

Medição de CO₂ utilizando a tecnologia de infravermelho não dispersivo (NDIR)

CO₂ measurement using non-dispersive infrared (NDIR) technology

Iago da Silva Fachneli,^{*} Nilton Alves Jr.,[†] David Vaz Teixeira,[‡] and Alan Franco Rosa[§]

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - Laboratório de Instrumentação, Informação e IoT (Lab3I)

Rua Xavier Sigaud, n. 150. Urca, Rio de Janeiro - RJ. CEP: 22290-180

Submetido: 18/08/2022 Aceito: 6/2/2023

Resumo: No contexto atual, a indústria apresenta um acréscimo de equipamentos ligados em rede que coletam dados constantemente e são utilizados para analisar atividades e ajudar na tomada de decisões futuras. Com base na espectrofotometria foi possível criar sensores que podem medir a concentração de gases de acordo com a absorção que esse gás sofre de um determinado comprimento de onda de luz. Neste trabalho é apresentado a teoria física desse princípio de medição, detalhes do sensor e uma aplicação desse tipo de tecnologia para medição de concentração de CO₂ em gás, na expulsão de CO₂ de tanques de cerveja.

Palavras chave: IoT, indústria, CO₂, espectrofotometria, NDIR.

Abstract: In the present context, industry features an increase in networked equipment that constantly collects data and is used to analyze activities and assist in future decisions making. Based on spectrophotometry it was possible to create sensors that can measure the concentration of gases according to the absorption that this gas suffers from a certain wavelength of light. In this paper the physical theory of this measurement principle, details of the sensor, and an application of this type of technology for measuring CO₂ concentration in gas, for expulsion of CO₂ from beer tanks, is presented.

Keywords: IoT, industry, CO₂, spectrophotometry, NDIR .

I. INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos gases mais estudados atualmente, principalmente quanto ao tema de mudanças climáticas, justamente por sua propriedade de absorção de radiação infravermelha [1]. No ambiente industrial o CO₂ é um dos gases mais utilizados na gaseificação das bebidas, pressurização de tanques, entre outros.

As aplicações envolvendo a medição de concentração de CO₂ vem da pesquisa básica sobre a interação da luz com a estrutura atômica. Niels Bohr adotando as ideias de Max Planck sobre energias quantizadas, desenvolveu quatro postulados sobre o tema. Em um desses postulados Bohr definiu que a energia é emitida ou absorvida por um elétron quando ele passa de um estado de energia permitido para outro. Essa

energia é emitida ou absorvida como fóton. Em um átomo um elétron só pode ter certos valores de energia, chamados de níveis de energia. Um elétron deve absorver energia para que ele passe para um estado de mais alta energia [2].

A lei de Lambert-Beer enuncia que em se tratando de caminho óptico constante, à medida que a concentração em análise da amostra aumenta aritmeticamente, a amostra irá absorver a luz monocromática linearmente. Assim, pode-se determinar a concentração de uma espécie em solução medindo a absorbância [3].

Gases como o CO₂ apresentam a propriedade de absorver ou emitir radiação quando sujeito à recepção de luz na faixa de comprimentos de onda do infravermelho [1]. Na Figura 1 é possível observar o espectro de absorção de diversos gases onde a caracterização do elemento está relacionada com o comprimento de onda e a intensidade da radiação luminosa absorvida. Para melhorar a aferição do sensor e evitar interferências de outras substâncias, como no caso do CO₂ e N₂O, há um filtro passa-banda que permite a passagem de frequências que são relacionadas à frequência de melhor absorção do CO₂ e rejeita a passagem de frequências fora dessa faixa.

^{*} iagofachneli@hotmail.com

[†] naj@cbpf.br

[‡] davidvaz@cbpf.br

[§] alanfr@cbpf.br

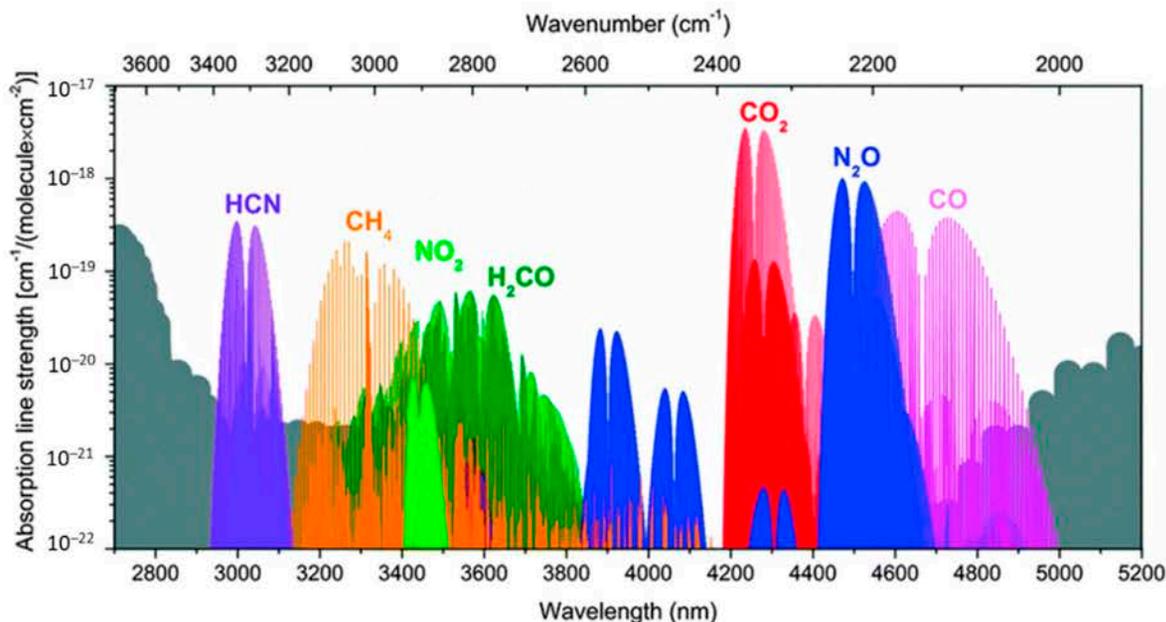


Figura 1: Espectro de absorção de vários gases pelo comprimento de onda [4].

O presente trabalho apresenta os detalhes sobre o funcionamento do sensor de concentração de CO_2 em seu processo teórico e experimental de obtenção dos valores de concentração utilizando sensores de infravermelho não dispersivo (*Non-Dispersive Infrared* – NDIR) e quais estudos fundamentaram essa tecnologia. Esse tipo de sensor foi utilizado no projeto para que seja feita a medição de concentração de CO_2 em tanques de uma cervejaria. No processo de assepsia dos tanques utilizando soda cáustica, é necessário retirar todo o CO_2 presente nos tanques para que não haja implosão dos tanques por reações químicas e também a diminuição do poder de limpeza da soda cáustica, assim utiliza-se ar atmosférico esterilizado para expulsar o CO_2 dos tanques. Então, utiliza-se o sensor NDIR para medir a concentração de CO_2 presente no ar de saída até que a concentração diminua a valores considerados seguros para a assepsia. Com base nessa informação, é possível entender que o tanque está com alta concentração de CO_2 e com a injeção de ar atmosférico esterilizado essa concentração tende a cair pelo tempo de expulsão. O projeto visa entender qual é a concentração de CO_2 presente no tanque e que é segura para finalizar a expulsão e assim avaliar o tempo de expulsão, se é possível diminuir esse tempo, visto que é uma atividade realizada de maneira automática com tempo pré definido. Se o tempo de expulsão diminuir, os compressores de ar serão utilizados por menos tempo, diminuindo de forma significativa o gasto de energia elétrica.

Para medir a concentração de CO_2 em um ambiente industrial, em tanques, em uma tubulação ou mesmo em uma área fechada, há vários fatores que influenciam na escolha do sensor, dos quais é possível destacar: a precisão necessária na medida e concentração do gás em análise. Para a atividade em estudo, o sensor de concentração de CO_2 que utiliza a tecnologia NDIR foi o escolhido para ser utilizado. Sensores com esse tipo de tecnologia são utilizados em diversos ambientes industriais para análise de gases por absorção de

luz, eles podem ser uma boa escolha para utilização em alguns ambientes industriais, pois, são sensores de baixo custo (considerando pequenos projetos e em uma escala mais educacional) e são utilizados em atividades que não precisam de alta precisão (apresentam uma boa acurácia para a atividade realizada, o que já é suficiente), sendo empregados no monitoramento de processos, não sendo um sensor utilizado em caráter laboratorial com alta precisão e boa acurácia.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Espectrofotometria

A técnica de espectrofotometria é utilizada para determinar a concentração de espécies químicas absorvedoras em solução, levando em consideração a interação da luz com a matéria [5].

A espectrofotometria óptica estuda a relação entre a radiação eletromagnética emitida por uma fonte de luz e a quantidade que é absorvida pela substância a qual essa radiação atravessa (absorbância) [6]. Então, a base da espectrofotometria é utilizar um feixe de luz para atravessar a amostra e medir a intensidade da luz que atinge o detector. Quando a radiação eletromagnética atinge uma substância, parte de sua energia pode ser absorvida dependendo da estrutura e propriedades de átomos e moléculas, promovendo a sua excitação. Isso mostra que algumas frequências de radiação podem ser seletivamente absorvidas pela amostra, de modo que apenas um feixe de radiação de menor intensidade que o feixe incidente é transmitido pela amostra [5].

