

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS
Coordenação de Formação Científica

Iago da Silva Fachneli

SISTEMA IOT DE ACOMPANHAMENTO DE EXPULSÃO DE CO₂ EM INDÚSTRIA
CERVEJEIRA

Rio de Janeiro - RJ

2023

Iago da Silva Fachneli

**SISTEMA IOT DE ACOMPANHAMENTO DE EXPULSÃO DE CO₂ EM
INDÚSTRIA CERVEJEIRA**

Dissertação apresentada à Coordenação de Formação Científica do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Física com ênfase em Instrumentação Científica.

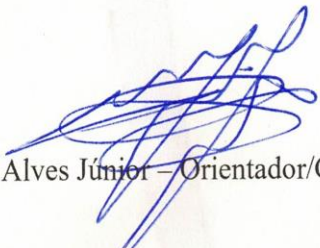
Orientador: Nilton Alves Júnior


**Rio de Janeiro - RJ
2023**

“SISTEMAS IoT DE ACOMPANHAMENTO DE EXPULSÃO DE CO₂ EM INDÚSTRIA
CERVEJEIRA”


IAGO DA SILVA FACHNELI

Dissertação de Mestrado Profissional em Física
com ênfase em Instrumentação Científica,
apresentada no Centro Brasileiro de Pesquisas
Físicas do Ministério da Ciência Tecnologia e
Inovação. Fazendo parte da banca examinadora
os seguintes professores:


Nilton Alves Júnior – Orientador/CBPF

Documento assinado digitalmente
 **EVANDRO LUIZ CARDOSO MACEDO**
Data: 01/11/2023 09:11:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Evandro Luiz Cardoso Macedo - UFRJ

Documento assinado digitalmente
 **LEANDRO AURELIANO DA SILVA**
Data: 04/01/2024 17:27:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Leandro Aureliano da Silva - UNIUBE

Rio de Janeiro, 27 de outubro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador, Prof. Doutor Nilton Alves Júnior, pelo compartilhamento de conhecimentos desde as cadeiras cursadas, principalmente em *Internet of Things* (IoT), e também pela paciência nessa longa caminhada, com diversos problemas pelo caminho. Agradeço à equipe de apoio do Prof. Doutor Nilton Alves Júnior, em especial ao David, que ajudou desde o início desse projeto, utilizando de seu tempo para revisões, discussões e ensinamentos nos códigos e sistemas desenvolvidos.

Agradeço ao Prof. Doutor Romeu Abrahão Pereira, que foi quem me apresentou ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e me deu todo o apoio e oportunidade para que esse trabalho pudesse ser concluído.

Agradeço à equipe do Grupo Petrópolis por ter aceitado que os testes fossem realizados em sua fábrica de Uberaba. Em especial, meu agradecimento às equipes de Filtração e Fermentação do Grupo Petrópolis de Uberaba, representadas por Igor, Henrique, Thiago, Allysson e José, por terem paciência e ajudarem nas medições nos tanques. Agradeço também aos cervejeiros Zaio, Klaus, Matheus, Diego, Gustavo e Paulo, que me deram apoio e confiança nesse longo caminho de medições e testes na empresa. Agradeço especialmente ao Gerente de Processos de Produção, Leandro, por ter depositado sua confiança neste projeto, o que possibilitou seu desenvolvimento e teste na fábrica.

Agradeço à minha amiga Ana Luiza, por ter apoiado e feito sugestões ao projeto ao longo de seu desenvolvimento.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Maria Abadia e Valtemir, por todo o apoio e atenção ao longo dessa grande caminhada.

Agradeço à minha querida namorada, Marília, por ter me dado todo o apoio e compreensão ao longo desse projeto, em todos os momentos.

Finalizando, agradeço de modo geral a todos que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desse trabalho. Muito obrigado.

RESUMO

No processo de fabricação de cerveja, especificamente em sua fermentação, quando o dióxido de carbono (CO_2 – gás carbônico) é gerado, a cerveja fica vários dias dentro de um tanque. Após o esvaziamento desses tanques, diversos resíduos, como cerveja e leveduras, entre outras sujidades, ainda permanecem nos tanques e em tubulações, o que dificulta a limpeza. Para remover sujidades mais resistentes, utiliza-se hidróxido de sódio (NaOH – soda cáustica) devido ao seu alto poder de limpeza contra materiais orgânicos. Quando a cerveja é retirada do tanque, ele fica preenchido com dióxido de carbono, que, em contato com o hidróxido de sódio da limpeza, pode resultar em vácuo dentro do tanque. Por isso, o dióxido de carbono é retirado do tanque utilizando ar ambiente esterilizado, que é injetado pela parte superior do tanque, por compressores de ar que empurram o CO_2 para fora do tanque, por uma tubulação na parte inferior, até que o tanque esteja com a concentração de dióxido de carbono bem baixa. São realizados dois tipos de expulsões, manual e automática que buscam diminuir a concentração de CO_2 no tanque. É utilizado um compressor de ar de 186,5 kW para a injeção do ar ambiente esterilizado no sistema e, utilizá-lo por um período menor pode diminuir os gastos com energia elétrica na atividade. Este trabalho propõe desenvolver um equipamento de medição de concentração de dióxido de carbono, temperatura e umidade do ar de expulsão do tanque, visando delimitar valores na liberação do tanque para limpeza nos dois tipos de expulsões. Tendo como objetivo reduzir o tempo da expulsão automática, que apresenta tempos mínimos definidos conforme o tanque. Se, ao final desse período, o cervejeiro identificar uma concentração de CO_2 no tanque que ele considera prejudicial, o tempo de expulsão precisa ser estendido. Isso pode resultar em avaliações menos frequentes do tanque e, como consequência, o compressor de ar pode continuar funcionando por vários minutos além do necessário. Além de apresentar delimitações de concentração e tempo para expulsões manuais, que não tem tempo definido. Isso visa dar segurança de que a expulsão foi realizada com sucesso e possa ser replicada. O desenvolvimento deste sistema é possível com base em sensores de concentração de CO_2 de tecnologia *Non-Dispersive Infrared* (NDIR). Esses sensores, em conjunto com um ESP32, enviam dados via *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) para um Raspberry Pi. Esses dados podem, então, ser armazenados pelo InfluxDB e acessados pelo Grafana para visualização. Foi possível observar pelas medições que temperatura e umidade não são parâmetros para a liberação dos tanques. Pelos dados de concentração de CO_2 , é possível delimitar valores de concentrações nos dois tipos de expulsões e reduzir seus tempos.

Palavras-chave: IoT, indústria, CO_2 , cervejaria, NDIR

ABSTRACT

In the beer manufacturing process, specifically during beer fermentation, when carbon dioxide (CO₂ – carbon gas) is generated, the beer remains in tanks for several days. After emptying these tanks, many residues, such as beer and yeast, among other impurities, yet remain in the tanks and pipelines, making cleaning difficult. To remove more stubborn dirties, sodium hydroxide (NaOH – caustic soda) is used due to its high cleaning power against organic materials. When the beer is removed from the tank, it becomes filled with carbon dioxide, which, in contact with the sodium hydroxide used for cleaning can result in a vacuum inside the tank. Therefore, carbon dioxide is removed from the tank using sterilized ambient air, injected through the top of the tank by air compressors that push the CO₂ out of the tank through a bottom pipeline until the tank has a very low concentration of carbon dioxide. Two types of expulsions are carried out, manual and automatic, aiming to reduce the CO₂ concentration in the tank. A 186.5 kW air compressor is used to inject sterilized ambient air into the system, and using it for a shorter period can reduce electricity costs in the process. This work aims to develop a measurement device for carbon dioxide concentration, temperature, and air humidity during tank expulsion, aiming to establish values for tank release for cleaning in both types of expulsions. The goal is to reduce the time of automatic expulsion, which has defined minimum times according to the tank. If, at the end of this period, the brewer identifies a CO₂ concentration in the tank that they considered harmful, the expulsion time needs to be extended. This may result in less frequent tank evaluations, leading the air compressor to operate for several minutes longer than necessary. In addition to presenting concentration and time limitations for manual expulsions, which do not have a defined time, this aims to ensure that the expulsion was successful and can be replicated. The development of this system is possible, based on CO₂ concentration sensors using Non-Dispersive Infrared (NDIR) technology. These sensors, together with an ESP32, send data via Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) to a Raspberry Pi. These data can then be stored in InfluxDB and accessed by Grafana for visualization. Measurements indicate that temperature and humidity are not parameters for tank release. CO₂ concentration data can be used to define concentration values in both types of expulsions and reduce their durations.

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de tanque de grandes cervejarias com várias entradas e saídas de linha, válvulas, entre outros equipamentos.....	21
Figura 2 - Exemplo de sistema de CIP automatizado.....	25
Figura 3 - Esfera de pulverização estática e sua ação.....	27
Figura 4 - Esquema de formação dos biofilmes com uma camada da base entre 5 e 10 μm e “torres” que se elevam de 100 a 200 μm	30
Figura 5 - Solução de CuSO_4 que apresenta a demonstração sobre a espessura da camada do corpo homogêneo.	36
Figura 6 - Esquema mostrando bloco que recebe luz incidente contendo uma amostra absorvedora de Seção S contendo n espécies absorvedoras.	38
Figura 7 - Gráfico da absorbância <i>versus</i> concentração de uma amostra de solução de KMnO_4 em 525 nm.	39
Figura 8 - Gráfico característico da transmitância <i>versus</i> concentração de uma amostra de solução de KMnO_4 em 525 nm.	40
Figura 9 - Espectro de absorção (forção de absorção <i>versus</i> comprimento de onda) de várias substâncias.	41
Figura 10 - Modos normais de vibração do CO_2	42
Figura 11 - Espectro de absorção do dióxido de carbono em infravermelho.	43
Figura 12 - Espectro de absorção de infravermelho pela água.	44
Figura 13 - Sensor genérico para medição de concentração de CO_2	45
Figura 14 - Espectro de absorção do CO_2 com infravermelho com destaque para o filtro passa-banda.	46
Figura 15 - Sensor MH-Z14.	48
Figura 16 - Sensor MH-Z19C.	49
Figura 17 - Experimento comparando as medidas de concentração de CO_2 entre os sensores MH-Z14 e MH-Z19C em uma simulação de oscilação de concentração.	50
Figura 18 - Sensor MH-Z16.	51
Figura 19 - Exemplo de comunicação e ligação de pinos entre dois dispositivos UART.	53
Figura 20 - Sensor BME280.	54
Figura 21 - Módulo com sensor BME280.	54
Figura 22 - Diagrama de blocos de microssistemas.	55

Figura 23 - <i>Layout</i> aproximado do sensor BME280 em uma patente da Bosch sobre sensores de pressão e umidade.....	55
Figura 24 - Imagem da microscopia do BME280.	56
Figura 25 - <i>Zoom</i> de 300X sobre a matriz superior do BME380 mostrando com detalhes o filme fino e o que parecem ser eletrodos.	57
Figura 26 - Aumento do <i>zoom</i> no filme fino.	57
Figura 27 - Exemplo de comunicação I2C entre um dispositivo mestre e periféricos.....	58
Figura 28 - Módulo ESP32 WROOM 32UE utilizado no projeto.	59
Figura 29 - Raspberry Pi 3 Model B+.	60
Figura 30 - Exemplo do uso de um <i>broker</i> MQTT com diversos dispositivos (<i>devices</i>) utilizando <i>publish</i> e <i>subscribe</i> e os tópicos utilizados por cada um deles.....	61
Figura 31 - Tipos de distribuição de mensagens do protocolo MQTT.....	63
Figura 32 - Exemplo de fluxo do <i>proxy</i> reverso.....	65
Figura 33 - Interação com ferramenta do servidor InfluxDB.....	67
Figura 34 - Fluxo de comunicação do projeto.....	68
Figura 35 - Esquema de montagem do circuito de medição e tratamento dos dados de medição com um sensor NDIR da marca Winsen.	69
Figura 36 - Montagem modelo do sensor BME280 com o ESP32 com utilização da comunicação I2C.....	69
Figura 37 - Montagem inicial da caixa de medição do projeto.	70
Figura 38 - Detalhe interno da câmara de inox de separação de líquido e gás.....	71
Figura 39 - Caixa de medição finalizada.	71
Figura 40 - Fluxograma de decisão dos botões da caixa de medição.....	72
Figura 41 - Detalhe da nova câmara da caixa de medição.	72
Figura 42 - Compressor do tipo parafuso, muito utilizado em cervejarias.....	74
Figura 43 - Vela de filtro padrão utilizada na filtração de ar para esterilizá-lo.....	75
Figura 44 - Desenho aproximado de um tanque cilíndrico vertical de cervejaria com alguns dos equipamentos do sistema.	76
Figura 45 - Utilização da caixa de medição em um tanque.....	78
Figura 46 - Experimento com o detector de gases de concentração de oxigênio para liberação da assepsia.	79
Figura 47 - Início da calibração e mensagens de saída de andamento da atividade.....	81
Figura 48 - Comando de calibração de ponto zero enviado duas vezes e medições.	82
Figura 49 - Experimento de injeção direta do ar do tanque no sensor.	83

Figura 50 - Posicionamento interno do sensor MH-Z16 na câmara de medição.	83
Figura 51 - Gráficos e última concentração dos sensores MH-Z14 e MH-Z19C.	85
Figura 52 - Fluxograma aproximado da utilização do projeto com a AWS.	85
Figura 53 - Antenas utilizadas no projeto.	86
Figura 54 - Experimento em um BBT com expulsão automática.	89
Figura 55 - Gráfico de variação de temperatura na mesma medição anterior, mas expandindo para todo o tempo de medição.	89
Figura 56 - Gráfico de variação de umidade em todo o tempo da medição anterior.	90
Figura 57 - Gráfico de medição de concentração de CO ₂ na expulsão em um tanque de água.	91
Figura 58 - Gráfico de medição de concentração de CO ₂ utilizando o sensor MH-Z19C.	92
Figura 59 - Tela do aplicativo <i>Wifi Analyzer</i> mostrando os canais e potências de canais <i>Wifi</i> no ambiente do experimento.	93
Figura 60 - Experimento no ambiente fabril modificando as distâncias da caixa de medição e trocando as antenas.	94
Figura 61 - Gráfico de comparação entre umidade e temperatura na linha de fornecimento de CO ₂	95
Figura 62 - Gráfico de medição de temperatura e umidade na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 1.	96
Figura 63 – Gráfico de medição de temperatura e umidade na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 2.	97
Figura 64 - Gráfico de medição de concentração de dióxido de carbono na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 1.	97
Figura 65 - Gráfico de medição de concentração de dióxido de carbono na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 2.	98
Figura 66 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em todas as expulsões e em todos os tanques.	104
Figura 67 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em expulsões manuais em todos os tanques.	105
Figura 68 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em expulsões automáticas em todos os tanques.	105
Figura 69 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em expulsões automáticas em todos os tanques pelo tempo gasto na expulsão.	106
Figura 70 - Gráfico de Porcentagem CO ₂ (%) x tempo (h) de uma expulsão de CO ₂	118

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro de parâmetros técnicos do sensor MH-Z14.....	48
Quadro 2 - Quadro de parâmetros técnicos do sensor MH-Z19C.....	49
Quadro 3 - Quadro de parâmetros técnicos do sensor MH-Z16.....	51
Quadro 4 - Algumas especificações do detector de gases MSA modelo ALTAIR 4XR.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre o efeito da concentração da soda cáustica e o carbonato e seus efeitos como detergente e germicida.	33
Tabela 2 - Perdas de CO ₂ e NaOH durante um CIP de detergente cáustico com 2% de concentração.	34
Tabela 3 - Tabela de dados de tempo e medições de pressão em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.	99
Tabela 4 - Tabela de dados de tempo e medições de umidade em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.	100
Tabela 5 - Tabela de dados de tempo e medições de umidade em expulsões manuais em BBTs e FMTs.....	100
Tabela 6 - Tabela de dados de tempo e medições de umidade em expulsões automáticas em BBTs e FMTs.	101
Tabela 7 - Tabela de dados de tempo e medições de temperatura em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.	102
Tabela 8 - Tabela de dados de tempo e medições de temperatura em expulsões manuais em BBTs e FMTs.	103
Tabela 9 - Tabela de dados de tempo e medições de temperatura em expulsões automáticas em BBTs e FMTs.	103
Tabela 10 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões manuais em BBTs e FMTs.	108
Tabela 11 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões manuais em BBTs.....	109
Tabela 12 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões manuais em FMTs.	110
Tabela 13 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões automáticas em BBTs e FMTs.....	112
Tabela 14 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões automáticas em BBTs.	112
Tabela 15 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões automáticas em FMTs.....	113

Tabela 16 - Tabela de detalhes de todas as expulsões realizadas entre o dia 12/04/2023 e 12/06/2023 e a quantidade de expulsões que receberam aumento de tempo e a média de tempo de aumento.....	114
Tabela 17 - Tabela de comparações de concentração de CO ₂ , tempo e O ₂ de liberação entre expulsões manuais e automáticas em BBTs e FMTs.	115
Tabela 18 - Tabela de comparações de concentração de CO ₂ , tempo e O ₂ de liberação entre expulsões manuais e automáticas em BBTs.	115
Tabela 19 - Tabela de comparações de concentração de CO ₂ , tempo e O ₂ de liberação entre expulsões manuais e automáticas em FMTs.....	116
Tabela 20 - Taxa de retirada de CO ₂ de um tanque de cervejaria pelo tempo de expulsão. ..	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ACK – *acknowledgement* ou reconhecimento
- ADC – *Analog Digital Converter*
- AISI – *American Iron and Steel Institute*
- ASME – *American Society of Mechanical Engineers*
- ASTM – *American Society for Testing and Materials*
- AWS – *Amazon Web Services*
- BBT – *Bright Beer Tank*
- BLE – *Bluetooth Low Energy*
- CBPF – Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
- CIP – *Cleaning in Place*
- CLPs – Controladores Lógicos Programáveis
- CO₂ – dióxido de carbono
- CPU – *Central Processing Unit*
- CUSO₄ – sulfato de cobre II
- DIN – *Deutsches Institut für Normung*
- EN – *European Standards*
- EPS – extra-polissacarídica
- FDA – *U.S. Food and Drug Administration*
- FMT – *Fermentation and Maturation Tank*
- GND – *ground* ou terra
- GPIO – *General Purpose Input/Output*
- GPU – *Graphics Processing Unit*
- HTTPS – *Hyper Text Transfer Protocol Secure*
- I2C – *Inter-Integrated Circuit*
- I2S – *Inter-IC Sound*
- IoT – *Internet of Things*
- IP – *Internet Protocol* ou Protocolo da Internet
- IR – *Infrared*
- KMnO₄ – permanganato de potássio
- M2M - *Machine-to-Machine* ou máquina para máquina
- MEMS – *Micro-Electro-Mechanical Systems* ou sistemas microeletromecânicos
- MQTT – *Message Queueing Telemetry Transfer*

Na₂CO₃ – carbonato de sódio

NaHCO₃ – hidrogenocarbonato de sódio ou bicarbonato de sódio

NaOH – hidróxido de sódio ou soda cáustica

NAT – *Network Address Translation* ou tradução do endereço de rede

NDIR – *Non-Dispersive Infrared* ou infravermelho não dispersivo

O₂ – oxigênio

PET – polyethylene terephthalate

PETG – *polyethylene terephthalate glycol*

PTFE – poli-tetra-flúor-etileno

PWM – *Pulse Width Modulation*

R/W – *read/write* ou ler/escrever

Ra – rugosidade média da superfície

RMS – *Root mean square* (valor quadrático médio ou valor eficaz)

RSSF – Redes de sensores sem fio

RSSI – *Received Signal Strength Indication*

RX – *receive* (recepção)

SCADA – *Supervisory Control And Data Acquisition* ou sistemas de controle supervisão e sistemas de aquisições de dados

SCL – *Serial Clock*

SDA – *Serial Data*

SDIO – *Secure Digital Input Output*

SEM – *Scanning Electron Microscope* ou Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

SPI – *Serial Peripheral Interface*

SQL – *Structured Query Language*

SSL – *Secure Sockets Layer*

TCP – *Transmission Control Protocol* ou Protocolo de Controle de Transmissão

TLS – *Transport Layer Security*

TTL – Transistor – transistor *logic*

TX – *transmit* (transmissão)

UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

USB – *Universal Serial Bus*

VDD – alimentação

VOL - volume

ε - absorvidade molar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
3 FABRICAÇÃO DA CERVEJA – COMPONENTES, ARMAZENAMENTO E LIMPEZA DOS EQUIPAMENTOS	20
3.1 CONSTRUÇÃO DE UM TANQUE DE FERMENTAÇÃO E DE PRODUTO FINAL ..	20
3.2 SISTEMA CLEANING IN PLACE (CIP).....	23
3.3 LIMPEZA EM TANQUES DE FERMENTAÇÃO E MATURAÇÃO.....	28
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
4.1 PROBLEMAS NO USO DE SODA CÁUSTICA NA LIMPEZA DOS TANQUES	31
4.2 LEI DE LAMBERT-BEER.....	35
4.3 ESTUDO DA FREQUÊNCIA DE ABSORÇÃO DA ESPÉCIE EM ANÁLISE	40
4.4 ESPECTROFOTOMETRIA DO DIÓXIDO DE CARBONO.....	41
4.5 SENSOR NÃO DISPERSIVO INFRAVERMELHO (NDIR) OU DISPERSIVO	43
4.6 ESCOLHA DO COMPRIMENTO DE ONDA PARA DETECÇÃO DE CONCENTRAÇÃO	44
4.7 FUNCIONAMENTO DE UM SENSOR DE CONCENTRAÇÃO DE CO ₂	45
5 MATERIAL E MÉTODOS	47
5.1 SENSORES DE CONCENTRAÇÃO DE CO ₂ UTILIZADOS	47
5.2 SENSOR DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA, UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA BME280	53
5.3 MICROCONTROLADOR ESP32	58
5.4 RASPBERRY PI 3 MODEL B+	60
5.4.1 Mosquitto.....	61
5.4.2 Telegraf.....	63
5.4.3 InfluxDB	63
5.4.4 PageKite.....	64
5.4.5 Grafana.....	66
5.4.6 Pilha Telegraf, InfluxDB e Grafana (TIG).....	66
5.5 CIRCUITO E MONTAGEM	68
5.6 METODOLOGIA DA EXPULSÃO DE CO ₂	73
5.7 METODOLOGIA DE EXPERIMENTOS	77
5.8 METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CO ₂ – MH-Z16.....	80

5.9 EXPERIMENTOS ANTERIORES	82
5.9.1 Caixa de medição e disposição dos sensores.....	82
5.9.2 Sensores de dióxido de carbono.....	83
5.9.3 Sistemas de aquisição e demonstração dos dados utilizados anteriormente.....	84
5.9.4 Antenas	86
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
6.1 MUDANÇA DE LOCAL DE MEDIÇÃO	87
6.2 FUNCIONAMENTO DOS SENSORES MH-Z14, MH-Z19C E MH-Z16	88
6.3 AVALIAÇÃO DAS ANTENAS	92
6.4 MEDIÇÕES NA LINHA DE FORNECIMENTO DE CO ₂	94
6.5 MEDIÇÕES NA LINHA DE AR ATMOSFÉRICO ESTERILIZADO	95
6.6 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA	98
6.7 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE UMIDADE DO AR DE EXPULSÃO DOS TANQUES	99
6.8 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO AR DE EXPULSÃO DOS TANQUES	101
6.9 MEDIÇÕES DE OXIGÊNIO PELOS CERVEJEIROS	103
6.10 RESULTADOS DE EXPULSÃO MANUAL	106
6.11 RESULTADOS DE EXPULSÃO AUTOMÁTICA	110
6.12 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS EXPULSÕES	114
6.13 REDUÇÃO DO TEMPO DE EXPULSÃO	118
7 CONCLUSÃO.....	120
REFERÊNCIAS	123
ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO SENSOR MH-Z16.....	129
ANEXO B – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM BBT EM UMA EXPULSÃO MANUAL	130
ANEXO C – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM FMT EM UMA EXPULSÃO MANUAL	131
ANEXO D – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM BBT EM UMA EXPULSÃO AUTOMÁTICA	132
ANEXO E – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM FMT EM UMA EXPULSÃO AUTOMÁTICA	133
APÊNDICE A – PÁGINA GRAFANA.....	134

1 INTRODUÇÃO

A automação nas cervejarias é cada vez mais crucial, viabilizando economia e segurança. O armazenamento e análise de dados são fundamentais, minimizando erros e aprimorando a operação. Nas indústrias cervejeiras atuais com Sistemas de Controle Supervisório e Sistemas de Aquisições de Dados (SCADA), o controle integral do sistema *Cleaning in Place* (CIP) é essencial para monitorar atividades. A análise dos dados e gráficos possibilita previsões e busca por correlações para futuras melhorias na cervejaria. Todos esses avanços simplificam o controle da operação da cervejaria, alcançando mínimos níveis de mão de obra (Briggs *et al.*, 2004).

O processo de fabricação de cerveja, conforme Hammond *et al.* (1999 *apud* Boulton; Quain, 2008), acaba ocasionalmente gerando contaminantes em diversos equipamentos, como tanques, tinas, linhas, bombas, trocadores de calor, entre outros. O sistema de uma cervejaria é muito importante para minimizar a entrada de microrganismos no produto, que vai desde ser um sistema fechado com tanques e linhas (inacessível para limpeza manual – evolução técnica) (Priest; Campbell, 2003), armazenamento a frio de cerveja no processo e remoção das superfícies restantes do processo de fabricação nos equipamentos utilizando um sistema de limpeza, como o CIP. Com isso, o sistema de limpeza é de extrema importância para garantir a qualidade da cerveja para o consumidor com o menor nível de contaminantes possível, que são reduzidos ao longo das etapas do processo de fabricação (Boulton; Quain, 2008).

O principal resíduo poluente que persiste na produção de cerveja é representado pelos biofilmes. Nas cervejarias, o uso predominante de aço inoxidável na fabricação de tanques e sistemas de tubulação propicia a aderência desses microrganismos à sua superfície, dando origem a comunidades que se protegem mutuamente e fornecem nutrientes para sustentar o crescimento contínuo desses conglomerados (Boulton; Quain, 2008). Vários trabalhos foram desenvolvidos no estudo dos biofilmes desde a década de 1970 que podem ser obtidos em Keevil *et al.* (1995), Coghlan (1996), Costerton *et al.* (1995, 1999), Stickler (1999) (*apud* Boulton; Quain, 2008, p. 526).

Há três fatores principais para que haja a limpeza e desinfecção na cervejaria, segundo Cords e Watson (1998 *apud* Boulton; Quain, 2008; Briggs *et al.*, 2004). São eles:

- a remoção de sujidades indesejadas que podem ser transportadas nas linhas e contaminar a cerveja ou o mosto;
- a remoção de microrganismos que poderiam estragar ou afetar a consistência e qualidade do produto, afetando adversamente a operação de partes da planta; e

- a necessidade de remover restos do processo e sujeira das superfícies que afetam o desempenho do processo, eliminando qualquer risco de deterioração microbiana.

Existem várias opções de sistemas de CIP, variando em produtos de limpeza (soda cáustica vs. ácido), temperatura (quente vs. fria), automação (automatizado vs. manual), além de quatro parâmetros essenciais: tempo, temperatura, ação química e ação mecânica (Boulton; Quain, 2008). O processo de limpeza envolve etapas variáveis conforme a planta industrial, resíduos e nível de limpeza desejado. O objetivo primordial é obter uma planta microbiologicamente limpa (Priest; Campbell, 2003).

O CIP alcalino (utilizando hidróxido de sódio – NaOH – soda cáustica) é o mais efetivo contra resíduos líquidos e sólidos mais complexos restantes do processo e que são encontrados na brassagem, fermentação e maturação. Além disso, a soda cáustica é mais eficaz contra os biofilmes (Czechowski e Banner, 1992 *apud* Boulton; Quain, 2008). A maior desvantagem da soda cáustica é sua reação com o dióxido de carbono (CO₂), formando o carbonato de sódio ou o hidrogenocarbonato de sódio, que não possui atividade detergente ou biocida significativa. Em um ambiente de alta concentração de CO₂, como um tanque, acaba causando vácuo, o que pode gerar uma implosão do tanque (Boulton; Quain, 2008; Priest; Campbell, 2003).

Para limpar tanques com altos níveis de CO₂, é essencial retirar o gás, usando ar atmosférico esterilizado para posteriormente empregar hidróxido de sódio com segurança. A expulsão pode ser manual ou automática, que são expulsões já empregadas na cervejaria. Após um período de expulsão, avalia-se a ausência de CO₂ conforme o olfato de um cervejeiro e um medidor de oxigênio no gás de saída. É possível perceber que são medidas indiretas do gás alvo, o CO₂, utilizando um equipamento que mede oxigênio e a utilização do olfato, totalmente subjetivo e passível de erros.

Foram analisados, com este projeto, os dados de diversas expulsões, de maneira automática e manual, para que fosse possível caracterizar melhor a atividade. Em outras unidades fabris, o processo de expulsão de CO₂ passa por abrir o fundo do tanque e colocar uma vela dentro, de forma que, se ela continuar acesa, há mais oxigênio no ambiente e, se tiver menos oxigênio, a chama irá se apagar. Na indústria que o projeto foi testado, já estava sendo testado não abrir o fundo do tanque e o novo processo de medição proposto acaba sendo um avanço em relação às outras unidades, já que há a medição direta do CO₂, que é o gás alvo.

Ultimamente, os sensores que medem a concentração de CO₂ do tipo *Non-Dispersive Infrared* (NDIR) – infravermelho não dispersivo – têm se destacado como os preferidos para medições que demandam requisitos básicos. Isso ocorre devido à capacidade desses sensores de detectar as linhas de absorção de gases, como o CO₂, em uma faixa de comprimento de onda

específica. A utilização de sensores NDIR oferece ao projeto uma excelente relação custo-benefício, sendo especialmente adequada para ambientes sujeitos à degradação acelerada, pois permite a substituição dos sensores de maneira fácil e econômica (SGX Sensortech, 2007).

Esses sensores têm seu funcionamento baseado na lei de Lambert - Beer (SGX Sensortech, 2007; Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018), que é uma técnica espectroscópica muito utilizada para a determinação de concentrações de gases, por exemplo, que absorvem a luz em um determinado comprimento de onda, nesse caso o infravermelho. Então, essa técnica baseia-se na interação da luz com a matéria (Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018). O comprimento de onda de absorção é característico de cada molécula. No caso do CO₂, é na região do infravermelho e essa interação acaba causando transições entre níveis de energia eletrônicos, agitações vibracionais e rotacionais na molécula (Schaeffer, 2004).

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo de monitoramento de concentração de dióxido de carbono (empregando sensores NDIR), temperatura e umidade em tanques de cerveja, com o objetivo de determinar o momento ideal para a liberação do tanque para procedimentos de assepsia, medindo em tempo real enquanto é feita a expulsão automática ou manual. O projeto se fundamenta em pesquisa de campo estabelecendo critérios numéricos para determinar quando é seguro liberar um tanque para a assepsia. Isso é feito com base em diversas medições, considerando tanto a avaliação subjetiva do cervejeiro pelo olfato quanto a medição de oxigênio utilizando o medidor de gases, que são as formas padrões utilizadas.

Os dados coletados são transmitidos a um Raspberry Pi, que armazena os dados em um banco de dados InfluxDB. Esses dados podem então ser visualizados em um painel no Grafana, proporcionando aos cervejeiros e operadores uma interface gráfica para acompanhamento e análise. A análise dos dados obtidos por meio das medições permitirá a avaliação crítica da atividade, fornecendo suporte para decisões futuras e iniciativas de melhoria. Além disso, possibilitará a discussão sobre a redução do tempo de expulsão. Como resultado, é esperado que haja uma diminuição no tempo de operação dos compressores de ar, contribuindo para a economia de energia elétrica nas instalações da unidade.

O trabalho está estruturado em: capítulo 2, objetivos. No capítulo 3, Fabricação da cerveja – componentes, armazenamento e limpeza dos equipamentos. No capítulo 4, Fundamentação teórica; detalhando sobre a reação NaOH e CO₂; Lei de Lambert-Beer e outros detalhes do sensor de concentração de CO₂. No capítulo 5, Materiais e métodos; detalhando sobre os sensores utilizados e circuito; os serviços de comunicação, transferência e apresentação de dados no Raspberry Pi; a metodologia de expulsão, experimentos e calibração do sensor de CO₂. No capítulo 6, Resultados e discussão e no capítulo 7, Conclusão.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é desenvolver um equipamento para a medição de concentração de CO₂, temperatura e umidade do ar de saída dos tanques durante a expulsão de CO₂ dos tanques de cerveja, para posterior realização de assepsia com hidróxido de sódio.

Com base nas medições de concentração de dióxido de carbono, temperatura e umidade do gás de expulsão dos tanques:

- será definido se esses parâmetros são possíveis para a liberação do tanque;
- estabelecer os valores ideais dos parâmetros para garantir uma liberação segura do tanque para fins de assepsia; e
- analisar o tempo necessário para atingir esses valores e avaliar oportunidades de redução no uso de compressores de ar, que são exclusivamente empregados na etapa de expulsão de CO₂ dos tanques. Uma redução significativa nesse uso resultará em economias consideráveis a longo prazo em termos de consumo de energia elétrica.

3 FABRICAÇÃO DA CERVEJA – COMPONENTES, ARMAZENAMENTO E LIMPEZA DOS EQUIPAMENTOS

No processo de fabricação da cerveja são utilizados quatro principais ingredientes: malte de cevada, lúpulo, levedura e água, que são responsáveis pelos resíduos resultantes em tanques e equipamentos de uma cervejaria. Como resíduos, há muitos açúcares, amidos, proteínas, compostos polifenólicos, resinas, óleos e minerais. A maior parte dos componentes da cerveja são solúveis em água, sendo facilmente removidos apenas com água ou com produtos de limpeza alcalinos (utilizando principalmente hidróxido de sódio). Alguns fatores, como pH ácido e compostos resultantes da fabricação da cerveja, tais como complexos tanino-proteínas, são difíceis de remover das superfícies e a limpeza inadequada resultará em acúmulo visível e riscos de contaminação (Kanegsberg; Kanegsberg, 2020).

Em indústrias cervejeiras de grande porte, os tanques de fermentação são muito grandes e do tipo cilíndrico com o fundo cônico e fechado, necessitando de uma higienização de alta qualidade (Boulton; Quain, 2008). Esses tanques são fabricados em aço inoxidável, sendo o mais liso possível para evitar deposição de rejeitos da fabricação de cerveja que possam gerar possíveis contaminações (Briggs *et al.*, 2004).

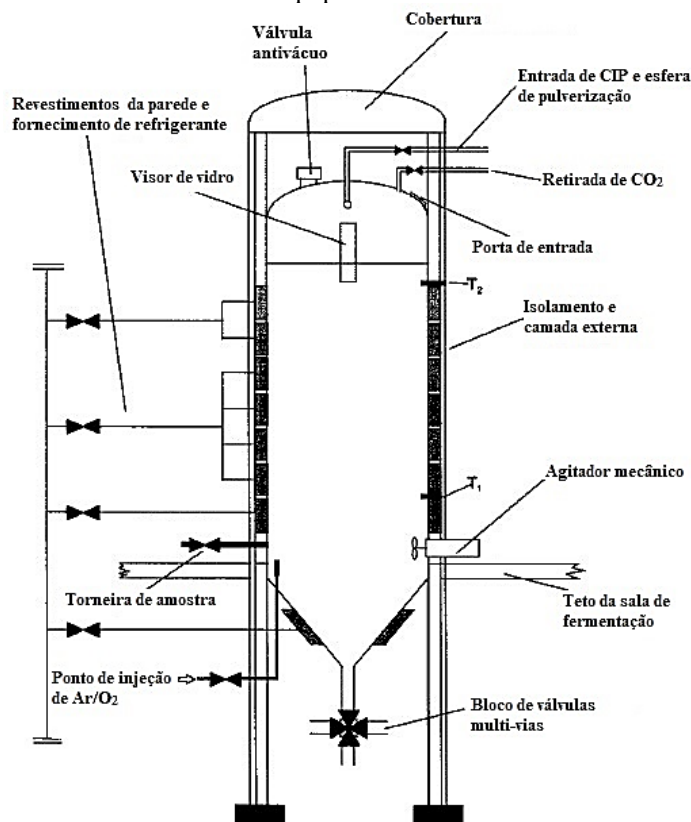
A utilização de um sistema CIP é essencial em cervejarias maiores por ser impossível limpar os equipamentos de forma rápida para manter a produção, além de vários riscos envolvidos nessa atividade. O controle de higiene e a limpeza da planta são essenciais na fabricação de cerveja, um produto alimentício. Equipamentos sujos adicionarão impurezas à cerveja, ocasionando problemas desagradáveis, além de problemas aos equipamentos (Stewart; Russell; Anstruther, 2017). O foco do estudo é na utilização de NaOH no CIP, o que necessita da retirada de CO₂, um subproduto da fermentação utilizado para pressurização de tanques.

