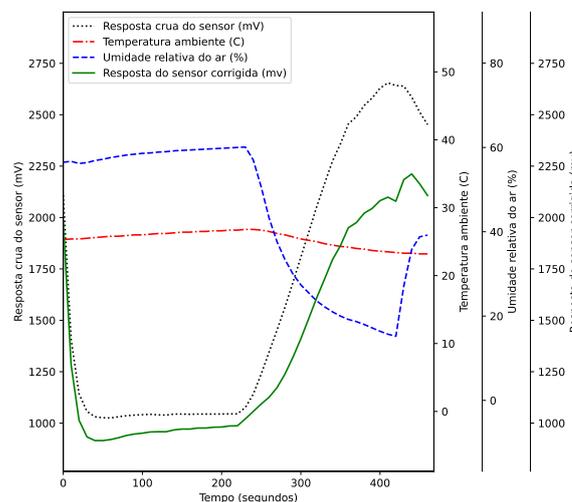


Tabela 5 – Resultados obtidos para a calibração de amônia com volume amostral de 0.5mL e 1.0mL correspondente a leitura do sensor e concentração da amônia calculada

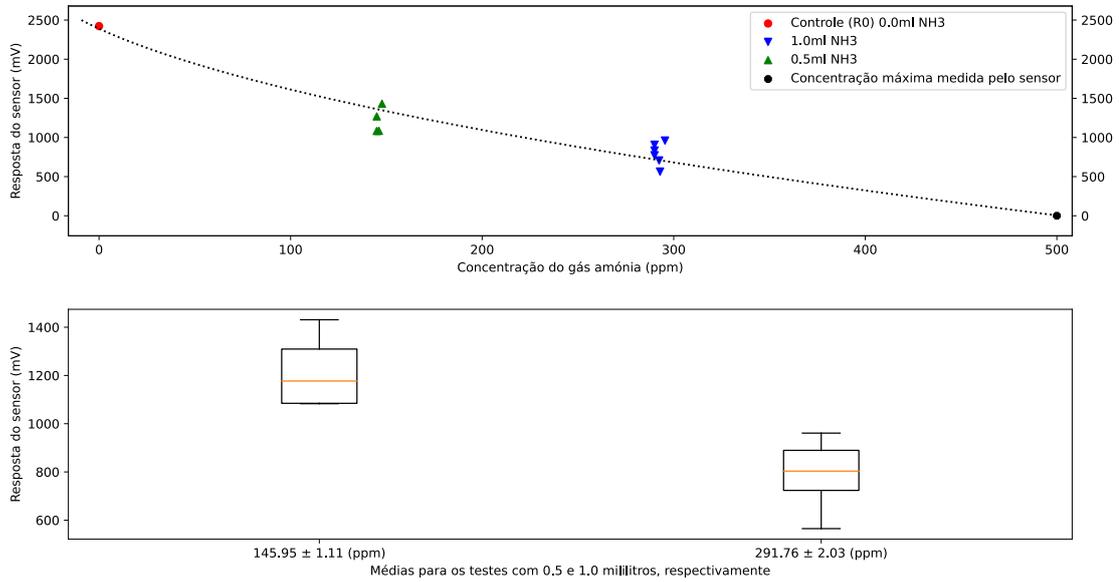
Leitura do sensor (mV)	Amônia (ppm)	Descrição
2423.28	0.0	Valor nominal de $R_0$
773.0	289.97	Concentração para 1.0mL de amônia, teste dia 29/05
834.0	289.97	Concentração para 1.0mL de amônia, teste dia 29/05
908.0	289.97	Concentração para 1.0mL de amônia, teste dia 29/05
1083.0	144.99	Concentração para 0.5mL de amônia, teste dia 29/05
1269.0	144.99	Concentração para 0.5mL de amônia, teste dia 29/05
707.0	292.37	Concentração para 1.0mL de amônia, teste dia 24/06
565.0	292.86	Concentração para 1.0mL de amônia, teste dia 24/06
961.0	295.44	Concentração para 1.0mL de amônia, teste dia 24/06
1431.0	147.71	Concentração para 0.5mL de amônia, teste dia 24/06
1085.0	146.09	Concentração para 0.5mL de amônia, teste dia 24/06
0.0	500.0	Valor de concentração máxima medida pelo sensor

## 5.1 Resultado para os testes de validação da amônia

A Tabela 6 mostra os testes de validação para a detecção do gás amônia conforme metodologia descrita anteriormente na subseção 3.1.2.1. Observa-se que o sensor possui tempo de resposta menor que 1 minuto após exposição ao ambiente no qual o hidróxido de amônia esta volatilizando. Por ser altamente volátil e possuir uma densidade  $0.73 \frac{kg}{m^3}$  menor que a do ar e valor de difusividade de  $0.28 \times 10^{-4} m^2 s^{-1}$  a  $25^\circ C$ , a amônia volatilizada se espalha pelo ambiente da sala de forma rápida e homogênea.