Outro fator que deve ser observado é em relação a essa transmitância da amostra. A cor das substâncias se deve à absorção de certos comprimentos de ondas da luz que incide sobre elas, deixando transmitir aos nossos olhos apenas

aqueles comprimentos de ondas não absorvidos [6], ou seja, a transmitância é a parte da energia luminosa que atravessa a amostra sem ser absorvida, que seria o que o detector recebe de resposta da amostra para ser analisado.

O sensor utilizado vai então comparar quantitativamente a fração de luz que atravessou a amostra com a intensidade de luz de referência [7]. O método utilizado no sensor em estudo é baseado na absorção de energia na faixa do infravermelho. Os espectros de absorção e emissão das substâncias podem ser obtidos em uma ampla faixa de comprimentos de onda, sendo mais utilizadas as regiões do infravermelho (como no sensor NDIR), entre $0,9 \mu\text{m}$ a $25 \mu\text{m}$, e do ultravioleta visível (UV-Vis), de 250 nm a 800 nm [8][9]. Quando o comprimento de onda da radiação do infravermelho corresponde às frequências ou ressonâncias naturais das moléculas, elas sofrem excitação.

No espectro de absorção da substância, a posição da banda de absorção mais intensa da substância corresponde ao comprimento de onda da radiação cuja energia é igual à necessária para que ocorra a transição eletrônica, mudando o estado de energia da substância. Já a intensidade em que a substância absorve essa energia depende de dois fatores: a probabilidade de interação entre a energia radiante incidente e o sistema eletrônico da substância, de modo a permitir a passagem de elétrons do estado fundamental a um estado excitado e a mudança de polaridade do estado excitado da molécula [7].

Na Figura 1 pode ser visto um gráfico de comprimento de onda *versus* intensidade de absorção, chamado de espectro de absorção, que mostra diversas substâncias e uma ampla faixa de comprimentos de onda que essas substâncias sofrem ressonância e suas intensidades de absorção.

As moléculas para terem condições de serem excitadas devem formar um dipolo, pois os átomos são arranjados assimetricamente ou em modos de vibração assimétricos. Em moléculas simétricas, o infravermelho não consegue excitar as moléculas, pois suas estruturas não desenvolvem dipolo. No caso do CO_2 , a molécula é simétrica mas os modos de vibração podem ser simétricos ou assimétricos assim que absorve o infravermelho, formando dipolos [10], que será detalhado na seção 2.3. Absorção de radiação infravermelha pelo CO_2 .

B. Lei de Lambert-Beer

A lei de Lambert - Beer (também designada por lei de Lambert - Beer - Bouguer), é uma relação empírica na óptica que associa a absorção de radiação eletromagnética com as propriedades dos gases presentes no ambiente de medição para resultar em sua concentração. Essa lei utiliza a transmitância da substância em estudo, que é a razão entre a intensidade de luz após absorção pela intensidade de luz sem absorção, conforme a Equação 1, para relacionar com a absorbância. As intensidades luminosas podem ser dadas em candela (cd).

$$T = \frac{\phi}{\phi_0} \quad (1)$$

Onde:

T : transmitância, é adimensional ou em porcentagem se multiplicado o resultado por 100;

ϕ : intensidade de luz após a absorção de CO_2 , em cd;

ϕ_0 : intensidade de luz sem absorção, em cd.

A absorbância é proporcional à concentração da espécie química absorvente, sendo constantes o comprimento de onda, a espessura atravessada pelo feixe luminoso e demais fatores. Por meio dessa lei, intensidades da radiação incidente e emergente podem ser relacionadas com as concentrações do material presente na solução [6].

O coeficiente de absorvidade (ou extinção) molar é a capacidade em que o gás tem de absorver a radiação incidente sobre ele em uma determinada frequência, sendo então uma propriedade dos átomos do gás. Então, esse valor depende da frequência de radiação eletromagnética que será usada na medição, no caso em estudo, essa luz será o infravermelho [3].

Na Figura 2, há um bloco de material absorvente de luz com seção transversal S e de largura a e comprimento b . O volume deste material possui um total de n átomos, íons ou moléculas absorvedoras. Sobre este volume incide uma quantidade de luz I_0 e sai I . Fazendo uma minimização, na Figura 2, na parte hachurada S , o comprimento pode ser definido como dx e existem dn espécies absorvedoras (átomos, íons ou moléculas) nessa área. Para cada partícula há uma seção de choque na qual ocorrerá a absorção de fótons [7].

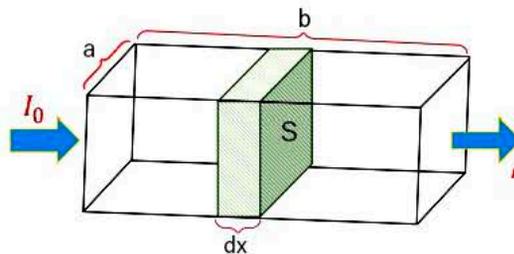


Figura 2: Esquema de luz incidente sobre uma amostra absorvedora de Seção S , com comprimento dx e contendo na área hachurada dn átomos, íons ou moléculas absorvedoras (adaptado) [7]

Em posse dessas afirmações, conclui-se que a concentração de um soluto em uma solução é diretamente proporcional à absorbância medida pelo sensor e a Equação 2 demonstra o exposto.

$$A = -\log \frac{\phi}{\phi_0} = \epsilon \times c \times l \quad (2)$$

Onde:

A : absorbância da solução em um dado comprimento de onda, adimensional;

ϕ : intensidade de luz após a absorção de CO_2 , em cd;

ϕ_0 : intensidade de luz sem absorção, em cd;

ϵ : coeficiente de absorvidade (ou extinção) molar, em $\text{L}/(\text{mol} \times \text{cm})$;

c : concentração da espécie absorvedora, em mol/L ;

l : comprimento da câmara de amostra do gás ou caminho óptico, em cm.

A absorvidade molar, ϵ , depende da substância, do comprimento de onda utilizado, da temperatura e do solvente. Para uma mesma espessura do absorvedor (caminho óptico), quanto maior o valor de ϵ maior será a taxa de absorção observada e mais sensível é o método espectrofotométrico. É por esse motivo que, idealmente, procura-se trabalhar com uma radiação monocromática, sempre que possível, para que se consiga o máximo de absorção da espécie a ser determinada [3].

Assim, a Lei de Lambert - Beer pode ser representada na Figura 3 e na Figura 4, que mostram os gráficos característicos de amostras em que podem ser aplicadas essa lei. A Figura 3 mostra o gráfico de absorbância *versus* concentração, que como pode ser visto tem uma relação linear. Aumentando-se a concentração, conseqüentemente a absorção será maior. Isso mostra que, mantendo-se o caminho óptico constante, pode-se determinar a concentração de uma espécie em solução através da medida de absorbância [3]. A Figura 4 mostra o gráfico de transmitância (em porcentagem) *versus* concentração, que mostra que quanto menor a concentração da amostra, maior será a transmissão de luz nela. O sensor utilizado, com base em comandos enviados a ele pelo algoritmo, responde com o valor de concentração de CO₂ em ppm (partes por milhão), que não precisa ser convertido para nenhuma outra unidade ou fazer qualquer cálculo, visto que ppm é uma unidade muito utilizada e de fácil entendimento.

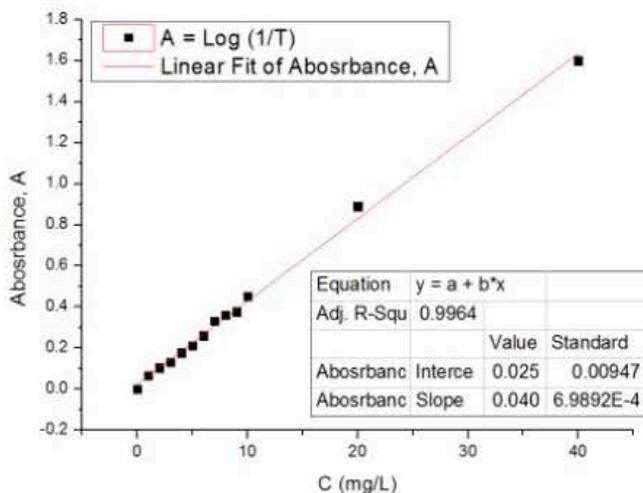


Figura 3: Absorbância característica de uma amostra de KMnO₄ [Absorbância A *versus* concentração em mg/L] [11]

C. Absorção de radiação infravermelha pelo CO₂

Uma molécula de CO₂ é formada por um átomo de carbono e dois átomos de oxigênio. Ambos os átomos de oxigênio estão quimicamente ligados ao átomo de carbono por

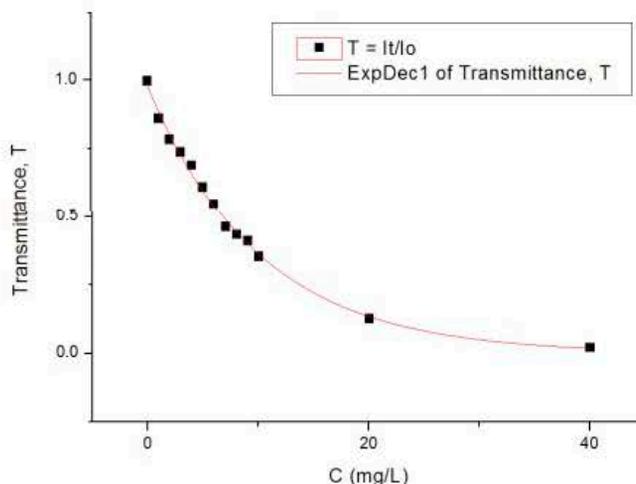


Figura 4: Transmitância característica de uma amostra de KMnO₄ [Transmitância T *versus* concentração em mg/L] [11]

ligações duplas covalentes, cada oxigênio compartilha dois elétrons com o átomo de carbono.