3.1 CONSTRUÇÃO DE UM TANQUE DE FERMENTAÇÃO E DE PRODUTO FINAL

Na fabricação da cerveja são utilizados tanques cilíndricos verticais com fundo cônicos para armazenamento na fermentação, maturação e produto final. Uma importante característica dos tanques, principalmente para fermentação e maturação, é que o cone seja angulado em 70° (desenvolvido por Leopold Nathan em 1908), para permitir que a levedura decante no cone no final do processo de fermentação, permitindo que boa parte do fermento seja retirado (Briggs *et al.*, 2004), além de facilitar o esvaziamento e a limpeza. Na Figura 1 é possível visualizar o desenho de um modelo de tanque, utilizado em grandes cervejarias, com todo seu sistema que

são equipamentos como transmissores de pressão e de temperatura, entrada e saída de CIP, entrada e saída de produto, camisas de resfriamento, válvulas de sobrepessão, válvulas antivácuo, entre outros. Esses tanques podem ter capacidade de armazenamento de 9000 hl ou 3800 hl na unidade fabril em que o projeto é utilizado.

Figura 1 - Modelo de tanque de grandes cervejarias com várias entradas e saídas de linha, válvulas, entre outros equipamentos.



Fonte: Adaptado de Boulton; Quain, 2008.

As superfícies internas de tanques e linhas em cervejarias devem ser facilmente limpas e duráveis para esterilização e limpeza, incluindo produtos da cerveja (Boulton; Quain, 2008). O material utilizado na fabricação dos tanques e linhas em cervejarias é o aço inoxidável (liga de aço – níquel – cromo), que é insensível a ácidos e alcalinos (Kunze; Manger, 2004). Geralmente, os aços utilizados são inoxidáveis e austeníticos, ou seja, aços que contenham carbono, que forma um carboneto que pode ser estabilizado em temperaturas normais pela inclusão de elementos como cromo, níquel e molibdênio, para melhorar a resistência à corrosão (Boulton; Quain, 2008; Briggs *et al.*, 2004). A adição de molibdênio nessa liga torna o material mais resistente, mas acaba ficando mais caro. Essa mistura cria um material resistente à limpeza e de grande duração (Kunze; Manger, 2004).

Na unidade são utilizados diferentes tipos de aço, escolhidos com base nos tipos de produtos que passam ou ficam armazenados naquele local. Um dos exemplos de aço utilizados é o de código 1.4313 (comumente utilizado na Alemanha) (Steinecker, 2021). Seu código é DIN X5CrNi134, equivalente à AISI 415, EN 10088-1, ASTM A240, ASME SA240. Sua composição química é: Cromo (12–14%), Níquel (3,5–4,5%), Molibdênio (0,3–0,7%), Carbono (0–0,05%) e Ferro como componentes primários. Além disso, a liga pode conter Silício (0–0,07%), Fósforo (0–0,04%) e Enxofre (0–0,025%) em quantidades baixas (Virgamet, 2022).

Esses tanques devem ter o seu corpo o mais liso possível e não ter ranhuras a nível microscópico, da mesma forma para as soldas. O controle de manufatura desses tanques deve ser bem detalhado, principalmente na superfície do aço inoxidável, para evitar que haja áreas que possam fornecer um caminho para possíveis contaminações microbianas (Briggs *et al.*, 2004; Kunze; Manger, 2004). Além disso, o material em contato com o líquido deve ser inerte; primeiro, para garantir que componentes da cerveja ou mosto não sejam adsorvidos em sua superfície e, segundo, para que nenhum material potencialmente tóxico possa ser liberado para o produto (Boulton; Quain, 2008).

A irregularidade resultante da fabricação do aço inoxidável através de uma ranhura de profundidade na superfície é chamada de rugosidade da superfície. Cada parte do tanque ou da tubulação apresenta valores aceitáveis e médios da rugosidade da superfície, incluindo suas soldas. A rugosidade média da superfície (R_a) de um tanque deve ser inferior a $0,8 \mu\text{m}$. Após ser polido com métodos mais caros e específicos, é possível reduzi-la para $0,25 \mu\text{m}$, com uma média de $0,4$ a $0,5 \mu\text{m}$. No entanto, se a chapa de aço inoxidável, na fabricação, apresentar uma rugosidade média entre $0,3 \mu\text{m}$ e $0,5 \mu\text{m}$, já será suficiente para atender aos padrões de uma cervejaria (Briggs *et al.*, 2004; Kunze; Manger, 2004).

As tubulações são produzidas com, em média, $1,6$ a $2,5 \mu\text{m}$ de rugosidade para tubos sem soldas; já com solda, a média é de $0,8$ a $1,6 \mu\text{m}$. As soldas apresentam, em média, uma rugosidade superficial de $0,4$ a $0,6 \mu\text{m}$. A superfície do cone é produzida de outra forma, diferente do corpo do tanque, por uma questão de segurança na limpeza do tanque e para diminuir as chances de restos de sujidades ficarem presos ao cone. A rugosidade média do cone é de $0,25 \mu\text{m}$ (Kunze; Manger, 2004).

Com base no que foi descrito sobre a profundidade de ranhuras superficiais no aço dos equipamentos, levando em conta o tamanho da cultura de levedura, que é de $6,0$ a $10,0 \mu\text{m}$, uma célula desse tamanho não pode ser mantida em uma superfície rugosa como a do padrão de fabricação dos tanques ordena para a rugosidade superficial. Porém, bactérias e esporos são da ordem de $0,7$ a $4,0 \mu\text{m}$, portanto, podem ficar presos em uma superfície mais profunda e acabar

se mantendo e multiplicando. Em geral, são pequenas leveduras e bactérias selvagens que acabam se estabelecendo e multiplicando nessas condições, gerando contaminações que, se os tanques não forem muito bem examinados, correm o risco de contaminar a cerveja. Apesar disso, elas podem ser retiradas com limpezas e esterilizações mais vigorosas. Assim, o monitoramento biológico das cervejas fabricadas é essencial (Kunze; Manger, 2004).

Os tanques de fermentação e maturação, principalmente, terão um alto nível de sujeira orgânica por restos, majoritariamente, de leveduras nas paredes e fundo do cone, além da tubulação de esvaziamento do tanque, por isso devem ser limpos por uma combinação de impacto líquido e ação de detergente.

3.2 SISTEMA CLEANING IN PLACE (CIP)

No processo de fabricação de cervejas, para manter os padrões de qualidade por um longo período de tempo, é essencial que todo o processo seja feito em linhas, tanques e equipamentos que sejam limpos frequentemente. Os principais parâmetros, especialmente ao consumidor, que podem ser afetados por sujidades são: sabor e cheiro da cerveja, estabilidade da espuma e sua turbidez. A limpeza da planta tem um desempenho essencial nesses pontos (Kunze; Manger, 2004).

A limpeza serve para remover resíduos e depósitos de produtos, como proteínas, resinas, óleos, sais orgânicos e inorgânicos, microrganismos, entre outros. A superfície pode ser limpa com produtos químicos desinfetantes e esterilizada por tratamento térmico. O meio de limpeza mais simples e menos problemático é a água (Kunze; Manger, 2004). Uma superfície é fisicamente limpa quando está livre de sujeira, incrustações ou resíduos; quimicamente limpa quando também está livre de detergente e desinfetante e microbiologicamente limpa quando seus microrganismos são reduzidos a um nível aceitável (Stanga, 2010).

O sistema CIP é assim chamado por ser fixo, ou seja, faz a limpeza no local e não necessita desmontar ou abrir o equipamento. Isso economiza muito tempo de trabalho, principalmente por ser um sistema automatizado, com pouco ou nenhum envolvimento manual por parte do operador (Kunze; Manger, 2004; Stanga, 2010).

Em grandes cervejarias, é impossível fazer limpezas manuais em tanques e tubulações pelo tamanho das instalações. Seriam gastos muito material, tempo, dinheiro e o risco de contaminação ainda existiria, por não ser feita a limpeza da maneira correta, o que poderia causar ainda grandes acidentes com os operadores. Então, as cervejarias costumam utilizar estações de limpezas e esterilização dos equipamentos, tanques e tubulações.

Muitos dos equipamentos modernos de uma cervejaria, tais como centrífugas, filtros e trocadores de calor a placas, não podem ser abertos de forma convencional e rápida. As tubulações acabam sendo muito extensas e fica impossível desmontar juntamente com as válvulas. Acaba ficando obrigatório que todos os equipamentos sejam fechados e que todas as superfícies internas em contato com o produto possam ser desinfetadas por circulação interna de fluidos de limpeza. Sem contato direto com pessoas, torna-se possível utilizar produtos de limpeza mais agressivos e temperaturas mais altas, desde que sejam compatíveis com todas as partes do sistema que estão sendo limpas. Esses equipamentos são limpos através de estações CIP (Stewart; Russell; Anstruther, 2017).

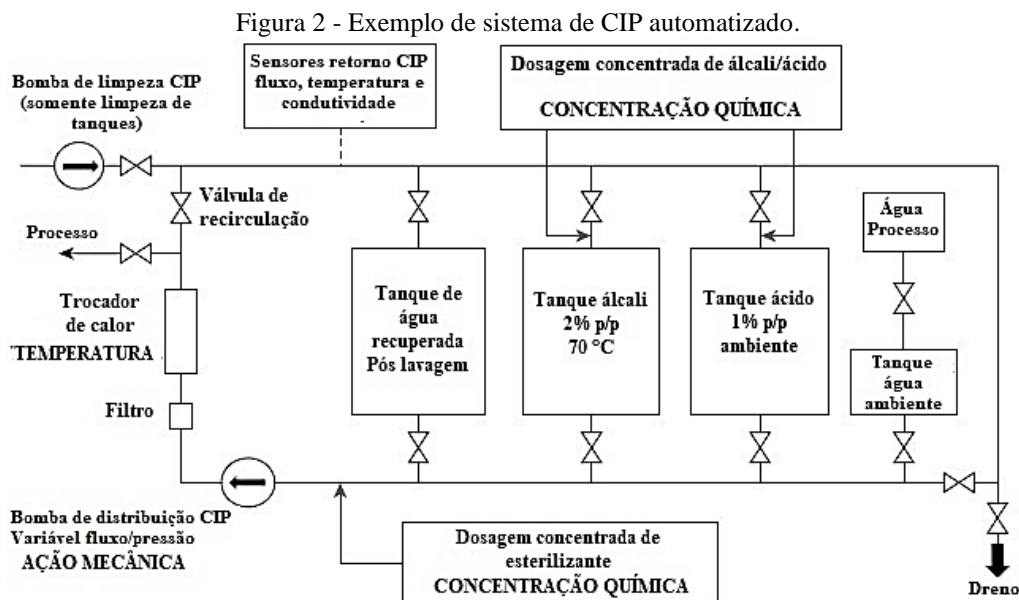
Os sistemas CIP são caros tanto em capital quanto em receita, portanto, é essencial montar o sistema de acordo com o uso. O projeto da fábrica de cerveja deve ser adequado para uma boa limpeza. Vários fatores afetam a eficiência da limpeza, incluindo a força dos agentes de limpeza da planta que está sendo limpa, a duração do tratamento, a temperatura e a natureza dos agentes químicos utilizados. O fluido de limpeza é enviado através da tubulação do equipamento que está sendo limpo para esferas de pulverização ou *spray ball* (em caso de tanques), que distribuem jatos dos produtos de limpeza para que todos os pontos do equipamento e superfícies sejam limpos, e, posteriormente, recircula o fluido de volta para os tanques na estação de CIP (Briggs *et al.*, 2004).

Em um sistema CIP, os agentes de limpeza são armazenados em tanques próximos aos equipamentos e tubulações que necessitam ser limpos. Os agentes de limpeza, então, são entregues dos tanques de armazenamento à planta por bombas. Normalmente, uma bomba de limpeza menor retorna os fluidos para os tanques de limpeza para formar um circuito CIP. Uma tubulação adicional permite que o fluxo de líquido seja direcionado para o dreno quando necessário. Todo o arranjo é denominado um conjunto CIP (Briggs *et al.*, 2004).

Uma planta de CIP modelo (Figura 2) é composta de tanques de: água recuperada (vinda de enxágues de limpezas anteriores), água fresca, soda cáustica, ácido, entre outros, conforme necessário. Há uma bomba de circulação de fluido, estação de aquecimento, dreno, medidores de fluxo, temperatura e condutividade. Conforme a condutividade, os tanques recebem mais produto concentrado para chegar a um valor pré-definido. A dosagem de produto esterilizante é feita na linha, não como o ácido e soda nos tanques.

Para a limpeza de algum equipamento, as válvulas de tanques e tubulações referentes ao tipo de limpeza são abertas em cada etapa e o fluido é bombeado para o processo de maneira automática, comunicando com Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) que dão os comandos necessários em um sistema fechado. A duração do fluxo, quantidade, temperatura,

entre outros fatores, são definidos pela empresa, conforme resultados práticos obtidos em outras cervejarias. Além disso, em cada área é utilizado um tipo de limpeza (Kunze; Manger, 2004).



Fonte: Adaptado de Stewart; Russell; Anstruther, 2017.

Toda estação de CIP deve ter pelo menos duas bombas; uma de envio da solução de limpeza para o equipamento, e outra para retorno da solução de limpeza para o tanque de armazenamento na estação de CIP, formando um circuito fechado de circulação. Para garantir que não haja retenção de produto na volta para a estação de CIP, a bomba de retorno deve trabalhar com desempenho máximo de até 25% mais vazão do que a bomba de envio. A velocidade do fluxo dos produtos é essencial para a limpeza e um bom funcionamento de equipamentos de CIP a longo prazo, principalmente quanto à preocupação de cavitação de bombas (Kunze; Manger, 2004). A taxa de envio de fluidos de limpeza deve ser equilibrada com as taxas de drenagem para que não ocorra inundação no equipamento e, assim, anule a ação de limpeza das esferas de pulverização. Em alguns projetos, os agentes de limpeza são enviados em série de rajadas para evitar inundação. Além disso, a duração de cada tratamento deve permitir uma drenagem adequada para evitar misturas de produtos (Briggs *et al.*, 2004).

O conjunto de CIP utilizado na unidade fabril é do tipo de recuperação parcial e total, o que permite economizar alguns custos ao recuperar uma parte dos fluidos de limpeza. Nestes sistemas, parte do produto de limpeza diluído é jogado fora nas etapas, mas a maior parte fica dentro dos tanques. Em todo reinício de limpeza, os tanques são checados automaticamente e reabastecidos com produto até determinada condutividade para garantir que este tenha a força correta de limpeza e que parte seja reutilizado. Isto ocorre similarmente com a água de enxágue,

que, em alguns processos, pode ser devolvida ao conjunto CIP e reutilizada em uma pré-lavagem, visto que em alguns equipamentos as sujidades não são tão onerosas e o equipamento é enxaguado com água limpa posteriormente. Um sensor de temperatura é necessário para definir a temperatura para tratamentos quentes. Na utilização de ácido e soda cáustica é comum monitorar a força por meio de um sensor de condutividade. Um sistema de perda total é mais provável de ser encontrado em aplicações nas quais houver sujidade pesada e um detergente recuperado possa sofrer uma forte contaminação (Briggs *et al.*, 2004; Priest; Campbell, 2003).

Existe um requisito básico de energia para obter uma limpeza satisfatória na qual é possível quantificar a energia total de limpeza necessária como a soma da energia química (força do agente de limpeza), a energia mecânica e a energia térmica empregadas no CIP (Singh Fisher, 1999 *apud* Briggs *et al.*, 2004; Priest; Campbell, 2003). Juntamente com esses fatores, o tempo de ação também é essencial em uma limpeza eficaz (Boulton; Quain, 2008).

Um agente químico de limpeza deve ter as seguintes propriedades (Kunze; Manger, 2004):

- alta solubilidade em água;
- bom poder de limpeza no que diz respeito à contaminação por sujidades;
- eficácia em baixas temperaturas;
- alto poder em umectação;
- pouca redeposição de sujeira;
- não formar espuma;
- fácil de enxaguar, sem criar depósitos;
- sem reações com sais da água;
- sem corrosão para materiais dos equipamentos;
- fácil de usar;
- custo baixo;
- pouca poluição de águas residuais; e
- uso de produtos químicos biologicamente degradáveis.

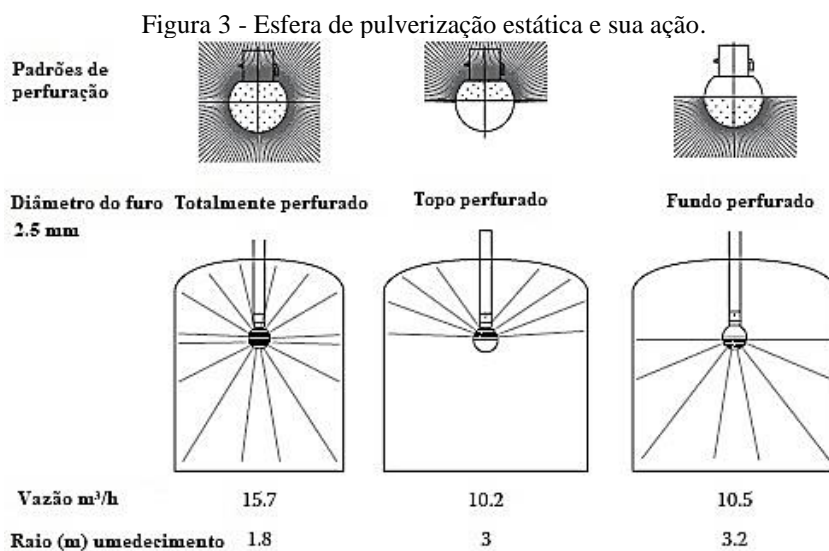
A maioria dos produtos de limpeza fornecidos são à base de hidróxido de sódio, por ser um agente de limpeza muito eficiente contra microrganismos em ambientes com maior carga orgânica. Então, os detergentes à base NaOH são mais eficazes contra os biofilmes do que produtos de limpeza à base de ácidos (Czechowski e Banner, 1992 *apud* Boulton; Quain, 2008).

Os ácidos não conseguem uma eficiência de limpeza tão alta em ambientes muito sujos. Embora eficazes contra bactérias, os detergentes ácidos têm pouca atividade biocida com leveduras (Boulton; Quain, 2008). Porém, os ácidos são cada vez mais utilizados em limpezas

justamente por sua compatibilidade com o CO₂, oferecendo economia de tempo, de produto e de CO₂ (Priest; Campbell, 2003). As vantagens da limpeza utilizando ácido são significativas e incluem (Boulton; Quain, 2008):

- não retirar o CO₂ do tanque;
- os tanques não precisam ser ventilados ou abertos e podem ser limpos sob pressão máxima de CO₂;
- são mais fáceis de serem enxaguados; e
- são utilizados a frio (temperatura ambiente), com conseqüente economia de utilidades.

Na limpeza dos tanques é utilizada a pulverização dos produtos a baixa pressão (1 a 2 bar), que são fluxos de envio dos agentes de limpeza de 20 a 75 m³/h (ou 200 a 750 hl/h) para o tanque, que, com a esfera de pulverização, acaba criando uma sobrepressão de até 6 bar (Kunze; Manger, 2004; Stewart; Russell; Anstruther, 2017). As esferas de aço inoxidável para pulverização no topo dos tanques são feitas com diversas aberturas de modo a alcançar o tanque todo e pulverizar os jatos da solução de limpeza em todos os lados. Exemplos de esferas de pulverização e sua ação podem ser vistos na Figura 3 (Boulton; Quain, 2008). A esfera de pulverização utilizada na unidade fabril é a do modelo totalmente perfurada.



Fonte: Adaptado de Stewart; Russell; Anstruther, 2017.

Esses líquidos são pulverizados por jateamento do topo do tanque pelas paredes uniforme e continuamente para que molhem todas as áreas e, assim, seja possível deixar com que as soluções químicas de limpeza e desinfecção atuem sobre os microrganismos e facilite a remoção das sujidades (Boulton; Quain, 2008; Stewart; Russell; Anstruther, 2017).

Todos os processos automáticos são realizados com base em receitas, que seguem um passo a passo de cada atividade. O sistema CIP deve ter alguns monitoramentos que ajudam na eficiência da limpeza, como (Kunze; Manger, 2004; Stanga, 2010):

- Velocidade de fluxo: conectado à força mecânica de um fluxo turbulento (limpeza de tubulações);
- Taxa de fluxo: ligada à limpeza de grandes superfícies (limpeza de tanques);
- Pressão: ligada à força mecânica de impacto e ao volume de solução na superfície (ajuste de esferas de pulverização);
- Condutividade: ligada à concentração de cada agente de limpeza; e
- Temperatura: ligada à velocidade das reações químicas com o solo.

Os ciclos de sistema CIP são revisados periodicamente e, quando necessário, são otimizados. O sucesso de uma limpeza eficaz deve incluir como fatores, além dos produtos utilizados e sua força, o custo financeiro, utilidades (vapor e ar estéril, por exemplo), tempo e temperatura (Boulton; Quain, 2008).

3.3 LIMPEZA EM TANQUES DE FERMENTAÇÃO E MATURAÇÃO

Se tratando dos tanques de fermentação/maturação e de cerveja filtrada, que são foco deste estudo, geralmente, eles apresentam um resíduo espumoso marrom claro que é de natureza proteica, acumulam levedura na parte superior ou inferior do tanque e há depósitos minerais (conhecidos como *beerstone*) que podem ser limpos utilizando ácidos. Produtos de limpeza alcalinos são usados para a maioria das sujidades da cervejaria; lavagens ácidas são feitas, geralmente, quando não há tanta sujidade ou quando a maior parte das sujidades já foi retirada, utilizando produtos de limpeza alcalinos (Kanegsberg; Kanegsberg, 2020).

O processo de fabricação de cerveja moderno tende a ser totalmente fechado para garantir que uma barreira microbiológica seja mantida entre os líquidos do processo e o ambiente externo. Para um processo complexo como o cervejeiro, é necessário adotar um plano de amostragem para garantir que todas as etapas nas quais houver risco de introdução de contaminantes sejam verificadas (Boulton; Quain, 2008; Briggs *et al.*, 2004).

As cervejas passam a maior parte do tempo armazenadas em tanques, proporcionando condições ideais para a sobrevivência de microrganismos, que se agrupam em nichos propícios ao desenvolvimento de contaminações. A coexistência desses microrganismos torna a detecção e a erradicação completa deles um desafio significativo. Não é suficiente eliminar parcialmente

ou a maioria desses organismos, uma vez que qualquer resíduo remanescente tem a capacidade de se reproduzir exponencialmente em um curto espaço de tempo, dando origem a milhões de novas células. Alguns pontos a serem observados são zonas “mortas”, como válvulas e flanges, onde as limpezas são mais difíceis ou ficam em ângulos que o produto usado na limpeza não consegue penetrar e, assim, possibilita a criação de células. É importante também que todas as bombas, curvas, esferas de pulverização, entre outros, se esvaziem autônoma e completamente (Kunze; Manger, 2004).

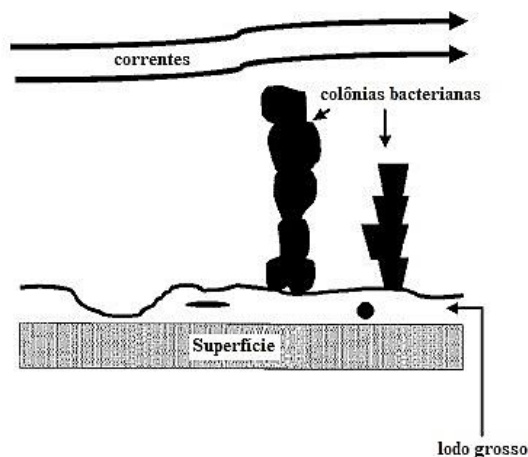
O processo de limpeza apresenta basicamente quatro fases (Briggs *et al.*, 2004; Priest; Campbell, 2003):

- O umedecimento da superfície para permitir o contato entre o detergente e os resíduos – efeito físico;
- Ação química no resíduo. Essa fase pode apresentar, pelo menos, três interações separadas, sendo:
 - a. ação de ácidos em incrustações minerais para dissolver os depósitos de incrustações inorgânicas;
 - b. reações de hidrólise para solubilizar proteínas, e
 - c. a saponificação por reação cáustica de componentes oleosos.
- A dispersão de partículas de resíduos grandes a partículas finamente divididas – efeito físico; e
- A suspensão em solução de qualquer resíduo removido – efeito físico.

Microrganismos em biofilmes, ligados por polissacarídeos extracelulares, são organizados de forma a aproveitar ao máximo os nutrientes disponíveis enquanto ocupam um local protegido. O aço inoxidável é facilmente colonizado por esses microrganismos, onde eles se ligam às superfícies e formam comunidades multicelulares (Boulton; Quain, 2008; Briggs *et al.*, 2004). Muitas bactérias comuns de deterioração de cerveja são adequadas à formação de biofilmes (Czechowski e Banner, 1992 *apud* Briggs *et al.*, 2004). Os biofilmes representam causas significativas de deterioração em instalações cervejeiras, além de serem resistentes à remoção, constituindo fontes persistentes de contaminação (Briggs *et al.*, 2004).

Os biofilmes têm a aparência de esferas empilhadas umas sobre as outras, formando estruturas organizadas verticalmente, como visto na Figura 4. A camada da base consiste em uma matriz extra-polissacarídica (EPS) derivada de micróbios que auxilia na fixação e fornece proteção para micróbios encapsulados (Boulton; Quain, 2008).

Figura 4 - Esquema de formação dos biofilmes com uma camada da base entre 5 e 10 µm e “torres” que se elevam de 100 a 200 µm.



Fonte: Adaptado de Boulton; Quain, 2008.

Os biofilmes crescem próximos a canais de nutrientes que são formados. Estes fornecem nicho para comunidades puras e mistas, o que permite que os nutrientes sejam disponibilizados entre elas. Os biofilmes são significativamente mais resistentes à remoção e morte através do tratamento com detergentes e biocidas. Uma explicação para esse fator é a proteção oferecida pelo lodo formado, o que acaba limitando o alcance do produto de limpeza. Além disso, algumas células, quando presentes em um biofilme, alteram seu fenótipo para se tornarem mais resistentes aos agentes antimicrobianos. O grau de proteção dos biofilmes pode ser estimado como 10 a 100 vezes maior do que em formas planctônicas (Boulton; Quain, 2008).

Conforme estudo de Storgards *et al.* (1997 *apud* Boulton; Quain, 2008, p. 529) sobre a importância dos biofilmes na higiene, foi possível chegar ao fato que todas as leveduras estudadas (uma cepa diastática de *S. cerevisiae*, *P. membranfaciens* e *B. anomalus*) se ligaram ao aço inoxidável e foram classificadas como “fortes produtoras de biofilme”. Na unidade fabril em que o projeto foi testado utiliza-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

Para a remoção de sujidades pesadas em tanques de maturação e fermentação são utilizados detergentes ácidos e cáusticos em sequência. Neste caso, primeiro será utilizada a soda cáustica para remover a pior camada de sujidades e, em seguida, é feita uma limpeza à base de ácido (Briggs *et al.*, 2004).

O hidróxido de sódio é particularmente eficaz em solos proteicos e biofilmes. O principal modo de ação do hidróxido de sódio é a hidrólise. As gorduras são hidrolisadas em sais de ácidos graxos mais solúveis, chamados sabões e glicerol. Já as proteínas, em fragmentos menores e aminoácidos (Barth; Farber, 2019).

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O maior problema encontrado no CIP alcalino é justamente na combinação entre CO_2 e NaOH . Fica necessário explicar como os dois reagem e expor experiências de expulsões e CIPs realizados com os dois produtos. Isso acaba mostrando ainda mais a importância deste trabalho para o tema, como uma segurança para equipamentos e pessoas.

Adentrando nos estudos necessários para a utilização dos sensores de concentração de CO_2 , inicialmente o espectrofotômetro foi inventado para estimar o teor de vitaminas em alimentações militares dos Estados Unidos. Depois se tornou um dos instrumentos de medição mais utilizados de todos os tempos em vários campos da ciência experimental. O espectrofotômetro é um dispositivo que caracteriza substâncias (nesse caso a concentração) em termos de sua capacidade de absorver diferentes partes do espectro eletromagnético (Ashfaq-e-Alam; Islam; Faria, 2017). A detecção de concentração do CO_2 é baseada em leis e estudos de física quântica, espectroscopia e a lei de Lambert-Beer.

A precisão necessária e o custo são outros fatores que influenciam a escolha do sensor. Um dos métodos mais barato e utilizados amplamente, é o de detecção de concentração de CO_2 baseado na absorção de energia na faixa do infravermelho. Sensores deste tipo medem o espectro vibracional de uma amostra através de sua absorção com o infravermelho. A quantidade de energia absorvida está relacionada ao número de moléculas presentes na amostra e, assim, demonstra a concentração da molécula em estudo, pois absorver luz é uma das propriedades físicas mais características das moléculas (Kanegsberg; Kanegsberg, 2020).

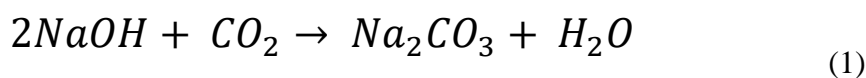
4.1 PROBLEMAS NO USO DE SODA CÁUSTICA NA LIMPEZA DOS TANQUES

Antes de citar sobre os problemas de CIP envolvendo a soda e o CO_2 , são elencados quatro tipos de circunstâncias que podem gerar vácuo em um tanque (Boulton; Quain, 2008):

- esvaziar o tanque fechado sob gravidade;
- o resfriamento rápido do tanque após CIP quente ou esterilização;
- reações químicas que ocorrem dentro do espaço livre do tanque (particularmente conversão de gases como o dióxido de carbono em carbonato de sódio ao usar hidróxido de sódio como agente de limpeza); e
- utilização de sifão entre tanques ou reservatórios para transferência de conteúdo em que há um tubo no topo de um dos tanques e desce para outro tanque.

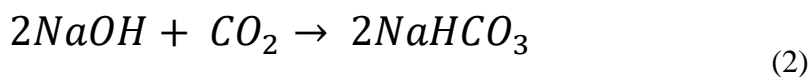
Enquanto os tanques são esvaziados, ocorre um processo de centrifugação e filtragem para remover impurezas, proteínas e leveduras. Durante esse processo, diversas sujidades vão se acumulando nos tanques e resta no tanque CO_2 , que é um subproduto da fermentação. Esse gás desempenha um papel importante ao pressurizar os tanques. Além disso, auxilia no esvaziamento dos tanques, no transporte de líquidos de um local para outro, na desaeração da água e na gaseificação das cervejas.

Existem duas grandes desvantagens na utilização de hidróxido de sódio nesses tanques. A primeira é que o hidróxido de sódio reage com o CO_2 , formando o carbonato de sódio (Na_2CO_3) ou o hidrogenocarbonato de sódio (NaHCO_3 – bicarbonato de sódio), dois tipos de produtos diferentes, dependendo da sua reação (Kanegsberg; Kanegsberg, 2020). Uma das reações que gera carbonato de sódio, pode ser vista na Equação 1, que é um produto insolúvel, que precipita e faz com que o hidróxido de sódio se torne ineficaz na limpeza, já que há sua diminuição. O carbonato e o bicarbonato gerados são agentes de limpeza, porém eles não contribuem com tanta alcalinidade quanto o cáustico. Além de reduzir a eficácia do hidróxido de sódio, o CO_2 é consumido na reação, sendo um produto muito valioso perdido. Além disso, essa reação gera vácuo e pode implodir o tanque. Portanto, é necessário remover o dióxido de carbono antes de realizar a limpeza dos tanques (Boulton; Quain, 2008; Kanegsberg; Kanegsberg, 2020; Kunze; Manger, 2004).



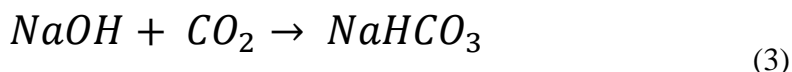
Hidróxido de sódio + dióxido de carbono → carbonato de sódio + água

Uma outra possível reação pode gerar bicarbonato de sódio (NaHCO_3), como na Equação 2.

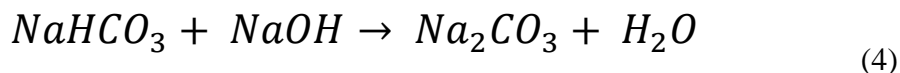


Hidróxido de sódio + dióxido de carbono → bicarbonato de sódio

É possível também, por outras reações, como na Equação 3, gerar bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e, com mais NaOH , é possível gerar carbonato de sódio e água, que pode ser visto na Equação 4.



Hidróxido de sódio + dióxido de carbono → bicarbonato de sódio



bicarbonato de sódio + hidróxido de sódio → carbonato de sódio + água

A formação de carbonato acaba produzindo escamas, que podem formar linhas pretas e devem ser removidas com um ácido (Kanegsberg; Kanegsberg, 2020). A reação com 1m³ de CO₂ ou 10 hl a 1 atm, a 20 °C será capaz de neutralizar 2 kg de NaOH ou 100 litros de hidróxido de sódio a 2% p/v, que, em casos de tanques fechados, pode levar várias horas (Boulton; Quain, 2008; Briggs *et al.*, 2004). Ou, conforme Barth e Farber (2019), um hectolitro de dióxido de carbono pode neutralizar o hidróxido de sódio em 3 litros de solução de limpeza. A perda de dióxido de carbono pode produzir um vácuo inesperado em um tanque, podendo potencialmente esmagá-lo. Pressões inferiores a 0,2 bar abaixo da pressão atmosférica (0,8 bar absoluto = 3 psi de vácuo) podem esmagar um fermentador (Barth; Farber, 2019). Segundo Priest e Campbell (2003), é quimicamente impossível evitar essas reações.

A Tabela 1 mostra que os níveis crescentes de carbonato de sódio na solução cáustica podem reduzir seus poderes de detergência e desinfecção. O carbonato de sódio tem apenas 15% da eficácia de limpeza da solução cáustica. A força cáustica em um conjunto CIP, normalmente, será controlada medindo sua condutividade. No entanto, o carbonato de sódio também se registra como condutividade e, portanto, quando presente, significa que a condutividade medida está dando uma falsa indicação alta da causticidade e, portanto, uma falsa alta indicação de capacidade de detergência (Stewart; Russell; Anstruther, 2017).

Tabela 1 - Comparação entre o efeito da concentração da soda cáustica e o carbonato e seus efeitos como detergente e germicida.

Carbonato de sódio só tem 15% da eficiência de limpeza do hidróxido de sódio			
% cáustico	% carbonato	Eficiência detergência	Eficiência germicida
2,0	0,0	7,5	4,0
1,0	1,0	6,3	3,7
0,5	1,5	3,3	2,9
0,3	1,8	1,0	1,0

Fonte: Adaptado de Stewart; Russell; Anstruther, 2017.

Um exemplo de Atwell *et al.* (2017) é que, normalmente, há mais de 700 hl de CO₂ residual do *headspace* de 10% de um recipiente de fermentação de 7.000 hl. Isso é mais do que

suficiente para atingir altos níveis de Na_2CO_3 com a dosagem contínua de NaOH em um CIP. Se mais do que 5% de Na_2CO_3 estiver presente em conjunto com NaOH , isso mostrará uma condutividade suficientemente alta que não virá totalmente de NaOH , o que configura uma parte de condutividade de NaOH e outra parte de Na_2CO_3 . Indicações incorretas dos níveis de NaOH resultarão em uma limpeza ineficaz que pode ter impacto no crescimento microbiano dentro do equipamento no qual está sendo realizada a limpeza, resultando em deterioração do produto e custos adicionais para a empresa. A condutividade fornece uma indicação da quantidade de íons presentes e pode ser usada em conjunto com outras informações para fornecer uma melhor indicação das concentrações químicas do detergente.

Conforme experiências utilizando hidróxido de sódio e CO_2 (Elmore, 1980 *apud* Priest; Campbell, 2003), os efeitos causados pelo CO_2 na limpeza cáustica são consideráveis mesmo quando há apenas 15% de dióxido de carbono em um tanque, por exemplo. Então, acaba que a remoção de CO_2 do tanque é extremamente necessária antes de se realizar a limpeza com hidróxido de sódio. No entanto, essa remoção leva tempo e há necessidade de rapidez no processo, por isso, é impraticável retirar o gás em toda limpeza.

Na Tabela 2 (Elmore, 1980 *apud* Priest; Campbell, 2003), é possível analisar diferentes porcentagens da concentração de CO_2 presente no tanque, a diminuição desse gás ao longo da limpeza e o que pode ser afetado de acordo com a porcentagem, como a queda na concentração de NaOH e o aumento de Na_2CO_3 . Portanto, pelos dados apresentados, fica necessário reduzir o nível de CO_2 abaixo dos 15%. Posteriormente, serão detalhados também resultados de experimentos envolvendo o tempo de expulsão de CO_2 pela sua concentração, o que ajudará a balizar e comparar os resultados desse trabalho.

Tabela 2 - Perdas de CO_2 e NaOH durante um CIP de detergente cáustico com 2% de concentração.

Comparação de perdas de CO_2 e NaOH durante um CIP						
CO_2						
CO₂ inicial (%)	Depois do pré enxágue (%)	Depois do ciclo de detergente (%)	Depois do enxágue final (%)	Perda no ciclo completo (%)	Perda de NaOH (%)	Aumento de Na₂CO₃ (%)
97	85	66	57	40	1,00	0,90
50	34	15	13	37	1,15	0,95
40	32	18	16	24	0,75	0,60
32	25	9	7	25	0,75	0,55
23	13	4	3	20	0,45	0,45
15	12	5	5	10	0,70	0,60
0	-	-	-	-	0,15	0,09

Fonte: Adaptado de Elmore, 1980 *apud* Priest; Campbell, 2003.