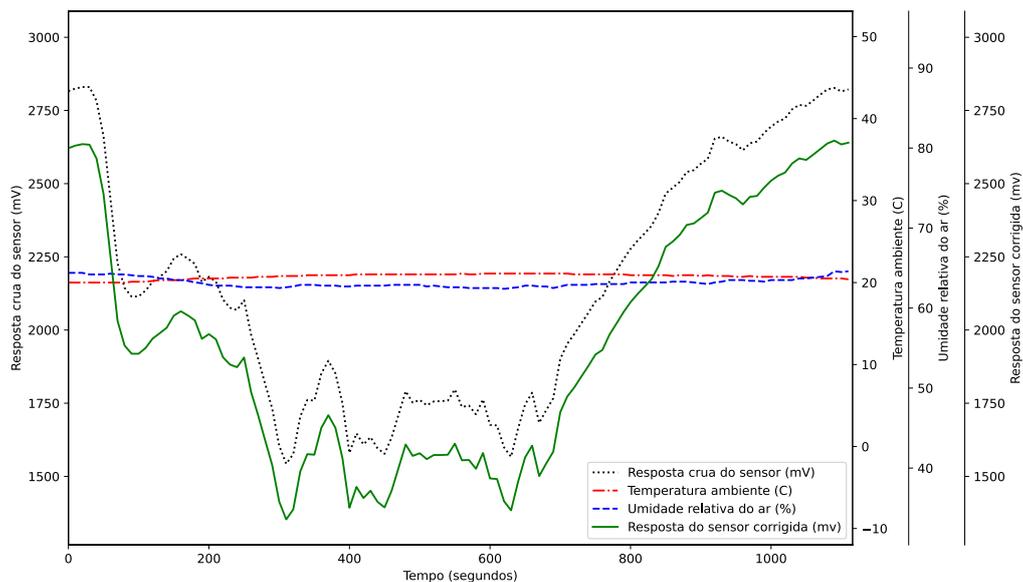
O tempo médio de resposta do sensor foi de  $38.33 \pm 4, 16$  segundos com coeficiente de variação de 10.85% no tempo da abertura do frasco e a detecção do agente amônia pelo sensor. A

Figura 22 – Curva de concentração para a resposta do sensor ao gás amônia e média dos valores de concentração obtidos para os testes com 0.5mL e 1.0mL de amônia volatilizada



variância no tempo de resposta do sensor pode ser explicada devido ao fato de que o ambiente onde o teste foi realizado não é totalmente controlado, e possíveis mudanças nas correntes de ar internas da sala causadas pelo fechamento da porta no início dos testes possam causar os desvios de tempo de resposta. Figura 23 mostra o tempo de resposta do sensor para correspondente ao teste 3 (Tabela 6) de resposta do sensor, observa-se na figura a flutuações de resposta do sensor causadas por disparidades no processo de volatilização do hidróxido de amônio na sala fechada.

Figura 23 – Resultado do teste 3 quanto ao tempo de resposta do sensor MICS-6814. Instante de tempo 675 corresponde a abertura da porta da sala



Como trabalho futuro, sugere-se a captura da concentração do agente amônia na sala

durante o teste utilizando um sensor de referencia ou método analítico laboratorial, por exemplo: espectrometria de massa, para validar os resultados obtidos do sensor calibrado. A verificação e validação dos resultados obtidos no processo de calibração da amônia não foi realizada devido a fatores fora do controle dos autores deste trabalho.