O infravermelho interage com o gás apenas se a radiação encontra um dipolo na molécula. Existem dipolos moleculares se os átomos nas moléculas estiverem dispostos de forma assimétrica ou se formam modos de vibração assimétricos. Existem modos de vibrações que acabam formando os dipolos, como vibrações de alongamento e flexão das moléculas, que formam distorções criando momentos dipolares ou mesmo multipolares [12].

O CO₂ é uma molécula linear triatômica que após interagir com a radiação infravermelha vibra de acordo com quatro diferentes modos. Três deles podem ser vistos na Figura 5, denominados: estiramento simétrico (ν_1) em que cada átomo de oxigênio vai para um lado com comprimento parecido de ambos para o carbono, não interferindo na posição do átomo de carbono; estiramento assimétrico (ν_3) onde um dos átomos de oxigênio da molécula se movimentam mais em relação ao outro ou que haja uma movimentação do átomo de carbono em relação a um dos átomos de oxigênio causando um desequilíbrio na molécula e dois modos de deformação angular, em que o modo de deformação angular (ν_2) apresenta duas orientações possíveis: a vibração no plano e a vibração para fora do plano [1].

A molécula de CO₂ só irá absorver a radiação infravermelha se durante a vibração ocorrer mudanças no momento de dipolo da molécula. Dos três modos de vibração da molécula apresentados na Figura 5, somente nos modos de vibração de estiramento assimétrico (em comprimento de onda de 4,2 μm) e de deformação angular (em comprimento de onda de 15 μm), ocorre uma mudança periódica do momento de dipolo da molécula durante a vibração e então possibilita ocorrer a absorção de radiação pela molécula de CO₂. No modo de vibração simétrico (em comprimento de onda de 7,5 μm , com estiramento e compressão simétrica da molécula), o momento de dipolo permanece nulo, pois os átomos de oxigênio mantêm-se simetricamente posicionados em relação ao carbono. Conseqüentemente nesse modo de vibração não há absorção. Para cada modo de vibração

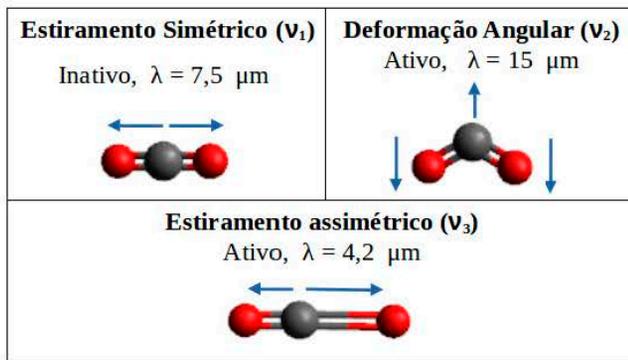


Figura 5: Modos de vibração da molécula de CO_2 , onde em vermelho estão os átomos de oxigênio e em cinza de carbono [1]

ocorre a absorção de radiação de um comprimento de onda particular característico daquela vibração [1]. O modo de estiramento assimétrico absorve a radiação infravermelha com comprimento de onda de $4,2 \mu\text{m}$, enquanto que o modo de deformação angular absorve radiação com comprimento de onda de $15 \mu\text{m}$ [1].

D. Sensor dispersivo ou não dispersivo

Existem dois tipos de sensores de absorção de energia na faixa do infravermelho: dispersivo e não dispersivo. Os sensores dispersivos são utilizados com frequência em laboratórios, pois medem vários gases, são mais precisos e sensíveis a baixas concentrações. Como apresentam diversas características que levam a maior exatidão, eles são mais caros. Os sensores não dispersivos, que é o tipo de sensor em estudo, são mais utilizados em indústrias, como monitores de processos e são mais simples do que os sensores dispersivos. Como já detalhado anteriormente, temos a luz transmitida pela amostra e a luz de entrada na amostra. Nesse tipo de sensor, utiliza-se a luz de entrada em um comprimento de onda diferente do que a amostra absorve para efeito de comparação com a intensidade de luz resultante da absorção da amostra [9].

O sensor não dispersivo é muito utilizado em ambientes mais agressivos química e fisicamente. Por ser um tipo de sensor com custo mais baixo em relação a outros sensores utilizados em indústrias, eles são utilizados nesses ambientes com a consciência de que vão se desgastar mais rápido e por terem um custo-benefício melhor, acaba compensando as trocas quando estragam, visto que podem ser descartados sem um alto custo para novas compras. Levando em conta esses ambientes mais agressivos, se fosse utilizado sensor dispersivo, por mais que tenham maior precisão e maior acurácia, esses sensores são caros e por sofrerem grande degradação, eles teriam um custo alto em consequência das frequentes trocas dos sensores. Só faria sentido em ser utilizado o sensor dispersivo em ambientes de extrema necessidade de uma mais detalhada caracterização dos gases do ambiente em que o sensor está.

Para a maioria das aplicações de campo, há pouca necessi-

dade de fazer espectrometria detalhada dos gases, pois o gás em estudo já tem as características conhecidas. Para medir a concentração, em um caso não muito crítico, pode ser aceito um certo grau de interferência ou sensibilidade no sensor, característica ideal para um sensor NDIR [12].

Em contraste ao sensor dispersivo que pode medir um espectro maior de gases, o sensor NDIR tem como um dos principais recursos a utilização de filtros passa-banda utilizados fisicamente antes dos detectores de infravermelho para permitir a passagem das frequências na qual o gás em análise absorve e rejeitar as frequências na qual o mesmo gás não absorve [12].

1. Escolha do comprimento de onda de detecção

Para se realizar uma análise espectrofotométrica é necessário conhecer o espectro de absorção da amostra que se quer determinar, pois é necessário definir qual o comprimento de onda da radiação incidente que causará o máximo de absorção da amostra que deseja saber a concentração [3].

O comprimento de onda de detecção escolhido não pode apresentar a interferência de outros gases que absorvam na mesma faixa de frequência escolhida.

Conforme a Figura 6, que mostra o espectro de absorção da água com uma luz de infravermelho, há fortes picos de absorção de radiação de infravermelho relativa abaixo de $3 \mu\text{m}$, entre $5 \mu\text{m}$ e $8 \mu\text{m}$ e além de $16 \mu\text{m}$. Qualquer tentativa de detectar linhas espectrais de gás nessas regiões estaria sujeita a forte interferência se a umidade estivesse presente juntamente com o gás alvo [12].

Analisando o espectro de absorção do CO_2 para o infravermelho, conforme a Figura 7, o CO_2 apresenta um grande pico de absorção em que há um intervalo sem interferência de umidade entre $3 \mu\text{m}$ a $5 \mu\text{m}$ e o CO_2 apresenta uma boa faixa de absorção a $4,2 \mu\text{m}$, o que facilita a medição de concentração do gás e evita interferência da absorção de água. Também pela Figura 7, na parte superior, há outro gráfico em que foi detalhado o pico de absorção somente, detalhando uma faixa de $4,2 \mu\text{m}$ a $4,4 \mu\text{m}$ de boa absorção. É justamente nessa faixa de $4,2 \mu\text{m}$ a $4,4 \mu\text{m}$ que ocorre a absorção por vibração de estiramento assimétrico em $4,2 \mu\text{m}$.

Ainda na Figura 7, no gráfico interno, em vermelho é possível visualizar a faixa de funcionamento do filtro passa-banda, em que fora da faixa do filtro os comprimentos de onda são rejeitados e não passam para o detector. O que o filtro passa-banda não rejeita já está fora da faixa de interferência com umidade.

O modelo de lâmpada de infravermelho utilizada no sensor é um fator que impacta na medição da concentração. Por exemplo, as lâmpadas infravermelhas com envoltório de vidro irradiam até $5 \mu\text{m}$, que já é suficiente para a detecção da parte com maior absorção. A detecção de gases além de $8 \mu\text{m}$ é menos popular, pois requer uma lâmpada mais especializada e cara, o que inviabiliza seu uso e deixa o sensor mais caro [12].

As fontes emissoras de infravermelho podem ser também de filamento, radiadores tipo Nernst ou Globar, LEDs especiais ou emissores de estado sólido, que estão em desenvolvimento e seguem tendência de serem muito utilizadas futu-