4.2 LEI DE LAMBERT-BEER

Quando um feixe de radiação com comprimento de onda único incide sobre uma cubeta com uma intensidade de luz incidente I_0 , vários fenômenos podem ocorrer, tais como a absorção, a reflexão ou o espalhamento de radiação pelo meio analisado. Com todos esses fenômenos acontecendo, a intensidade de radiação do feixe, após passagem pela amostra (intensidade transmitida, I_t), será menor que a intensidade de entrada I_0 (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000).

Ao incidir sobre a amostra, parte da intensidade do feixe da luz pode ser absorvida pela espécie na amostra devido à excitação de elétrons de ligação em moléculas e íons orgânicos ou, ainda, alguns ânions inorgânicos (Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018).

Os primeiros estudos sobre a relação entre a intensidade de radiação incidente e transmitida que se tem relatos são de experiências feitas por Pierre Bouguer (1729) e Johann Heindrich Lambert (1760). Estes dois cientistas efetuaram observações independentes e verificaram que as propriedades associadas ao processo de absorção de luz podem ser enunciadas em termos de duas leis fundamentais (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000):

- A intensidade de luz (monocromática) transmitida por um corpo homogêneo é proporcional à intensidade de luz incidente. Isto é: $I_t = k \times I_0$. Onde k é o coeficiente de absorção; e
- A intensidade de luz (monocromática) transmitida decresce exponencialmente com o aumento da espessura da camada do corpo homogêneo.

Na Figura 5 é possível observar o quanto a espessura da camada do corpo homogêneo é importante na absorção de luz. A solução de CuSO_4 parece ser bem mais clara na parte mais fina do frasco por ter uma camada menor e, na parte inferior, que apresenta uma camada maior, a solução aparenta ser mais escura, por apresentar mais absorção de luz na solução.

Em 1852, August Beer estudou a influência da concentração do meio onde passa o feixe de luz sobre a transmissão de luz, chegando à conclusão de que a transmissão de luz pelo meio depende da concentração desse meio. A lei de Beer é análoga à lei de Bouguer-Lambert. Enquanto Bouguer e Lambert estudaram a variação na absorção de um feixe de luz em função da variação da espessura da camada absorvente, Beer voltou seus estudos à concentração da solução em estudo mantendo a espessura constante. Alterando a espessura ou alterando a concentração, o que está se alterando é o número de partículas que vão interagir com a fonte de luz (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000).

Figura 5 - Solução de CuSO_4 que apresenta a demonstração sobre a espessura da camada do corpo homogêneo.



Fonte: Custodio; Kubota; De Andrade, 2000.

A lei de Beer estabelece uma relação linear entre a absorvância e a concentração da amostra, sendo, portanto, possível determinar a concentração de uma amostra através de sua curva de calibração (absorvância *versus* concentração) (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000). A quantidade de energia absorvida em um determinado comprimento de onda depende do número de moléculas presentes na trajetória do feixe e do coeficiente de absorção da molécula, conforme a lei de Lambert-Beer (também chamada de lei de Lambert-Beer-Bouguer), podendo ser vista na Equação 5.

$$A(\lambda) = E(\lambda)bc \quad (5)$$

Onde:

$A(\lambda)$ é a absorção, $E(\lambda)$ é o coeficiente de absorção naquele comprimento de onda λ , b é comprimento óptico entre o emissor e o detector e c é a concentração de gás nesse caminho (Lee, 2001 *apud* Schaeffer, 2004).

A lei de Beer é a lei básica da espectrofotometria, conforme a Equação 6.

$$I_t = I_0 e^{-acb} \quad (6)$$

Onde:

Se a concentração c for expressa mol por litro e a espessura do absorvedor b for expressa em centímetros, a absorvância a é a constante e toma o nome de absorvância molar, e o símbolo normalmente empregado para esta quantidade passa a ser ϵ . A absorvância a é a mais usada quando não se conhece a natureza do material absorvente (e, portanto, a sua massa molar),

sendo a concentração expressa em gramas por litro. A absorvidade molar ϵ é utilizada quando se deseja comparar quantitativamente a absorção de várias substâncias. Para uma mesma espessura de caminho óptico, quanto maior o valor de ϵ maior a sensibilidade do método (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000).

A absorvidade molar ϵ depende de vários fatores da substância. São eles: comprimento de onda do feixe de luz utilizado, temperatura e solvente. Idealmente utiliza-se a radiação monocromática para que seja possível obter o máximo de absorção da substância do meio em estudo. Pela Equação 6 é fácil perceber que quanto maior o valor de ϵ ou a , maior será a taxa de absorção da solução e mais sensível será o método espectrofotométrico utilizado (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000).

Mais relações são possíveis de serem obtidas através da Equação 6. É possível rearranjar a Equação 6 e obter uma nova relação entre I_t/I_0 que pode ser denominada transmitância (T). A Equação 7 mostra a relação para transmitância.

$$T = \frac{I_t}{I_0} = 10^{-\epsilon cb} \quad (7)$$

Assim, é possível chegar à Equação 5 aplicando o logaritmo na Equação 7 resultando na Equação 8.

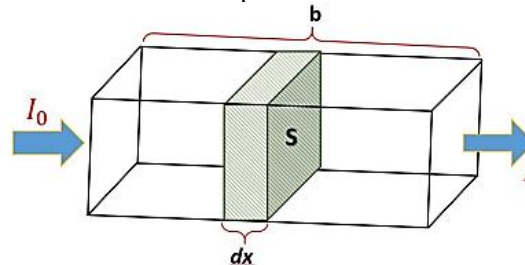
$$\log_{10} \frac{I_0}{I_t} = -\log_{10} T = \epsilon cb \quad (8)$$

As relações $\log_{10} \frac{I_0}{I_t}$ e $-\log_{10} T$ são também chamadas de absorbância ou absorção. Percebe-se pelo exposto acima que a transmitância acaba não tendo uma relação linear com a concentração, mas a absorção sim, ela tem uma relação linear com a concentração. Portanto, mantendo-se o caminho óptico constante, pode-se determinar a concentração de um gás, por exemplo, em uma solução, através da medida de absorbância da amostra. Isso é possível construindo uma curva de calibração de absorbância *versus* concentração e a concentração da amostra em estudo pode ser obtida através da curva (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000).

Descrevendo a lei de Lambert-Beer de outra maneira, considerando um bloco contendo material absorvente de luz com dimensões a e b e seção transversal S , conforme pode ser visto na Figura 6. No volume desse bloco existe um total de n átomos, íons ou moléculas que

absorvem luz e, sobre esse bloco, é incidida uma quantidade de luz I_0 e tem-se como resultado a quantidade de luz após absorção I (Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018).

Figura 6 - Esquema mostrando bloco que recebe luz incidente contendo uma amostra absorvedora de Seção S contendo dn espécies absorvedoras.



Fonte: Adaptado de Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018.

Ainda na Figura 6, na parte hachurada em verde de seção transversal S e comprimento dx , tem-se dn espécies absorvedoras, em que cada partícula há uma seção de choque na qual ocorrerá a captura de fótons da luz incidente. A probabilidade de captura dos fótons de luz pelas partículas é dada pela razão dS/S . A fração absorvida dI_x do feixe I_x que atinge a seção S é proporcional ao número de fótons por cm^2 , resultando em $-dI_x/I_x$ que é a probabilidade de captura dos fótons (Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018). A Equação 9 demonstra a relação entre a probabilidade de captura dos fótons pelas espécies absorvedoras na seção S com a absorção de luz do feixe, ficando conforme a Equação 10.

$$-\frac{dI_x}{I_x} = \frac{dS}{S} \quad (9)$$

$$dS = a \cdot dn \quad (10)$$

Então, as Equações 9 e 10 ficam como mostrado na Equação 11, desenvolvendo para a Equação 12.

$$-\int_{I_0}^I \frac{dI_x}{I_x} = \int_0^n \frac{a \cdot dn}{S} \quad (11)$$

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \frac{a \cdot n}{S} \quad (12)$$

Transformando o $-\ln$ para \log , a Equação 12 fica como na Equação 13.

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \frac{a \cdot n}{2,303 \cdot S} \quad (13)$$

Definindo a seção transversal S como $S = V/b$, a Equação 13 fica como a Equação 14.

$$\log\left(\frac{I_0}{I}\right) = \frac{a \cdot n \cdot b}{2,303 \cdot V} \quad (14)$$

Algumas definições serão necessárias para a próxima etapa. Onde:

$\log\left(\frac{I_0}{I}\right)$ é o valor de absorção da solução;

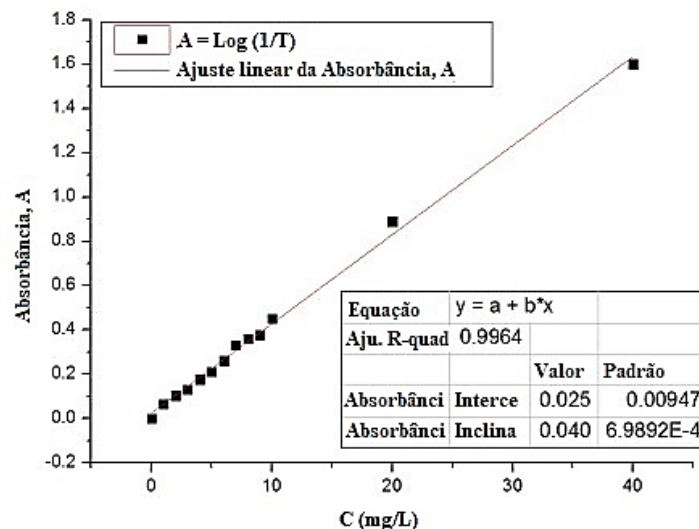
$\frac{n}{V}$ é o termo para a concentração das espécies absorvedoras do bloco;

$\frac{a}{2,303}$ é o coeficiente de extinção molar ou absorvidade molar (ϵ).

Essas últimas definições retornam à Equação 5 novamente e mostram como a absorção da solução em um comprimento de onda está relacionada à largura b da cubeta que contém a solução e à concentração c da espécie absorvedora contida na cubeta.

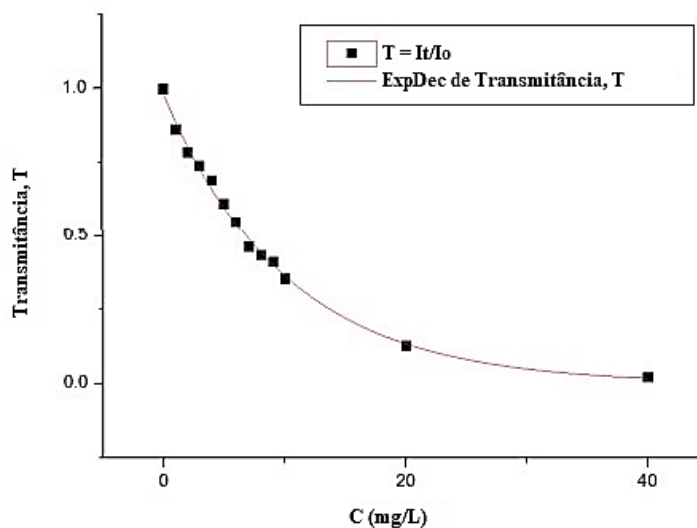
Na Figura 7 é possível visualizar um exemplo de curva absorbância *versus* concentração, com característica linear. Na Figura 8 é possível visualizar um gráfico de exemplo da característica exponencial da relação entre a transmitância (nesse caso em porcentagem) *versus* concentração.

Figura 7 - Gráfico da absorbância versus concentração de uma amostra de solução de KMnO_4 em 525 nm.



Fonte: Adaptado de Ashfaque-e-Alam; Islam; Faria, 2017.

Figura 8 - Gráfico característico da transmitância *versus* concentração de uma amostra de solução de KMnO_4 em 525 nm.



Fonte: Adaptado de Ashfaque-e-Alam; Islam; Faria, 2017.

4.3 ESTUDO DA FREQUÊNCIA DE ABSORÇÃO DA ESPÉCIE EM ANÁLISE

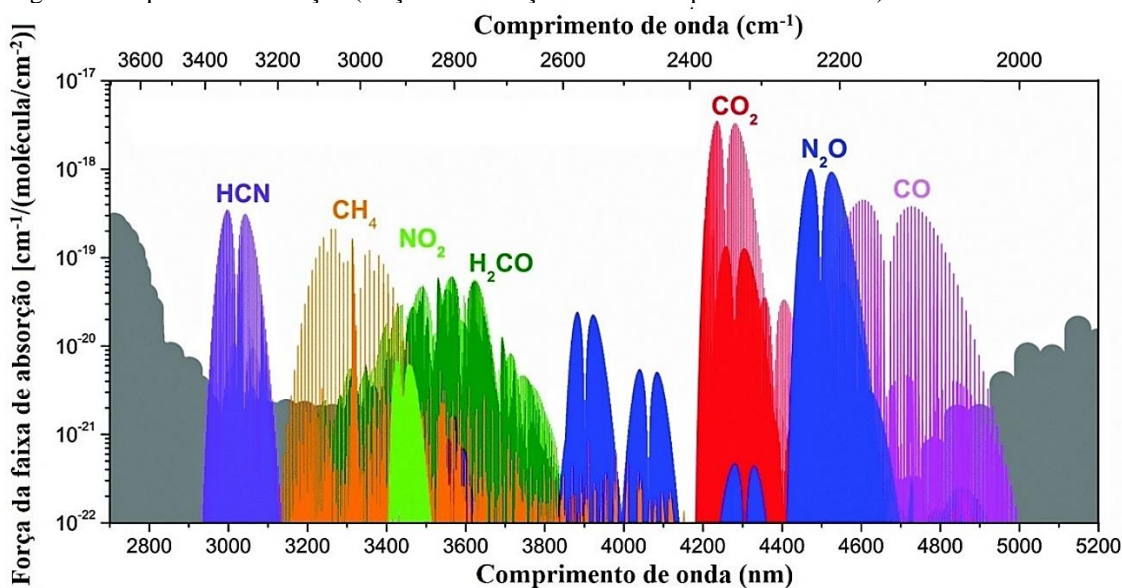
A espectrofotometria é uma técnica analítica utilizada amplamente com diversos tipos de aplicações tais como para a determinação da concentração de espécies químicas absorvedoras em solução (Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018). A técnica é muito utilizada para caracterizar diversos tipos de moléculas, de acordo com suas absorções em um determinado comprimento de onda, ou seja, baseia-se na interação da luz com a matéria (Ashfaque-e-Alam, Islam; Faria, 2017; Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018).

A espectrofotometria auxilia na análise do espectro de absorção da espécie que se deseja determinar a concentração. Visto que pode ser que não se saiba qual é a frequência de absorção daquela espécie em análise, é necessário definir qual o comprimento de onda onde a radiação de luz incidente sobre a amostra causará maior efeito de absorção e, assim, obter a melhor sensibilidade de quantificação possível, observando sempre frequências em que essa espécie absorve bem sem ser interferida por outros tipos de substâncias. O espectro de absorção é obtido variando-se o comprimento de onda da radiação que incide sobre a amostra e medindo-se a quantidade de radiação absorvida através de um espectrofotômetro (Custodio; Kubota; De Andrade, 2000).

As frequências ressonantes (comprimentos de onda) dependem do número e das massas dos átomos nas moléculas em análise, bem como do número e forças das várias ligações químicas. Se a estrutura química das moléculas for complexa haverá toda uma gama de vibrações ressonantes (SGX Sensortech, 2007).

No caso deste estudo, o CO_2 é que está sendo analisado. Na Figura 9 é possível observar um gráfico de força de absorção *versus* comprimento de onda de diversas substâncias em um espectro de absorção. A região entre aproximadamente 4200 e 4400 nm de comprimento de onda corresponde ao comprimento de onda no qual ocorre maior força de absorção do CO_2 e essa região é a de incidência de luz do infravermelho.

Figura 9 - Espectro de absorção (forção de absorção versus comprimento de onda) de várias substâncias.



Fonte: Adaptado de Diyyot, 2021.

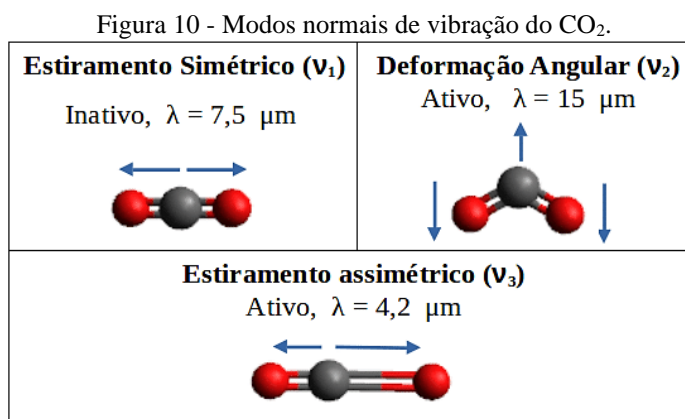
A posição da espécie na banda de absorção corresponde ao comprimento de onda da radiação cuja energia é igual à necessária para que ocorra a transição eletrônica. Já a intensidade depende de dois fatores: a probabilidade de interação entre a energia radiante incidente e o sistema eletrônico da substância em análise, de modo a permitir a passagem de elétrons do estado fundamental a um estado excitado, e a polaridade do estado excitado (Canassa; Lamonato; Ribeiro, 2018).

4.4 ESPECTROFOTOMETRIA DO DIÓXIDO DE CARBONO

Os comprimentos de onda em que ocorrem a absorção de energia são característicos de cada molécula, sendo causados por transições entre os níveis de energia eletrônicos, vibracionais e rotacionais da molécula (Schaeffer, 2004).

Uma molécula de dióxido de carbono 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 ligações duplas covalentes, ou seja, cada oxigênio compartilha dois elétrons com o átomo

de carbono. A molécula de dióxido de carbono apresenta uma estrutura linear triatômica, com quatro modos de vibração das ligações químicas, quando a molécula interage com a radiação infravermelha. Os modos de vibração são: estiramento simétrico, estiramento assimétrico e dois modos de deformação angular (vibração no plano e vibração fora do plano) (Junges *et al.*, 2020). A Figura 10 indica os modos normais de vibração do CO₂, em qual comprimento de onda cada um acontece e se é ativo ou inativo para absorção da radiação.



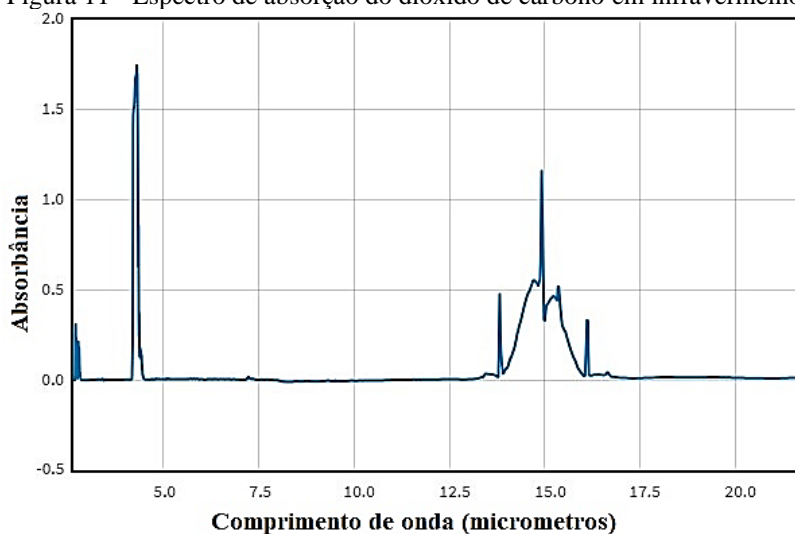
Fonte: Junges *et al.*, 2020.

Para que a molécula possa absorver radiação é necessário que durante a vibração ocorra uma mudança no momento de dipolo da molécula (Junges *et al.*, 2020; SGX Sensortech, 2007). Assim dizendo, quando a radiação infravermelha incide sobre o gás, os átomos sofrem vibrações que acabam mudando os estados de energia dos átomos em níveis discretos, quando o comprimento de onda da radiação corresponde às frequências ou ressonâncias naturais das moléculas (SGX Sensortech, 2007).

Dentre os modos de vibração citados, apenas os modos de estiramento assimétrico e deformação angular absorvem radiação, no comprimento de onda de $4,2 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$, respectivamente. No modo de vibração simétrico ($7,5 \mu\text{m}$ de comprimento de onda), que apresenta estiramento e compressão simétrica da molécula, o momento de dipolo permanece nulo, visto que os átomos de oxigênio ficam alinhados simetricamente com o átomo de carbono (Junges *et al.*, 2020). Nos modos de vibração já citados como ativos para absorção, ocorre uma mudança periódica no momento de dipolo da molécula durante a vibração, isso torna essas vibrações em seus comprimentos de onda característicos passíveis de absorção (Junges; *et al.*, 2020; SGX Sensortech, 2007).

Na Figura 11 é possível observar os dois pontos de absorção citados, que são em $4,2 \mu\text{m}$ (com um pico bem maior) e $15 \mu\text{m}$ (com picos de absorção entre aproximadamente 14 e $16 \mu\text{m}$).

Figura 11 - Espectro de absorção do dióxido de carbono em infravermelho.



Fonte: Adaptado de NIST, 2022.

4.5 SENSOR NÃO DISPERSIVO INFRAVERMELHO (NDIR) OU DISPERSIVO

Para a caracterização dos espectros de gases e substâncias em um gráfico de espectro de absorção é necessária a utilização de um equipamento sensor dispersivo. Este instrumento é utilizado para demonstrar uma vasta gama de compostos em diversos comprimentos de onda como um espectrômetro. Um instrumento desse tipo, utilizando *infrared* (IR) ou infravermelho, caracterizará os gases que sofrem absorção por infravermelho. A maioria dos instrumentos de IR dispersivos são sistemas de bancada muito caros, volumosos e um tanto frágeis, que, geralmente, são utilizados em laboratórios e não podem ser utilizados em aplicações de campo para identificar e monitorar gases, pelos motivos já citados (preço, volume e fragilidade). Portanto, pouquíssimos sistemas dispersivos de detecção de gás IR são implantados em locais perigosos (SGX Sensortech, 2007).

Na maioria das aplicações de detecção de gases utilizando IR, desde que tenha conhecimento de detalhes do gás, sem necessidade de uma caracterização prévia, são utilizados sensores (NDIR). A utilização desses equipamentos permite medir a concentração do gás em estudo, podendo aceitar um certo grau de sensibilidade entre alguns gases que podem absorver no mesmo comprimento de onda e ocasionar sobreposição, sendo uma técnica para requisitos básicos (SGX Sensortech, 2007).

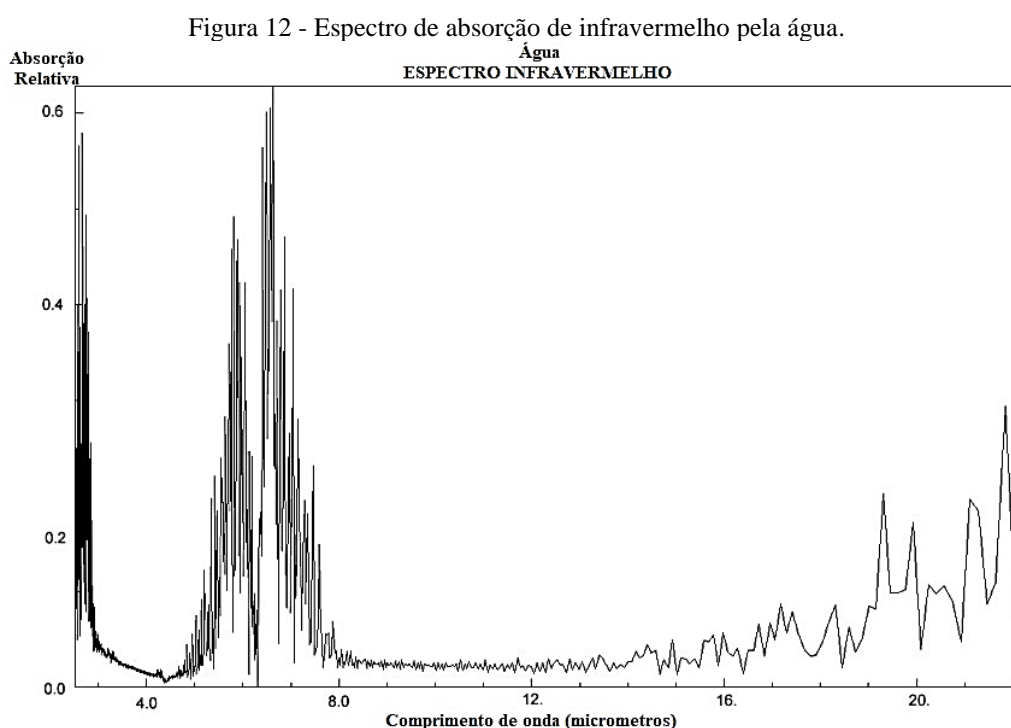
Em sensores NDIR é comum considerar o sensor como um componente individual no instrumento e não dispersivo por ter filtros fixos de banda que estreitam a faixa de leitura para que detectores de IR individuais identifiquem somente algumas faixas de absorção de gás em uma faixa limitada de comprimento de onda. Os sensores acabam ficando mais baratos e seus

componentes são mais robustos, simplificando o *design* para atender a padrões de segurança certificáveis. Além disso, as concentrações de gás podem ser obtidas em tempo real, utilizando algoritmos simples no microprocessador do instrumento e com auxílio de outros microprocessadores (SGX Sensortech, 2007).

4.6 ESCOLHA DO COMPRIMENTO DE ONDA PARA DETECÇÃO DE CONCENTRAÇÃO

A escolha de qual comprimento de onda utilizar no sensor NDIR é definido pela fonte de IR disponível (em geral, a com melhor custo benefício) e a preocupação com interferências de água junto à medição. Há uma grande preocupação na detecção de infravermelho juntamente com água para saber em quais comprimentos de onda sua absorção ocorre para não interferir com gases no mesmo comprimento de onda.

A Figura 12 mostra os picos de absorção de infravermelho da água. Pelo espectro visto é possível analisar que os picos de absorção ocorrem: abaixo de 3 μm , entre 5 e 8 μm e acima de 16 μm . Caso seja necessário detectar gases em um desses comprimentos de onda, a detecção estaria sujeita a forte interferência de água ou mesmo umidade, caso estejam presentes junto ao gás em análise. Porém, há algumas janelas nas quais é possível analisar gases sem a interferência de água: 3 a 5 μm ou 8 a 16 μm (SGX Sensortech, 2007).



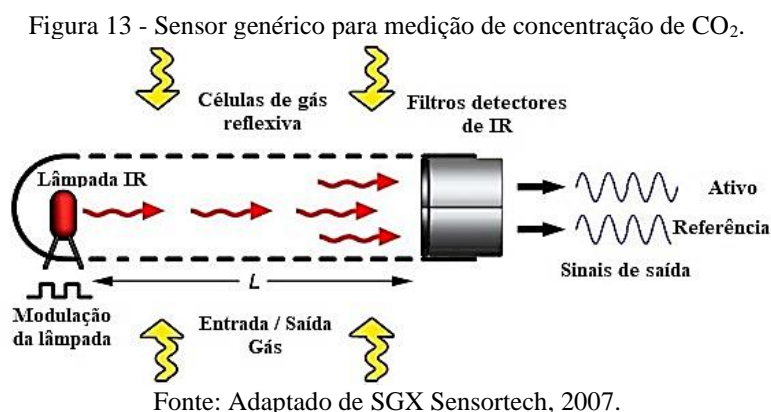
Fonte: Adaptado de SGX Sensortech, 2007.

Para o dióxido de carbono e outros gases é escolhida a região de 3 a 5 μm . Os motivos são: há linhas de absorção do CO_2 em 4,2 μm ; não há linhas de absorção de gás em 4 μm , o que possibilita obter um sinal de referência para o sensor neste comprimento de onda; e as lâmpadas de infravermelho com invólucros de vidro irradiam até 5 μm (SGX Sensortech, 2007).

Uma breve observação sobre as lâmpadas é que a detecção de gases utilizando lâmpadas que irradiam além de 8 μm são raras e essas lâmpadas são caras e especializadas. A radiação de uma lâmpada de filamento incandescente diminui em comprimentos de onda mais longos. Além disso, não há fontes IR de estado sólido de baixo custo comercialmente disponíveis em comprimentos de onda longos (SGX Sensortech, 2007). Os sensores acabam utilizando lâmpadas mais baratas e mais simples, que acabam dando melhor custo benefício ao produto, essencial para um projeto como este e que não necessitam de uma faixa maior de comprimentos de onda para a detecção.

4.7 FUNCIONAMENTO DE UM SENSOR DE CONCENTRAÇÃO DE CO_2

Um sensor genérico para a medição de concentração de CO_2 pode ser visto na Figura 13. Nele são utilizadas células de absorção com superfícies refletoras e espaços para a admissão do gás em uma câmara contendo uma fonte de infravermelho (lâmpada), em geral um pequeno filamento de tungstênio com invólucro de vidro (SGX Sensortech, 2007).



Os sensores de infravermelho, normalmente, apresentam detectores ativos de infravermelho que são formados por um piroelétrico empacotado juntamente com o filtro passa-banda ajustado para a faixa de frequência de absorção do CO_2 . Normalmente, há um detector de referência com filtro neutro de 4 μm para quantificar a intensidade de luz que é inserida na câmara sem que a mesma tenha sofrido absorção (seria a intensidade de luz total) e, assim, ser

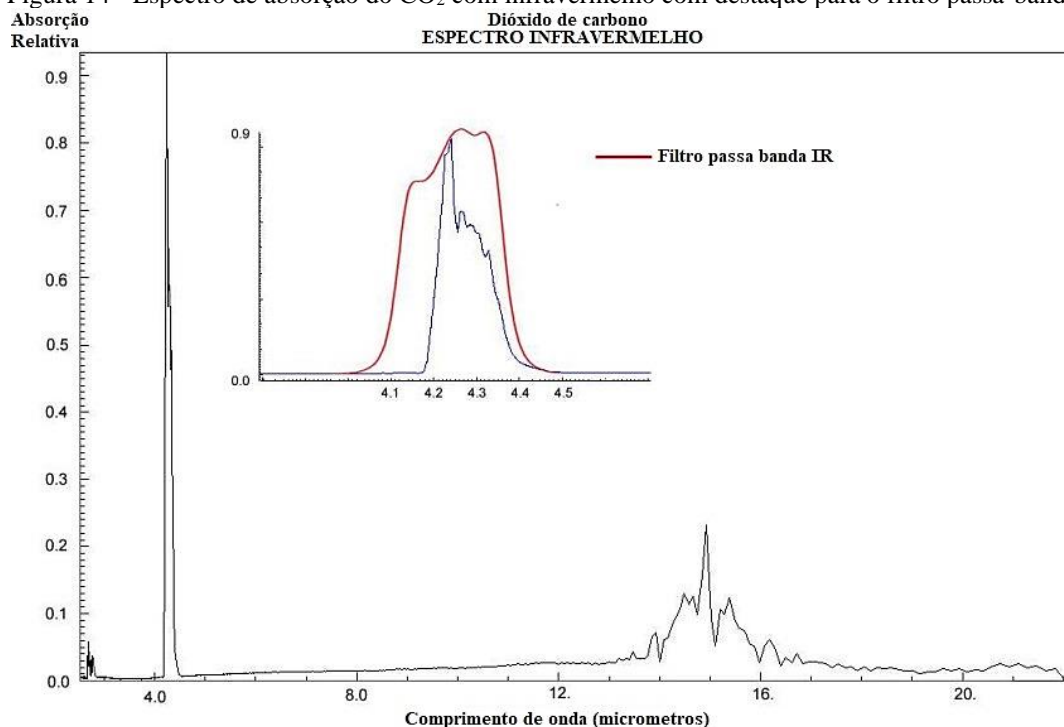
contrastada com a intensidade de luz após absorção do CO₂ (intensidade de luz absorvida) (SGX Sensortech, 2007).

Destacando melhor a região de absorção de luz infravermelha pelo CO₂, é possível visualizar os picos de melhor absorção e também em quais comprimentos de onda eles ocorrem. Como já citado anteriormente, a região de 4 μm é a ideal para ser utilizada, com um pico de absorção muito forte.

O sensor apresenta detectores piroelétricos que respondem às mudanças no nível de luz, então, a fonte IR deve ser modulada, pulsando a tensão do filamento com ondas quadradas, a uma taxa de 1 a 10 Hz. A saída dos detectores é senoidal com uma tensão alternada de pico a pico, proporcional à intensidade da luz IR incidente no detector. Se um gás que absorve infravermelho entrar na câmara de medição do sensor, a intensidade de IR no detector diminuirá de acordo com a lei de Lambert-Beer expressa pela Equação 5 (SGX Sensortech, 2007).

Na Figura 14 é possível observar o espectro de absorção do CO₂ na parte inferior da imagem; na parte superior há um destaque do pico de absorção em 4 μm juntamente com o limiar do filtro passa-banda do sensor de infravermelho, de modo que ele faz um recorte justamente na área em que o CO₂ absorve o comprimento de onda com a maior intensidade de absorção.

Figura 14 - Espectro de absorção do CO₂ com infravermelho com destaque para o filtro passa-banda.



Fonte: Adaptado de SGX Sensortech, 2007.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Atualmente fala-se muito em redes de sensores sem fio (RSSFs) que são estruturas de sensores formadas por vários nós sensores comunicando-se por meio de protocolos sem fio. Tais sensores são capazes de coletar dados do ambiente, como temperatura, umidade concentração de um gás, pressão, entre outros (Karl e Willig, 2005 *apud* Costa, 2022). Nesse trabalho não há uma grande rede de sensores, mas uma rede de comunicação entre um equipamento sensor e o Raspberry Pi via *WiFi* com a comunicação utilizando o protocolo *Message Queueing Telemetry Transfer* (MQTT) e, assim, ter acesso a várias ferramentas para organizar, armazenar e visualizar os dados medidos.

Esses sensores, na maioria das vezes, não possuem acesso à energia padrão e necessitam de bateria (Loureiro *et al.*, 2005 *apud* Costa, 2022). Além disso, possuem quatro componentes principais (Karl e Willig, 2005 *apud* Costa, 2022):

- Microcontrolador: realiza a execução do algoritmo utilizado no sistema, de criação do projetista, e processa todos os componentes do sistema;
- Memória: utilizada na execução da aplicação no microcontrolador, além de armazenar todos os dados coletados;
- Sensores: responsáveis pela coleta dos dados do ambiente monitorado; e
- Protocolos de comunicação: responsáveis por transmitir os dados coletados entre os equipamentos.

No projeto foi utilizado o ESP32 juntamente com os sensores de concentração de CO₂ (MH-Z14, MH-Z19C e MH-Z16) e BME280 com um *firmware* desenvolvido para comunicar com o Raspberry Pi. Este tem instalado os programas Mosquitto, Telegraf, InfluxDB, PageKite e Grafana. A comunicação entre o ESP32 e o Raspberry utiliza *WiFi* com protocolo de comunicação MQTT.

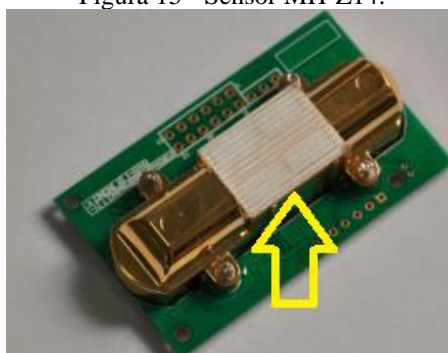
5.1 SENSORES DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ UTILIZADOS

Os sensores MH-Z19C, MH-Z14 e MH-Z16 são sensores de medição de concentração de CO₂ que utilizam o princípio de medição NDIR, em tamanho reduzido, apresentando boa seletividade, independência de oxigênio para fazer medição, longa vida útil, alta sensibilidade, baixo consumo, boa estabilidade, excelente saída linear, utilizam saída *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e não apresentam interferência de água (MHZ-Z16, 2022). Além

disso, apresentam um sensor interno de temperatura que faz a compensação de temperatura para a medição. Eles são fabricados pela *Zhengzhou Winsen Electronics Technology*.

Os três sensores têm os mesmos princípios de funcionamento, mas apresentam características diferentes, essenciais ao bom funcionamento do projeto. O motivo principal de terem sido utilizados os três sensores foi de que não se sabia qual era a concentração de CO₂ que os tanques eram liberados para assepsia. Inicialmente, usou-se o sensor MH-Z14, um sensor de fabricação mais antiga, que pode ser visto na Figura 15 e, conforme o Quadro 1 de parâmetros técnicos do sensor, é possível analisar alguns detalhes elétricos, de comunicação (sinal de saída UART), duração de vida útil, tempo de aquecimento e, o mais importante, faixa de medida do sensor. No caso do modelo em uso, foi utilizado um sensor com faixa de medição de 0 a 5000 ppm de concentração, 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 (MH-Z14, 2016).

Figura 15 - Sensor MH-Z14.



Fonte: MH-Z14, 2016.

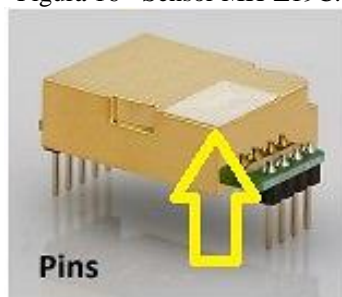
Quadro 1 - Quadro de parâmetros técnicos do sensor MH-Z14.