Tabela 6 – Resultados de validação para a calibração do gás amônia quanto ao tempo de resposta do sensor

Teste	Tempo de resposta do sensor
1	30 segundos
2	43 segundos
3	37 segundos
4	35 segundos

### 5.1.1 Resultado para os testes de sensibilidade cruzada com o etanol

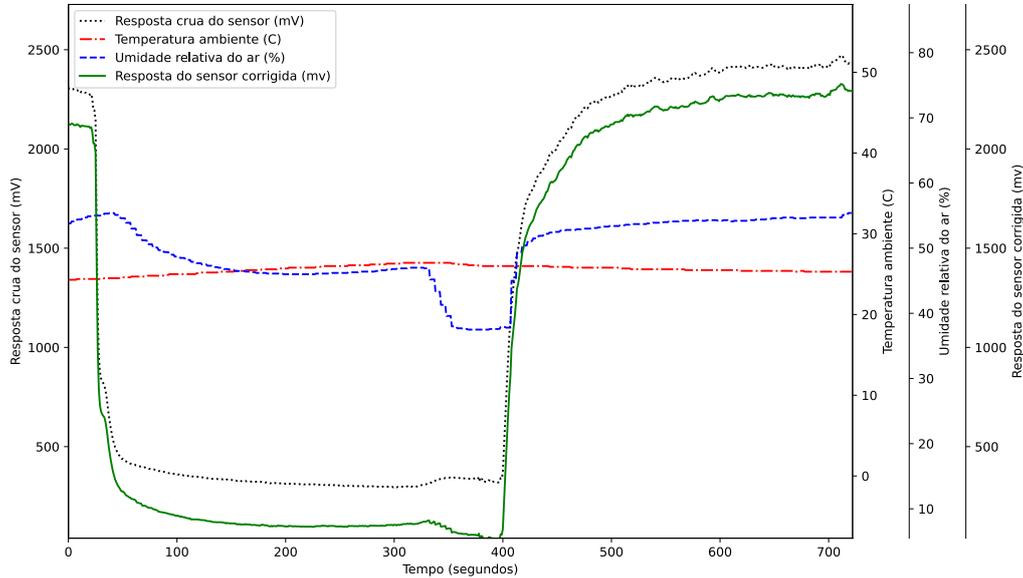
Como pode ser observado na [Figura 24](#), a curva de resposta para o sensor quanto a presença do agente etanol foi similar a curva de resposta para o agente amônia, fato que condiz com as informações do fabricante ([SGX SENSORTECH, 2015](#)). Devido ao ambiente estar saturado de etanol a resposta do sensor foi próxima a zero em alguns momentos. No instante de tempo 350, introduz-se a câmara fechada de vidro o ar sintético. Como o ambiente dentro da câmara está saturado com etanol e considerando o tempo necessário para realizar a remoção do ar saturado de etanol ser muito grande, os sensores foram removidos da câmara fechada de vidro no instante 400 para averiguar se a resposta voltaria ao valores nominais. Essa ação faz com que a resposta do sensor volte a subir. A sensibilidade cruzada ao etanol do sensor a NH<sub>3</sub> do MICS-6814 pode ser um problema considerando aplicações em ambientes industriais onde a medição/detecção isolada do agente amônia é necessária. A correção da sensibilidade cruzada pode ser realizada utilizando o sensor RED do MICS-6814, porém, esta requer a calibração dos demais agentes que geram sensibilidade cruzada no sensor RED.

## 5.2 Resultados de transmissão de dados do Bluetooth

Na [Figura 25](#) é possível observar a tela do aplicativo *BLE Scanner* conectado ao sensor com e sem notificações habilitadas. O uso de notificações ao invés de um esquema de leitura ativa periódica permite ao receptor dos dados apenas receber notificações quando o valor do dado lido muda pelo sensor, este então notifica o dispositivo leitor que o dado mudou. Os resultados para a distância máxima média de alcance do sensor, quando o sensor permanece em um ambiente fechado, foi de aproximadamente 10 metros. Tendo em vista a aplicação do sensor em ambientes industriais, o mesmo pode ser lido a uma distância segura de um ambiente contendo um possível vazamento de um agente de interesse.