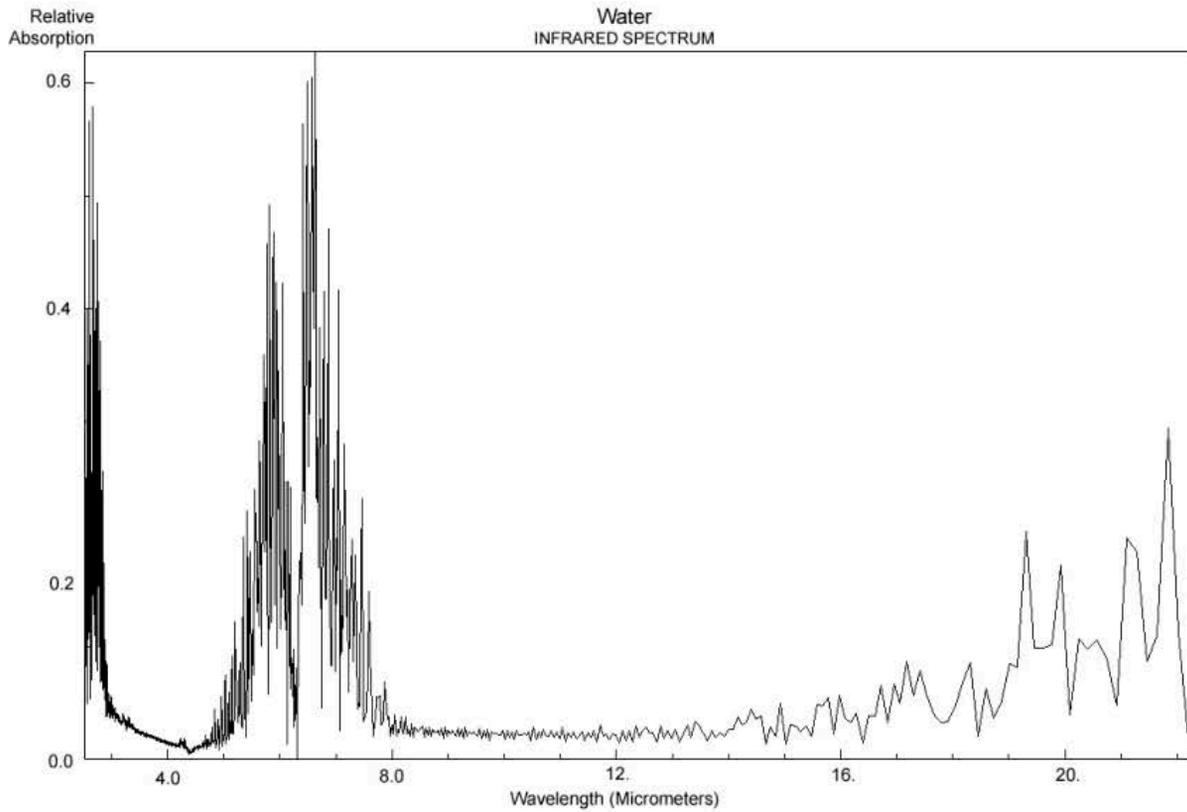


Figura 6: Espectro de absorção da água com infravermelho, em μm [12]

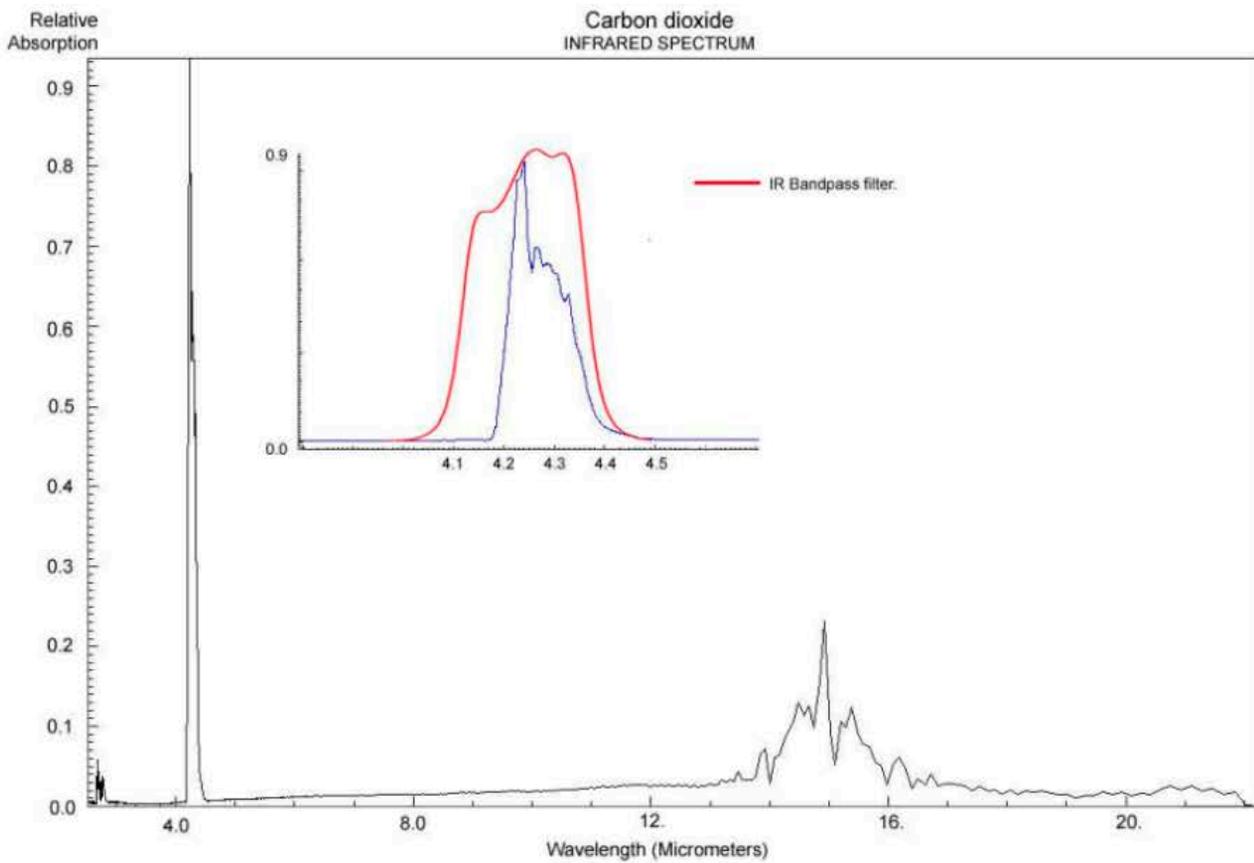


Figura 7: Espectro de absorção do CO_2 com infravermelho, em μm [12]

ramente quando fabricadas em larga escala, visto algumas características de fabricação com menor custo [9].

III. MATERIAIS E MÉTODOS

A. Componentes

1. Sensores MH-Z14A, MH-Z19C e MH-Z16

Os sensores utilizados no projeto foram o MH-Z14A, MH-Z19C e MH-Z16 que são sensores diferentes fisicamente mas que têm o mesmo processo de medição de concentração. São sensores desenvolvidos pela Zhengzhou Winsen Electronics Technology e utilizam o padrão de tecnologia NDIR, que segundo o fabricante apresenta boa seletividade e não dependem de oxigênio para medir a concentração de CO₂ [13] [14] [15].

Inicialmente não se tinha conhecimento sobre qual era a concentração máxima e mínima encontrada nos tanques, então foi testado o sensor MH-Z14A, um sensor um pouco mais antigo, com consumo médio de corrente menor que 85 mA, tempo de aquecimento de 3 minutos, tempo de resposta menor do que 90 segundos, duração de vida estimada maior que 5 anos e mede concentrações máximas de até 5 mil ppm [13]. O sensor MH-Z14A pode ser visto na Figura 8.

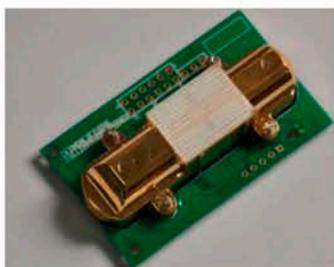


Figura 8: Sensor de medição de CO₂ por infravermelho modelo MH-Z14A [13]

Depois foi testado o sensor MH-Z19C que é um sensor mais novo que o MH-Z14A, mais compacto, tem um consumo menor de corrente elétrica (menos que 40 mA de média), tem menor tempo de aquecimento (1 minuto), tempo de resposta menor que 120 segundos, duração de vida estimada de mais de 10 anos e mede concentração máxima de CO₂ de 10 mil ppm [14]. O sensor MH-Z19C pode ser visto na Figura 9.

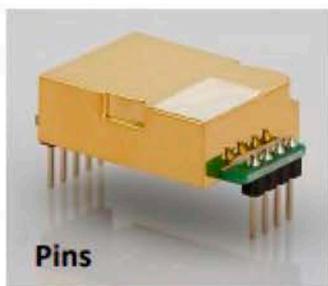


Figura 9: Sensor de medição de CO₂ por infravermelho modelo MH-Z19C [14]

Atualmente, é utilizado o sensor MH-Z16, um sensor mais robusto e é o mais novo utilizado no projeto, com consumo

médio de corrente elétrica de menos que 85 mA, tempo mínimo de aquecimento de 10 segundos, tempo de resposta menor que 30 segundos, duração de vida estimada em mais de 10 anos e mede uma concentração máxima de 100 mil ppm [15]. O sensor MH-Z16 pode ser visto na Figura 10.



Figura 10: Sensor de medição de CO₂ por infravermelho modelo MH-Z16 [15]

Todos esses sensores apresentam um sensor de temperatura interno que faz a compensação da temperatura na medição [13] [14].

Esses sensores podem ser aplicados para monitoramento da qualidade do ar, em processo industrial, na agricultura, entre outros. O sensor MH-Z14A pode medir de 0 ppm a 5 mil ppm, já o sensor MH-Z19C pode medir de 400 ppm a 5 mil ppm, dando a opção de medir até 10 mil ppm. O sensor MH-Z16 mede de 0 a 100 mil ppm. Os sensores MH-Z14A e MH-Z19C apresentam acurácia de $\pm 50 \text{ ppm} + 5\%$ do valor lido. O sensor MH-Z16 apresenta acurácia de menos de 1% do valor lido pelo sensor [13] [14] [15].

De posse das informações sobre espectrofotometria e a absorção de infravermelho pelo CO₂, observados na Figura 1, é possível analisar que em um comprimento de onda de aproximadamente 4250 nm, a intensidade de absorção do CO₂ está em seu ponto mais alto e não há nenhuma outra substância na mesma faixa de frequência e com tamanha intensidade de absorção. Portanto, conforme a Figura 11, com uma lâmpada de infravermelho em um tubo com a entrada e saída do gás, a lâmpada cria uma radiação infravermelha na câmara e o gás é excitado pela energia da radiação. Um filtro óptico é utilizado para filtrar apenas a radiação na faixa de infravermelho e o detector mede a intensidade da luz.