Tensão de trabalho	4,5 – 5,5 V DC	Tempo de aquecimento	3 min
Corrente média	< 85 mA	Tempo de resposta	$T_{90} < 90 s$
Tensão de interface	3.3 V (Compatível com 5 V)	Temperatura de trabalho	0 °C - 50 °C
Faixa de medida	0-2000 ppm, 0-5000 ppm, 0-1% VOL, 0-3% VOL, 0-5% VOL	Umidade de trabalho	0-95 %
Sinal de saída	PWM	Peso	15 g
	UART	Vida útil	> 5 anos
	0.4-2 V DC	Dimensão	57.5 x 34.7 x 17 mm (C x L x A)

Fonte: Adaptado de MH-Z14, 2016.

Depois foi utilizado o sensor MH-Z19C, que pode ser visto na Figura 16, que é um sensor mais novo que o MH-Z14, mais compacto, tem um consumo de corrente elétrica menor (menos do que 40 mA de média), tem menor tempo de aquecimento (1 minuto), tempo de resposta menor do que 120 segundos, duração de vida estimada de mais de 10 anos e mede concentração máxima de CO₂ de 10000 ppm (MH-Z19C, 2021). No Quadro 2 é possível visualizar mais informações de parâmetros do sensor MH-Z19C.

Figura 16 - Sensor MH-Z19C.



Fonte: MH-Z19C, 2021.

Quadro 2 - Quadro de parâmetros técnicos do sensor MH-Z19C.

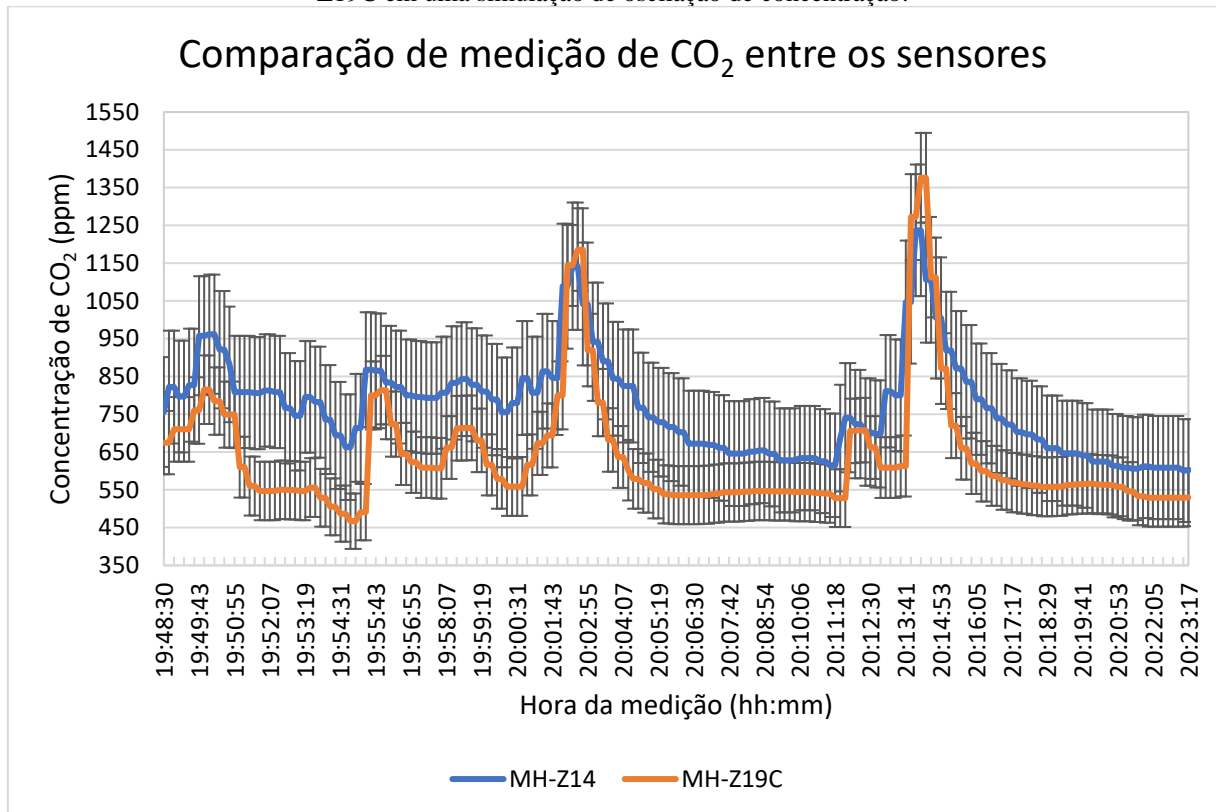
Número do modelo	MH-Z19C	Faixa de medida	400-10000 ppm (opcional)
Gás detectado	CO ₂	Tempo de aquecimento	1 min
Tensão de trabalho	DC (5.0±0.1) V	Tempo de resposta	$T_{90} < 120 s$
Corrente média	< 40 mA (@5 V da fonte de energia)	Temperatura de trabalho	-10 °C - 50 °C
Pico de corrente	125 mA (@5 V da fonte de energia)	Umidade de trabalho	0-95 % (sem condensação)
Tensão de interface	3.3 V (Compatível com 5 V)	Temperatura de armazenamento	-20 °C - 60 °C
Sinal de saída	PWM	Peso	5 g
	Porta Serial (UART) (TTL tensão de 3.3 V)	Vida útil	> 10 anos

Fonte: Adaptado de MH-Z19C, 2021.

Esses sensores podem ser aplicados em diversas atividades como: monitoramento de qualidade do ar, em processos industriais, na agricultura, entre outros. O sensor MH-Z14 apresenta acurácia de $\pm 100 \text{ ppm} + 6\%$ do valor lido (MH-Z14, 2016) e o MH-Z19C apresenta acurácia de $\pm 50 \text{ ppm} + 5\%$ do valor lido (MH-Z19C, 2021). Foram realizados 15 experimentos utilizando ambos os sensores, comparando os resultados com um sensor reserva de cada um em diversos ambientes. Por meio dos resultados e de cálculos estatísticos, incluindo desvio padrão médio e incerteza nominal, considerando fatores como acurácia e outros erros que possam afetar

o sensor, chegou-se à conclusão de que o erro padrão utilizado em ambos os sensores pode ser conforme sua acurácia dada pelo fabricante. Na Figura 17 pode ser visto um experimento que foi realizado para simular a oscilação de concentração de CO₂ e comparar a resposta de cada sensor a essa oscilação.

Figura 17 - Experimento comparando as medidas de concentração de CO₂ entre os sensores MH-Z14 e MH-Z19C em uma simulação de oscilação de concentração.



Fonte: Do Autor, 2022.

Quando o experimento foi feito, injetava-se ar com concentração de CO₂ mais alta e retirava-se rapidamente. O sensor MH-Z14 demorava mais para estabilizar após a retirada do ar. Uma explicação possível seria que a câmara de medição dos dois é diferente, sendo a do MH-Z14 maior, como pode ser visto comparando-se a Figura 15 e Figura 16. Então, é possível que, não havia um fluxo de ar suficiente para retirar o ar que estava dentro da câmara mais rapidamente, por isso o sensor MH-Z14 demorava mais a estabilizar em relação ao MH-Z19C.

Atualmente, é utilizado o sensor MH-Z16 (Figura 18), mais robusto, com consumo médio de corrente elétrica de menos do que 85 mA, tempo mínimo de aquecimento de 10 segundos, tempo de resposta menor do que 30 segundos, duração de vida estimada em mais de 10 anos e mede uma concentração máxima de 100000 ppm (MH-Z16, 2022). O experimento do projeto tem duração de algumas horas e a concentração de dióxido de carbono fica alta

grande parte do tempo. Então, o tempo de aquecimento tem pouca relevância nas medições, visto que o sistema já esperava algumas horas para começar a ter uma queda de concentração e avisar o fim do processo de expulsão. Algumas informações de parâmetros do sensor MH-Z16 podem ser vistas no Quadro 3.

Figura 18 - Sensor MH-Z16.



Fonte: MH-Z16, 2022.

Quadro 3 - Quadro de parâmetros técnicos do sensor MH-Z16.

Número do modelo	MH-Z16	Faixa de medida	0-50000 ppm (pode ser estendido no máximo a 150000 ppm)
Gás detectado	CO ₂		
Tensão de trabalho	DC (5.0±0.1) V	Tempo de aquecimento	10 s
Corrente média	< 85 mA (@5 V da fonte de energia)	Tempo de resposta	$T_{90} < 30 s$
Pico de corrente	150 mA (@5 V da fonte de energia)	Temperatura de trabalho	-10 °C - 50 °C
Tensão de interface	3.3 V (Compatível com 5 V)	Umidade de trabalho	0-95 % (sem condensação)
Sinal de saída	PWM	Temperatura de armazenamento	-20 °C - 60 °C
	Porta Serial (UART) (TTL tensão de 3.3 V)	Peso	< 21 g
		Vida útil	> 10 anos

Fonte: Adaptado de MH-Z16, 2022.

O sensor MH-Z16 apresenta diversos modelos com faixa de medição de: 0–2000 ppm, 0–5000 ppm, 0–1% de volume de CO₂, 0–3% de volume de CO₂, 0–5% de volume de CO₂, 0–10% de volume de CO₂, e 0–15% de volume de CO₂. O modelo escolhido de 100000 ppm (ou 0–10% de volume de CO₂) foi escolhido por ser o mais fácil de ser encontrado e medir maior concentração relacionado aos sensores MH-Z14 e MH-Z19C. O sensor MH-Z16 utilizado no projeto apresenta acurácia menor do que 1% do valor de concentração lido (MH-Z16, 2022).

Foram realizados 10 experimentos comparando medições do MH-Z16 e do seu sensor reserva, que vieram calibrados de fábrica (Anexo A) e dos outros sensores já citados. Realizando os mesmos cálculos estatísticos de erro padrão, chegou-se ao resultado de que seu

erro é realmente muito baixo e foi utilizado o erro de ± 20 ppm + 1% do valor medido nos gráficos das medições realizadas pelo MH-Z16.

Um fator de grande atenção nesses sensores, pelo tipo de metodologia de medição utilizada, é quanto à temperatura do ambiente em que eles estão inseridos. Todos os sensores citados apresentam internamente um sensor de temperatura que faz a compensação da temperatura com o valor da medição (MH-Z16, 2022; MH-Z19C, 2021). A temperatura e a umidade do ambiente afetam a precisão da medida e o sensor de temperatura interno é utilizado para compensar o valor. Em experimentos realizados por Zhou *et al.* (2021), a concentração de CO₂ medida pelo sistema a 20 °C é relativamente precisa. No entanto, quando as medidas são realizadas com as mesmas concentrações em diferentes temperaturas, observou-se que quanto maior a variação de temperatura em relação à temperatura de 20 °C, maior foi o erro de medição. Esses erros, quando são plotados em um gráfico, são aproximadamente lineares. Nesse projeto, as medições estavam sendo realizadas a temperaturas próximas a 20 °C, o que não traria tanto problema de precisão para o sensor.

Como pode ser visto na Figura 15 e Figura 16, as setas indicativas amarelas mostram o local no sensor para entrada e saída dos gases na câmara de medição. Na Figura 18 do sensor MH-Z16 não é possível ver esses detalhes de entrada da câmara de medição com clareza, mas ele também apresenta partes abertas para a entrada do ar ambiente. Fisicamente, pela parte destacada nas setas é possível ver a lâmpada de infravermelho ligando e desligando intermitentemente, ficando cerca de um segundo em cada estado. No sensor MH-Z16 não é possível ver a lâmpada acendendo e apagando.

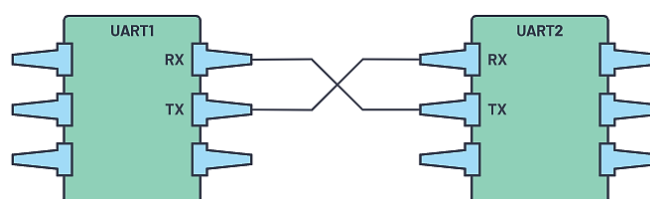
Os sensores MH-Z14, MH-Z19C e MH-Z16 apresentam três protocolos de comunicação: *Pulse Width Modulation* (PWM), *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e *Analog Digital Converter* (ADC). No projeto, a comunicação utilizada entre os sensores e o ESP32 foi o protocolo UART (conexão por cabos), que utiliza o bit de paridade, uma maneira do dispositivo receptor saber se algum dado foi alterado durante a transmissão. O protocolo foi, então, utilizado por ser mais robusto em ambientes ruidosos e bem simples de implementar com o ESP32. O UART é um protocolo de comunicação de *hardware* que usa comunicação serial assíncrona com velocidade configurável. É considerado assíncrono porque não há sinal de *clock* para sincronizar os *bits* de saída do dispositivo de transmissão indo para o dispositivo de recepção (Peña; Legaspi, 2020).

Sistemas embarcados, microcontroladores e computadores usam principalmente UART como uma forma de protocolo de comunicação de *hardware* de dispositivo para dispositivo, utilizando apenas dois fios para transmissão e recepção de dados. Para a comunicação pelo

protocolo UART, a taxa de transmissão precisa ser definida da mesma forma no dispositivo transmissor e receptor. A taxa de transmissão é a taxa na qual a informação é transferida para um canal de comunicação e servirá como o número máximo de *bits* por segundo a serem transferidos (Peña; Legaspi, 2020).

Um exemplo de ligação entre dois dispositivos que usam a comunicação UART pode ser visto na Figura 19, em que os sinais saem de um pino transmissor (Tx) e entram no pino receptor (Rx) em cada um dos dispositivos, são essas linhas que vão receber e transmitir os dados seriais destinados à comunicação serial.

Figura 19 - Exemplo de comunicação e ligação de pinos entre dois dispositivos UART.



Fonte: Peña; Legaspi, 2020.

Sobre a transmissão de dados pelo protocolo UART:

O UART transmissor está conectado a um barramento de dados de controle que envia dados de forma paralela. A partir disso, os dados passarão a ser transmitidos na linha de transmissão (fio) de forma serial, bit a bit, para a UART receptora. Isso, por sua vez, converterá os dados seriais em paralelo para o dispositivo receptor (Peña; Legaspi, 2020).

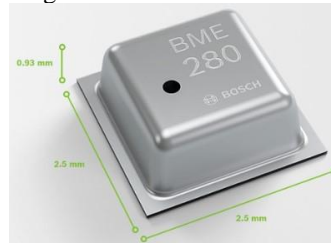
No projeto foi utilizada uma biblioteca dos sensores com algumas alterações, em que o método de comunicação UART já é estabelecido, sendo necessário apenas documentar o que cada um dos pinos do ESP32 é na comunicação e ligar aos sensores que já vêm com a identificação de pinos.

5.2 SENSOR DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA, UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA BME280

Além do sensor de CO₂, foi utilizado um sensor de umidade relativa, temperatura ambiente e pressão barométrica da Bosch, modelo BME280. Este é um sensor de alta precisão e muito utilizado em aplicações móveis nas quais o tamanho e o baixo consumo de corrente são essenciais para o projeto (Bosch, 2022), como nesse trabalho, em que são utilizadas baterias. O sensor é considerado muito estável a longo prazo, tem um tempo de resposta rápido e é robusto contra interferências eletromagnéticas, o que é típico no ambiente industrial. Esse sensor já vem

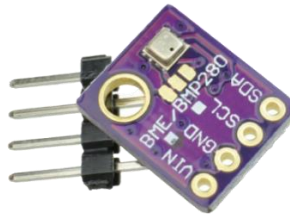
pré-calibrado e pronto para uso (Bosch, 2022). O sensor BME280 sozinho pode ser visto na Figura 20, porém, no projeto ele é utilizado em um módulo pronto com o sensor, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 20 - Sensor BME280.



Fonte: Mouser, 2021.

Figura 21 - Módulo com sensor BME280.



Fonte: Huinfinito, 2022.

O módulo com o sensor BME280 apresenta comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C) em utilização no projeto, com tensão de alimentação de 5 V e consumo de corrente de 3,6 μA , medindo umidade, pressão e temperatura, sem colocar o módulo em hibernação, visto que as medições são realizadas constantemente. O sensor mede temperaturas entre -40 e 85 $^{\circ}\text{C}$, umidade relativa de 0 a 100% e pressão de 300 a 1100 hPa. O sensor de temperatura integrado é usado principalmente para compensação de temperatura dos sensores de pressão e umidade e pode também ser utilizado para estimar a temperatura ambiente (Bosch, 2022).

O sensor de umidade apresenta tempo de resposta (τ 63%) de 1 segundo, com tolerância de precisão de $\pm 3\%$ de umidade relativa e histerese $\leq 2\%$ de umidade relativa. Já o sensor de pressão apresenta ruído RMS (*root mean square* ou valor quadrático médio) de 0,2 Pa (equivalente a 1,7 centímetros), erro de sensibilidade de $\pm 0,25\%$ (equivalente a uma mudança de altura de 1 a 400 metros) e *offset* do coeficiente de temperatura de $\pm 1,5$ Pa/K (equivalente a $\pm 12,6$ centímetros a uma mudança de temperatura de 1 $^{\circ}\text{C}$) (Bosch, 2022).

Um diagrama de blocos geral de microssistemas como o do sensor pode ser observado na Figura 22. Esse diagrama demonstra que há um bloco não eletrônico que se comunica com o meio exterior, agindo como sensor e/ou atuador; há, então, a comunicação com uma interface analógica que recebe, transmite e amplifica os sinais recebidos pelos sensores/atuadores; e,

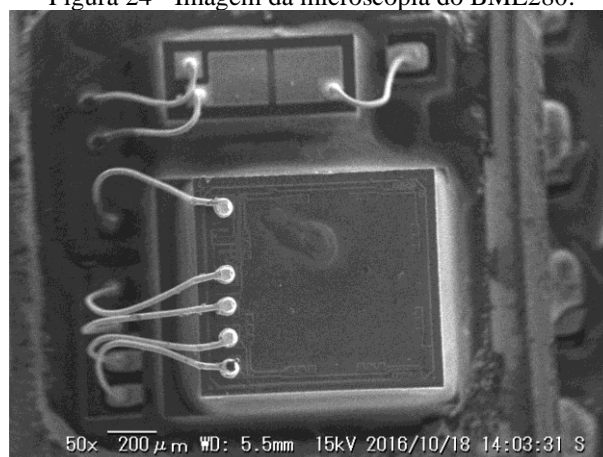
que a membrana se deforme de acordo com o diferencial de pressão entre um lado da membrana (30), em contato com a atmosfera no espaço oco, e o outro lado da membrana (30), em contato com a atmosfera no interior do alojamento do sensor.

Os MEMS são estruturas microusinadas que, com o avanço dos processos de fabricação, formam microestruturas mecânicas suspensas, móveis ou não, que podem ser utilizadas como sensores e/ou atuadores em sistemas miniaturizados, podendo ser utilizados em diversas áreas e são interessantes principalmente devido ao seu tamanho físico (Ribas, 2000).

Utilizando um *Scanning Electron Microscope* (SEM ou Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV) (41J Blog, 2016), foi possível confirmar a versão de que o sensor de pressão e umidade são do tipo MEMS. Sensores do tipo MEMS são formados por uma membrana flexível suspensa sobre uma lacuna e essa membrana é defletida conforme o diferencial de pressão em cada lado da membrana, o que foi detalhado na patente. Os elementos de detecção quantificam a deflexão da membrana que é, então, correlacionada a um valor de pressão para a pressão do gás no lado da membrana oposto ao volume do sensor. Elementos de detecção baseados em tecnologia piezoresistiva e tecnologia de detecção capacitiva são normalmente usados (Lammel *et al.*, 2019).

Pela Figura 24 é possível observar que há três matrizes discretas, sendo uma pequena matriz superior, outra grande matriz inferior e, sob a matriz inferior, parece haver outra matriz. A matriz inferior se presume ser o sensor de pressão e sob ela pode ser que seja o controlador de interface ADC/SPI/I2C (41J Blog, 2016).

Figura 24 - Imagem da microscopia do BME280.

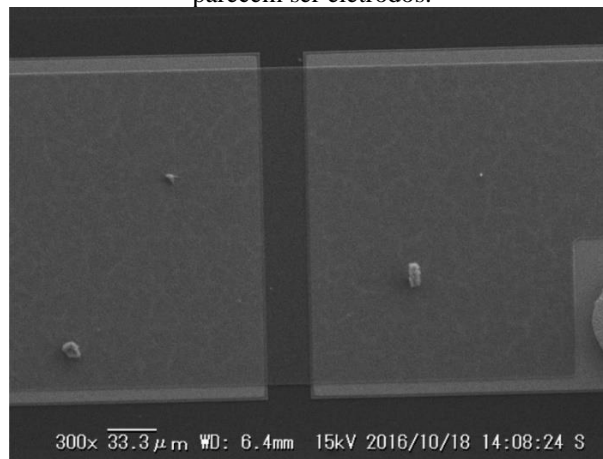


Fonte: 41J Blog, 2016.

Na matriz superior, parece haver um par de eletrodos que contém um filme fino colocado sobre eles, como pode ser visto na Figura 25, com um *zoom* de 300X. Aumentando o

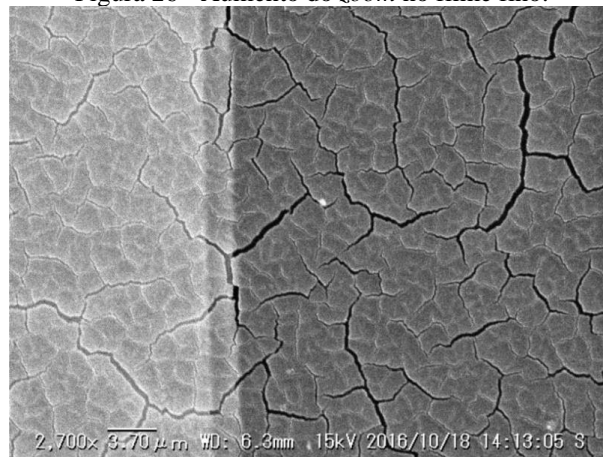
zoom e aproximando-se do limite de difração, pode ser vista a estrutura da Figura 26, que mostra ranhuras no filme fino da matriz. Presume-se que as ranhuras vistas podem ser uma parte funcional do filme, que, segundo 41J Blog (2016), pode permitir que a água seja absorvida pela superfície e sofra uma alteração da resistividade ou a capacitância da camada, detalhes de um sensor de umidade. As ranhuras variam de $1\ \mu\text{m}$ a $< 100\ \text{nm}$ de largura (41J Blog, 2016).

Figura 25 - Zoom de 300X sobre a matriz superior do BME380 mostrando com detalhes o filme fino e o que parecem ser eletrodos.



Fonte: 41J Blog, 2016.

Figura 26 - Aumento do zoom no filme fino.



Fonte: 41J Blog, 2016.

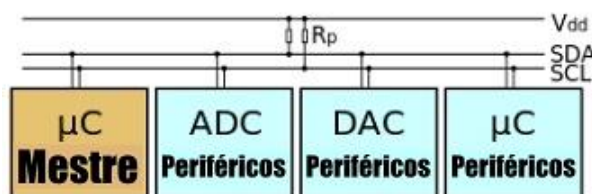
Na patente da Bosch (Lammel *et al.*, 2019) não é detalhada a questão do sensor de umidade, porém é encontrada justamente uma explicação do que pode ser visto na matriz detalhada na Figura 25 e Figura 26, sendo os sensores de umidade utilizados para medir a quantidade de vapor de água presente no ar e formados por um par de eletrodos separados por um material dielétrico. O material dielétrico é formado por um polímero capaz de absorver e reter moléculas de água em concentrações proporcionais à umidade ambiente e essas moléculas

acabam alterando a constante dielétrica do polímero. Isso demonstra que a umidade pode ser determinada medindo-se a capacitância entre os dois eletrodos e correlacionando o resultado com um valor de umidade (41J Blog, 2016; Lammel *et al.*, 2019).

O sensor BME280 utiliza o protocolo de comunicação I2C para a comunicação com o ESP32 (conexão cabeada) 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 (Camara, 2013).

O barramento I2C é composto por dois fios de comunicação, SDA e SCL, além de alimentação (VDD) e GND. Os fios de comunicação apresentam *pull-ups*, como pode ser visto na Figura 27. A linha SCL é responsável pelo *clock* do barramento e a linha SDA pela transmissão de dados.

Figura 27 - Exemplo de comunicação I2C entre um dispositivo mestre e periféricos.



Fonte: Camara, 2013.

No estado neutro do barramento I2C são mantidos os valores digitais altos em ambas as linhas de comunicação. Para se iniciar a comunicação, o SDA é trazido para o valor digital baixo pelo mestre. Logo após, o mestre escreve o endereço do dispositivo que ele deseja se comunicar, por exemplo, 0xC0. Caso o dispositivo exista, ele responderá com um ACK, um pulso na linha SCL e, então, começa a transferência de dados. O mestre escreve o endereço do registrador no periférico que ele deseja ler ou escrever (R/W) e opera, então, em sequência, podendo ler/escrever um ou mais registradores (Camara, 2013).

5.3 MICROCONTROLADOR ESP32

Os microcontroladores são pequenos computadores com processadores, memórias voláteis ou não e diversos periféricos de entrada e saída de dados (Karl e Willig, 2005 *apud* Costa, 2022). Um microcontrolador muito utilizado atualmente é o ESP32 (Figura 28), desenvolvido pela *Espressif System*. “O ESP32 oferece uma plataforma robusta e altamente integrada, que ajuda a atender às demandas contínuas de uso eficiente de energia, design compacto, segurança, alto desempenho e confiabilidade” (Costa, 2022, p. 18).

Figura 28 - Módulo ESP32 WROOM 32UE utilizado no projeto.



Fonte: Mouser, 2022.

Dentre as principais características do módulo do ESP32, modelo WROOM-32UE utilizado no projeto tem-se (Espressif, 2022a):

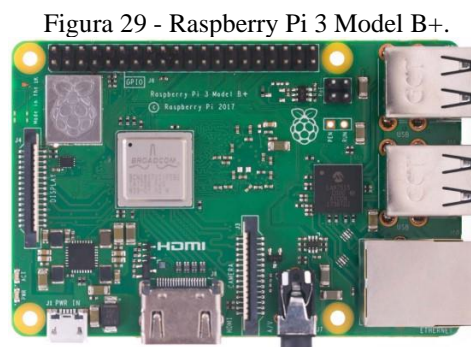
- O módulo é capaz de funcionar de forma confiável em ambientes industriais, com temperatura operacional entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. O ESP32 pode remover dinamicamente as imperfeições do circuito externo e se adaptar às mudanças nas condições externas;
- O ESP32 consegue apresentar uma alta integração com diversos componentes, como: sensores, atuadores, baterias e dispositivos de comunicação;
- O consumo de energia é considerado ultrabaixo, o que para pequenos projetos IoT é essencial, principalmente quando há o uso de baterias; e
- Com base nas comunicações, o ESP32 pode funcionar como um sistema autônomo completo ou como um dispositivo periférico para um *host*, reduzindo a pilha de comunicação do processador. Pode ainda fornecer funcionalidade *WiFi* e *Bluetooth* por meio de suas interfaces SPI/SDIO ou I2C/UART.

O ESP32 é um microcontrolador com *WiFi* 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 (Espressif, 2022b).

O módulo utilizado no projeto foi o ESP32 WROOM 32UE, com antena *WiFi* 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, 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.

5.4 RASPBERRY PI 3 MODEL B+

O Raspberry Pi, que pode ser visto na Figura 29, é um minicomputador 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 funcionando a 1,4 GHz, *WiFi* 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 (Raspberry, 2014).



Fonte: Raspberry, 2014.

O Raspberry Pi é empregado em diversos tipos de projetos de rede IoT, permitindo a conexão de centenas de milhares de dispositivos. Entre suas características estão a baixa capacidade de armazenamento, o processamento, o consumo de energia e o suporte a diferentes tipos de comunicação, além de ser bem pequeno fisicamente. Dependendo da limitação de recursos, o Raspberry Pi pode funcionar como *gateway* de acesso à Internet, transferindo dados e dando capacidade para que vários serviços instalados nele possam funcionar em comunicação com outros dispositivos ou serviços na Internet (Torres *et al.*, 2016).

As redes IoT estão mudando muito e ganhando características diversas, mas os protocolos de comunicação utilizados nessas redes, em geral, devem lidar com baixa largura de banda, alta latência e instabilidades de comunicação (Torres *et al.*, 2016). O protocolo de comunicação MQTT é muito utilizado em comunicações de dispositivos IoT, tendo sido utilizado no projeto, para a comunicação entre o Raspberry Pi e o ESP32, na caixa de medição.

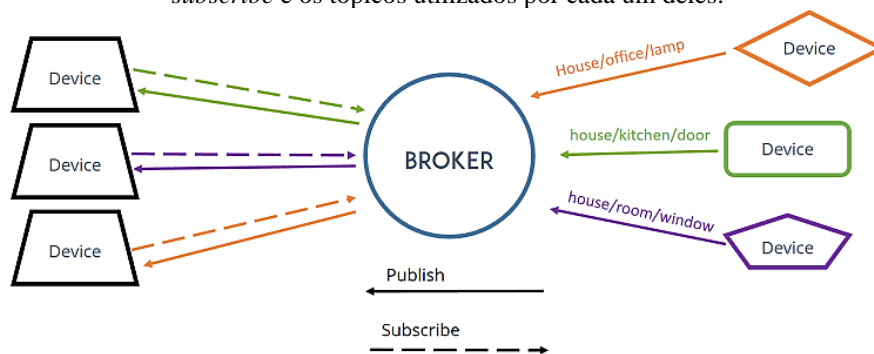
O Raspberry Pi foi utilizado no projeto como um servidor local (armazenamento) e intermediário com alguns serviços de comunicação e de visualização de dados, além de intermediar a comunicação com a Internet. A comunicação entre o ESP32 na caixa de medição e o Raspberry foi feita via *WiFi*, com uma rede local gerada pelo Raspberry Pi. Os serviços instalados no Raspberry Pi foram Mosquitto, Telegraf, InfluxDB, PageKite e Grafana.

5.4.1 Mosquitto

Todos os dados de concentração de CO₂, pressão, umidade e temperatura que foram medidos, foram enviados via protocolo MQTT. A comunicação MQTT entre a caixa de medição do projeto com o Raspberry Pi foi feita via o MQTT *Broker* Mosquitto, instalado no Raspberry Pi. O Mosquitto foi escolhido devido aos vários trabalhos e projetos já desenvolvidos e com extensa documentação na Internet. A comunicação é criptografada com *Transport Layer Security* (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, como visto na Figura 30. 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 (Dinculeanó; Cheng, 2019; Luz, 2022). O *broker* funciona recebendo as mensagens, ordenando-as e as distribuindo para seus destinatários. Resumindo, o *broker* funciona como um gerenciador de mensagens.

Figura 30 - Exemplo do uso de um *broker* MQTT com diversos dispositivos (*devices*) utilizando *publish* e *subscribe* e os tópicos utilizados por cada um deles.



Fonte: Random Nerd Tutorials, 2023.

O *broker* Mosquitto, desenvolvido pela Eclipse Foundation, é compatível com os padrões do MQTT, seguindo o modelo de publicação/assinatura, que tem baixa sobrecarga de rede e pode ser implementado em dispositivos de baixa potência, como microcontroladores, que podem ser usados em sensores remotos da IoT. Então, o Mosquitto acaba sendo utilizado para quando há a necessidade de mensagens leves em dispositivos com recursos limitados (Light, 2017). Quando um dispositivo deseja receber uma determinada informação, esse dispositivo subscreve no tópico do dado que necessita, fazendo uma requisição ao *broker*, que gerencia as publicações e subscrições (Teixeira Filho, 2022).

Após a instalação do Mosquitto, o arquivo de configuração é modificado de acordo com o necessário ao projeto. Então é configurado para que usuários anônimos não se conectem ao

broker e que sejam utilizados os certificados para confirmação da comunicação, definição de arquivos de senhas, em qual porta o *broker* irá comunicar (porta 8883), as pastas onde estarão armazenados os certificados de clientes e do servidor com as chaves, definição de versão do TLS, entre outras configurações.

Os certificados *Secure Sockets Layer* (SSL) são gerados pelos comandos *openssl genrsa* com as devidas especificações para as comunicações e são armazenados em suas devidas pastas. Os certificados de clientes gerados são específicos, utilizando o *Internet Protocol* (IP ou Protocolo da Internet) estático configurado no ESP32 e também para o Telegraf. O certificado e chave gerados para o cliente do ESP32 são copiados para o ESP32 e utilizados em seu código. O certificado e a chave são usados quando a comunicação com o servidor for feita. Para o Telegraf, os arquivos de certificado e chaves gerados são transferidos para uma pasta criada pelo próprio Telegraf quando ele é instalado. O local dos arquivos de certificados e chaves é requisitado no início da comunicação.

Desenvolvido em 1999 pela IBM, o MQTT é um protocolo de código aberto de mensagens projetado para comunicação *Machine-to-Machine* (M2M ou máquina para máquina), tipo cliente servidor, que deve lidar com alta latência, possível instabilidade na comunicação e baixa largura de banda (Torres *et al.*, 2016). Essas características ajudam a ter um protocolo mais leve, com mais eficiência na transmissão de dados e que acaba exigindo poucos recursos, principalmente físicos, nos locais de uso, o que é importante para locais com pouco espaço, que ficam com o equipamento ligado intermitentemente e alimentados por bateria, por exemplo (Carneiro da Cunha; Macêdo Batista, 2022).

O protocolo MQTT adota o protocolo *Transmission Control Protocol* (TCP ou Protocolo de Controle de Transmissão), com um padrão de comunicação das mensagens como *publisher/subscriber* (publicador/assinante). Os dados do publicador são enviados para um intermediário, chamado *broker*, como já citado sobre o Mosquitto. O *broker* enviará as mensagens ao assinante (destinatário daquela comunicação). Com esse método, apenas o endereço do *broker* é conhecido, possibilitando que vários tipos de distribuição de mensagens possam ser utilizados no MQTT, como um para um (*one-to-one*), um para muitos (*one-to-many*) ou muitos para muitos (*many-to-many*) (Torres *et al.*, 2016), como pode ser visto na Figura 31. A distribuição das mensagens do projeto foi simples, de um para um, sendo a caixa de medição o *publisher*, o *broker* Mosquitto instalado no Raspberry Pi, organizando as mensagens e as direcionando para o Telegraf, o *subscriber*.

É gerada uma rede *WiFi* pelo Raspberry Pi só para a comunicação entre o ESP32 e o Raspberry Pi, na qual o IP de ambos é estático para facilitar a comunicação. A comunicação

MQTT é feita utilizando a biblioteca PubSubClient, juntamente com a biblioteca WiFiClientSecure no ESP32. Toda a comunicação é feita de forma segura, utilizando um usuário e senha na comunicação MQTT. Quando o servidor MQTT é configurado no Raspberry Pi, são configurados chaves e certificados na comunicação, que são gerados para os clientes (Telegraf e ESP32) e conferidos no Raspberry Pi pelo Mosquitto. Também é configurada a porta segura de comunicação 8883 do MQTT.



Fonte: Torres *et al.*, 2016.

5.4.2 Telegraf

O Telegraf é um agente de coleta de dados da InfluxData, uma plataforma de código aberto orientada por um *plugin* que faz a coleta de métricas e eventos, de dados de sensores e sistemas que utilizam pouca memória, o que é ideal para um sistema como o de IoT com dispositivos mais limitados. O Telegraf usa o protocolo MQTT para auxiliar na comunicação com os sensores, para o recebimento dos dados e posterior armazenamento de dados no banco do InfluxDB (InfluxData, 2022).

O serviço do Telegraf é instalado no Raspbian (Sistema Operacional do Raspberry Pi) e pode coletar métricas do Raspberry Pi, como uso de CPU, uso de memória, uso de disco, carga do sistema, temperaturas de CPU e GPU e outros dados (InfluxData, 2022). No caso desse projeto, pode coletar os dados recebidos do sensor via MQTT.

5.4.3 InfluxDB

O InfluxDB, desenvolvido pela InfluxData, é um banco de dados de séries temporais, capaz de receber milhões de dados por segundo e realizar análises em tempo real. Ele é otimizado para armazenamento rápido e de alta disponibilidade e recuperação de dados de séries temporais, o que facilita o uso em monitoramento de operações, métricas de aplicativos, dados de sensores de IoT e análises em tempo real. É escrito na linguagem de programação Go

e fornece uma linguagem de consulta bem semelhante ao *Structured Query Language* (SQL) (Grafana, 2023a; Naqvi *et al.*, 2017).

No projeto, os dados das medições foram feitos ao longo de horas e medidos de 30 em 30 segundos, não sendo uma atividade complexa até para bancos de dados mais lentos. Então, a escolha do InfluxDB como banco de dados foi feita com base na facilidade de implementação juntamente com Telegraf e Grafana e pela documentação de apoio encontrada antes da escolha.

Os dados de séries temporais são dados que apresentam sua identificação de data e hora indexados em ordem temporal. Esses dados geralmente são obtidos de medições sucessivas, na mesma fonte de dados e em intervalo de tempo fixo, com o objetivo principal de estudar alterações nos valores ao longo do tempo. Em um gráfico, a série temporal sempre vai ser o valor no eixo y e o tempo no eixo x. Gráficos de pontos de dados de séries temporais geralmente ilustram tendências ou padrões de maneira mais acessível e intuitiva (InfluxData, 2023).