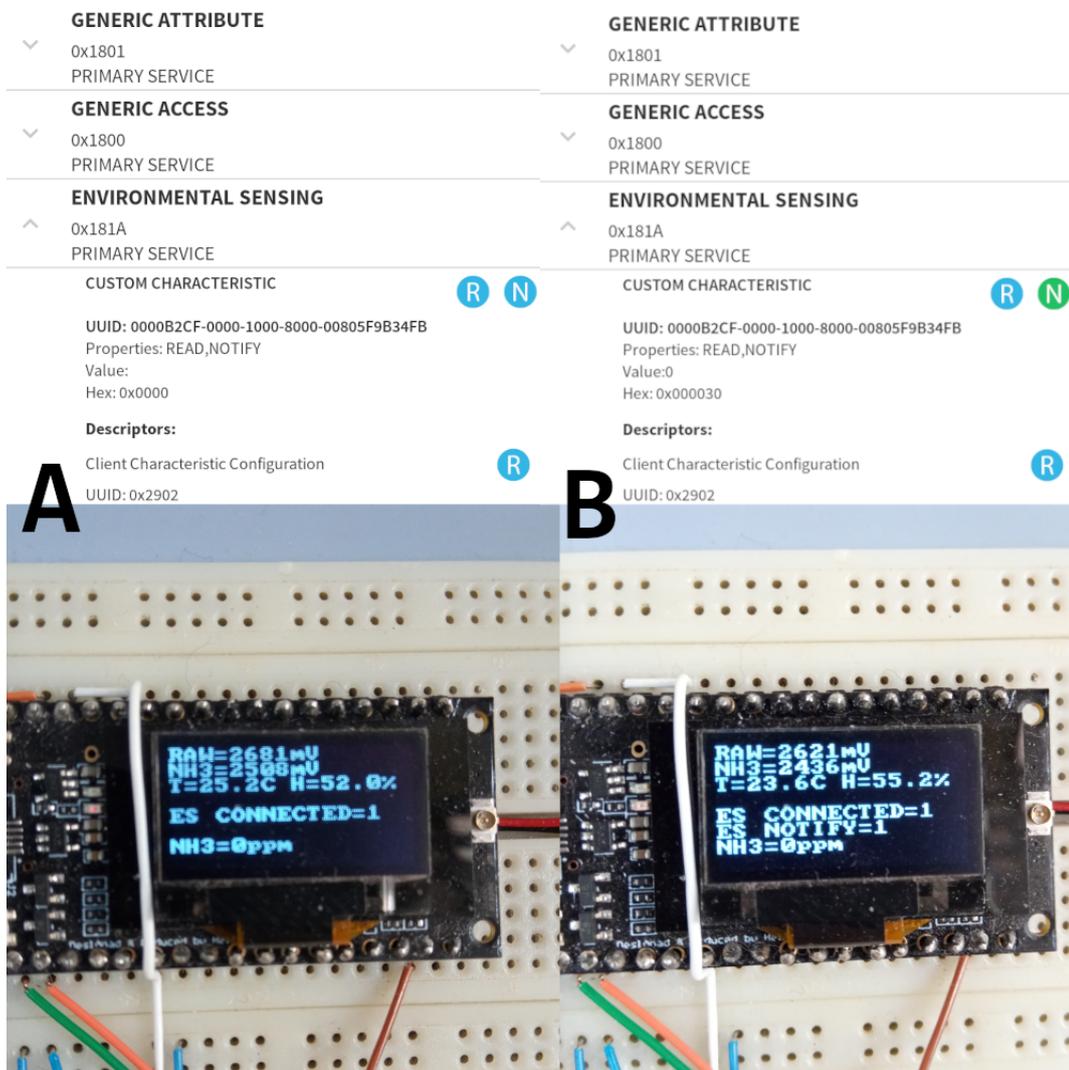
Também na [Figura 25](#) pode-se observar o *display* de dados do sistema embarcado, são mostrados informações da leitura crua do sensor; leitura corrigida levando em consideração a

Figura 24 – Resposta do sensor perante a presença do agente etanol. No instante de tempo 50 o papel de filtro quantitativo umedecido com etanol é inserido na câmara fechada; no instante de tempo 400, remove-se os sensores da câmara fechada de vidro.



temperatura e umidade relativa do ar; valores atuais de temperatura e umidade relativa do ar; número de dispositivos *Bluetooth* conectados; número de dispositivos notificados e concentração em ppm de amônia no ambiente.

Figura 25 – Na figura: (A) Tela do aplicativo *BLE Scanner* conectado ao sensor, abaixo no *display* do sensor é possível observar a que um dispositivo ES esta conectado. (B) Tela do aplicativo *BLE Scanner* conectado ao sensor com notificações habilitadas, abaixo no *display* é possível observar que um dispositivo ES esta conectado e recebendo notificações



# 6

## Conclusão e Trabalhos futuros

Neste trabalho, foi aplicado um conjunto procedimentos em laboratório, permitindo a calibração para o sensor MICS-6814, tanto para correção dos fatores temperatura ambiente e umidade relativa do ar, quanto para a presença do gás amônia na resposta do sensor. Para os testes realizados visando a simulação de um vazamento em um ambiente fechado, o tempo médio de resposta do sensor foi de  $38.33 \pm 4,16$  segundos, sendo capaz de detectar a presença de amônia no ambiente em todos os casos de teste.