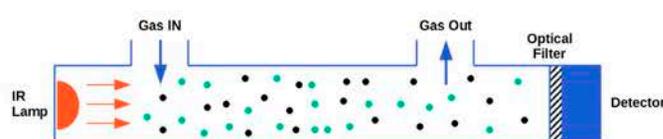


Figura 11: Esquema interno deste tipo de sensores NDIR [4]

O detector ativo de infravermelho, normalmente, é formado por um piroelétrico empacotado juntamente com o filtro passa-banda ajustado para o CO₂. Normalmente há um detector de referência infravermelho com filtro neutro de 4 μm [12].

Como pode ser visto na Figura 8 e na Figura 9, há a parte em branco para entrada e saída dos gases na câmara de medição dos sensores. Na Figura 10 do sensor MH-Z16 não é possível ver esses detalhes de entrada da câmara de medição do sensor com clareza mas ele também apresenta partes abertas para a entrada do ar ambiente. Fisicamente, pela parte branca dos sensores é possível ver a lâmpada de infravermelho ligando e desligando intermitentemente, ficando ligada cerca de um segundo e desligada também cerca de

um segundo. Através de medições de corrente em testes utilizando os sensores, foi possível observar que quando a lâmpada está ligada, a corrente é de aproximadamente 150 mA nos sensores. Quando a lâmpada está desligada, a corrente é de aproximadamente 10 mA. O que pode ser explicado pelo consumo de corrente da própria lâmpada, visto que desligada o consumo é menor por estar somente os componentes básicos do circuito do sensor e o consumo aumenta quando a lâmpada está ligada. O sensor MH-Z16 não apresenta essa luz visível externamente.

2. Sensor de pressão atmosférica, umidade relativa e temperatura BME280

No circuito completo do projeto, além dos sensores de CO₂, foi utilizado um sensor de umidade, temperatura e pressão atmosférica da Bosch de modelo BME280, que pode ser visto na Figura 12. Esse sensor é muito utilizado em aplicações móveis onde o tamanho e o baixo consumo são essenciais para o projeto, como nesse trabalho, em que são utilizadas baterias. O sensor BME280 sozinho pode ser visto na Figura 12, porém, no projeto ele é utilizado em um módulo pronto com o sensor, como pode ser visto na Figura 13.



Figura 12: Sensor BME280 [16]

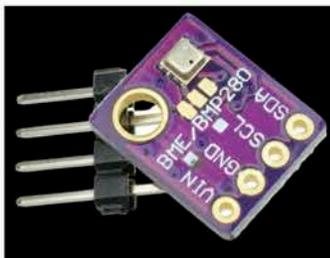


Figura 13: Módulo com sensor BME280 [17]

Esse sensor é utilizado para ajudar na caracterização do gás medido, visto que no ambiente em estudo tem-se o CO₂ refrigerado com cerveja a cerca de 3°C no tanque e quando ocorre a expulsão do gás a temperatura está próxima da temperatura ambiente, observado em medições feitas no ar de saída do tanque. Na expulsão do CO₂ pelo ar atmosférico esterilizado, ocorre um pequeno aumento de temperatura que é justamente causado pelo ar atmosférico esterilizado estar mais quente que o CO₂ por não sofrer troca térmica no processo até chegar ao tanque. O ar atmosférico esterilizado é o ar atmosférico após um processo de filtração para retirada de microrganismos.

3. Microcontrolador ESP32

ESP32 é um microcontrolador com Wi-Fi e Bluetooth que pode ser utilizado em aplicações de baixa potência. No chip do ESP32 existem dois núcleos de CPU que podem ser controlados individualmente, e a frequência do clock da CPU é ajustável de 80 MHz a 240 MHz. O ESP32 é compatível com um rico conjunto de periféricos, desde sensores de toque capacitivos, sensores Hall, interface de cartão SD, Ethernet, SPI de alta velocidade, UART, I2S e I2C [18].

O módulo utilizado no projeto é o ESP32 WROOM 32UE, com antena Wi-Fi externa para melhor alcance de comunicação, visto que o projeto é utilizado em um ambiente industrial com muito ruído e com extensa área. O módulo, que pode ser visto na Figura 14, é utilizado para programação em linguagem C para receber as medições dos sensores, envio de dados e alertas para o Raspberry Pi, controle dos botões e outros controles do projeto.



Figura 14: Módulo ESP32 WROOM 32UE utilizado no projeto [19]

4. Raspberry Pi 3 Model B+

O Raspberry Pi, que pode ser visto na Figura 15, é um mini computador de placa única que se conectado a um monitor, teclado e mouse, funciona como um computador de mesa. Ele conta com um processador quad core de 64 bits rodando a 1,4 GHz, Wi-Fi dual-band de 2,4 GHz e 5 GHz, Bluetooth 4.2/BLE, Ethernet mais rápida, apresenta 4 portas USB 2.0. Além disso ainda possui como periféricos: 40 pinos de GPIO para UART, I2C, SPI, entre outras comunicações [20].

A placa apresenta o sistema operacional Raspberry Pi OS, uma distribuição Linux baseada no Debian e no caso do projeto, é utilizado com o MQTT broker Mosquitto instalado, além do Telegraf, InfluxDB e Grafana.

B. Comunicações

O projeto apresenta um esquema de comunicações que pode ser visto na Figura 16 que aborda as comunicações entre o módulo de medição do projeto e o Raspberry Pi e a Internet com o Grafana. A Figura 16 já mostra a utilização



Figura 15: Raspberry Pi 3 Model B+ utilizado no projeto como servidor local com comunicação com a internet [20]

do sensor MH-Z16 sozinho, que é o sensor que melhor respondeu à concentração de CO₂ encontrada nos tanques.

Os sensores MH-Z14A, MH-Z19C e MH-Z16 apresentam três protocolos de comunicação: PWM (*Pulse Width Modulation*), UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) e ADC (*Analog Digital Converter*). No projeto a comunicação utilizada entre os sensores e o ESP32 é o protocolo UART, que utiliza o bit de paridade que é uma maneira do dispositivo receptor saber se algum dado foi alterado durante a transmissão [21]. O protocolo é então utilizado por ser mais robusto em ambientes ruidosos [21] (que é a situação encontrada em um ambiente industrial) e é bem simples de implementar juntamente com o ESP32.

O sensor BME280 utiliza o protocolo de comunicação I2C para a comunicação com o ESP32 que já é o protocolo indicado para o módulo sensor utilizado por padrão de fabricação. O protocolo I2C funciona como um barramento de comunicação a dois fios com dispositivos mestre e diversos periféricos escravo [22].

A comunicação entre o ESP32 e o Raspberry é feita via Wi-Fi com uma rede local criada pelo Raspberry Pi. Todos os dados de concentração de CO₂, pressão, umidade e temperatura que são medidos, são enviados via MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), que é um protocolo de mensagens de publicação e assinatura muito utilizado em sensores de baixa potência, para baixo consumo de memória e baixo consumo de energia [23] [24], o que é de extrema importância neste projeto. O MQTT permite a utilização de um protocolo padrão para proteger os dados na comunicação, chamado de Transport Layer Security (TLS) que trabalha juntamente com o protocolo de transporte Transmission Control Protocol (TCP), um protocolo de comunicação da camada de transporte que torna a comunicação mais confiável [24] [25].

A comunicação MQTT entre o módulo de medição do projeto com o Raspberry é feita via o MQTT Broker Mosquitto instalado no Raspberry PI, como pode ser visto na Figura 16. A comunicação é criptografada com TLS versão 1.2 e são utilizados certificados e chaves de cliente e servidor.

Cada mensagem MQTT contém um tópico, no qual os clientes podem se inscrever ou publicar. O broker (que nesse caso é o Mosquitto) recebe mensagens publicadas de diversos clientes que contém um determinado valor ou comando e retransmite as informações para cada cliente que se inscreveu naquele tópico específico [26] [23].

O Raspberry Pi tem a plataforma Telegraf instalada [27],

que é uma plataforma de gestão para coletar métricas, entre outras funcionalidades. O Telegraf tem um papel principal de cliente que recebe os dados do tópico MQTT com as medições, como pode ser visto na Figura 16 e também pode obter algumas informações do Raspberry Pi sobre CPU, memória utilizada, entre outras informações que podem ser utilizadas para monitorar o servidor, mas que não são destacadas no projeto.

O Telegraf então faz uma ponte para o InfluxDB, um banco de dados simples para séries temporais de dados, que consegue lidar com muitas consultas e escritas com baixo impacto na performance do sistema operacional e compatível com SQL [28]. Com os dados armazenados pelo InfluxDB, foi utilizado o Grafana para mostrar graficamente os valores medidos de concentração de CO₂ em ppm, temperatura, umidade, potência do sinal do Wi-Fi, pressão e dados de status de como estão os sensores (se estão aquecendo, com falha ou funcionando normalmente) e o valor do último dado enviado de cada um desses parâmetros.

C. Circuito e montagem

O circuito para medição de CO₂ utilizando os sensores MH-Z14A, MH-Z19C ou MH-Z16 pode ser visto no esquema da Figura 17. Todos os dados são processados pelo microcontrolador ESP32 e podem ter diversos fins, como mostrar o valor medido em um *display* ou mandar o valor medido para outro equipamento, acionar um relé, entre outras aplicações.