5.4.4 PageKite

A rede em que o Raspberry Pi está é uma rede privada que é acessível à Internet usando *Network Address Translation* (NAT ou tradução do endereço de rede). Assim, nenhum *host* da rede privada é acessível de fora da rede. Para conseguir acessar o Raspberry Pi da Internet, deveriam ser geradas regras NAT de encaminhamento de portas no *gateway* da rede (Candido, 2019). Porém, no caso do projeto, não foi possível configurar essas regras no *gateway*, pois a conexão é roteada via *WiFi* de um celular. Então, nessa situação, foi necessária uma solução de tunelamento como o que é feito pelo serviço do PageKite.

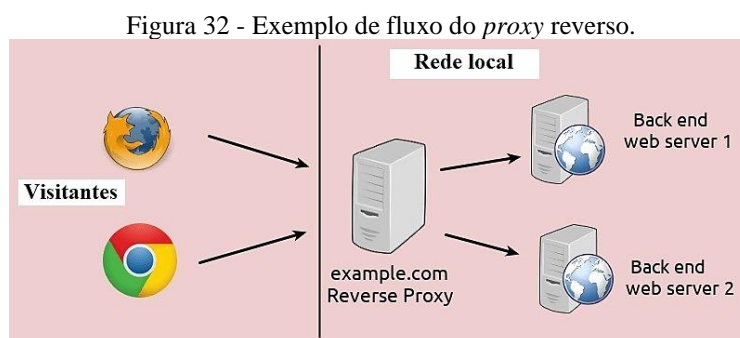
O PageKite é uma solução de código aberto de tunelamento local para a Internet, considerado rápido e confiável. O PageKite acaba transformando um servidor local, como o Raspberry Pi, em um site público, mesmo mantendo o IP local. Então, o PageKite expõe um serviço dentro de uma rede privada à Internet sem a necessidade de encaminhamento de porta, desde que se tenha acesso ativo à Internet (Candido, 2019; PageKite, 2023a).

O PageKite funciona da seguinte maneira (Guoan, 2019):

- O servidor é executado em *localhost*;
- O PageKite é instalado no servidor local (na mesma máquina) e funciona como um conector de *back-end*;
- Outra instância do PageKite é executada como um *front-end relay* em uma máquina com um endereço IP público, na nuvem;

- O PageKite de *back-end (localhost)* se conecta à instância *front-end* (nuvem) e gera um túnel para o serviço configurado; e
- Os clientes, que no caso do projeto foram navegadores *web*, conectam-se ao *front-end* e solicitam o serviço. O *front-end* retransmite a solicitação pelo túnel gerado e o *back-end* a encaminha para o servidor real. As respostas viajam de volta da mesma maneira.

A Figura 32 apresenta um exemplo do fluxo de um serviço de *proxy* reverso em que os clientes, que são os navegadores *web*, fazem as solicitações para o servidor do *proxy* reverso (*front-end*), que seria um servidor do PageKite, pela Internet e as encaminha para os servidores de *back-end*, que são os servidores onde está o servidor verdadeiro do serviço necessitado (Guoan, 2022).



Fonte: Adaptado de Guoan, 2022.

É necessário apenas o cadastramento no site do PageKite e um comando com o nome de domínio escolhido. O PageKite funciona com qualquer servidor *web* e com qualquer navegador ou cliente da *web*. Então, as pessoas que precisam utilizar a página não precisam instalar *softwares* e, caso o nome de domínio seja diferente do padrão do PageKite, as pessoas nem saberão que ele está sendo utilizado. Caso o nome de domínio seja do padrão do PageKite e algumas regras sejam seguidas, o PageKite vem com criptografia de protocolos de segurança de comunicações TLS/SSL; além de segurança automática usando o *Hyper Text Transfer Protocol Secure* (HTTPS), que utiliza comunicação criptografada entre os dispositivos (PageKite, 2023b).

O intuito do PageKite no projeto foi facilitar o acesso remoto ao painel do Grafana, que funciona localmente, deixando que o painel seja acessado por qualquer pessoa com permissão de acesso (visto que o painel no Grafana apresenta usuário e senha), simplificando, assim, a visualização dos experimentos do projeto. Além disso, o PageKite utiliza criptografia TLS, tornando toda a conexão mais segura.

5.4.5 Grafana

O Grafana é um projeto de código aberto iniciado em 2014 e que teve muita popularidade no GitHub, sendo uma plataforma que faz a consulta dos dados armazenados no banco do InfluxDB (no caso desse projeto) e faz com que esses dados possam ser visualizados através de diferentes tipos de gráficos e painéis. O Grafana permite que os usuários criem rapidamente visualizações de seus dados, como gráficos, tabelas e mapas de calor. O Grafana ainda deixa com que esses painéis sejam acessíveis a diversas pessoas as quais o desenvolvedor do painel dê acesso (Grafana, 2023b).

Através do Grafana é possível visualizar, consultar e entender os dados de diversas ferramentas externas. Por meio de vários *plugins*, os usuários podem obter o que mais lhes convém ou até mesmo criar *plugins* para atender às suas necessidades.

O Grafana ainda oferece os recursos de (Do, 2021):

- Visualização de dados;
- Painéis dinâmicos;
- Explorar métricas;
- Explorar *logs*;
- Criação de alertas;
- Fontes de dados mistas em um mesmo gráfico;
- Anotações e *tags* de eventos;
- Filtros *ad-hoc*; e
- Uso de *plugins* prontos ou criação de novos, suportando *plugins* de painéis, fonte de dados e aplicativos.

5.4.6 Pilha Telegraf, InfluxDB e Grafana (TIG)

O InfluxDB apresenta instalação de cliente para seu funcionamento. Após, é feita a configuração do arquivo do InfluxDB e a criação do banco de dados e do usuário e senha que serão utilizados para ter acesso ao banco de dados. Há uma ferramenta do próprio InfluxDB para essas configurações e interações com o servidor. Um exemplo de comunicação da ferramenta de interação com o servidor do InfluxDB pode ser visto na Figura 33, no qual são feitas requisições para mostrar os bancos de dados criados (*show databases*), entrar em um banco de dados de nome telegraf (*use telegraf*) e mostrar a lista de medidas que existem dentro

desse banco de dados (*show measurements*), que demonstrou medidas da CPU, do disco, memória, processos, entre outros serviços do sistema.

Figura 33 - Interação com ferramenta do servidor InfluxDB.

```
> show databases
name: databases
name
----
_internal
telegraf

> use telegraf
Using database telegraf

> show measurements
name: measurements
name
----
cpu
disk
diskio
mem
processes
swap
system
```

Fonte: Kumar, 2021.

O Telegraf tem um arquivo de configuração muito grande devido à diversidade de *plugins* que podem ser acessados com ele. No projeto, ele funcionou como uma ligação entre o Mosquitto e o banco de dados no InfluxDB. Na parte de *output plugins* (*plugins* de saída), especificamente no `outputs.influxdb`, foi configurado o nome do banco de dados e seu respectivo usuário e senha, que já foram configurados no InfluxDB em que o Telegraf gravou. No mesmo arquivo de configuração do Telegraf, há a parte de configuração de entrada de dados que o Telegraf buscou. Na parte `inputs.mqtt_consumer`, do arquivo de configuração, foi possível selecionar o servidor que deveria ser utilizado, em qual porta seria o recebimento de dados do MQTT, quais tópicos ele escutaria, além dos detalhes de usuário e senha da conexão MQTT com o *broker* Mosquitto e todos os certificados e chaves TLS usadas na conexão e que foram previamente geradas e adicionadas em uma pasta do arquivo do Telegraf, entre outras configurações.

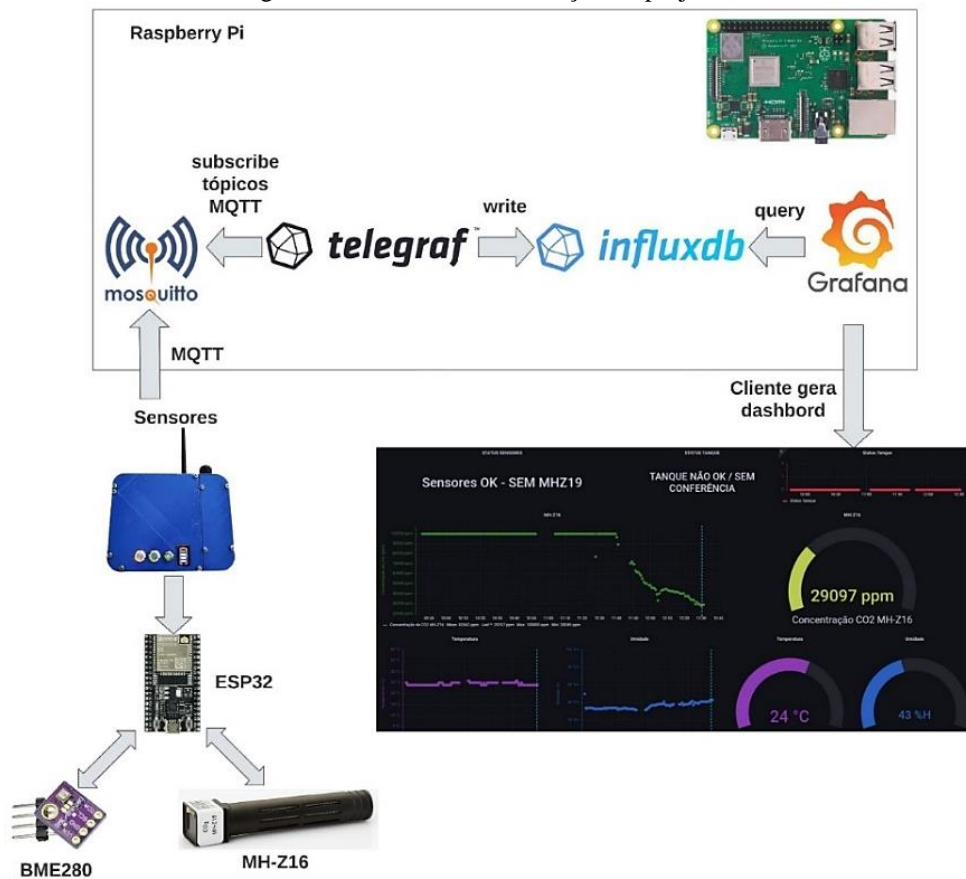
A instalação do servidor do Grafana pode ser feita via comandos e, por padrão, a porta de comunicação do Grafana no servidor local é a porta 3000. Para configurar o Grafana de forma local é necessário entrar no navegador *web* e digitar `http://localhost:3000`. No primeiro *login* será necessário modificar a senha padrão e, depois, já é possível acessar as páginas do Grafana. É necessário adicionar a fonte de dados, que no caso é o InfluxDB, e algumas informações do tipo de banco do InfluxDB. Detalhes mais específicos, como o nome do banco de dados, o usuário, senha e detalhes de acesso do banco, inclusive de credenciais de acesso,

também são necessários para maior segurança. Depois de adicionar o InfluxDB como fonte de dados ao servidor Grafana, é possível ter acesso aos dados do banco para a criação de diversos tipos de painéis.

5.5 CIRCUITO E MONTAGEM

Os dados medidos pelos sensores podem ser vistos em tempo real em uma página na Internet devido a uma série de serviços de comunicação entre a caixa de medição, o Raspberry Pi, e a Internet, como já explicitado. O fluxo da comunicação entre a caixa de medição e o Raspberry Pi pode ser visto na Figura 34, levando em consideração uma comunicação somente local. Utilizando o PageKite, o acesso ao Grafana é possível ser feito pela Internet.

Figura 34 - Fluxo de comunicação do projeto.

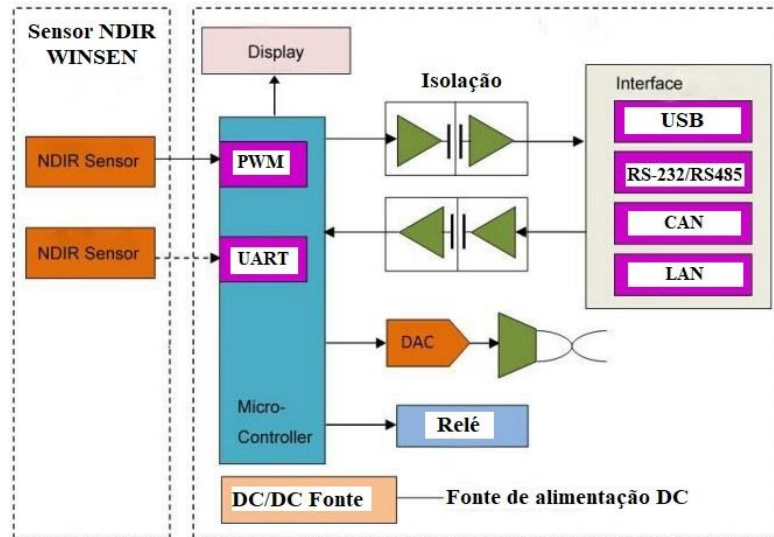


Fonte: Do Autor, 2022.

O circuito para medição de CO₂ utilizando os sensores MH-Z14, MH-Z19C ou MH-Z16 (qualquer um desses sensores da marca Winsen podem usar o mesmo tipo de circuito) pode ser visto no esquema da Figura 35. A ligação desses sensores é feita, via UART, a dois fios,

sendo um TX (sensor) com RX (ESP32) e um RX (sensor) com TX (ESP32). Todos os dados são processados pelo microcontrolador ESP32 e podem ter diversos fins, como mostrar o valor medido em um *display*, enviar o valor medido para outro equipamento, acionar um relé, entre outras aplicações. O sensor recebe alimentação de 5 V de uma placa *step-down*.

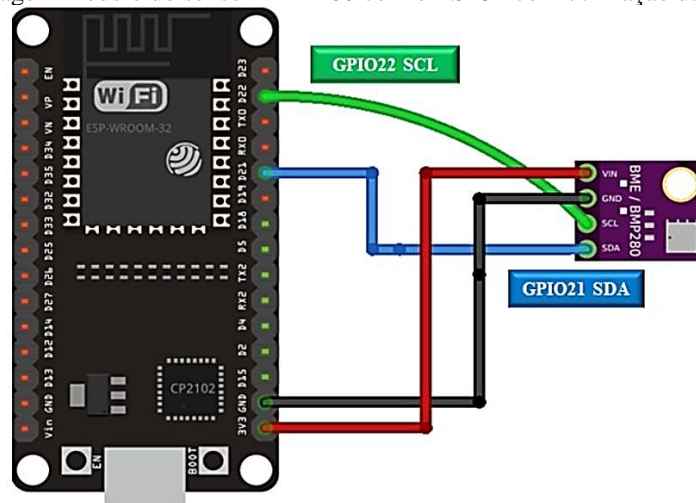
Figura 35 - Esquema de montagem do circuito de medição e tratamento dos dados de medição com um sensor NDIR da marca Winsen.



Fonte: Adaptado de MH-Z14, 2016.

O sensor BME280 utiliza I2C para comunicar e tem SCL e SDA como pinos para comunicação, além dos pinos VDD e GND. A ligação do sensor com o ESP32 pode ser vista na Figura 36. O sensor é alimentado com 5V pela placa *step-down*, não sendo pelo ESP32 como na Figura 36.

Figura 36 - Montagem modelo do sensor BME280 com o ESP32 com utilização da comunicação I2C.

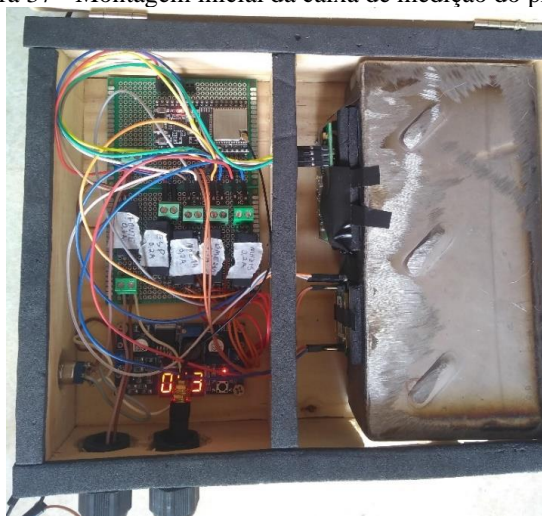


Fonte: ESP32 ESP-IDF, 2022.

O ESP32 é responsável por coletar os dados dos sensores e fazer a comunicação com o Raspberry Pi via *WiFi* em rede local. O Raspberry Pi funciona como um servidor, além de processar e armazenar os dados. O código no ESP32 analisa os dados já no recebimento para saber se há problema com os sensores ou se as medidas estão dentro de um determinado valor. Caso não estejam, há a mensagem de erro dos sensores. O ESP32 também é alimentado individualmente pela placa *step-down*.

Uma montagem inicial da caixa de medição do projeto é mostrada na Figura 37, em que é possível ver uma câmara de inox à direita da imagem. Esta câmara tem um formato interno em U invertido (Ω), que pode ser visto na Figura 38, com entrada do fluxo de ar na parte inferior direita, 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 ficam os sensores só chegue realmente o ar sem líquidos. Se houvesse líquido, não chegaria ao outro lado por cair por gravidade ainda no lado direito da câmara.

Figura 37 - Montagem inicial da caixa de medição do projeto.



Fonte: Do Autor, 2022.

A montagem final da caixa de medição, com todos os sensores e o ESP32 para a medição da concentração de CO_2 , temperatura e umidade, ficou conforme mostra a Figura 39, onde pode ser visto que há três botões na frente da caixa de medição. O botão 3 é para ligar e desligar a caixa de medição. O *display* de LED (4) apresenta o nível da bateria da caixa de medição. O projeto é móvel então, é energizado por duas baterias de Li-íon de 3,7 V, modelo 18650, de 15800 mAh cada. Elas estão ligadas em série, resultando em aproximadamente 7,4 V e corrente de 15800 mAh. A corrente é suficiente para dar carga de 2 a 3 medições de aproximadamente 4 horas de duração.

Figura 38 - Detalhe interno da câmara de inox de separação de líquido e gás.



Fonte: Do Autor, 2022.

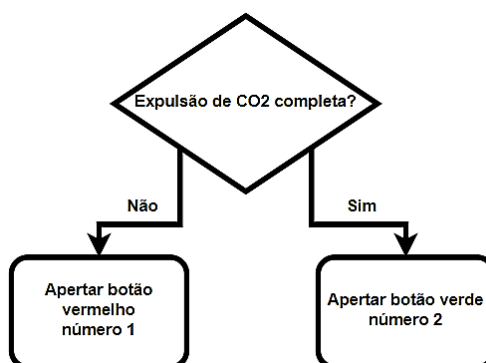
Figura 39 - Caixa de medição finalizada.



Fonte: Do Autor, 2022.

Um fluxograma de decisão sobre os botões pode ser visto na Figura 40. Os botões 1 e 2 são utilizados para quando o cervejeiro vai avaliar se a expulsão de CO₂ do 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 retirado do tanque, o botão 2 deve ser acionado. Caso contrário, o botão 1 deve ser acionado, demonstrando que, no tempo atual de expulsão, foi conferido pelo cervejeiro e ainda deve continuar a expulsão no tanque, pois ainda resta CO₂ que pode ser prejudicial à atividade. Os botões são apenas para controlar se nas conferências do tanque feitas pelo cervejeiro o CO₂ foi expulso ou não no tempo correto e, assim, seja possível visualizar em qual concentração foi analisado e se nessa concentração a avaliação foi negativa ou não, avaliando o tempo decorrido até o acionamento do botão.

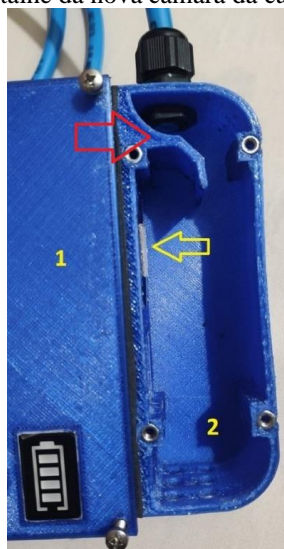
Figura 40 - Fluxograma de decisão dos botões da caixa de medição.



Fonte: Do Autor, 2022.

Conforme a Figura 41, a nova câmara de medição apresenta a parte de número 1, em destaque, com tampa, pois é onde ficam os circuitos com os sensores e outros componentes já detalhados. Na parte direita, que está sem a tampa, destacada com o número 2, é uma câmara onde estão fixados os sensores na lateral (destaque com uma seta, sendo possível visualizar uma parte do sensor MH-Z14) e que recebe o ar de saída do tanque, a ser medido pela parte superior, com a mangueira e saída de ar da câmara na parte inferior.

Figura 41 - Detalhe da nova câmara da caixa de medição.



Fonte: Do Autor, 2022.

A montagem final, mostrada na Figura 39 e Figura 41, foi confeccionada de um material plástico chamado de *polyethylene terephthalate glycol* (PETG), feito em impressora 3D e aceito em indústrias alimentícias (o caso de uma cervejaria).

O PETG é um poliéster termoplástico com boa resistência química e física, que apresenta boa durabilidade, sendo adequado para uso em temperaturas mais altas e que apresenta boas características para o uso com impressão 3D. O PETG é uma adaptação do

polyethylene terephthalate (PET) com adição de glicol (G), o que acaba oferecendo algumas mudanças nas propriedades do material. O PETG substituiu o etileno glicol na cadeia molecular por um monômero maior, o ciclohexano dimetanol, que interrompe a cristalização a altas temperaturas associadas ao PET, o que enfraquecia o material por superaquecimento, turvação e fragilidade (TWI, 2023).

O PETG tem aplicações diversas por ser resistente ao calor, impacto e solventes. É atualmente amplamente utilizado para embalagens, como recipientes para alimentos, garrafas para bebidas, entre outros. Também é possível esterilizar itens feitos de PETG. O PETG oferece resistência química contra bases e ácidos e apresenta conformidade com a *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) para uso em alimentos (TWI, 2023).

No caso específico de bebidas, como a grande parte é gaseificada (com a utilização de CO₂), não há grande ligação entre o CO₂ e o PETG, como observado através de alguns experimentos (ERIKS, 2023; Bürkle GMBH, 2015; Plazit Polygal, 2020). Por isso, este é um bom material a ser utilizado no projeto, pois não modificaria a concentração do dióxido de carbono, o que prejudicaria a medição.

As medições são feitas sob pressão ambiente, apenas com a vazão de ar com bastante CO₂ inicialmente e, depois, se aproximando da concentração de dióxido de carbono no ambiente. Os materiais da caixa de medição acabam entrando em contato apenas com um pouco de cerveja no início do processo (restos na tubulação) e, às vezes, água, mas em pouca quantidade, não sendo um ambiente tão agressivo ao material.

Os componentes eletrônicos ficam separados da câmara de medição, então sofrem somente o contato com um pouco de ar que está na câmara de medição e que acaba ultrapassando as paredes e frestas dos sensores. A temperatura de trabalho é ambiente, o que não é prejudicial ao PETG.

5.6 METODOLOGIA DA EXPULSÃO DE CO₂

O processo de expulsão do dióxido de carbono dos tanques de cerveja depende diretamente do ar que é utilizado. Comprar qualquer tipo de gás para utilizar na expulsão ficaria muito caro, então é utilizado o ar ambiente esterilizado para a expulsão do CO₂.

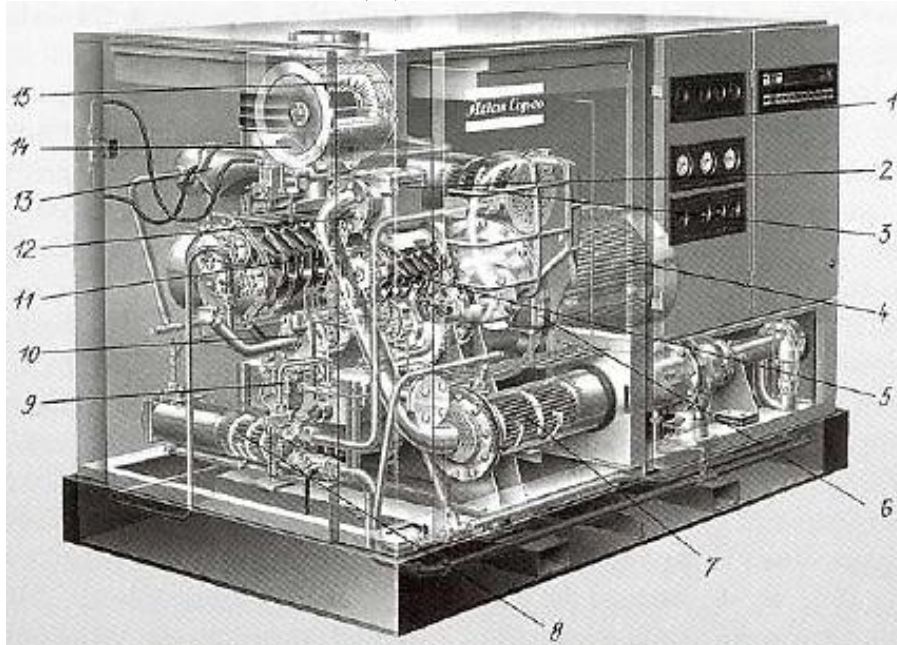
Na produção de cerveja, é utilizado ar em diversas partes do processo; algumas vezes em pressões altas, em outras em grandes quantidades, em outros locais é necessário o ar comprimido isento de óleo e contaminações, entre outros tipos de usos mais específicos. Constata-se que o ar atmosférico ambiente é utilizado tanto na expulsão do dióxido de carbono

dos tanques quanto como ar comprimido para acionamento de equipamentos, movimentação de líquidos, abertura ou fechamento de válvulas e para aerar fermento, por exemplo. Há custo apenas na energia para sua transformação (Kunze; Manger, 2004).

Uma planta para transformação do ar ambiente em ar atmosférico esterilizado é necessária em uma cervejaria. Essa planta, em geral, contém: um filtro de ar para retirar as contaminações, um compressor que comprime o ar aspirado na pressão necessária, um resfriador para resfriar o ar aquecido pela compressão, um secador para secar o ar frio, um armazenador do ar funcionando como um pulmão para equilibrar as flutuações de pressão (fornece pressão contínua) e uma rede de tubulações (Kunze; Manger, 2004).

O tipo de compressor utilizado na unidade fabril é do tipo parafuso (Figura 42), um tipo de compressor isento de óleo para evitar que o óleo entre no ar comprimido e contamine. Esses compressores, em geral, são resfriados a ar ou água. É um tipo de compressor muito utilizado em cervejarias (Kunze; Manger, 2004).

Figura 42 - Compressor do tipo parafuso, muito utilizado em cervejarias. (1) painel de instrumentos, (2) abafador de ruído de compressão, (3) resfriador intermediário, (4) motor elétrico, (5) estágio de alta pressão, (6) separador de condensado, (7) resfriador posterior com separador de condensado, (8) radiador de óleo, (9) bomba de óleo, (10) ventilação, (11) estágio de baixa pressão, (12) válvula antirretorno, (13) refrigerador de descarga, (14) válvula de controle de admissão, (15) filtro de admissão de ar com abafador de ruído.

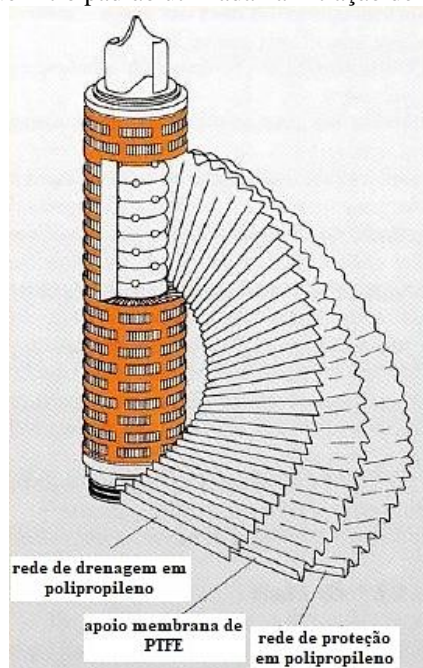


Fonte: Kunze; Manger, 2004.

O ar comprimido advindo desse sistema é chamado de ar estéril, principalmente pelo uso de filtros de ar que retiram os contaminantes, principalmente retirando microrganismos do ar. Esse ar estéril é obtido através de velas filtrantes com o diâmetro dos poros de 0,2 μm (Kunze; Manger, 2004).

A Figura 43 mostra a construção interna de uma vela de filtração de ar padrão, com três membranas: uma de drenagem de polipropileno, outra de suporte em poli-tetra-flúor-etileno (PTFE) e outra em polipropileno para proteção da rede. Internamente, várias membranas são dobradas para aumentar a superfície de filtração, que chega a cerca de $0,75 \text{ m}^2$ por vela. Pelo tipo de montagem das membranas das velas, não só partículas maiores do que os poros de $0,2 \text{ }\mu\text{m}$ são retidas, mas, por resultado de forças eletrostáticas, também são retidas partículas menores e o ar se torna estéril (Kunze; Manger, 2004).

Figura 43 - Vela de filtro padrão utilizada na filtração de ar para esterilizá-lo.



Fonte: Adaptado de Kunze; Manger, 2004.

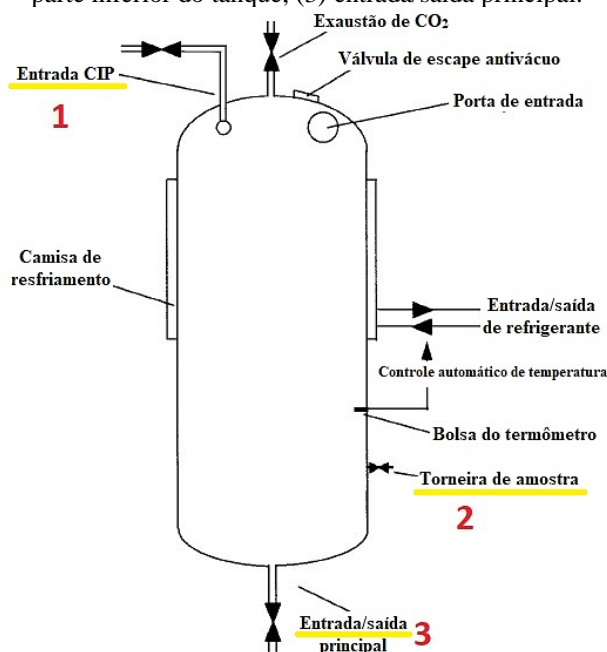
Antes de iniciar a expulsão, o tanque é despressurizado, retornando CO_2 para o circuito de fornecimento do gás, para que grande parte seja reaproveitada e apenas parte dele fique no tanque e a expulsão possa iniciar.

Quando o tanque está sem cerveja, há somente dióxido de carbono dentro dele. O ar atmosférico apresenta uma massa molar de $28,96 \text{ g/mol}$, enquanto o dióxido de carbono apresenta 44 g/mol . Por ser mais denso, o dióxido de carbono tende a ficar na parte inferior do tanque, o que facilita a expulsão e justifica a injeção de ar ser de cima para baixo no tanque.

Após todo esse processo na obtenção do ar e tratamento para esterilizá-lo, o ar fica disponível para ser utilizado na expulsão do CO_2 a uma pressão de 8 bar . Na Figura 44 é possível ver em destaque as três importantes partes do tanque na expulsão. Para a retirada de CO_2 do tanque é necessário injetar ar atmosférico esterilizado com os compressores de ar soprando a

uma alta vazão por cima do tanque (1) como forma de aspirar ou empurrar o dióxido de carbono com o ar para a parte de baixo do tanque (3) e, conseqüentemente, para fora do tanque. Em (2) é o local onde são feitas as medições pela caixa de medição e pelos cervejeiros e operadores.

Figura 44 - Desenho aproximado de um tanque cilíndrico vertical de cervejaria com alguns dos equipamentos do sistema. (1) entrada CIP; (2) torneira de amostra: o local de retirada de amostras do ar interno no tanque, por onde é feita a medição da concentração de CO₂ e as conferências do tanque pelos cervejeiros; e a saída do ar na parte inferior do tanque, (3) entrada/saída principal.



Fonte: Adaptado de Boulton; Quain, 2008.

São realizados dois tipos de expulsões diferentes que já são atividades normais da cervejaria. A expulsão automática, que utiliza receitas que são realizadas automaticamente, sem ação de operadores, como fechamento ou abertura de válvulas seguindo tempos definidos. Os tempos foram selecionados conforme recomendação da empresa que montou o sistema na fábrica através de testes realizados por eles em cervejarias de todo o mundo. A outra expulsão é manual, em que o tanque tem sua válvula da entrada de CIP (1) na Figura 44 manipulada sua abertura pelos operadores manualmente e eles deixam essa válvula com abertura conforme o tamanho do tanque e, em geral, por pelo menos 4 horas da mesma forma, com injeção de ar atmosférico esterilizado continuamente, sem alterações na abertura da válvula.

A expulsão automática é de 120 minutos para *Bright Beer Tanks* (BBTs – capacidade de 386 m³), que são tanques menores e, geralmente, contém parte do processo fabril com cerveja menos carregada de leveduras. Esse intervalo de tempo não é contínuo, são 90 segundos enviando ar esterilizado e 100 segundos em pausa. Esse tempo em pausa não conta no tempo de expulsão. São 120 minutos somente de expulsão, o que, no total, resulta em um tempo muito

maior pelo tempo em pausa. O tempo em pausa é justamente para não gerar um regime turbulento interno no tanque e causar uma grande mistura que dificultaria a expulsão de CO₂ e acabaria resultando um tempo maior de expulsão. Na expulsão de forma manual, a válvula de ar atmosférico esterilizado fica o tempo inteira aberta em 20% de abertura, também como forma de não gerar uma pressão interna alta no tanque devido a vazão de entrada alta, gerando um regime turbulento interno no tanque.

Para *Fermenting and Maturation Tanks* (FMTs - capacidade de 905 m³), tanques maiores e que apresentam alta carga de leveduras, o tempo de expulsão automática é de 160 minutos. Tanto de forma manual quanto automática, a válvula fica totalmente aberta nos FMTs, que, por serem tanques muito grandes, fica mais difícil de gerar um regime turbulento. Porém, na expulsão automática há pequenas pausas, bem menos do que em BBTs.

O controle de vazão de ar atmosférico para a expulsão é essencial, pois caso o fluxo seja muito alto, isso pode ocasionar um regime turbulento entre o CO₂ interno no tanque e o ar atmosférico esterilizado, o que causa uma mistura mais complexa de ser retirada. Quando o fluxo de ar atmosférico esterilizado apresenta velocidades aproximadas entre a entrada e a saída de ar, forma-se um regime laminar na expulsão de CO₂, o que torna a expulsão mais rápida.

5.7 METODOLOGIA DE EXPERIMENTOS

A caixa de medição deve ser posicionada de forma que a parte de entrada da mangueira do ar de saída do tanque fique 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 (destacada com uma seta vermelha na Figura 41) para que, caso tenham líquidos, a parede possa proteger os sensores e deixar que esses líquidos escorram lateralmente pela câmara, até sair da caixa de medição pela parte inferior. A Figura 45 mostra a maneira como deve ser disposta a caixa de medição no tanque.

É possível perceber pela Figura 45 que uma mangueira é encaixada na torneira de amostra do tanque (seta em destaque amarela). A caixa deve ficar na vertical, com os botões direcionados à frente da pessoa, de forma que a antena fique reta ou direcionada para o local onde o Raspberry Pi está instalado. Dessa forma, o fluxo de ar sai pela torneira de amostra e entra pela parte de cima da caixa, passando pela câmara de medição e saindo pela parte de baixo, voltando para o ambiente. A torneira de amostra, em consenso, é o local ideal que os cervejeiros encontraram para avaliar como está o ar interno do tanque. Então, o projeto utiliza

o mesmo lugar para ter parâmetros para correlacionar com as medições de oxigênio que eles fazem e com o teste inalando o ar de saída do tanque pela torneira de amostra.

Figura 45 - Utilização da caixa de medição em um tanque.



Fonte: Do Autor, 2022.

No sistema de expulsão automática, as atividades são feitas por receitas, que seguem um passo-a-passo, com ações e subações. Quando o tempo acaba, o processo trava e o(a) operador(a) deve conferir, com um detector de gases da marca MSA modelo ALTAIR 4XR, a concentração de oxigênio em porcentagem. Ele(a) deve também aspirar o ar de saída do tanque pela torneira de amostra. Caso ele(a) não consiga respirar, ou sinta alguma dificuldade, algo que incomode o olfato se ficar respirando aquele ar, significa que ainda há dióxido de carbono no tanque. A explicação é que o CO_2 é um gás asfíxiante se inalado em alta concentração, o que incomoda o olfato, chegando a causar certa ardência nas narinas ao respirar.

Então, utilizam-se dois métodos de conferência do tanque, um indireto, que é pelo detector de gases, visto que o gás alvo é o CO_2 e o gás medido é o O_2 e um método individual, até certo ponto que é inalando o ar de saída do tanque. Em alta concentração é impossível inalar o CO_2 por muito tempo, mas em baixas concentrações e por diversos fatores, como um

resfriado, pode haver confusão do olfato e, conseqüente, erro na liberação da expulsão de um tanque somente pelo olfato. Um experimento de concentração de oxigênio de um tanque durante a liberação para a assepsia pode ser visto na Figura 46, permitindo observar que a mangueira do detector de gases é colocada diretamente na torneira de amostra.