A metodologia adotada para a correção da influência da variação da temperatura ambiente e umidade relativa do ar baseada na regressão linear múltipla da temperatura e umidade com variável dependente resposta do sensor, permite a correção com relativa precisão da influência destes fatores na resposta do sensor. O erro médio obtido para resposta do sensor quanto a correção da influência da temperatura e umidade foi de  $77.3851mV$  quando comparado ao valor ideal de  $R_0 = 2423.2836mV$  esperado. Considerando os recursos disponíveis para a calibração do sensor, julga-se que a calibração da correção a influência da temperatura ambiente e umidade relativa do ar é satisfatória perante o método adotado.

O sistema implementado possibilita a leitura do sensor de forma remota por meio do protocolo *Bluetooth*. O padrão *environmental sensing* permite que qualquer dispositivo *Bluetooth* que implemente o padrão possa realizar a leitura do sensor através de mecanismos de leitura periódica ou por meio de notificações. A implementação do sistema utilizando tarefas no FreeRTOS garante a periodicidade de leitura do sensor e opera em tempo-real. Os testes realizados indicam que o sensor pode ser usado para detectar possíveis vazamento de amônia em um ambiente fechado de forma remota e segura.

Trabalho futuros incluem a validação laboratorial da calibração da curva de resposta do sensor utilizando um espectrômetro de massa para quantificação da concentração real da amônia comparada com a concentração obtida através da leitura do sensor calibrado. Calibração do sensor RED para eliminação de influência de gases cruzados na resposta do sensor NH<sub>3</sub>.

Uma vez validados os resultados da calibração da amônia, o sensor será capaz de gerar dados de concentração em valores absolutos para a concentração em partes por milhão do gás amônia. Prevê-se também a integração do protocolo de comunicação LoRa para comunicação de longa distância e integração de uma *mesh Bluetooth* para comunicação de curta distância de vários sensores ambientais. Também, prevê-se teste de calibração colaborativa para diversos sensores MICS-6814, onde o sensor calibrado possa servir de referência para a calibração de demais sensores em proximidade por meio de comunicação *mesh Bluetooth*.

# Referências

- ALI, S. et al. Low Cost Sensor With IoT LoRaWAN Connectivity and Machine Learning-Based Calibration for Air Pollution Monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 70, p. 1–11, 2021. ISSN 1557-9662. Citado 3 vezes nas páginas 13, 17 e 21.
- AOSONG. *Temperature and humidity module AM2303 Product Manual*. Guangzhou, China, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- BARAKEH, Z. A. et al. Development of a normalized multi-sensors system for low cost on-line atmospheric pollution detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 241, p. 1235–1243, 2017. ISSN 0925-4005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092540051631632X>>. Citado na página 21.
- BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP. *Environmental Sensing Profile*. [S.l.], 2014. Citado na página 24.
- BLUETOOTH SPECIAL INTEREST GROUP. *Environmental Sensing Service*. [S.l.], 2014. Citado na página 24.
- BRIENZA, S. et al. A Low-Cost Sensing System for Cooperative Air Quality Monitoring in Urban Areas. *Sensors*, v. 15, n. 6, p. 12242–12259, 2015. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/15/6/12242>>. Citado na página 22.
- ELIASSON, J.; LINDGREN, P.; DELSING, J. A Bluetooth-based Sensor Node for Low-Power Ad Hoc Networks. *Journal of Computers*, v. 3, Maio 2008. Citado na página 22.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *Analog to Digital Converter (ADC)*. Shanghai, China, 2022. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>>. Acesso em: 14 mar 2022. Citado na página 27.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Bluetooth Architecture*. Shanghai, China, 2022. Citado na página 27.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series Datasheet*. Shanghai, China, 2022. Citado na página 23.
- ESPRESSIF SYSTEMS. *FreeRTOS*. Shanghai, China, 2022. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html>>. Acesso em: 14 mar 2022. Citado na página 27.
- LINDH, J. *Bluetooth® low energy Beacons*. Dallas, Texas, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- MAAG, B.; ZHOU, Z.; THIELE, L. A Survey on Sensor Calibration in Air Pollution Monitoring Deployments. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 6, p. 4857–4870, Dezembro 2018. ISSN 2327-4662. Citado 5 vezes nas páginas 14, 18, 19, 20 e 21.
- MACKENSEN, E.; LAI, M.; WENDT, T. M. Bluetooth Low Energy (BLE) based wireless sensors. In: *SENSORS, 2012 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–4. ISSN 1930-0395. Citado na página 22.