O ESP32 é responsável por coletar os dados dos sensores e fazer a comunicação com o Raspberry Pi via Wi-Fi em rede local. O Raspberry Pi funciona como um servidor, além de processar os dados para saber se há problema com os sensores ou se as medidas estão dentro de um determinado valor de concentração para acionar um alarme. Foram utilizados diversos fusíveis para proteção do sistema e uma placa de circuito step-down para baixar a tensão de 8V para 5V. Uma montagem parcial do projeto é mostrada pela Figura 18 que é possível ver uma câmara de inox à direita da imagem. A câmara de inox citada tem um formato interno em U invertido (∩), que pode ser visto na Figura 19, com entrada do fluxo de ar na parte da direita inferior com sentido do fluxo de ar para cima, passando pelo espaço na parte superior e saindo na parte inferior esquerda, de forma que no lado esquerdo onde ficava os sensores só chegasse realmente o ar sem líquidos, se houvesse, visto que o líquido não chegaria ao outro lado por cair por gravidade já no lado direito da câmara.

A montagem final da caixa onde estão todos os sensores e o ESP32 para a medição da concentração de CO₂, ficou conforme a Figura 20. Pode ser visto na Figura 20 há três botões, um vermelho e um verde maiores e um outro botão com detalhes e cor verde para ligar e desligar o módulo de medição. O *display* de LED é para apresentar o nível da bateria do módulo de medição. O projeto é móvel e é energizado via duas baterias de Li-ion de 3,7V, modelo 18650, de 15800 mAh cada.

Conforme a Figura 21 que mostra o diagrama dos botões (vermelho e verde), caso seja finalizado o tempo de expulsão normal, o cervejeiro vai avaliar se a expulsão de CO₂ do

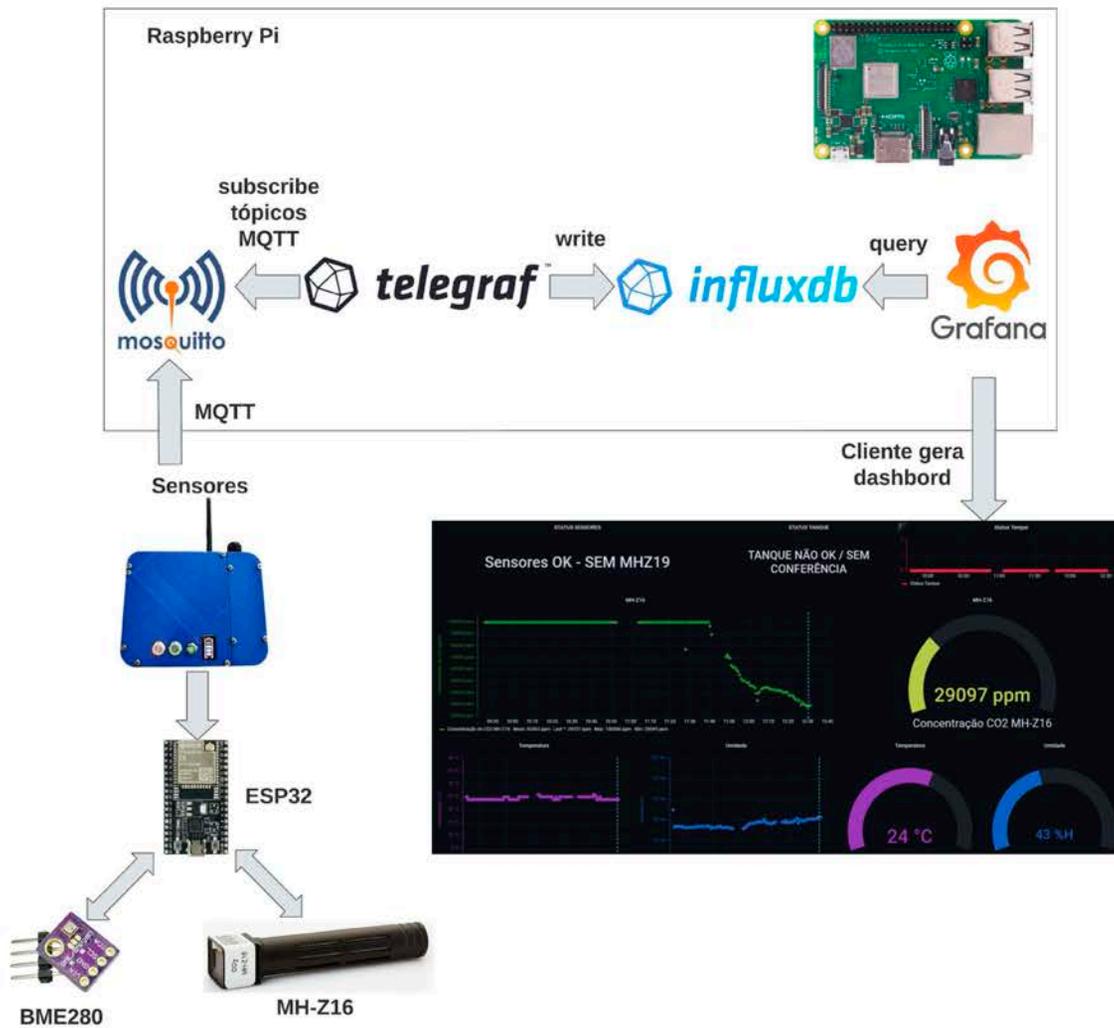


Figura 16: Fluxo de comunicação do projeto

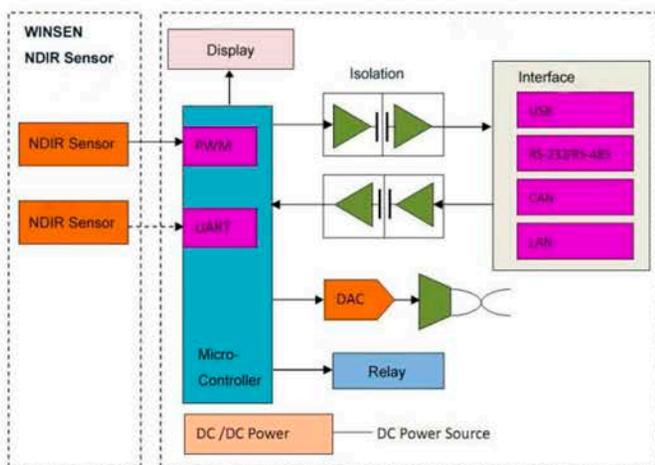


Figura 17: Esquema do circuito de medição e tratamento dos dados de medição com um sensor NDIR da marca Winsen [13]

tanque foi feita com sucesso, ou seja, se boa parte do gás realmente foi expulso. Caso seja verdadeiro que boa parte do CO₂ tenha sido expulso, o botão verde deve ser acionado, caso contrário o botão vermelho deve ser acionado, demonstrando que no tempo atual de expulsão, foi conferido pelo cervejeiro e ainda deve continuar a expulsão, pois ainda resta CO₂ que pode ser prejudicial à atividade. Os botões são apenas para controle se nas conferências pelo cervejeiro o CO₂ foi expulso ou não no tempo correto e em qual concentração foi analisado e se nessa concentração a avaliação foi ruim ou não, avaliando o tempo de início para o tempo de análise com o apertado do botão.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A montagem final, mostrada na Figura 20, foi confeccionada de um material plástico (PETG) feito em impressora 3D e conforme a Figura 22, a nova câmara de medição apresenta a parte esquerda, onde ficam os circuitos já detalhados, que na Figura 22 está com a tampa e uma câmara (parte di-

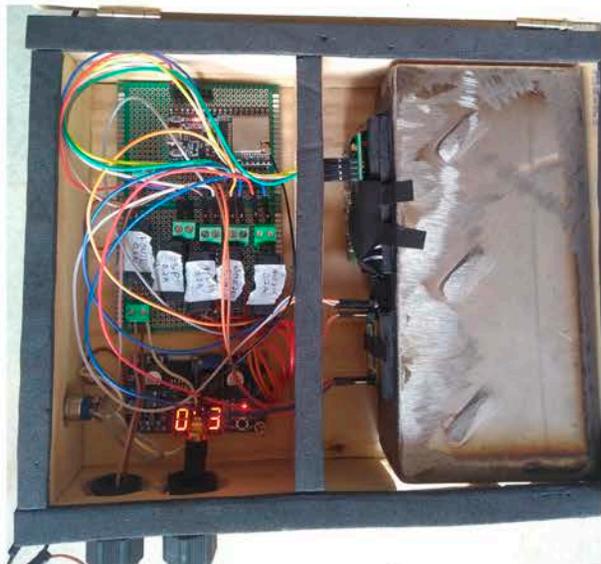


Figura 18: Montagem do projeto em estágio inicial de desenvolvimento



Figura 19: Câmara de inox utilizada no início do projeto

reita aberta) onde estão fixados os sensores (é possível ver uma pequena parte do sensor MH-Z14A na parte superior esquerda da câmara).

A caixa de medição deve ser posicionada de forma que a parte de entrada da mangueira do ar de saída do tanque fique posicionada na parte de cima da caixa de medição. Com isso, a nova câmara de medição apresenta uma pequena parede na frente da entrada do fluxo de ar (parte superior na Figura 22)



Figura 22: Parte da câmara de medição do projeto

maior para garantir o aquecimento e uma melhor estabilização dos sensores. Uma possível explicação para esse efeito mais demorado de estabilização do sensor MH-Z14A é que o sensor MH-Z14A tem uma câmara de gás maior que do sensor MH-Z19C, então ele demoraria um pouco mais a estabilizar e trocar o gás interno preso no sensor com o gás que está sendo injetado na câmara.