Figura 46 - Experimento com o detector de gases de concentração de oxigênio para liberação da assepsia.



Fonte: Do Autor, 2023.

Algumas especificações do detector de gases MSA modelo ALTAIR 4XR podem ser vistas no Quadro 4, como faixas de medição de gases e tipos de gases medidos.

Quadro 4 - Algumas especificações do detector de gases MSA modelo ALTAIR 4XR.

Especificação	Descrição		
TIPOS DE GÁS	Gás	Faixa	Resolução
	LEL	0-100 %	1 %
	O ₂	0-30 %	0,1 %
	CO	0-1999 ppm	1 ppm
	H ₂ S-LC	0-100 ppm	0,1 ppm
	SO ₂	0-20 ppm	0,1 ppm
	NO ₂	0-50 ppm	0,1 ppm

Fonte: MSA, 2021.

Pelo experimento, a concentração de oxigênio deve estar entre 19 e 21% para que o tanque possa ser liberado para a assepsia com hidróxido de sódio. No ambiente próximo aos tanques, a concentração encontrada é de 20,8% de oxigênio, sendo esse um valor base para

liberação e que, normalmente, é o mais visto. Visto que a troca é por ar atmosférico esterilizado, espera-se que a concentração de oxigênio nos tanques no fim da atividade seja próxima à encontrada no ambiente.

A caixa de medição do projeto fica ligada no tanque desde o início da expulsão, com ar direto da torneira de amostra, o tempo todo aberta e medindo a cada 30 segundos. Quando a expulsão é feita de maneira automática, algumas vezes, perto do final do tempo de expulsão, o(a) operador(a) tira a caixa de medição da torneira de amostra para conferir com o detector de gases como está a concentração de oxigênio do ar de saída do tanque.

No caso de expulsão de CO₂ de maneira manual, convencionou-se seguir pelo gráfico da caixa de medição do projeto para conferir a concentração de CO₂ e, quando chega em um valor abaixo de 5000 ppm, o(a) operador(a) vai conferir a concentração de oxigênio com o detector de gases. Boa parte dos(as) operadores(as) deixavam muito tempo a expulsão manual acontecendo para garantir que não houvesse risco (já que a maneira correta é de forma automática).

5.8 METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CO₂ – MH-Z16

O sensor que mede a concentração de CO₂, o MH-Z16, tem como recomendação três métodos de calibração do ponto zero (400 ppm): método manual, utilizando conexão de pinos do sensor; método enviando comando, em que um comando de calibração é enviado ao sensor; e método de autocalibração, em que o sensor fica funcionando por algum tempo para reconhecer qual é o ponto zero de forma inteligente e fazer a calibração automaticamente (MH-Z16, 2022).

O método manual é mais complexo de se fazer por ter que conectar o pino HD do módulo sensor em nível baixo (0V), mantendo pelo menos por 7 segundos assim, o que torna inviável ficar alterando os pinos fisicamente sempre que for calibrar. O método de autocalibração não é recomendado para uso em casos com grande variação de concentração, como na indústria, agricultura, entre outros, então essa função do sensor é desativada. O uso do método de envio de comando é mais fácil e foi o método escolhido, pois não necessita de alterações físicas no sensor, apenas de mudanças no código do projeto, o que pode ser facilmente inserido no código geral e utilizado em conjunto com botões ou chaves, por exemplo.

Uma exigência de todos esses modos de calibração é que o sensor esteja estável no ambiente, com uma concentração de 400 ppm por mais de 20 minutos. A concentração de CO₂ ambiente é próxima de 400 ppm (Martin *et al.*, 2017), o que acaba facilitando o processo de calibração. Conforme contato com a equipe de suporte da empresa fabricante do sensor, não há

a necessidade de calibrar esse sensor por outros modos, sendo necessária apenas uma calibração para o ponto zero dele sempre que preciso. Como nos tanques a concentração vai sempre caindo do maior valor lido pelo sensor até chegar a aproximadamente o valor de concentração do ar ambiente, uma pequena variação na calibração de ponto zero não prejudica as medições.

A calibração utilizando a caixa de medição é feita conforme pode ser visto na Figura 41, em que a câmara de medição fica aberta para receber mais facilmente o ar em circulação. A calibração é feita em um ambiente com boa ventilação, em local aberto e longe de quaisquer equipamentos que possam gerar qualquer tipo de alteração no sensor. O código de calibração vai, então, a cada minuto fazer a medição da concentração de dióxido de carbono, durante 20 minutos, conforme pode ser visto na Figura 47.

Figura 47 - Início da calibração e mensagens de saída de andamento da atividade.

```
17:54:06.436 -> MH-Z16 is warming up now.
17:54:36.472 ->
17:54:36.472 -> .....1min.
17:55:35.440 -> co2: -1ppm now.
17:55:36.455 -> .....2min.
17:56:35.451 -> co2: 403ppm now.
17:56:36.481 -> .....3min.
17:57:35.481 -> co2: 401ppm now.
17:57:36.457 -> .....4min.
17:58:35.482 -> co2: 405ppm now.
17:58:36.481 -> .....5min.
17:59:35.494 -> co2: 406ppm now.
17:59:36.492 -> .....6min.
```

Fonte: Do Autor, 2023.

Garantindo durante os 20 minutos que o sensor esteja estabilizado e medindo concentrações próximas a 400 ppm, o comando de calibração é enviado duas vezes ao sensor, como visto na Figura 48, e, depois, são feitas medições normais de concentração a cada 10 segundos, já com o sensor calibrado. Por recomendação do fabricante do sensor, ele deve ser regularmente calibrado e o ciclo de calibração recomendado não deve ultrapassar mais do que 6 meses (MH-Z16, 2022). O sensor do projeto foi calibrado mensalmente.

Pensou-se em utilizar um equipamento certificado para a calibração e conferência dos dados de medições, porém o sensor MH-Z16 já veio calibrado de fábrica. No Anexo A pode ser visto seu certificado de calibração. O aluguel de um sensor certificado seria muito caro, visto que os experimentos não são feitos continuamente na fábrica, podendo chegar a dias sem realizar a atividade, o que acabaria encarecendo muito pela diária do equipamento, pois é uma atividade conforme a produção. Além disso, a atividade não necessita de muita precisão,

somente de uma aproximação de valores de liberação para formar um entendimento e melhor caracterização da atividade. Visto que a concentração de CO₂ se aproxima dos níveis de concentração do ambiente externo e a calibração do sensor segue a concentração do ambiente, uma calibração de concentração um pouco acima de 400 ppm, realizada em um ambiente aberto e sem interferência de equipamentos e movimentos de pessoas que possam causar aumento na concentração de CO₂, pode ser o suficiente para esse tipo de atividade. Foram comprados dois sensores MH-Z16 e após as calibrações realizadas em um deles, era comparada a medição dos dois sensores para verificar se havia muita diferença entre eles, o que não foi observado.

Figura 48 - Comando de calibração de ponto zero enviado duas vezes e medições.

```
18:24:37.692 -> 1st zero calibration now.  
18:25:37.666 -> 2nd zero calibration now.  
18:25:37.711 -> co2: 487ppm now.  
18:25:47.681 -> co2: -1ppm now.  
18:25:57.719 -> co2: -1ppm now.  
18:26:07.726 -> co2: 407ppm now.  
18:26:17.733 -> co2: 406ppm now.  
18:26:27.733 -> co2: 403ppm now.  
18:26:37.745 -> co2: 401ppm now.  
18:26:47.739 -> co2: 400ppm now.
```

Fonte: Do Autor, 2023.

5.9 EXPERIMENTOS ANTERIORES

5.9.1 Caixa de medição e disposição dos sensores

Inicialmente, o projeto foi desenvolvido em uma caixa de madeira, onde eram fixados os circuitos eletrônicos e uma câmara de inox para a medição e fixação dos sensores, como mostrado na Figura 37. A caixa de madeira não podia ser utilizada na cervejaria por práticas de higiene, então foi sugerido fazer uma nova caixa de medição utilizando a impressora 3D da cervejaria e o material PETG para impressão, que pode ser utilizado em indústria alimentícia, como visto na Figura 39 e Figura 41. As proporções da caixa de madeira para a caixa de PETG foram reduzidas para diminuir a utilização de materiais e otimizar espaços.

Em alguns experimentos com os sensores antigos de concentração de dióxido de carbono, foram testados métodos mais diretos de injeção de ar do tanque na câmara de medição, como visto na Figura 49. Uma mangueira passa a parede da câmara de medição diretamente

para o sensor, para conferir se os sensores estavam medindo corretamente ou se havia alguma perda na própria câmara de medição ou pelo formato da parede na frente dos sensores.

Figura 49 - Experimento de injeção direta do ar do tanque no sensor.



Fonte: Do Autor, 2022.

A caixa de medição foi inicialmente fabricada para os sensores MH-Z19C e MH-Z14. Com a utilização do sensor MH-Z16, que tem dimensões diferentes dos outros sensores utilizados, ele ficou posicionado internamente, dentro da caixa de medição, como visto na Figura 50. Isso foi necessário, pois novas modificações na caixa deveriam ser feitas, o que não foi possível por falta de verba e por questões de tempo, além de depender de um novo projeto.

Figura 50 - Posicionamento interno do sensor MH-Z16 na câmara de medição.



Fonte: Do Autor, 2022.

5.9.2 Sensores de dióxido de carbono

A atividade não tinha seus detalhes conhecidos, principalmente em questões numéricas, visto que, em outras unidades da cervejaria, a conferência do tanque é feita retirando-se o fundo do tanque e colocando uma vela dentro. Se essa vela apagar, ainda há muito CO_2 e, se ela continuar acesa dentro do tanque, é porque a atividade de expulsão já foi concluída suficientemente, pois entende-se que há mais oxigênio do que CO_2 dentro do tanque. Um método totalmente empírico, porém, arriscado do ponto de vista de abrir um tanque errado,

podendo ocasionar acidentes, perda de produto e também por movimentar parafusos, porcas e arruelas que acabam sendo danificados com o tempo e constante abertura de tanques.

Os sensores de dióxido de carbono MH-Z14 e MH-Z19C passaram por diversas modificações nos códigos de programação para conferir se não havia problema no código dos sensores, pois o principal problema encontrado foi a medição constante do valor máximo dos sensores nos experimentos feitos.

Os sensores foram adquiridos da China e os prazos para a chegada de novos sensores ao Brasil acabava comprometendo o tempo do estudo para que novos experimentos fossem feitos. Era necessário a espera para a chegada dos sensores, fazer novos experimentos e analisar os resultados para avaliar se era preciso modificar algo físico ou lógico ou a troca do sensor. Somente através do sensor MH-Z16 é que os experimentos foram desenvolvidos de maneira correta e puderam ser utilizados como forma a dar entendimento melhor à atividade. Primeiro foi utilizado o sensor MH-Z14, depois o sensor MH-Z19C e, depois, o sensor MH-Z16.

5.9.3 Sistemas de aquisição e demonstração dos dados utilizados anteriormente

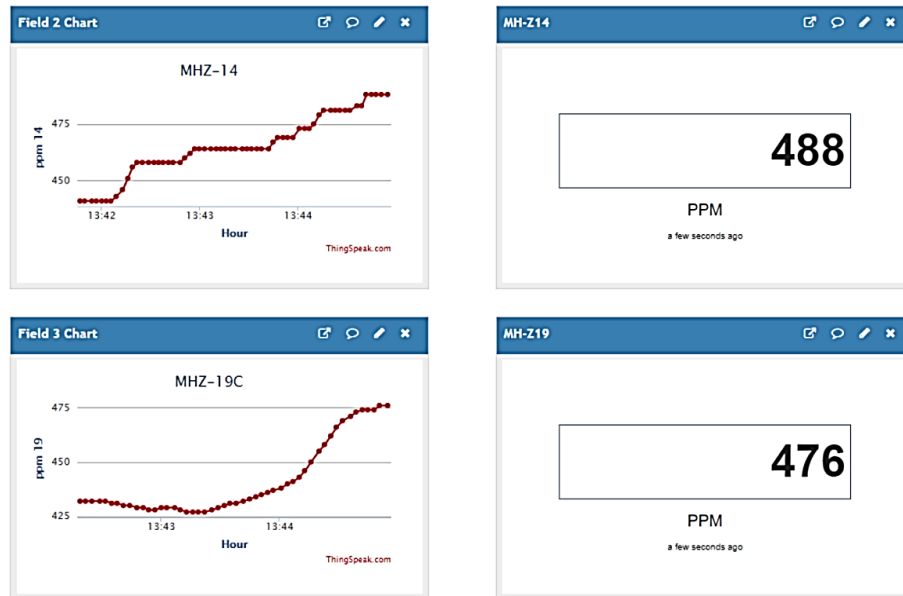
O primeiro sistema utilizado no projeto foi o ThingSpeak, uma plataforma da MathWorks de análise IoT para visualizar e analisar dados em tempo real na nuvem. Com o ThingSpeak foi possível enviar os dados diretamente para a nuvem, sem um intermediário de armazenamento. O ThingSpeak permite que engenheiros e cientistas criem protótipos e construam sistemas IoT sem configurar servidores ou desenvolver *softwares web* (ThingSpeak, 2023). Na Figura 51 é possível ver alguns dos gráficos de concentração medidos pelos sensores MH-Z14 e MH-Z19C em um dos experimentos feitos.

Posteriormente, optou-se por migrar para os serviços da Amazon Web Services (AWS). Nesse ambiente, foram implementados: o AWS IoT Core, que foi utilizado para receber os dados provenientes da caixa de medição por meio do protocolo MQTT. Os dados recebidos eram, então, direcionados para o AWS Lambda, que acionava o Telegraf. O Telegraf desempenhava o papel de coletor de dados e os repassava para o banco de dados InfluxDB e o Grafana possibilitava a visualização e análise dos dados armazenados. InfluxDB, Telegraf e Grafana foram implantados dentro de uma única instância EC2 na nuvem. A Figura 52 mostra o fluxograma aproximado do projeto quando utilizava os serviços da AWS.

A parte de recebimento de dados pelo Telegraf e armazenamento no InfluxDB e a recuperação dos dados pelo Grafana no banco de dados é bem aproximado ao fluxo de informações atual. Os dados eram enviados via MQTT pelo ESP32 em formato JSON para a

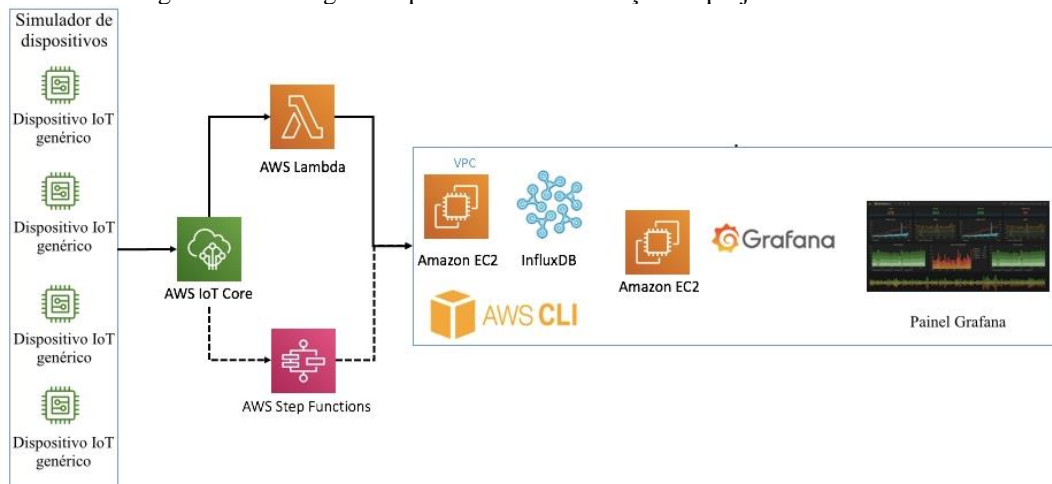
AWS IoT Core e continham chaves e certificados gerados internamente nas plataformas da AWS, que eram conferidos na comunicação.

Figura 51 - Gráficos e última concentração dos sensores MH-Z14 e MH-Z19C.



Fonte: Do Autor, 2022.

Figura 52 - Fluxograma aproximado da utilização do projeto com a AWS.



Fonte: Adaptado de Rehan; Vieru, 2020.

O projeto já estava funcionando via AWS quando foi feita a disponibilização do Raspberry Pi pelo CBPF. Então, todo o sistema foi reconstruído, desde código do ESP32 até todas as comunicações e certificados MQTT foram também reestruturados e algumas partes foram elaboradas para que fosse possível recomeçar os experimentos com a nova plataforma. Na plataforma AWS, várias comunicações eram simplificadas devido aos recursos fornecidos pela plataforma, embora alguns serviços não fossem gratuitos. Portanto, a AWS também representava uma opção viável para o desenvolvimento do projeto.

5.9.4 Antenas

Como o sistema de medição é utilizado com a caixa de medição recebendo sinal de uma rede *WiFi* do Raspberry Pi, a antena na caixa de medição é essencial para receber esse sinal. Na área dos tanques da cervejaria em que o projeto foi desenvolvido há somente duas tomadas que podem ser utilizadas para ligar o Raspberry Pi, limitando bastante o espaço a ser utilizado, tendo a maior distância entre a tomada e o tanque mais distante, cerca de 50 metros. Alguns tanques, até mesmo perto do local da tomada, apresentavam muitos pontos de obstáculo e acabava sendo impossível posicionar a caixa de medição. A área é extensa e conta com diversas colunas, equipamentos e tubulações de inox, o que acaba atenuando bastante o sinal. Então, uma boa antena e achar bons pontos para posicionamento da caixa de medição foi essencial para manter a comunicação funcionando, até mesmo porque a mangueira ligada ao tanque também era um fator limitante para movimentação da caixa de medição.

As antenas utilizadas no projeto podem ser vistas na Figura 53. As antenas são com conector do tipo SMA, utilizado no ESP32. A antena de número 1 é uma antena de 2,4 GHz, 10 cm, 3 dBi de intensidade, ligada diretamente à caixa de medição. A antena de número 2 necessita ser ligada a uma base (do mesmo tipo da vista com a antena de número 3), possui 17 cm, de 2,4 e 5,8 GHz, 6 dBi de intensidade e apresenta elemento de cobre em seu corpo para melhorar o sinal. Como ela é ligada à base, apresenta maior alcance e possibilidade de movimentação, visto que a base apresenta cabo de 1 metro. A antena de número 3 também só funciona ligada à base, apresentando 12 cm, convencional, de 433 MHz e 4 dBi de intensidade.

Figura 53 - Antenas utilizadas no projeto.



Fonte: Do Autor, 2022.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O projeto utilizou o Grafana como plataforma de visualização de dados medidos para apresentação aos usuários, que são operadores e cervejeiros. O Grafana apresenta uma tela bem ampla de informações, que auxilia na visualização de um usuário normal na atividade para a liberação do tanque para a assepsia e também na análise de algumas informações para o estudo da atividade. O Grafana pode ser utilizado tanto em um computador quanto pelo celular.

O intuito da visualização desenvolvida na ferramenta Grafana é permitir que operadores e cervejeiros possam acompanhar as medidas do projeto e possam se orientar mais facilmente na hora de ir conferir a expulsão no tanque, evitando assim idas desnecessárias aos tanques. A tela principal do Grafana desenvolvida no projeto pode ser vista no Apêndice A.

É importante destacar sobre o gráfico e as medidas RSSI que elas são importantes para o posicionamento da caixa de medição, para uma melhor recepção do sinal e para que os dados não se percam por falha de comunicação entre a caixa de medição e o Raspberry Pi.

Pelos gráficos no Grafana, é possível visualizar que em todos estão destacados na parte inferior os dados de primeiro valor de medição, último, máximo, mínimo e média, conforme a faixa de horário selecionada. Isso ajuda na análise das medições feitas.

6.1 MUDANÇA DE LOCAL DE MEDIÇÃO

Como já dito anteriormente, o local de medição atual e que os cervejeiros utilizam é na própria torneira de amostra de cada tanque, um consenso entre eles sobre o melhor lugar para avaliar a atividade. Há discussões sobre qual seria o melhor local para a medição para garantir ainda mais a expulsão, abordando também o fator de segurança da atividade.

Uma sugestão considerava a possibilidade de medir a expulsão de pelo menos 27 dos 44 tanques em outro local que não fosse no tanque que estava sendo realizada a expulsão. Essa ideia apresenta vantagens, uma vez que permite a fixação do equipamento e facilita a montagem de uma infraestrutura dedicada aos experimentos, tornando o processo mais prático. No entanto, essa abordagem enfrenta desafios quando examinada em detalhes. Os detalhes desse cenário, exigem uma análise cuidadosa e um planejamento minucioso.

O ar é retirado do sistema por uma chaminé, mas, antes de chegar até ela, ele deve passar pelas linhas do sistema de CIP, após sair do tanque. Essa linha sempre está preenchida de água. Então, uma parte do sistema próximo ao tanque está com um pouco de cerveja e outra parte do sistema de CIP está preenchida por água.

No início de cada atividade de expulsão de CO₂ há um tempo de empurre desses líquidos para um dreno com o ar atmosférico esterilizado e, depois, a expulsão propriamente começa. Porém, o sistema apresenta curvas, bombas e válvulas que acabam dando resistência para que líquidos continuem na linha, mesmo após a drenagem. A torneira de amostra nesse local, mesmo sendo a um metro da válvula da linha de CIP no alto, ainda assim recebe muito líquido, o que pode prejudicar as medições e o sensor não teria uma vida útil muito longa. Mesmo com todo esse processo para diminuição dos líquidos na linha, ainda restam líquidos que demoram bastante para deixar o ar de expulsão mais seco e evitar umidade demasiada no equipamento.

Uma diferenciação grande acontece entre os tanques também, visto que esse ponto é fixo e a pressão de ar atmosférico esterilizado se mantém a mesma em qualquer um dos tanques. O tanque mais longo mantém mais líquidos na linha por mais tempo, por ser mais difícil de retirar os líquidos pela linha ser mais extensa. Além disso, seria necessário mudar o local de medições dos cervejeiros, pois o projeto perderia a correlação com a finalização da atividade pelos cervejeiros se eles continuassem utilizando como ponto de liberação o tanque e esse projeto utilizando o ponto na linha de CIP.

Após a experiência no novo local, constata-se que mudar o ponto necessita ter que mudar toda a relação de experimentos e estudos. Além de ser um ponto muito mais úmido, o que afeta as medições e todo o sistema de sensores e eletrônica do projeto. Então, não seria ideal modificar o projeto para esse novo local nesse momento.

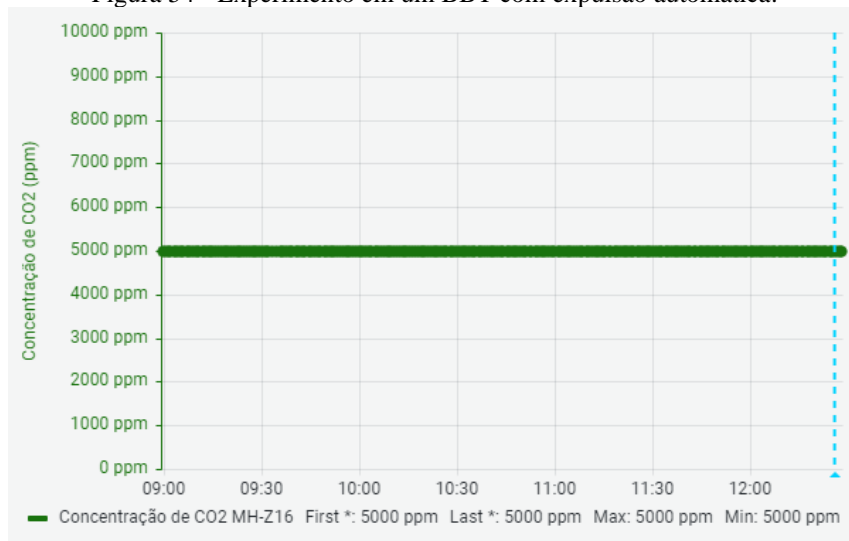
6.2 FUNCIONAMENTO DOS SENSORES MH-Z14, MH-Z19C E MH-Z16

Anteriormente dito sobre os sensores, não era muito conhecido como a atividade realmente funcionava e esperava-se que a concentração de CO₂ dentro do tanque ficasse bem próxima à concentração de CO₂ ambiente. Então, como, em geral, a concentração ambiente fica próxima a 400 ou 500 ppm, esperava-se que um sensor medindo abaixo de 5000 ppm, por exemplo, trouxesse detalhes suficientes para um estudo da atividade.

Como pode ser visto na Figura 54, mostrando um experimento utilizando o sensor MH-Z14, o tracejado azul foi o momento da liberação da atividade para o CIP cáustico pelo cervejeiro, com duração total de 4 horas e 25 minutos de expulsão, e a concentração medida pelo sensor não apresentou variações em todo o tempo expulsão.

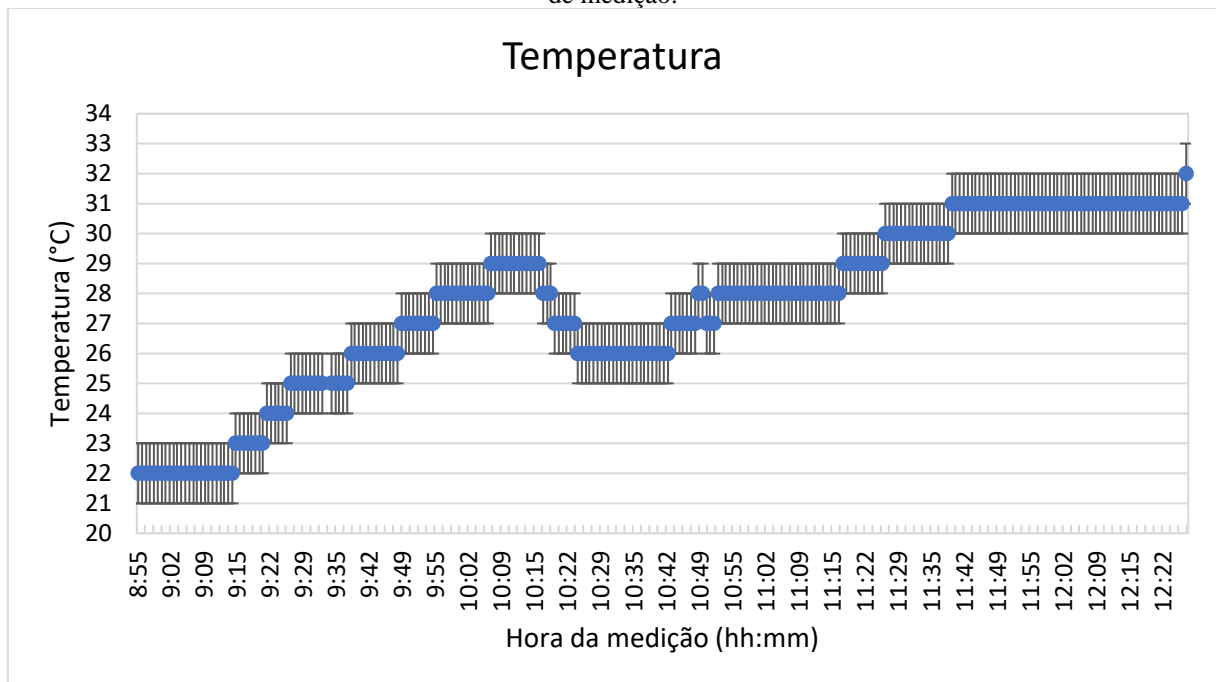
Na mesma medição, mas visualizando todo o tempo da atividade (Figura 54), a temperatura apresentou médias de 27,6 °C, com a máxima chegando a 32 °C (que foi a última medição) e a mínima de 22 °C, como pode ser visto no gráfico da Figura 55.

Figura 54 - Experimento em um BBT com expulsão automática.



Fonte: Do Autor, 2023.

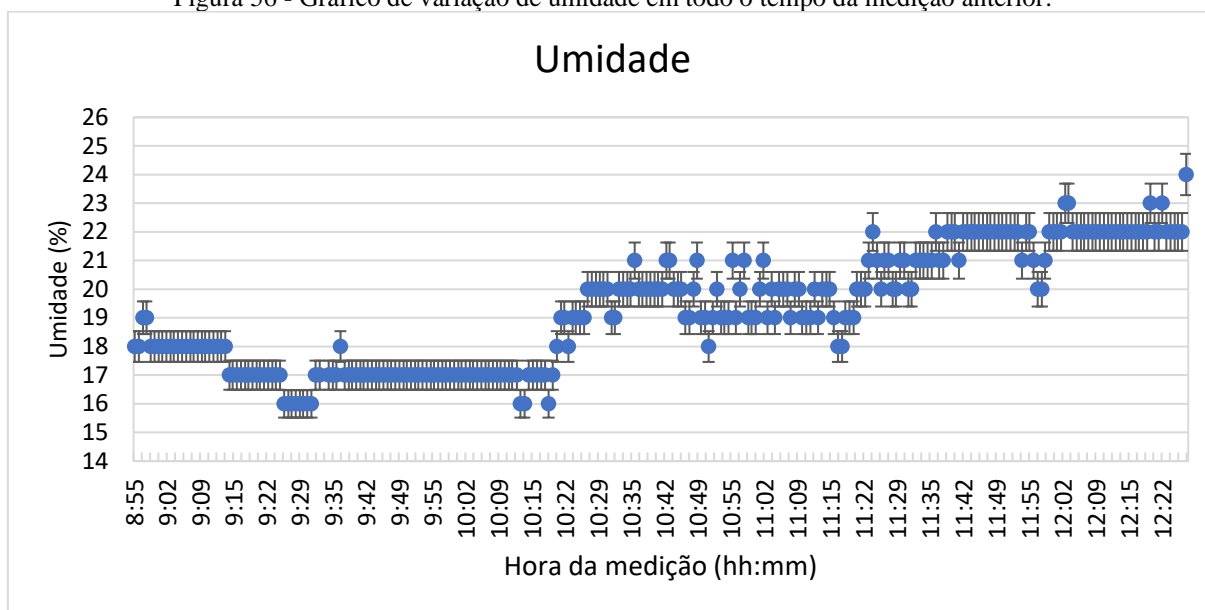
Figura 55 - Gráfico de variação de temperatura na mesma medição anterior, mas expandindo para todo o tempo de medição.



Fonte: Do Autor, 2023.

Enquanto isso, a umidade apresentou média de 19,3%, com máxima chegando a 24% (que foi a última medição) e mínima de 16% de umidade, o que pode ser visto na Figura 56. Como margem de erro para a temperatura e a umidade, foi utilizado a acurácia do sensor, que foi de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 3\%$ para umidade, incluindo histerese. Foram realizados 8 experimentos e depois utilizados cálculos estatísticos sobre o desvio padrão médio e incerteza nominal, levando em consideração a acurácia e outros erros que podem afetar o sensor, chegou-se à conclusão que, como erro padrão, a acurácia pode demonstrar todo erro associado à temperatura e umidade.

Figura 56 - Gráfico de variação de umidade em todo o tempo da medição anterior.

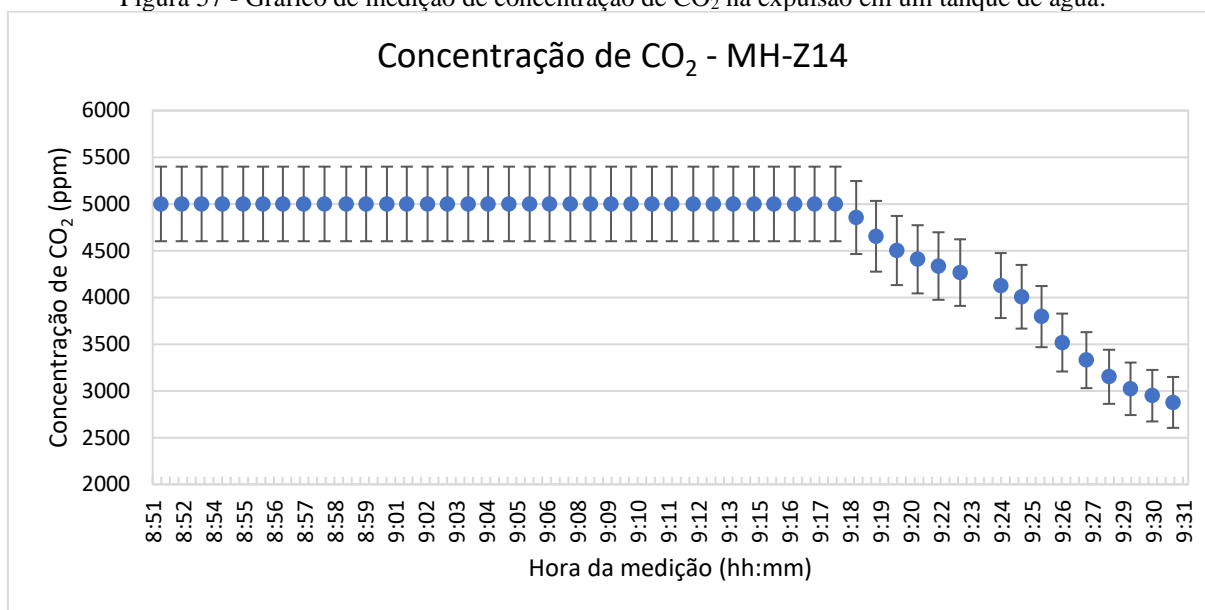


Fonte: Do Autor, 2023.

Com os dados e gráficos de temperatura e umidade medidos pelo sensor BME280, pode-se concluir que havia mudanças ao longo do tempo da medição, mostrando que o sensor BME280 estava funcionando e que o sensor MH-Z14, provavelmente, fazia medições de concentração de CO₂ que estavam acima do seu limite superior de medição.

Outro experimento foi realizado em um tanque de menor capacidade de armazenamento, utilizado para água. Esse tanque apresenta volume de 765 hectolitros ou 76,5 m³. Nesse tanque também é realizada a expulsão de CO₂, porém ele não foi utilizado no projeto por essa atividade ser bem menos realizada. Sua expulsão é mais rápida e menos complexa. Então, para tirar dúvidas do funcionamento do sensor MH-Z14, a caixa de medição foi utilizada nessa expulsão e mostrou o resultado do gráfico da Figura 57. A atividade foi realizada por mais tempo que o normal e pôde ser visto que, por volta de 09:18, a concentração de CO₂ começou a cair abaixo de 5000 ppm, o que demonstraria uma gradual retirada de CO₂ do tanque e, principalmente, uma resposta diferente do sensor do que estava sendo visto. A margem de erro utilizada na Figura 57 já foi explicitada como $\pm 100 \text{ ppm} + 6\%$ do valor lido para o sensor MHZ-14.

A liberação para a assepsia desse tanque de água ocorreu às 09:30, o que demonstrava o último valor de medição como 2877 ppm. Com isso, ficou demonstrado que o sensor funcionava, porém, o nível de dióxido de carbono nos tanques, quando era feita a liberação, ficava acima do que o sensor poderia medir e, no tanque de água, que é menor e com expulsão mais rápida, deixando um pouco além do tempo, foi possível perceber a queda de concentração abaixo do limite máximo de medição do sensor.

Figura 57 - Gráfico de medição de concentração de CO₂ na expulsão em um tanque de água.

Fonte: Do Autor, 2023.

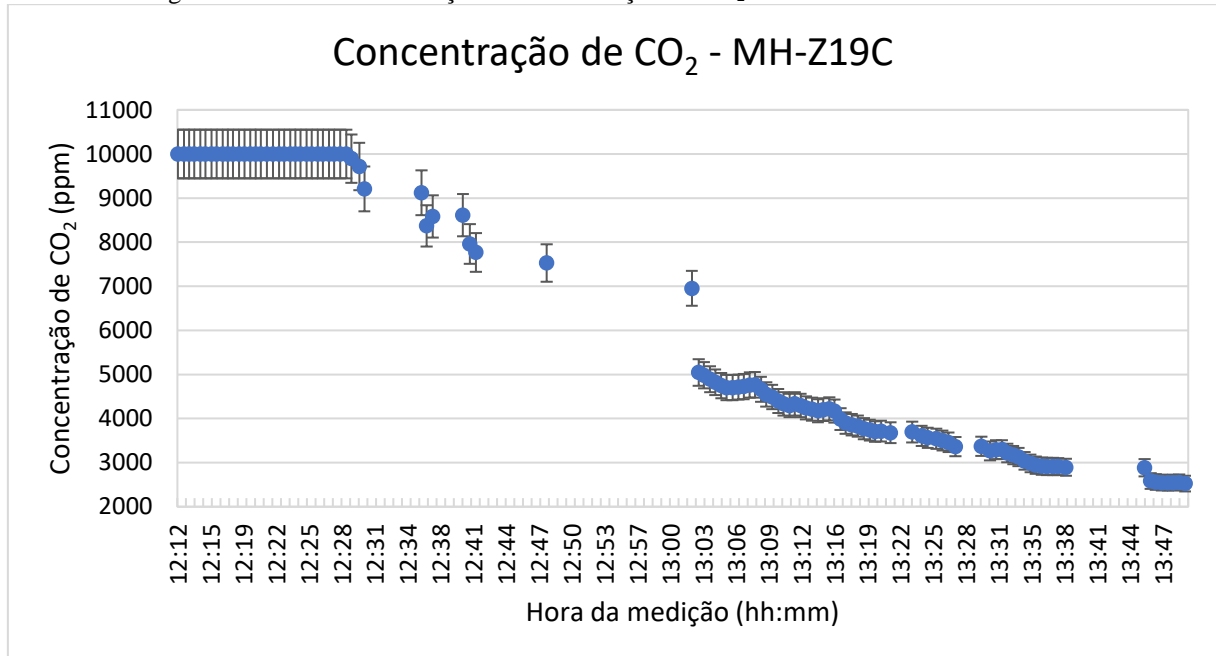
Após, foi utilizado o sensor MH-Z19C, com limite de medição em 10000 ppm. Na maioria das medições com este sensor, ele também apresentou somente seu limite máximo nos gráficos. Porém, em um experimento de expulsão manual, que ficou mais tempo do que o normal, a atividade foi paralisada diversas vezes por problemas, onde pôde ser visto no gráfico da Figura 58 vários vazios na medição. Foi uma medição que apresentou resultados bem diferentes do que vinha sendo visto. Após um tempo, a concentração de dióxido de carbono começou a cair abaixo de 10000 ppm e, após diversas paradas e retomadas, a concentração foi caindo, chegando a um nível de 2526 ppm de concentração e o tanque foi liberado para assepsia. A margem de erro utilizada na Figura 58 já foi explicitada como ± 50 ppm + 5% do valor lido para o sensor MHZ-19C.