- MASSON, N.; PIEDRAHITA, R.; HANNIGAN, M. Approach for quantification of metal oxide type semiconductor gas sensors used for ambient air quality monitoring. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 208, p. 339–345, 2015. ISSN 0925-4005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400514014026>>. Citado 5 vezes nas páginas 14, 18, 20, 25 e 28.
- MEIXNER, H.; LAMPE, U. Metal oxide sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 33, n. 1, p. 198–202, 1996. ISSN 0925-4005. Eurosenors IX. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0925400596800980>>. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 18.
- MOIS, G. D. et al. Performance Evaluation of Energy-Autonomous Sensors Using Power-Harvesting Beacons for Environmental Monitoring in Internet of Things (IoT). *Sensors*, v. 18, n. 6, 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/6/1709>>. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.
- RAI, A. C. et al. End-user perspective of low-cost sensors for outdoor air pollution monitoring. *Science of The Total Environment*, v. 607-608, p. 691–705, 2017. ISSN 0048-9697. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717316935>>. Citado na página 17.
- SGX SENSORTECH. *MICS-6814 1143 rev 8*. Corcelles-Cormondrèche, Switzerland, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 14, 25, 48 e 51.
- WANG, C. et al. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. *Sensors*, v. 10, n. 3, p. 2088–2106, 2010. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/10/3/2088>>. Citado 5 vezes nas páginas 14, 17, 18, 19 e 25.
- ZIMMERMAN, N. et al. A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 11, n. 1, p. 291–313, 2018. Disponível em: <<https://amt.copernicus.org/articles/11/291/2018/>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.

# **Anexos**

# ANEXO A – Códigos

Código 9 – Código da *header* da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor MICS-6814

```

1 #ifndef MICS6814_H
2 #define MICS6814_H
3
4 #include <stdint.h>
5
6 #define MICS6814_ADC ADC_UNIT_1
7 #define MICS6814_ADC_CHANNEL ADC1_CHANNEL_0
8 #define MICS6814_ADC_VREF 1106 // read using adc2_vref_to_gpio
9 #define MICS6814_SAMPLE_SIZE 16 // 2^n
10 #define MICS6814_SAMPLE 4 // log2(MICS6814_SAMPLE_SIZE)
11 #define MICS6814_WARMUP_TIME ((60 * 60)) // 1 hour
12 #define MICS6814_WARMUP 0x80000000 // sensor warm-up
13 #define MICS6814_BETAS 3
14 #define MICS6814_LSTSQ 3
15
16 #define MICS6814_ALLOC_BETAS(args...) do{ \
17     mics6814_calibration_betas = malloc(sizeof(float) * MICS6814_BETAS); \
18     if (mics6814_calibration_betas == NULL) ESP_LOGE(TAG, \
19         "Fail to allocate memory for calibration coefficients"); \
20     mics6814_initi_calibration(mics6814_calibration_betas, ##args); \
21 } while(0);
22
23 #define MICS6814_ALLOC_LSTSQ(args...) do{ \
24     mics6814_calibration_lstsq = malloc(sizeof(float) * MICS6814_LSTSQ); \
25     if (mics6814_calibration_lstsq == NULL) ESP_LOGE(TAG, \
26         "Fail to allocate memory for least squares coefficients"); \
27     mics6814_initi_calibration(mics6814_calibration_lstsq, ##args); \
28 } while(0);
29
30 extern volatile bool mics6814_skip_warmup;
31 extern float *mics6814_calibration_betas;
32 extern float *mics6814_calibration_lstsq;
33
34 static __attribute__((unused))
35 void mics6814_initi_calibration(float *calibration_vector, ...){
36     va_list args;
37     va_start(args, calibration_vector);
38     for (uint8_t i = 0; i < MICS6814_BETAS; i++)
39         calibration_vector[i] = va_arg(args, double);
40     va_end(args);
41 }
42
43 void mics6814_init();
44 uint32_t mics6814_read_voltage();
45 float mics6814_vraw_to_vreg(const uint32_t *, const int16_t *, const
46     int16_t *);
47 float mics6814_to_ppm(const uint32_t*, const int16_t*, const int16_t*);
48 #endif