Como os sensores de CO₂ utilizam lâmpadas de infravermelho para realizarem a medição, essas lâmpadas necessitam de um certo tempo que fiquem ligadas para garantir um melhor funcionamento, é esse o aquecimento de lâmpadas citado anteriormente, onde no sensor MH-Z14A é necessário um tempo de pelo menos 3 minutos [13] ligado aquecendo a lâmpada antes de realmente enviar as medições, enquanto que o sensor MH-Z19C necessita de 1 minuto [14] para aquecimento de sua lâmpada para começar a enviar as medições com valores estabilizados e o sensor MH-Z16 necessita de apenas 10 segundos de aquecimento.

Na Figura 24, é mostrada uma imagem da tela do Grafana que apresenta uma medição utilizando o sensor MH-Z16 em um dos testes, mostrando o gráfico de concentração de CO₂ (em ppm) *versus* a hora da medição e ao lado direito do gráfico, o último valor de concentração de CO₂ recebido. Além disso, há medições de temperatura e umidade e o respectivo valor da medição atual de temperatura e umidade. Há também informações sobre o status atual dos sensores (nome: status sensores) e status do tanque. Como mostrado, a con-

ferência não foi feita pelo cervejeiro, ou seja, a expulsão de CO₂ continua sendo realizada. Também é possível ver o gráfico de status do tanque, para saber os horários de verificação do tanque pelo cervejeiro e sua mudança de status.

Com o desenvolvimento de vários testes nos tanques, foi possível perceber que quando a expulsão era feita automaticamente, a vazão de ar atmosférico esterilizado sofria mais variações, pois a válvula de ar fica um certo tempo aberta e um certo tempo fechada, como parte da receita que é seguida automaticamente na expulsão. Então, acaba que a expulsão demora mais para ser realizada e a concentração de liberação do tanque ficava alta, com o sensor MH-Z14A sempre medindo seu valor máximo e o sensor MH-Z19C algumas vezes medindo ligeiramente abaixo de 10 mil ppm e algumas vezes medindo sua concentração máxima.

Quando a expulsão era feita de maneira manual, em que a válvula de ar fica o tempo todo aberta e a expulsão apresenta uma vazão de ar alta e constante, era possível avaliar que a expulsão se dava mais rapidamente e os sensores conseguiam medir concentrações bem baixas, chegando algumas vezes a próximo de mil ppm.

Então, foi possível analisar que os sensores MH-Z14A e MH-Z19C estavam com seus limites máximos muito próximos dos valores de liberação de concentração de CO₂ nos tanques, o que não seria ideal para desenvolver o projeto, visto que não seria possível analisar muito bem tanto o valor de concentração de liberação quanto o gráfico resultante na expulsão na queda de concentração. Com isso, foi necessário comprar o sensor MH-Z16, que apresenta um limite máximo de medição de 100 mil ppm, para melhor caracterização da atividade. Inicialmente não havia nenhuma bibliografia que reforçasse os valores de concentração encontrados na atividade.

Os três sensores são calibrados com ar atmosférico frequentemente, visto que o fabricante pede que sejam calibrados com pelo menos 400 ppm de concentração de CO₂ que seria a concentração de CO₂ próximo à concentração da atmosfera [13] [14] [15]. Os sensores são utilizados na medição da retirada de CO₂ em alta concentração de tanques e que é empurrado com o ar atmosférico esterilizado em concentrações mais baixas de CO₂ próximo à concentração atmosférica. Com os resultados obtidos até aqui, foi possível perceber que a concentração de CO₂ não chega até próximo à concentração atmosférica. A expulsão não necessariamente precisa ser total, continuando os sensores medindo concentrações relativamente altas após liberação do cervejeiro.

Um dos estágios atuais é para saber o quão concentrado ainda ficam os tanques no final da atividade e foi alterado para que utilize somente o MH-Z16 que pode medir até 100 mil ppm para conseguir caracterizar melhor o decréscimo de concentração do CO₂. Essa mudança foi feita, pois principalmente nos tanques de volumes maiores, a concentração na medição a 5 mil ppm se mantinha o tempo inteiro no mesmo valor até o final e em vários testes se mantinha também em 10 mil ppm. Em outros testes fazendo a expulsão de maneira manual já com o sensor MH-Z19C medindo até 10 mil ppm, foi observado a liberação do tanque pelo cervejeiro marcando 8 mil ppm de concentração de CO₂.

Outra forma que vem sendo analisada para ajudar no melhor momento de liberação do tanque é através dos gráficos

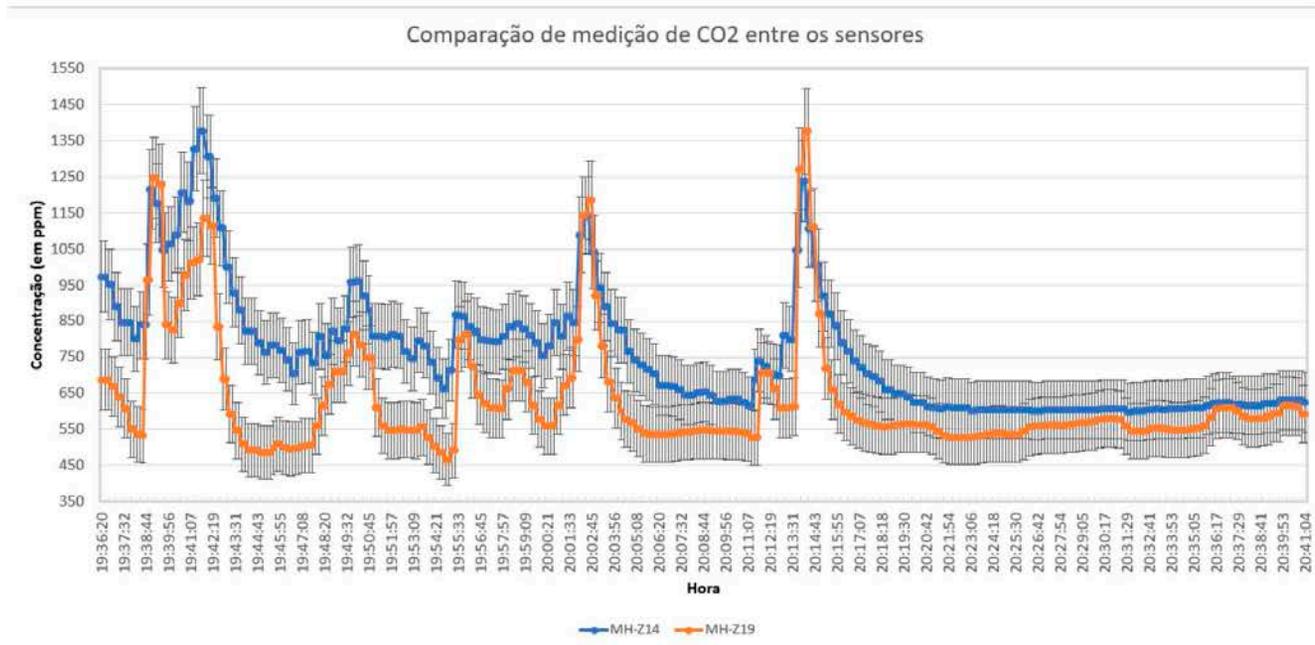


Figura 23: Comparação entre as medidas de concentração de CO₂ entre os sensores MH-Z14A e MH-Z19C em simulação de oscilação de concentração



Figura 24: Página do Grafana mostrando um teste de medição utilizando o sensor MH-Z16 com gráficos e valores atuais de concentração de CO₂ (em ppm), temperatura, umidade e texto do status dos sensores e da conferência do tanque

de medição de temperatura do ar que sai do tanque. Se a temperatura for um meio possível de se avaliar se a expulsão foi realizada de maneira satisfatória, pode ser um fator mais barato e rápido de se utilizar na atividade, visto que é mais fácil e barato encontrar sensores de temperatura.

Esse processo de medição busca diminuir o tempo gasto nessa atividade de expulsão de gases e assim diminuir o uso da utilização de compressores de ar, que são utilizados para enviar o ar atmosférico esterilizado para os tanques e assim, reduzir o gasto de energia na atividade. Para essa atividade,

o sensor de CO₂ não dispersivo atende muito bem a necessidade, pois não há uma demanda por grande exatidão no valor da concentração.

V. CONCLUSÃO

Para a atividade proposta, precisam ser realizados mais testes para observar melhor qual a concentração aproximada de CO₂ que os tanques são liberados para a assepsia. Visto

que é uma atividade que não demanda tanta exatidão quanto a um valor de concentração mas demanda uma certa confiança quanto à queda de concentração, os sensores NDIR podem ser utilizados para construir um equipamento de monitoramento de concentração de CO₂ com um custo mais baixo. A expulsão de CO₂ é para limpeza do tanque com soda cáustica e é utilizado ar atmosférico esterilizado através de compressores de ar para a expulsão do gás, sendo uma atividade com risco de danificar um tanque, visto que pode acontecer uma implosão por contato da soda com o CO₂, porém o projeto visa dar mais entendimento sobre a atividade, principalmente por caracterizar melhor numericamente a expulsão via concentração do gás, trazendo a metodologia científica para a indústria através de um equipamento que pode dar mais segurança à atividade. Além disso, o processo passa a ficar mais seguro e confiável em casos de problemas, pois os dados serão coletados e analisados, podendo ser utilizados para entender melhor como tudo ocorreu.

É importante destacar que a comunicação é feita via Wi-Fi entre a caixa de medição e o Raspberry PI. Como o ambiente industrial é um meio com muito ruído eletromagnético, o sinal pode sofrer muitas interferências e então apresentar a potência do sinal do Wi-Fi no dashboard do projeto pode ser um meio de analisar como está o sinal de comunicação e buscar melhorar a posição da antena, por exemplo.