Era possível perceber também um funcionamento normal do sensor MH-Z19C, porém, somente quando a atividade se estendia muito além do normal. Da mesma forma do sensor MH-Z14, o MH-Z19C também não conseguiu dar a caracterização da atividade de maneira satisfatória, pois na maioria das atividades de expulsão o gráfico se manteve em seu limite máximo. Isso demonstrava um grande problema naquele momento, se os sensores estivessem funcionando corretamente, a concentração de liberação do tanque para a assepsia apresentaria um valor maior que o limite máximo desses sensores.

Além disso, outra análise também acabou sendo posta em estudo, que era de que a concentração de dióxido de carbono nunca chegaria a níveis de concentração do ambiente normal, próximo a 400 ppm. Assim, ficou mais do que provado que seria necessário trocar

novamente o sensor e utilizar um sensor com limite de medição bem superior aos que estavam sendo utilizados para buscar entender em qual concentração, em geral, acontecia a liberação.

Figura 58 - Gráfico de medição de concentração de CO₂ utilizando o sensor MH-Z19C.



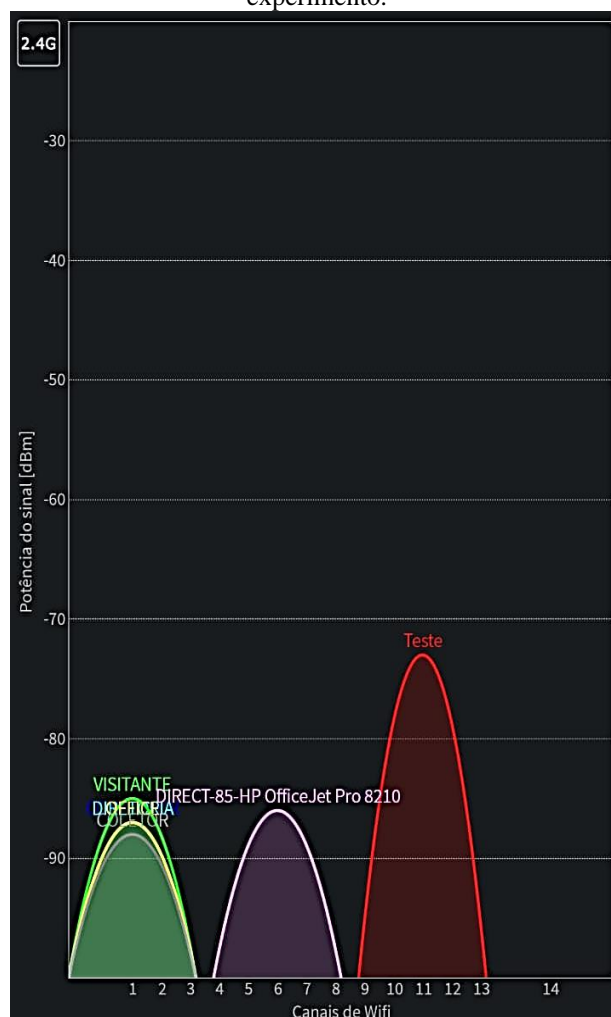
Fonte: Do Autor, 2023.

6.3 AVALIAÇÃO DAS ANTENAS

Conforme já relatado, foram avaliadas três antenas. A avaliação consistiu em ligar o Raspberry Pi próximo a um tanque que seria utilizado no experimento e ligar a caixa de medição. O aplicativo de celular *Wifi Analyzer* foi utilizado para obter detalhes no mesmo ponto em que a caixa de medição estava. Então, relacionavam-se os resultados obtidos com o *Wifi Analyzer* pelo celular com a força do sinal de *Wifi* em dBm, obtida pelo ESP32 e que é demonstrada no Grafana. Como o Raspberry Pi que cria a rede *Wifi* e ficava fixo (não tendo muita chance de mobilidade frente aos obstáculos da área), foi necessário buscar a melhor antena e o melhor posicionamento da caixa, além de deixar o sinal *Wifi* do Raspberry Pi o melhor possível, visto que é um equipamento limitado e não é recomendável para criar redes *Wifi* de boa qualidade.

O *Wifi Analyzer* auxiliou na tomada de decisão de qual canal do *Wifi* usar no Raspberry Pi, visto que há várias redes *Wifi* no ambiente. Na Figura 59 é possível visualizar uma tela do aplicativo *Wifi Analyzer* em que o *Wifi* de nome Teste, que é a rede criada pelo Raspberry Pi, pôde ser vista fora dos canais *Wifi* encontrados no ambiente, buscando não receber interferências de outros canais e com potência de sinal próxima a -70 dBm.

Figura 59 - Tela do aplicativo *Wifi Analyzer* mostrando os canais e potências de canais *Wifi* no ambiente do experimento.



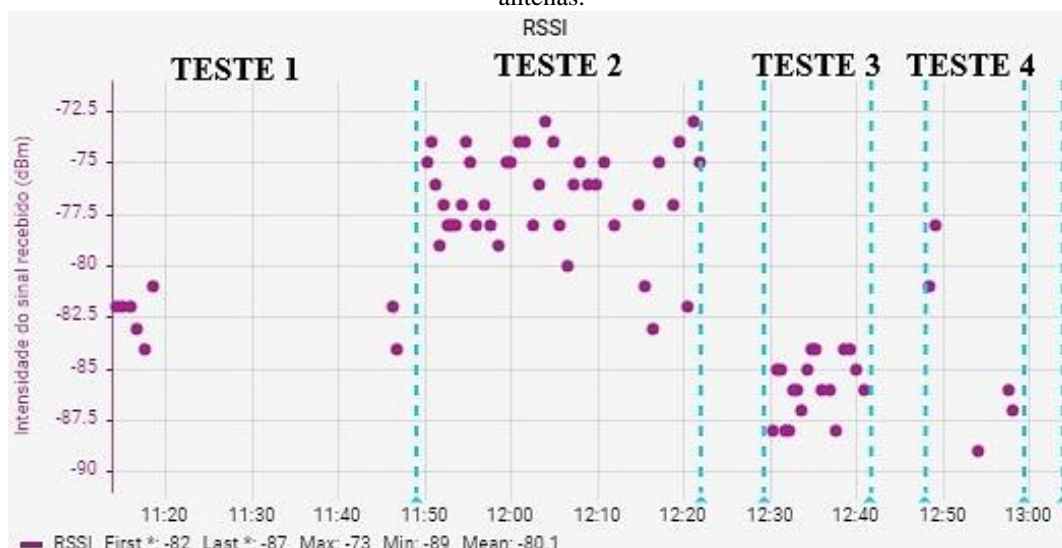
Fonte: Do Autor, 2022.

Nos experimentos foi possível avaliar que, se o sinal estivesse próximo de -80 dBm, o que é um sinal ruim, a comunicação entre o Raspberry Pi e a caixa de medição falhava, ocorrendo perda de dados das medições.

No caso da avaliação das antenas, em experimentos feitos em dois ambientes, sendo um o local de medição, a antena de número 1 na Figura 53 foi a que apresentou melhores resultados e menos falhas de comunicação com o Raspberry Pi.

Na Figura 60 é possível ver um dos experimentos que foram feitos no ambiente fabril modificando as antenas e mudando a distância da caixa de medição para o Raspberry Pi. O experimento mais bem-sucedido realizado foi o TESTE 2 que apresentou medições de intensidade de sinal na faixa de -83 dBm e -73 dBm com a antena escolhida para ser utilizada no projeto (antena 1 da Figura 53). Foi realizado na mesma distância, mas com outra antena, o experimento TESTE 3 que resultou em medições de -88 dBm a -84 dBm. Os tracejados azuis representam o início e o fim entre os testes realizados.

Figura 60 - Experimento no ambiente fabril modificando as distâncias da caixa de medição e trocando as antenas.



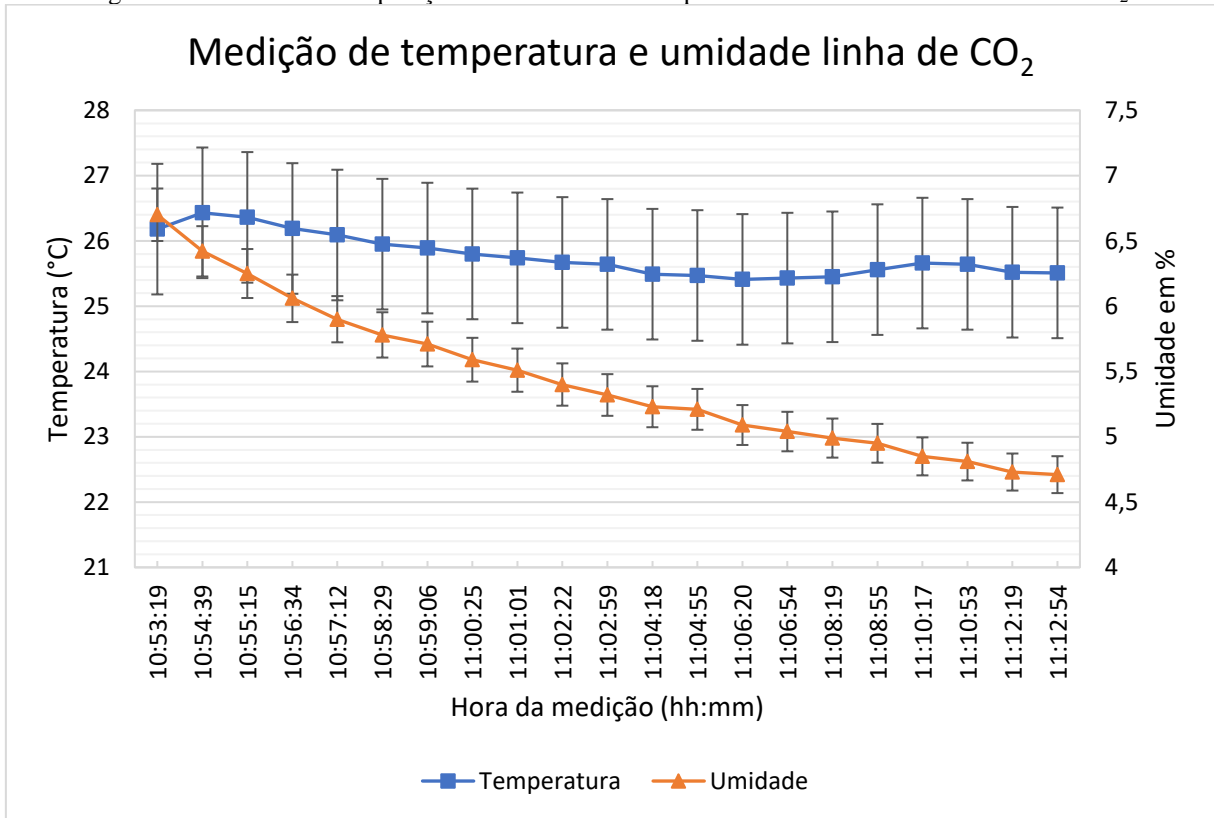
Fonte: Do Autor, 2022.

6.4 MEDIÇÕES NA LINHA DE FORNECIMENTO DE CO₂

Foram realizados 3 experimentos na linha de fornecimento de CO₂ para o processo. O CO₂ é utilizado para pressurizar os tanques, devido a suas características de não afetar prejudicialmente o produto e por ser necessário na gaseificação da cerveja.

O oxigênio deve ser o mínimo possível para evitar oxidação da cerveja. Então, quando os tanques estão fermentando e o CO₂ vai sendo gerado, são feitos testes de pureza desse CO₂ de saída e, somente quando alcançam um alto nível de pureza, é que o tanque pode enviar o CO₂ para o circuito de fornecimento. A pureza na linha de fornecimento é de 99,998% de CO₂ no ar em circulação, conforme testes realizados pela equipe da cervejaria. Com isso, medir a concentração na linha de fornecimento mostrou o nível máximo do sensor em toda a medição, o que não agregou novas informações. Na Figura 61 é possível ver um gráfico de comparação entre umidade e temperatura de uma medição na linha de fornecimento de CO₂, em que há pouquíssima variação na temperatura do ar na linha, medindo aproximadamente 26 °C, enquanto que a umidade apresentou valor de início de aproximadamente 7% até chegar próximo de 4,5%. A margem de erro para a temperatura e a umidade foi de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 3\%$, respectivamente.

A linha de fornecimento de CO₂ não traz novas informações. É ideal ter conhecimento do nível de pureza de CO₂ na linha para entender que o tanque apresenta praticamente 100% do ar interno de dióxido de carbono e esse nível deve cair para que a assepsia possa ser feita. A linha de ar atmosférico esterilizado já é mais importante ter seu monitoramento, pois estaria medindo o que está sendo enviado para a expulsão no tanque.

Figura 61 - Gráfico de comparação entre umidade e temperatura na linha de fornecimento de CO₂.

6.5 MEDIÇÕES NA LINHA DE AR ATMOSFÉRICO ESTERILIZADO

Foram feitas 5 medições de temperatura e umidade, além de medições de concentração de dióxido de carbono na linha de ar atmosférico esterilizado, assim como na linha de fornecimento de CO₂. A Figura 62 e Figura 63 mostram medições de temperatura e umidade de dois experimentos diferentes. As medições foram feitas em dias diferentes e pode ser visto que não apresentam nenhuma relação, apresentando diferentes valores sem seguir um padrão.

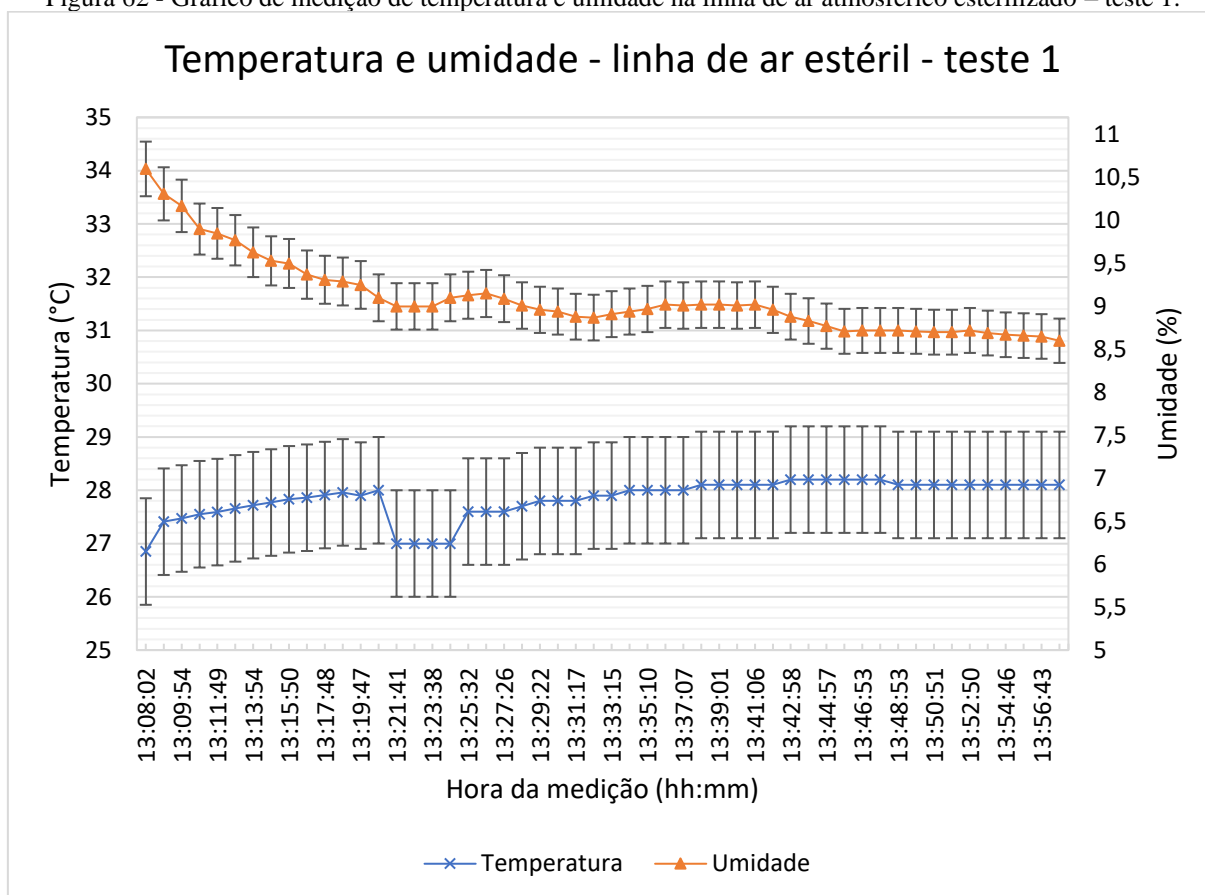
Nos mesmos experimentos também foram feitas medições, utilizando os sensores MH-Z14 e MH-Z19C, para a concentração de dióxido de carbono na linha de ar atmosférico esterilizado. Essas medições podem ser vistas na Figura 64 e Figura 65 em diferentes dias.

A margem de erro para a temperatura e a umidade foi de $\pm 1^\circ\text{C}$ e $\pm 3\%$, respectivamente. Enquanto que para o sensor MHZ-14 foi de ± 100 ppm + 6% do valor lido e para o sensor MHZ-19C, a margem de erro utilizada foi de ± 50 ppm + 5% do valor lido, já explicitados os motivos.

Pode ser visto pelas medições na Figura 64 e Figura 65 que o valor medido não é exatamente o mesmo nos dois sensores, ficando a medida de um sensor quase na margem de erro do outro sensor, tendo cada sensor sua característica na medição. Eles respondem razoavelmente bem às mudanças de concentração, sendo o MH-Z19C mais sensível, mesmo

tendo um tempo de resposta maior, o que pode ser devido à sua câmara de medição ser menor. Pode ser visto também que eles não seguem um padrão de, por exemplo, sempre ser o sensor MH-Z19C com concentrações mais altas, pois tiveram também medições em que o MH-Z14 foi o sensor que apresentava concentrações mais altas em relação ao MHZ-19C.

Figura 62 - Gráfico de medição de temperatura e umidade na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 1.



Fonte: Do Autor, 2023.

Então, a expulsão nos tanques acaba dependendo da concentração de CO_2 de envio para o tanque e, caso essa concentração esteja mais alta, a liberação do tanque pode ter uma concentração mais alta se esse envio for feito por muito tempo e a retirada de CO_2 do tanque vai ser mais lenta. O mesmo serve para o contrário.

Uma possível explicação para esse comportamento de diversos picos na medição seria que os sugadores de ar dos compressores de ar ficam próximos à chaminé que retira o ar de dentro dos tanques e expulsa para a atmosfera. É possível que em alguns momentos a chaminé esteja expelindo o ar de algum tanque com concentração de CO_2 mais elevada e o vento favorável acabaria levando esse ar para os sugadores, o que faz com que esse ar com CO_2 entre no sistema de compressão e acabe sendo utilizado na expulsão de algum tanque.

Figura 63 – Gráfico de medição de temperatura e umidade na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 2.

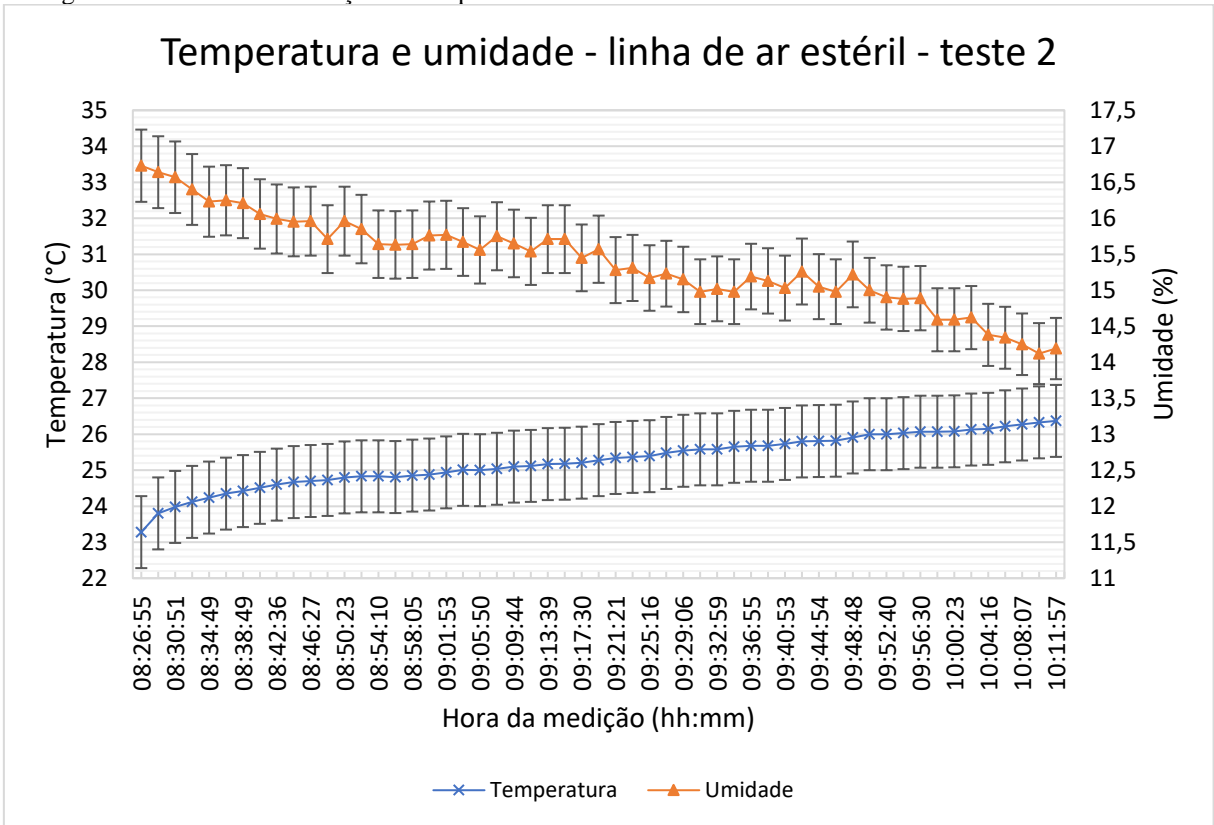


Figura 64 - Gráfico de medição de concentração de dióxido de carbono na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 1.

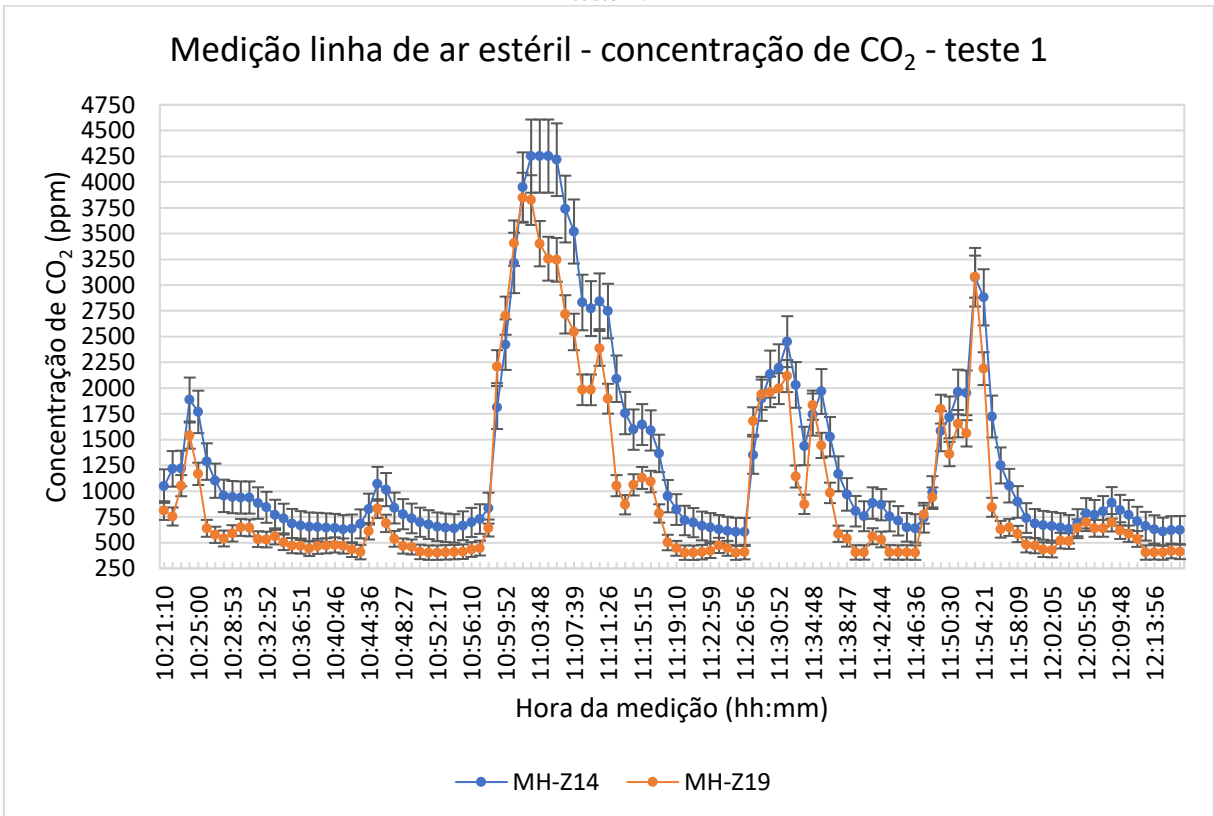
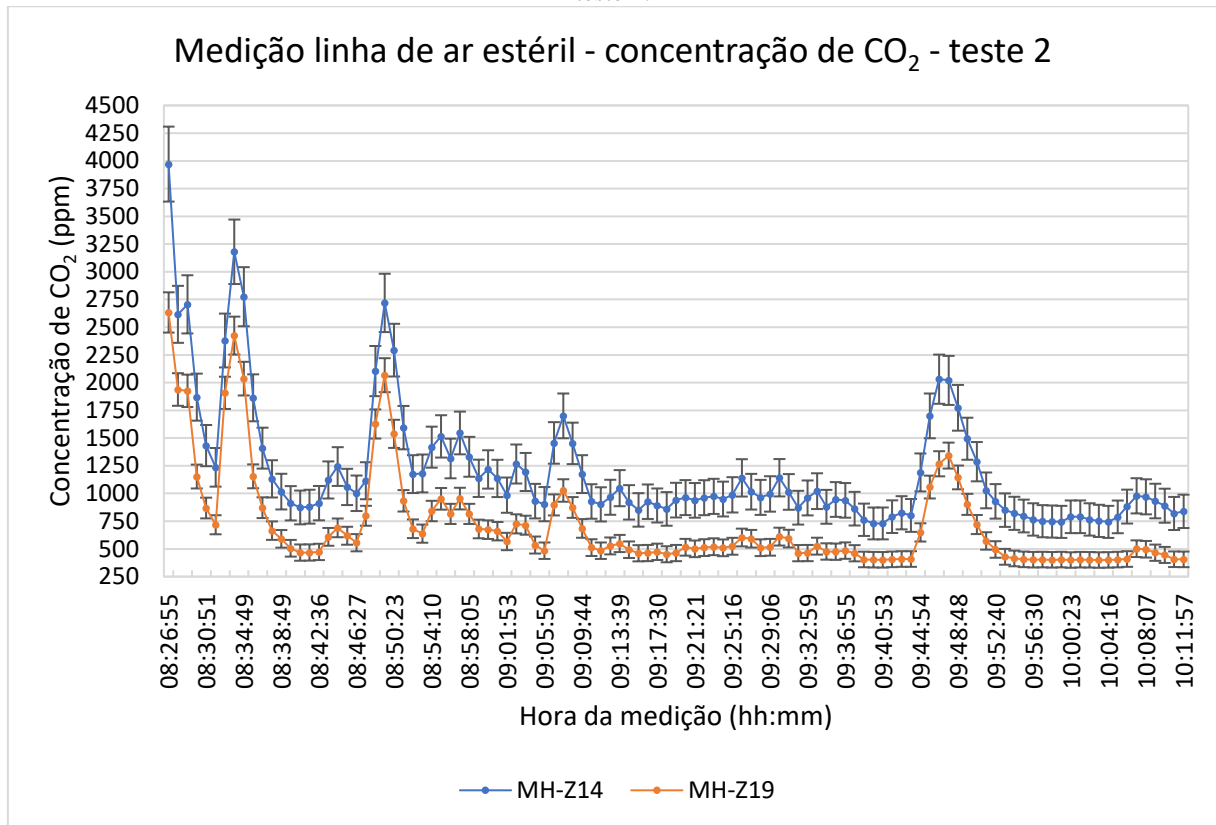


Figura 65 - Gráfico de medição de concentração de dióxido de carbono na linha de ar atmosférico esterilizado – teste 2.



Sobre a temperatura e umidade, a planta de compressão de ar apresenta secadores de ar que reduzem a temperatura para próximo de 3 °C, a fim de reduzir a umidade do ar. Quando o ar sai do secador, o equipamento apresenta um medidor de temperatura que mede, em geral, 19 °C. Nas medições, a umidade do ar medida apresentava taxas um pouco mais altas e temperatura próxima a ambiente. Caso essas altas taxas de umidade viessem do sistema de compressão, poderia ser bastante prejudicial para o compressor a médio ou longo prazo. O que se pode deduzir é que a umidade e a temperatura são adquiridas no percurso do ar pelo sistema de distribuição.

6.6 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA

O sensor BME280 é um sensor que apresenta medição de pressão atmosférica. Foram realizadas 65 medições de pressão atmosférica. Nas medições realizadas, a pressão não foi uma variável que poderia trazer algo diferente ao estudo, visto a maneira como é medido o ar de saída dos tanques. Mesmo assim, seus valores foram medidos e utilizados para alimentar gráficos no Grafana e, sem surpresas, os dados não trouxeram novas informações ao estudo.

Utilizando dados de medições em expulsão automática e manual em BBTs e FMTs, os resultados podem ser vistos na Tabela 3, que retrata a média, o máximo, o mínimo e o σ (desvio padrão) da duração (T), a pressão de início (P_i), a pressão de liberação (P_f), a pressão máxima ($P_{m\acute{a}x}$), a pressão mínima ($P_{m\acute{i}n}$) e a pressão média ($P_{m\acute{e}d}$). Como pode ser visto pelos valores de pressão obtidos e os dados retratados no desvio padrão (σ), os dados de pressão são bem uniformes, próximos à média, o que acaba não dando novos detalhes da atividade quando a pressão é posta em análise.

Tabela 3 - Tabela de dados de tempo e medições de pressão em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.

Dados de medições de pressão em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	P_i (hPa)	P_f (hPa)	$P_{m\acute{a}x}$ (hPa)	$P_{m\acute{i}n}$ (hPa)	$P_{m\acute{e}d}$ (hPa)
Média	03:47	936	935	936	934	935
Máximo	05:36	941	941	943	941	941
Mínimo	02:10	931	928	931	927	930
σ	00:52	2	3	3	3	3

Fonte: Do Autor, 2023.

Nota: T (hh:mm) é o tempo realizado nas medições;

P_i (hPa) é o valor encontrado no início das medições;

P_f (hPa) é o valor encontrado na liberação do tanque;

$P_{m\acute{a}x}$ (hPa) é o valor de pressão máxima encontrada nas medições. Exemplo 1: o valor de 943 hPa é o valor máximo medido em todas as medições. Exemplo 2: o valor de 936 hPa foi encontrado fazendo a média de todos os valores máximos medidos.

$P_{m\acute{i}n}$ (hPa) é o valor de pressão mínima encontrado nas medições. O mesmo raciocínio dos exemplos anteriores para $P_{m\acute{a}x}$ (hPa) podem ser utilizados, só que na pressão mínima.

$P_{m\acute{e}d}$ (hPa) é o valor calculado de pressão média encontrada nas medições. Exemplo: em cada medição existe o valor médio das medições feitas e que foi calculado pelo Grafana, conforme o espaço de tempo selecionado. O valor de 935 hPa é o valor médio calculado de todos os valores médios das medições feitas, enquanto que o valor de 930 hPa é o menor valor encontrado nas médias das medições.

Todos esses valores são demonstrados em média, máximo, mínimo e desvio padrão (σ).

Essa nota vale para todas as tabelas de apresentação dos dados das medições.

6.7 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE UMIDADE DO AR DE EXPULSÃO DOS TANQUES

Com o intuito de avaliar a possibilidade de liberar o tanque para assepsia com base na medição da umidade do ar de saída dos tanques, foi feito um estudo de como a grandeza se comportava durante a atividade de expulsão dos gases. Foram realizadas 65 medições de

umidade. Utilizando dados de expulsão manual e automática em BBTs e FMTs, podem ser observados na Tabela 4 dados de umidade relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à umidade de início (U_i), à umidade de liberação (U_f), à umidade máxima ($U_{m\acute{a}x}$), à umidade mínima ($U_{m\acute{i}n}$) e à umidade média ($U_{m\acute{e}d}$).

Tabela 4 - Tabela de dados de tempo e medições de umidade em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.

Dados de medições de umidade em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	U_i (%)	U_f (%)	$U_{m\acute{a}x}$ (%)	$U_{m\acute{i}n}$ (%)	$U_{m\acute{e}d}$ (%)
Média	03:47	32	34	41	27	32
Máximo	05:36	67	62	67	53	63
Mínimo	02:10	16	8	22	8	17
σ	00:52	12	13	12	11	12

Fonte: Do Autor, 2023.

É possível perceber que há uma grande diferença entre os valores máximos e mínimos tanto de U_i (%) quanto de U_f (%), mas com a média alcançando valores próximos a 30%.

Não é tão correto comparar diretamente com a umidade relativa do ar ambiente, pois esse ar esterilizado passa por secadores de ar que vão diminuir a umidade após a compressão, mas, em alguns dias com chuva, foi observado um aumento na umidade medida no ar de expulsão dos tanques, o que pode caracterizar uma dificuldade do sistema de compressão de retirar a umidade do ar que já está alta, retratando que o ar atmosférico do ambiente pode afetar a umidade do ar final para o processo.

A Tabela 5 demonstra dados de 25 expulsões manuais feitas em BBTs e FMTs, apresentando dados de umidade média, máxima, mínima e σ (desvio padrão) da duração das medições (T), umidade de início (U_i), umidade de liberação (U_f), umidade máxima ($U_{m\acute{a}x}$), umidade mínima ($U_{m\acute{i}n}$) e umidade média ($U_{m\acute{e}d}$).

Tabela 5 - Tabela de dados de tempo e medições de umidade em expulsões manuais em BBTs e FMTs.

Dados de medições de umidade em expulsões manuais em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	U_i (%)	U_f (%)	$U_{m\acute{a}x}$ (%)	$U_{m\acute{i}n}$ (%)	$U_{m\acute{e}d}$ (%)
Média	02:56	32	32	42	28	31
Máximo	03:35	43	46	49	36	38
Mínimo	02:10	16	13	32	13	17
σ	00:25	9	9	6	8	7

Fonte: Do Autor, 2023.

Quando a expulsão é feita de maneira manual, foram observados valores máximos bem menores nos dados de umidade, de forma geral, e valores maiores de umidade mínima em todos

os dados de umidade em relação ao apresentado na Tabela 4, que era de todas as medições e tanques. É possível observar também pelo σ que as medições de umidade em expulsões manuais são mais estáveis se comparadas com os dados da Tabela 4.

Quando são analisados os dados de 40 expulsões automáticas em BBTs e FMTs, conforme a Tabela 6, pode-se observar os valores de média, máxima, mínima e σ (desvio padrão) da duração das medições (T), umidade de início (U_i), umidade de liberação (U_f), umidade máxima ($U_{m\acute{a}x}$), umidade mínima ($U_{m\acute{i}n}$) e umidade média ($U_{m\acute{e}d}$).

Tabela 6 - Tabela de dados de tempo e medições de umidade em expulsões automáticas em BBTs e FMTs.