```

## Código 10 – Código da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor MICS-6814

```
1 static const char *TAG = "mics6814";
2
3 #include <esp_adc_cal.h>
4 #include <esp_log.h>
5 #include <esp_rom_sys.h>
6 #include <freertos/FreeRTOS.h>
7 #include <freertos/task.h>
8 #include <stdint.h>
9 #include <time.h>
10
11 #include "mics6814.h"
12
13 static esp_adc_cal_characteristics_t mics6814_adc_characteristics;
14
15 static inline __attribute__((always_inline))
16 void mics6814_init_adc(){
17     // adc2_vref_to_gpio((gpio_num_t)25); // set to read VREF
18
19     adc1_config_width(ADC_WIDTH_12Bit);
20     adc1_config_channel_atten(MICS6814_ADC_CHANNEL, ADC_ATTEN_11db);
21
22     esp_adc_cal_value_t mode =
23         esp_adc_cal_characterize(MICS6814_ADC, ADC_ATTEN_DB_11,
24     ADC_WIDTH_BIT_12,
25                                     MICS6814_ADC_VREF, &
26     mics6814_adc_characteristics);
27
28     switch (mode){
29         case ESP_ADC_CAL_VAL_EFUSE_VREF:
30             ESP_LOGI(TAG, "ADC eFuse Vref used for characterization");
31             break;
32         case ESP_ADC_CAL_VAL_EFUSE_TP:
33             ESP_LOGI(TAG, "ADC Two Point value used for characterization");
34             break;
35         case ESP_ADC_CAL_VAL_DEFAULT_VREF:
36             ESP_LOGI(TAG, "ADC Default Vref used for characterization");
37             break;
38         default:
39             break;
40     }
41 }
42
43 inline __attribute__((always_inline))
44 void mics6814_init(){
45     mics6814_init_adc();
46
47     if (mics6814_calibration_betas == NULL) ESP_LOGE(TAG, "Fail to set
48     calibration betas");
49
50     ESP_LOGI(TAG, "Sensor started");
51 }
```

```

50 uint32_t mics6814_read_voltage(){
51     uint32_t ret = 0;
52     // NOTE: the voltage should never get this high, so doing this *should*
53     // be fine
54     if (!mics6814_skip_warmup && (time(NULL) <= (time_t)
55     MICS6814_WARMUP_TIME)) return 0x80000000;
56
57     for (uint8_t i = 0; i < MICS6814_SAMPLE_SIZE; i++)
58         ret += adc1_get_raw((adc_channel_t)MICS6814_ADC_CHANNEL);
59
60     return esp_adc_cal_raw_to_voltage((ret >> MICS6814_SAMPLE) & 0xFFF, &
61     mics6814_adc_characteristics);
62 }
63
64 inline __attribute__((always_inline))
65 float mics6814_vraw_to_vreg(const uint32_t *vraw, const int16_t *temp,
66     const int16_t *humd){
67     return (float)*vraw - (mics6814_calibration_betas[0]
68     + (mics6814_calibration_betas[1] * (*temp) / 10.0)
69     + (mics6814_calibration_betas[2] * (*humd) / 10.0));
70 }
71
72 inline __attribute__((always_inline))
73 float mics6814_to_ppm(const uint32_t *vraw, const int16_t *temp, const
74     int16_t *humd){
75     float vreg = mics6814_vraw_to_vreg(vraw, temp, humd);
76     return (mics6814_calibration_lstsq[0] * mics6814_calibration_lstsq[0] *
77     vreg)
78     + (mics6814_calibration_lstsq[1] * vreg)
79     + mics6814_calibration_lstsq[2];
80 }

```

Código 11 – Código da *header* da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor AM2302

```

1 #ifndef AM2302_H
2 #define AM2302_H
3
4 #include <stdint.h>
5 #include <esp_err.h>
6
7 #define AM2302_GPIO_PIN_SEL ((1ULL << CONFIG_AM2302_GPIO_PIN))
8
9 // NOTE: am2302_init needs to run on the same core as dht_read
10 void am2302_init();
11 esp_err_t am2302_read(int16_t *t, int16_t *v);
12
13 #endif