Os tanques de cerveja na unidade fabril apresentam em seu corpo uma torneira de retirada de amostras da cerveja do tanque que fica pouco abaixo do meio do tanque, através dessa torneira, que fica sempre aberta na expulsão de CO₂ é que são feitas as medições do equipamento detalhado neste trabalho e também a liberação do tanque por um cervejeiro no fim da expulsão. Esse era um dos pontos que era obrigatório seguir no estudo para utilizar o mesmo ponto em que o tanque é verificado pelo cervejeiros para fazer comparações com o momento de liberação. Atualmente, para a liberação da atividade, um cervejeiro utiliza um equipamento para trabalho em espaço confinado que mede apenas o oxigênio presente no ar de saída do tanque, que deve estar próximo a 20% e o cervejeiro na hora que confere com o equipamento, cheira o ar que está saindo, visto que o CO₂, quando em uma concentração mais alta, torna asfixiante e a pessoa não consegue se manter cheirando por muito tempo o ar. Então, a atividade é liberada por um método indireto (via oxigênio) e um método subjetivo (cervejeiro cheirando).

O projeto visa aperfeiçoar a liberação da atividade medindo diretamente a concentração de CO₂, que é o gás alvo e buscando descobrir uma concentração ideal aproximada para a partir dela começar a agilizar a liberação da atividade. Através de vários testes que estão sendo realizados busca-se descobrir qual é o valor ideal de concentração que se deve liberar o tanque para assepsia.

No início não foi encontrada nenhuma bibliografia com detalhes sobre qual é a concentração aproximada da atividade de expulsão ao longo do tempo, então foram sendo utilizados os sensores MH-Z14A e MH-Z19C, mas que não deram o resultado esperado. Depois foi feita a troca dos sensores e utilizado somente o sensor MH-Z16 atualmente. Está em análise os valores de concentração de CO₂ nos tanques na liberação para assepsia, ficando, em sua maioria, próximo de 30 mil ppm na forma de expulsão automática, bem acima do

valor limite de concentração do MH-Z19C e do MH-Z14A.

A atividade de expulsão pode ser realizada de duas maneiras, automaticamente e manualmente. Quando realizada de maneira automática, a atividade é mais demorada pela vazão de ar atmosférico esterilizado não ser contínua. De maneira manual a válvula de ar atmosférico esterilizado fica aberta o tempo inteiro, sendo mais rápida a expulsão. Quando feita de maneira manual, o projeto já consegue dar uma confiança maior na liberação e os cervejeiros já confiam que a expulsão foi feita, visto que na maioria das vezes a atividade ficava sendo realizada muito mais tempo do que o necessário e agora pelos gráficos já é possível avaliar que a expulsão foi realizada e acaba diminuindo o tempo de utilização de compressores de ar.

O principal uso do projeto é na diminuição do uso dos compressores de ar para a expulsão, buscando diminuir o tempo desnecessário de expulsão. Para a fábrica inteira é utilizado um compressor de ar e somente para esta atividade é utilizado outro compressor, diminuir seu tempo de uso é essencial tanto por questões financeiras quanto por questões de tempo de uso do equipamento em caso de manutenção.

- [1] JUNGES, A. L. et al. O “efeito estufa” na sala de aula: um experimento de baixo custo para demonstrar a absorção de radiação infravermelha por gases estufa como o dióxido de carbono. *Caderno brasileiro de ensino de física. Florianópolis. Vol. 37, n. 2 (ago. 2020), p. 849-864*, 2020.
- [2] SUSSUCHI, E. M.; MACHADO, S. M. F.; MORAES, V. R. de S. Origem da teoria quântica.
- [3] CUSTODIO, R.; KUBOTA, L. T.; ANDRADE, J. C. de. Lei dos processos de absorção da radiação. *Revista Chemkeys*, n. 3, p. 1–5, 2000.
- [4] DIYIOT. *Tutorial do medidor de CO2 MH-Z14A com Arduino, ESP8266 ou ESP32*. 2021. Disponível em: <<https://diyiot.com/mh-z14a-co2-meter-arduino-esp8266-esp32/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- [5] MOREIRA, A. F.; SANTOS, S. d.; JUNIOR, A. C. Construção e caracterização de um fotômetro destinado ao uso de aulas experimentais de química sobre a lei de lambert-beer. *Holos*, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, v. 2, p. 142–151, 2016.
- [6] UNESP. *Espectrofotometria*. 2021. Disponível em: <<https://www.dracena.unesp.br/Home/Graduacao/espectrofotometria.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- [7] CANASSA, T. A.; LAMONATO, A. L.; RIBEIRO, A. V. Utilização da lei de lambert-beer para determinação da concentração de soluções. *Journal of Experimental Techniques and Instrumentation*, v. 1, n. 2, 2018.
- [8] AZEVEDO, E. R. d.; NUNES, L. A. d. O. Construção de um espectrógrafo de projeção e sua utilização em demonstrações de espectroscopia óptica. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 31, p. 2199–2204, 2008.
- [9] SCHAEFFER, R. D. *Estudo e desenvolvimento de um sensor de CO2 de baixo custo*. 2004. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4199>>. Acesso em: 17 jun. 2022.
- [10] GIL, M. *Sensor de infravermelho para detecção de Dióxido de Carbono*. 2021. Disponível em: <<https://www.managas.com.br/blog/conservacao-de-alimentos/sensor-de-gas-por-infravermelho-nao-dispersivo-ndir/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- [11] ASHFAQUE-E-ALAM, M.; ISLAM, M. R.; FARIA, I. J. Development and validation of a low-cost visible light spectrophotometer. In: IEEE. *2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*. [S.l.], 2017. p. 653–657.
- [12] SGX SENSORTECH (IS) LTD. *Infrared Sensor Application Note 1 A Background to Gas Sensing by NonDispersive Infrared (NDIR) (AIA-Infrared AN1 Issue 6, May 2007)*. 2007. Disponível em: <<https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2014/08/AN1-%E2%80%93A-Background-to-Gas-Sensing-by-Non-Dispersive-Infrared-NDIR.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2022.
- [13] ZHENGZHOU WINSEN ELECTRONICS TECHNOLOGY. *Intelligent Infrared Carbon Dioxide Module (Model: MH-Z14)*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<https://www.winsensor.com/d/files/MH-Z14.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2022.
- [14] ZHENGZHOU WINSEN ELECTRONICS TECHNOLOGY. *Infrared CO2 Sensor Module (Model: MH-Z19C)*. [S.l.], 2021. Disponível em: <[https://www.winsensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual\(ver1_2\).pdf](https://www.winsensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual(ver1_2).pdf)>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- [15] ZHENGZHOU WINSEN ELECTRONICS TECHNOLOGY. *MH-Z16 Infrared CO2 Gas Module*. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.winsensor.com/d/files/mh-z16_co2-manual-v2_6.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2022.
- [16] BOSCH. *BME 280 - Combined humidity and pressure sensor*. [S.l.], 2021. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/783/bst_bme280_ds002-2238172.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2022.
- [17] HUINFINITO. *Módulo Sensor Barômetro / Temperatura / Umidade - BME280*. 2022. Disponível em: <<https://www.huinfinito.com.br/sensores/1346-modulo-sensor-barometrotemperaturaumidade-bme280.html>>. Acesso em: 15 jul. 2022.
- [18] ESPRESSIF. *ESP32-WROOM-32D e ESP32-WROOM-32U - Datasheet*. [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2022.
- [19] MOUSER ELECTRONICS. *ESP32-DevKitC-32UE*. 2022. Disponível em: <https://br.mouser.com/images/espressifsystems/hd/ESP32-DevKitC-32UE_SPL.jpg>. Acesso em: 02 jul. 2022.
- [20] RASPBERRY. *Raspberry Pi 3 Model B+*. 2014. Disponível em: <

- lojavirtual/735/rpi-brief.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.
- [21] PEÑA, E.; LEGASPI, M. G. *UART: A Hardware Communication Protocol Understanding Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*. 2020. Disponível em: <<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- [22] CAMARA, R. *Protocolo I2C*. 2013. Disponível em: <<http://www.univasf.edu.br/~romulo.camara/novo/wp-content/uploads/2013/11/Barramento-e-Protocolo-I2C.pdf>>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- [23] LIGHT, R. *MQTT man page*. 2022. Disponível em: <<https://mosquitto.org/man/mqtt-7.html>>. Acesso em: 17 jul. 2022.
- [24] BARANAUSKAS, E.; TOLDINAS, J.; LOZINSKIS, B. Evaluation of the impact on energy consumption of mqtt protocol over tls. In: CEUR-WS. *CEUR workshop proceedings: IVUS 2019 international conference on information technologies: proceedings of the international conference on information technologies, Kaunas, Lithuania, April 25, 2019*. [S.l.], 2019. v. 2470, p. 56–60.
- [25] STEVE'S INTERNET GUIDE. *Beginners Guide To The MQTT Protocol*. 2018. Disponível em: <<http://www.steves-internet-guide.com/mqtt/>>. Acesso em: 12 jul. 2022.
- [26] DINCULEANĂ, D.; CHENG, X. Vulnerabilities and limitations of mqtt protocol used between iot devices. *Applied Sciences*, MDPI, v. 9, n. 5, p. 848, 2019.
- [27] INFLUXDATA. *Telegraf*. 2022. Disponível em: <<https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/>>. Acesso em: 07 jul. 2022.
- [28] INFLUXDATA. *InfluxDB*. 2022. Disponível em: <<https://www.influxdata.com/get-influxdb/>>. Acesso em: 07 jul. 2022.