```

## Código 12 – Código da biblioteca desenvolvida para a leitura do sensor AM2302

```
1 static const char *TAG = "am2302";
2
3 #include "am2302.h"
4
5 #include <driver/gpio.h>
6 #include <driver/rmt.h>
7 #include <esp_err.h>
8 #include <esp_log.h>
9 #include <stdint.h>
10 #include <stdlib.h>
11
12 static RingbufHandle_t ringbuf_handle = NULL;
13
14 inline __attribute__((always_inline))
15 void am2302_init(void){
16     rmt_config_t rmt_rx_config = {
17         .rmt_mode      = RMT_MODE_RX,
18         .channel       = CONFIG_AM2302_RMT_CHANNEL,
19         .gpio_num      = CONFIG_AM2302_GPIO_PIN,
20         .clk_div       = 80,
21         .mem_block_num = 1, // mem_block is 512 * uint32_t
22         .rx_config = {
23             .idle_threshold      = 100,
24             .filter_ticks_thresh = 160,
25             .filter_en           = 1
26         }
27     };
28
29     ESP_ERROR_CHECK(rmt_config(&rmt_rx_config));
30     ESP_ERROR_CHECK(rmt_driver_install(CONFIG_AM2302_RMT_CHANNEL, 1024, 0))
31     ;
32     gpio_config_t gpio = {
33         .intr_type      = GPIO_INTR_DISABLE,
34         .pin_bit_mask   = AM2302_GPIO_PIN_SEL,
35         .mode           = GPIO_MODE_INPUT_OUTPUT_OD,
36         .pull_up_en     = true
37     };
38     ESP_ERROR_CHECK(gpio_config(&gpio));
39     ESP_ERROR_CHECK(rmt_get_ringbuf_handle(CONFIG_AM2302_RMT_CHANNEL, &
40     ringbuf_handle));
41 }
42
43 static inline __attribute__((always_inline))
44 esp_err_t am2302_check_checksum(const uint64_t bits){
45     uint8_t sum = 0x00;
46     for (uint8_t i = 1; i < 5; i++)
47         sum += 0xFF & (bits >> (i << 3));
48
49     return sum == (uint8_t)(bits & 0xFF) ? ESP_OK : ESP_ERR_INVALID_CRC;
50 }
51
52 static inline __attribute__((always_inline))
53 esp_err_t am2302_parse(
54     const rmt_item32_t *restrict items,
55     int16_t *t,
```

```

54     int16_t *h){
55
56     uint64_t bits = 0x0;
57
58     for (ssize_t i = 39; i >= 0; i--){
59         bits |= ((abs((uint16_t)items->duration1 - 70) <= 5) ? 1ULL : 0ULL)
60         << i;
61         items++;
62     }
63     esp_err_t checksum_result = am2302_check_checksum(bits);
64
65     if (checksum_result != ESP_OK){
66         ESP_LOGE(TAG, "checksum fail");
67         return checksum_result;
68     }
69     *h = (0xFFFF) & bits >> 24;
70     *t = (0xFFFF) & bits >> 8;
71
72     return checksum_result;
73 }
74 esp_err_t am2302_read(int16_t *t, int16_t *h){
75     esp_err_t err;
76
77     size_t len_items = 0;
78
79     gpio_set_level(CONFIG_AM2302_GPIO_PIN, 0);
80     rmt_rx_start(CONFIG_AM2302_RMT_CHANNEL, true);
81     ets_delay_us(800);
82     gpio_set_level(CONFIG_AM2302_GPIO_PIN, 1);
83
84     rmt_item32_t *items = (rmt_item32_t *)xRingbufferReceive(ringbuf_handle
85     , &len_items, 4);
86
87     rmt_rx_stop(CONFIG_AM2302_RMT_CHANNEL);
88
89     len_items /= 4;
90
91     if (len_items < 42 || len_items > 42){
92         err = ESP_ERR_INVALID_SIZE;
93         ESP_LOGE(TAG, "could not read sensor data");
94         goto end;
95     }
96
97     if (items == NULL){
98         err = ESP_ERR_INVALID_RESPONSE;
99         ESP_LOGE(TAG, "could not read sensor");
100        goto end;
101    }
102    err = am2302_parse((void *) (items + 1) + sizeof(uint16_t), t, h);
103 end:
104    vRingbufferReturnItem(ringbuf_handle, (void *)items);
105
106    return err;
107 }

```

## ANEXO B – Figuras

Figura 26 – Sala utilizada para os testes de validação da calibração para a amônia



Figura 27 – Fonte de amônia (hidróxido de amônio) e béquer utilizados para o teste de validação da calibração da amônia