Dados de medições de umidade em expulsões automáticas em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	U_i (%)	U_f (%)	$U_{m\acute{a}x}$ (%)	$U_{m\acute{i}n}$ (%)	$U_{m\acute{e}d}$ (%)
Média	04:06	33	35	41	27	32
Máximo	05:36	67	62	67	53	63
Mínimo	02:46	19	8	22	8	17
σ	00:46	13	14	14	12	13

Fonte: Do Autor, 2023.

Na expulsão automática, a variação entre os valores medidos foi maior do que na expulsão manual, apresentando todos os valores de umidade máxima medida e os valores mínimos de umidade medida para U_f (%), $U_{m\acute{a}x}$ (%), $U_{m\acute{i}n}$ (%) e $U_{m\acute{e}d}$ (%), referente à Tabela 4. O σ demonstra medições mais dispersas na expulsão automática, mas com as médias bem próximas da expulsão manual.

Concluindo, é possível perceber que a diferença entre o valor de U_i (%) e o valor U_f (%) são próximos, o que não ajuda a definir qual seria o momento de finalizar a atividade. Então, a umidade é dependente do clima e do sistema de secadores dos compressores de ar, dependendo ainda da umidade proveniente do tanque e das linhas, que, na maioria das vezes, apresentam um pouco de líquidos. Não foram observadas características marcantes que possam ser utilizadas para a liberação do tanque para assepsia.

6.8 RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA DO AR DE EXPULSÃO DOS TANQUES

Com o intuito de avaliar a possibilidade de liberar o tanque para assepsia baseado na medição da temperatura do ar de saída dos tanques, foi feito um estudo de como a grandeza se comportava durante a atividade de expulsão dos gases. Foram realizadas 65 medições de temperatura. A medição de temperatura é uma das mais básicas realizadas, por isso seus

sensores costumam ser de menor custo e mais difundidos, sendo mais fáceis de se encontrar. Então, as medições de temperatura receberam um foco especial.

As medições de temperatura seguiram o mesmo padrão de pressão e umidade, realizadas pelo sensor BME280. Utilizando dados de expulsões manuais e automáticas em BBTs e FMTs, podem ser observados pela Tabela 7 dados de temperatura relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à temperatura de início (Te_i), à temperatura de liberação (Te_f), à temperatura máxima ($Te_{m\acute{a}x}$), à temperatura mínima ($Te_{m\acute{i}n}$) e à temperatura média ($Te_{m\acute{e}d}$).

Tabela 7 - Tabela de dados de tempo e medições de temperatura em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.

Dados de medições de temperatura em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	Te_i (°C)	Te_f (°C)	$Te_{m\acute{a}x}$ (°C)	$Te_{m\acute{i}n}$ (°C)	$Te_{m\acute{e}d}$ (°C)
Média	03:47	23	27	28	23	25
Máximo	05:36	32	34	35	32	33
Mínimo	02:10	14	18	19	14	17
σ	00:52	3	4	4	4	4

Fonte: Do Autor, 2023.

Os valores de medições tanto na expulsão manual quanto na automática para a temperatura apresentaram variações muito pequenas no geral, o que pode ser visto pelo σ das medições. A temperatura acabou sendo um dos parâmetros que menos variou. Os tanques possuem refrigeração, mas, quando eles esvaziam, essa refrigeração não é utilizada.

Os dados da Tabela 7 demonstram que os valores de temperatura, na média, apresentam valor pouco acima da temperatura de saída da planta de compressão. Relacionando os valores Te_i (°C) e Te_f (°C) pode ser visto que acabam demonstrando um ganho de temperatura na atividade, podendo ser pela temperatura interna do tanque que começa a ficar mais aquecido quando vazio e também por ganho de temperatura no sistema de distribuição de ar.

É possível analisar os dados de 25 expulsões manuais, conforme a Tabela 8, com dados de temperatura relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à temperatura de início (Te_i), à temperatura de liberação (Te_f), à temperatura máxima ($Te_{m\acute{a}x}$), à temperatura mínima ($Te_{m\acute{i}n}$) e à temperatura média ($Te_{m\acute{e}d}$).

É possível analisar os dados de 40 expulsões automáticas, conforme a Tabela 9, com dados de temperatura relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à temperatura de início (Te_i), à temperatura de liberação (Te_f), à temperatura máxima ($Te_{m\acute{a}x}$), à temperatura mínima ($Te_{m\acute{i}n}$) e à temperatura média ($Te_{m\acute{e}d}$).

Tabela 8 - Tabela de dados de tempo e medições de temperatura em expulsões manuais em BBTs e FMTs.

Dados de medições de temperatura em expulsões manuais em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	Te_i (°C)	Te_f (°C)	Te_{máx} (°C)	Te_{mín} (°C)	Te_{méd} (°C)
Média	02:56	23	27	27	23	25
Máximo	03:35	32	34	35	32	33
Mínimo	02:10	18	21	21	18	20
σ	00:25	4	5	5	4	5

Fonte: Do Autor, 2023.

Tabela 9 - Tabela de dados de tempo e medições de temperatura em expulsões automáticas em BBTs e FMTs.

Dados de medições de temperatura em expulsões automáticas em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	Te_i (°C)	Te_f (°C)	Te_{máx} (°C)	Te_{mín} (°C)	Te_{méd} (°C)
Média	04:06	23	28	28	23	26
Máximo	05:36	28	34	34	28	26
Mínimo	02:46	14	18	19	14	17
σ	00:46	3	4	4	3	3

Fonte: Do Autor, 2023.

Os dados apresentados na Tabela 8 e Tabela 9 também não demonstram uma característica diferencial do início e do fim das medições em relação à temperatura para que seja possível utilizar para finalizar a atividade. Pela média, o valor Te_f seria de 27°C e 28°C, nas expulsões manuais e automáticas, respectivamente, sendo que 55% de todas as medições apresentaram valores iguais ou maiores do que 28 °C, não sendo possível utilizar os dados relacionados à temperatura para finalizar a expulsão.

É importante destacar que os valores máximos não necessariamente vieram de FMTs ou BBTs mais distantes da entrada de ar atmosférico esterilizado, o que demonstraria um ganho maior de temperatura pela distância da linha, não havendo relação com a localização do tanque sua temperatura de expulsão, tanto de Te_i quanto de Te_f.

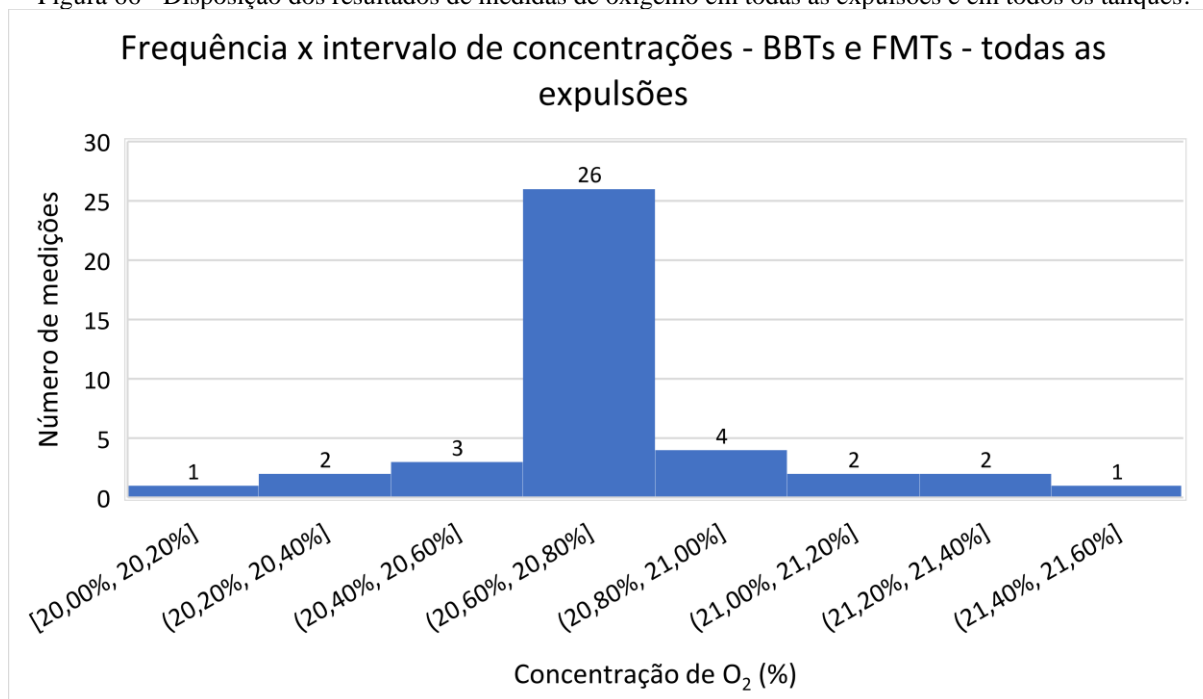
Ficou entendido que a temperatura também não foi um fator que poderia ser utilizado para finalizar a atividade de expulsão de um tanque, não apresentando uma faixa de valores confiáveis para definir o fim da expulsão.

6.9 MEDIÇÕES DE OXIGÊNIO PELOS CERVEJEIROS

Dando destaque às medições de oxigênio que os cervejeiros realizam nas liberações dos tanques para assepsia, foram analisadas 41 medições realizadas durante 5 meses em todos os horários e tanques. Lembrando que os cervejeiros utilizam como valor mínimo 19% de oxigênio

para liberação. Considerando os experimentos envolvendo tanto expulsões automáticas quanto manuais e em todos os tanques, é possível visualizar a disposição dos resultados das medições na Figura 66.

Figura 66 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em todas as expulsões e em todos os tanques.



Fonte: Do Autor, 2023.

Analisando 10 expulsões manuais, as medições de oxigênio ficaram, em média, em 20,94% de oxigênio, sendo 20,98% de oxigênio em BBTs e 20,80% de oxigênio em FMTs. A disposição de resultados tanto em FMTs quanto em BBTs para expulsões manuais pode ser vista na Figura 67.

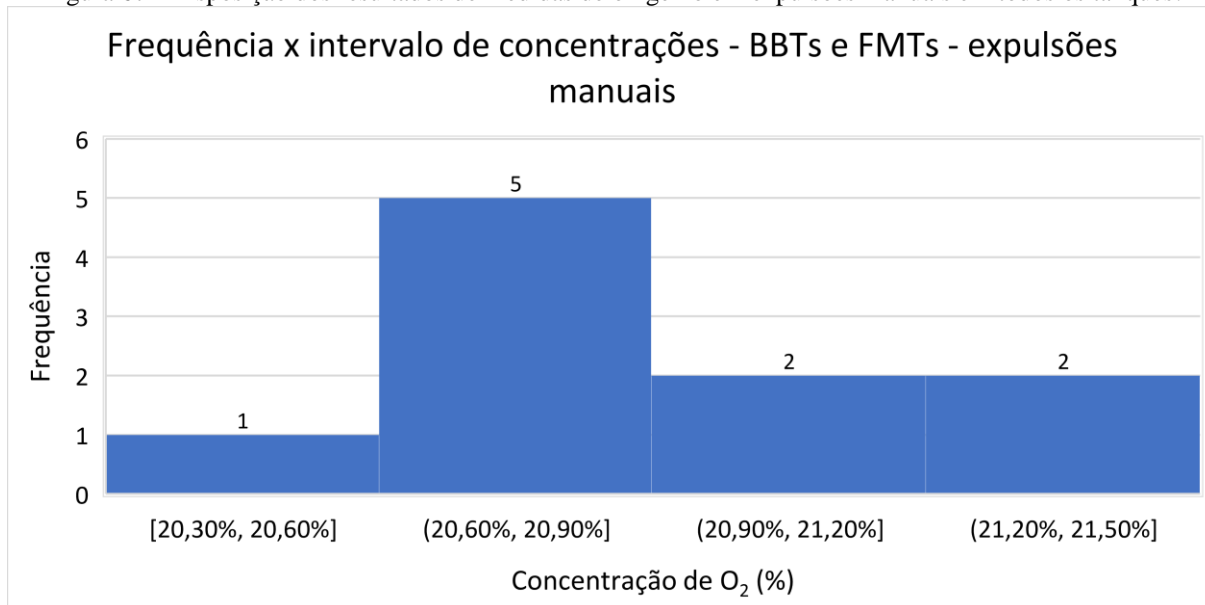
Analisando 11 expulsões automáticas, as medições de oxigênio ficaram, em média, em 20,75% de oxigênio, sendo de 20,77% de oxigênio em BBTs e 20,72% de oxigênio em FMTs. A disposição de resultados tanto em FMTs quanto em BBTs pode ser vista na Figura 68.

Além disso, destacando o tempo das expulsões automáticas, a média foi de 4 horas e 6 minutos de duração. A disposição da quantidade de expulsões automáticas pela quantidade de tempo gasto pode ser vista na Figura 69, em uma análise de 11 medições. Pode-se ainda destacar que, nas expulsões acima do tempo médio, a medição de oxigênio ficou, em média, em 20,87% de oxigênio.

É interessante destacar que foi observado que a maioria dos cervejeiros, quando a medição resulta em um valor menor que 20% de oxigênio, aumenta o tempo de expulsão para

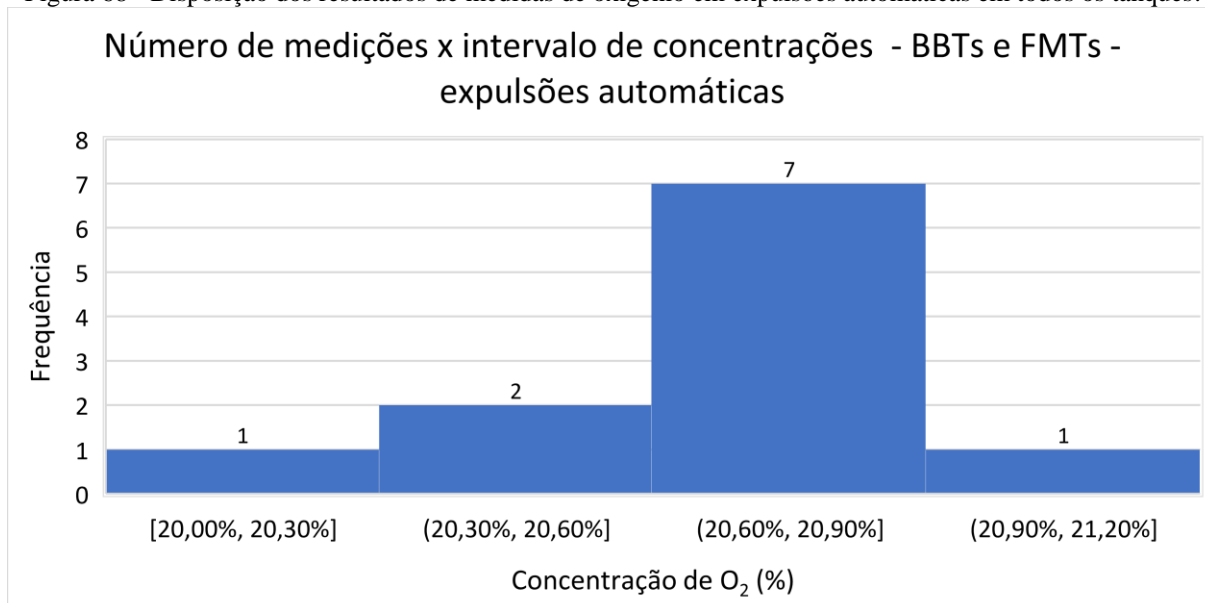
garantir que a expulsão ocorra e gere mais segurança de que a atividade foi feita de maneira satisfatória.

Figura 67 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em expulsões manuais em todos os tanques.



Fonte: Do Autor, 2023.

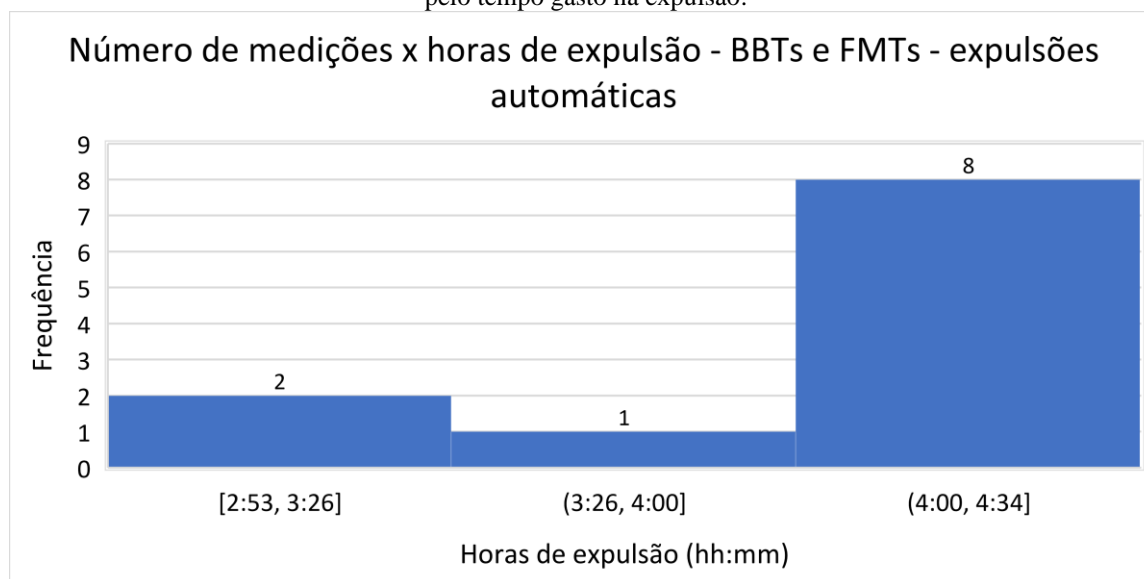
Figura 68 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em expulsões automáticas em todos os tanques.



Fonte: Do Autor, 2023.

Os resultados de medições apresentarem o valor de 20,80% de oxigênio tem explicação de que, quando se utiliza o equipamento para medir a quantidade de oxigênio em diversas partes da área, o valor normalmente encontrado é de 20,80% de oxigênio. Isso mostra que o ar de expulsão do tanque está na mesma porcentagem de oxigênio do ar do ambiente externo.

Figura 69 - Disposição dos resultados de medidas de oxigênio em expulsões automáticas em todos os tanques pelo tempo gasto na expulsão.



Fonte: Do Autor, 2023.

6.10 RESULTADOS DE EXPULSÃO MANUAL

Nas tabelas apresentadas sobre dados de pressão, umidade e temperatura, sempre havia a coluna de duração das medições das expulsões (T, em hh:mm) com média, máxima, mínima e σ . Nenhuma análise dessa coluna tinha sido realizada e, agora, nos resultados envolvendo valores de concentração de CO_2 , essa duração de tempo das expulsões servirá para embasar as análises necessárias para chegar aos objetivos propostos nesse projeto.

Como já dito anteriormente, os tanques estão com uma alta concentração de CO_2 , próximo a 100% de concentração e injeta-se ar atmosférico esterilizado a uma concentração mais baixa de CO_2 visando diminuir sua concentração dentro do tanque a níveis insuficientes para causar implosão por contato do CO_2 com NaOH ou mesmo para gerar carbonato que reduza o poder de limpeza de NaOH.

Foram realizadas 25 medições de expulsão manual nos tanques, 16 em BBTs e 9 em FMTs. Na expulsão manual nos BBTs, a válvula de entrada do tanque é restringida a aproximadamente 20% de abertura. Caso essa válvula permanecesse totalmente aberta durante todo o tempo de expulsão, a pressão da linha de ar atmosférico esterilizado, que é de 8 bar, causaria uma alta pressão interna no tanque, o que poderia ser prejudicial à sua estrutura e acabaria atrapalhando na expulsão de CO_2 do tanque, por gerar um fluxo turbulento no tanque.

Quando a expulsão manual é feita em FMTs, ao contrário dos BBTs, a válvula permanece totalmente aberta durante o procedimento. Sendo um tanque muito grande, a alta pressão da linha de ar atmosférico esterilizado não é suficiente para fazer com que a pressão

interna do tanque aumente a níveis que possam prejudicar sua estrutura nem atrapalhar a expulsão de CO₂. Dessa maneira, o fluxo de ar atmosférico esterilizado na entrada do tanque é bem próximo ao fluxo de ar na saída do tanque e se consegue retirar o CO₂ interno sem que a pressão interna aumente muito, formando um fluxo bem próximo ao laminar, seguindo a equação de continuidade.

Portanto, a abertura da válvula acaba sendo essencial na expulsão, juntamente com o tamanho do tanque. Deixar a válvula muito aberta nos tanques menores faz com que um alto fluxo de ar entre no tanque e resulte em um fluxo turbulento, podendo resultar em zonas em que o CO₂ não esteja sendo trocado pelo ar atmosférico esterilizado, mas esteja sendo misturado, enquanto que diminuir a abertura da válvula pode formar um fluxo laminar que retira mais facilmente o ar com alta concentração de CO₂.

A fábrica foi toda projetada para ter seus processos funcionando de maneira automática. A expulsão manual não é a correta a ser feita, porém é um artifício necessário quando a linha de CIP está em uso e é necessário fazer a limpeza com NaOH, adiantando o processo de expulsão sem utilizar a linha de CIP. Geralmente, o processo é adiantado quando o prazo de enchimento do tanque já está programado para depois do CIP realizado. Então, com a produção em alta, o uso da expulsão manual acaba sendo mais frequente para dar mais rapidez ao processo e não perder tempo no enchimento do tanque.

O gráfico do Anexo B mostra 1 hora e 20 minutos finais de uma expulsão manual em um BBT. Esse gráfico demonstra como se dá a queda de concentração no tanque, formando um gráfico com curva bem próxima a uma exponencial, não tendo uma queda linear nem brusca. Isso é o que se espera da atividade, visto que a concentração vai caindo gradualmente, conforme vai havendo a troca do ar muito concentrado com CO₂ com o ar esterilizado com concentração mais baixa de CO₂. A liberação do tanque ocorreu às 13:03, com uma concentração de dióxido de carbono de 4200 ppm. A duração total da atividade foi de 2 horas e 50 minutos.

O Anexo C mostra o gráfico de uma expulsão manual em um FMT. É possível visualizar o início da queda de concentração de dióxido de carbono no tanque. Nesse tanque a válvula pode permanecer totalmente aberta e a liberação do tanque ocorreu às 13:37, com uma concentração de dióxido de carbono de 5100 ppm. A duração da atividade foi de 3 horas.

É possível perceber pelos gráficos dos Anexos B e C que não há fortes picos e vales de concentração nas medições em pouco período de tempo, tais como os que ocorreram na Figura 64 e Figura 65. O que ocorreu foi uma variação de toda a escala do sensor, mas ocorreu uma queda bem gradual ao longo do tempo. No gráfico do Anexo B, do valor máximo medido pelo sensor até o valor de liberação passou-se 1 hora e 27 minutos, restando 1 hora e 23 minutos de

expulsão com medições acima da leitura do sensor. No Anexo C, do início da queda de concentração até a liberação passou-se 1 hora e 10 minutos, restando 1 hora e 50 minutos de expulsão com medições acima da leitura do sensor.

São mostrados os dados de 25 expulsões manuais tanto em BBTs quanto em FMTs, conforme a Tabela 10, com dados de concentração de CO₂ relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à concentração de início (C_i), à concentração de liberação (C_f), à concentração máxima (C_{máx}), à concentração mínima (C_{mín}) e à concentração média (C_{méd}).

Tabela 10 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões manuais em BBTs e FMTs.

Dados de medições de concentração de CO₂ em expulsões manuais em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	C_i (ppm)	C_f (ppm)	C_{máx} (ppm)	C_{mín} (ppm)	C_{méd} (ppm)
Média	02:43	43878	7547	56833	4209	27111
Máximo	03:35	100000	22700	100000	13800	69200
Mínimo	02:00	4200	620	4200	620	1400
σ	00:33	38725	8044	39830	4677	26904

Fonte: Do Autor, 2023.

Como pode ser visto na Tabela 10, referente aos tempos de duração, o valor médio foi de 2 horas e 43 minutos, o tempo máximo foi de 3 horas e 35 minutos e o tempo mínimo foi de 2 horas de duração. Todos esses resultados foram conseguidos utilizando o projeto para liberação dos tanques. Vários operadores deixavam a expulsão acontecendo por pelo menos 4 horas. Fazendo um cálculo com o tempo máximo, é uma redução de tempo de 25 minutos e, com base no tempo médio, é uma redução de 1 hora e 17 minutos de compressor ligado.

Ainda conforme a Tabela 10, referente à concentração de dióxido de carbono, o mais importante do estudo é qual a concentração em que o cervejeiro liberou o tanque para assepsia. Os valores médios de fim de medição (C_f), que é o valor medido no momento da liberação para assepsia pelo cervejeiro, foram de 7547 ppm, um valor bem alto em relação ao valor de concentração de dióxido de carbono encontrado na atmosfera. O valor mínimo de liberação foi de 620 ppm, um valor mais próximo do valor da atmosfera e que foi medido na medição com menor tempo de expulsão, 2 horas. O valor máximo de liberação foi de 22700 ppm, com 2 horas e 2 minutos de expulsão. Não há um padrão pelo tempo nesses resultados.

O valor máximo de liberação é de extrema importância, pois é através dele que é possível avaliar uma diminuição do tempo de expulsão. Então, de forma geral, o valor de expulsão manual mais alto liberado aconteceu com 2,27% de volume de CO₂.

São mostrados os dados de 16 expulsões manuais em BBTs, conforme a Tabela 11, com dados de concentração de CO₂ relacionados à média, à máxima, à mínimo e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à concentração de início (C_i), à concentração de liberação (C_f), à concentração máxima (C_{máx}), à concentração mínima (C_{mín}) e à concentração média (C_{méd}).

Tabela 11 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões manuais em BBTs.

Dados de medições de concentração de CO₂ em expulsões manuais em BBTs						
Tipo	T (hh:mm)	C_i (ppm)	C_f (ppm)	C_{máx} (ppm)	C_{mín} (ppm)	C_{méd} (ppm)
Média	02:37	30817	6137	35250	3645	10933
Máximo	03:10	63000	22700	63000	10200	34400
Mínimo	02:00	4200	620	4200	620	1400
σ	00:31	26556	8273	29347	3513	12646

Fonte: Do Autor, 2023.

Pela Tabela 11 é possível analisar que nos BBTs, referente ao tempo de expulsão, o tempo mínimo foi de 2 horas, com máximo de 3 horas e 10 minutos e média de 2 horas e 37 minutos. Relembrando que os operadores deixavam a expulsão, em média, por 4 horas. Ocorreu uma otimização de tempo bem interessante com a utilização da caixa de medição do projeto.

Quando é destacada a concentração de dióxido de carbono de liberação, a média de liberação foi de 6137 ppm, com máximo em 22700 ppm e 620 ppm de mínimo.

Uma medição em BBTs apresentou a concentração máxima de expulsão manual de aproximadamente 2,27% de volume de concentração de dióxido de carbono, como pode ser observado na Tabela 10. Mesmo sendo tanques menores, essa concentração não foi suficiente para danificar nada no sistema. Quando o valor máximo e o valor mínimo são retirados, a média encontrada nas liberações é de 3375 ppm, o que resulta em um volume de concentração de dióxido de carbono de 0,34% na medição.

São mostrados os dados 9 expulsões manuais em FMTs, conforme a Tabela 12, com dados de concentração de CO₂ relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à concentração de início (C_i), à concentração de liberação (C_f), à concentração máxima (C_{máx}), à concentração mínima (C_{mín}) e à concentração média (C_{méd}).

Pela Tabela 12 é possível analisar o tempo de expulsão manual nos FMTs, sendo que o tempo médio foi de 2 horas e 55 minutos, com tempo máximo de 3 horas e 35 minutos e tempo mínimo de 2 horas e 10 minutos. O tempo máximo resultou em uma liberação de 6000 ppm e o tempo mínimo resultou em uma liberação de 20000 ppm.

Tabela 12 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões manuais em FMTs.

Dados de medições de concentração de CO₂ em expulsões manuais em FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	C_i (ppm)	C_f (ppm)	C_{máx} (ppm)	C_{mín} (ppm)	C_{méd} (ppm)
Média	02:55	70000	10367	100000	5336	59467
Máximo	03:35	100000	20000	100000	13800	69200
Mínimo	02:10	10000	5100	100000	908	46300
σ	00:42	51961,52	8355	0	7333	11830

Fonte: Do Autor, 2023.

Ainda pela Tabela 12, quando se analisa a concentração de dióxido de carbono, a média das liberações foi de 10367 ppm, o que demonstra um valor de 1,04% de volume de concentração de dióxido de carbono. O valor máximo foi de 20000 ppm e o mínimo de 5100 ppm. Nos FMTs, os valores médios de liberações são mais altos, o que pode ser explicado pelo volume do tanque que é muito maior, permitindo que concentrações maiores não sejam prejudiciais à atividade e o CO₂ esteja bem mais disperso pelo tanque, além de ser mais difícil diminuir a concentração. Mas, é importante, novamente, destacar que o valor de concentração maior medido em expulsões manuais foi em um BBT.

Tanto em expulsões nos BBTs quanto nos FMTs é errôneo afirmar que o tempo maior vai gerar C_f (ppm) menor e o mesmo para o contrário.

Levando em conta somente a concentração de CO₂ e retirando valores mínimos e máximos, trabalhando somente com os dados intermediários, as liberações de BBTs ficam em aproximadamente 3375 ppm, ou seja, 0,34% de volume de concentração de CO₂, com máximo e mínimo em 2,27% e 0,06% de volume de concentração de CO₂, respectivamente. Em FMTs, as liberações intermediárias ficaram próximas a 6000 ppm, ou seja, 0,6% de volume de concentração de CO₂, com máximo e mínimo em 2% e 0,51%, respectivamente, de volume de concentração de CO₂.

6.11 RESULTADOS DE EXPULSÃO AUTOMÁTICA

A expulsão automática é a mais correta e convencional a ser feita. Essa expulsão é certificada pela empresa montadora da fábrica. A atividade, se feita de maneira errada, pode causar danos físicos a estruturas, tanques e equipamentos, além de poder resultar em mais carbonato junto à NaOH. Por padrão, os tempos de expulsão automática configurados são:

- BBTs – 2 horas de tempo configurado, sendo que a cada 1 minuto e 30 segundos a válvula está totalmente aberta injetando ar atmosférico esterilizado no tanque e que a

cada 1 minuto e 40 segundos a válvula está fechada sem injetar ar atmosférico esterilizado no tanque (sem contar no tempo de 2 horas); e

- FMTs – 2 horas e 40 minutos de tempo configurado, com a válvula totalmente aberta, com pequenas pausas durante a atividade de expulsão que param a contagem de tempo.

O tempo, obviamente, pode ser estendido caso a expulsão não tenha sido terminada, o que dá brecha para configurar um tempo muito maior que o necessário e ficar utilizando compressor sem necessidade. Foram realizadas 40 medições de expulsão automática nos tanques, 23 em BBTs e 17 em FMTs.

O gráfico do Anexo D mostra a última 1 hora e 25 minutos de uma expulsão automática em um BBT. Esse gráfico demonstra como se dá a queda de concentração no tanque, formando um gráfico com queda leve ao longo do tempo de expulsão, com a mesma característica da expulsão manual, porém mais demorado e não finaliza em uma concentração tão baixa quanto a expulsão manual. A liberação do tanque ocorreu às 12:30, com uma concentração de dióxido de carbono de 28049 ppm. A duração da atividade foi de 4 horas e 36 minutos.

O Anexo E mostra um gráfico de uma expulsão automática em um FMT, sendo possível observar a última 1 hora e 50 minutos de uma expulsão. Esse gráfico demonstra que, como nos BBTs, nos FMTs a queda de concentração no tanque também é de forma leve e gradual ao longo do tempo de expulsão. A liberação do tanque ocorreu às 13:40, com uma concentração de dióxido de carbono de 24000 ppm. A duração da atividade foi de 3 horas e 27 minutos.

No Anexo D, do valor máximo medido pelo sensor até o valor de liberação, passaram-se 50 minutos, sobrando 3 horas e 46 minutos de expulsão com medições acima da leitura do sensor. No Anexo E, do valor máximo medido pelo sensor até a concentração de liberação, passou-se 1 hora e 10 minutos, sobrando 2 horas e 17 minutos de expulsão com medições acima da leitura do sensor. O tempo de expulsão até começar a ter queda de concentração é muito maior na expulsão automática do que na manual, assim como a concentração final.

São mostrados os dados de 40 expulsões automáticas, tanto em BBTs quanto em FMTs, na Tabela 13, com dados de concentração de CO₂ relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à concentração de início (C_i), à concentração de liberação (C_f), à concentração máxima (C_{máx}), à concentração mínima (C_{mín}) e à concentração média (C_{méd}).

Como pode ser visto na Tabela 13, referente aos tempos de duração, o valor médio foi de 3 horas e 48 minutos, com um tempo máximo de 4 horas e 54 minutos e tempo mínimo de 2 horas e 46 minutos. Referente à concentração de CO₂, a média de liberação do tanque para assepsia foi de 12793 ppm. O valor mínimo de liberação foi de 880 ppm que não foi medido no

menor tempo de duração da atividade. O valor máximo de liberação foi de 54700 ppm ou 5,47% de volume de CO₂, com 3 horas e 3 minutos de expulsão.

Tabela 13 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões automáticas em BBTs e FMTs.

Dados de medições de concentração de CO₂ em expulsões automáticas em BBTs e FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	C_i (ppm)	C_f (ppm)	C_{máx} (ppm)	C_{mín} (ppm)	C_{méd} (ppm)
Média	03:48	71233	12793	77607	8774	55260
Máximo	04:54	100000	54700	100000	48000	97000
Mínimo	02:46	5000	880	5000	806	4300
σ	00:40	36194	14815	32102	13079	30986

Fonte: Do Autor, 2023.

São mostrados os dados de 23 expulsões automáticas em BBTs, conforme a Tabela 14, com dados de concentração de CO₂ relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à concentração de início (C_i), à concentração de liberação (C_f), à concentração máxima (C_{máx}), à concentração mínima (C_{mín}) e à concentração média (C_{méd}).

Tabela 14 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões automáticas em BBTs.

Dados de medições de concentração de CO₂ em expulsões automáticas em BBTs						
Tipo	T (hh:mm)	C_i (ppm)	C_f (ppm)	C_{máx} (ppm)	C_{mín} (ppm)	C_{méd} (ppm)
Média	04:05	52417	9380	68350	7529	42217
Máximo	04:44	100000	28000	100000	28000	83600
Mínimo	03:00	5000	880	5000	806	4300
σ	00:36	42571	11274	39579	10979	33160

Fonte: Do Autor, 2023.

Pela Tabela 14 é possível analisar que nos BBTs, referente à duração da expulsão automática, houve uma média de 4 horas e 5 minutos, com tempo máximo de 4 horas e 44 minutos e tempo mínimo de 3 horas. Quando é destacada a concentração de CO₂ de liberação, a média de liberação foi de 9380 ppm, com máxima em 28000 ppm e 880 ppm de mínima.

A concentração máxima foi de aproximadamente 2,8% de volume de concentração de dióxido de carbono, esse valor de 28000 ppm foi encontrado em uma medição de 4 horas e 36 minutos de duração, próximo ao tempo máximo de expulsão em BBTs. Porém, a medição do tempo mínimo de 3 horas foi a que resultou na medição de 4100 ppm. Quando os valores máximos e mínimo são retirados, a média encontrada nas liberações é de 6850 ppm, o que resulta em um volume de concentração de dióxido de carbono de 0,68% na medição.

São mostrados os dados de 17 expulsões automáticas em FMTs, conforme a Tabela 15, com dados de concentração de CO₂ relacionados à média, à máxima, à mínima e ao σ (desvio padrão) da duração das medições (T), à concentração de início (C_i), à concentração de liberação (C_f), à concentração máxima (C_{máx}), à concentração mínima (C_{mín}) e à concentração média (C_{méd}).

Tabela 15 - Tabela de dados de tempo e medições de concentração de dióxido de carbono em expulsões automáticas em FMTs.

Dados de medições de concentração de CO₂ em expulsões automáticas em FMTs						
Tipo	T (hh:mm)	C_i (ppm)	C_f (ppm)	C_{máx} (ppm)	C_{mín} (ppm)	C_{méd} (ppm)
Média	03:37	83778	15069	83778	9603	63956
Máximo	04:54	100000	54700	100000	48000	97000
Mínimo	02:46	25500	920	25500	830	13000
σ	00:40	26782	17033	26782	14903	27935

Fonte: Do Autor, 2023.

Pela Tabela 15 é possível analisar sobre o tempo de expulsão automática nos FMTs que o tempo médio foi de 3 horas e 37 minutos, com tempo máximo de 4 horas e 54 minutos e tempo mínimo de 2 horas e 46 minutos. O tempo máximo resultou em uma liberação de 17500 ppm e o tempo mínimo, em uma liberação de 9200 ppm.

Ainda pela Tabela 15, quando se analisa a concentração de dióxido de carbono, a média das liberações foi de 15069 ppm, o que demonstra um valor de 1,51% de volume de concentração de dióxido de carbono. O valor máximo foi de 54700 ppm e o mínimo de 920 ppm. Nos FMTs, os valores de liberações foram mais altos no geral, o que pode ser explicado pelo volume do tanque, que é muito maior e acaba permitindo que concentrações maiores não sejam prejudiciais à atividade e o CO₂ esteja bem mais disperso pelo tanque.

Levando em conta somente a concentração de CO₂ e retirando valores mínimos e máximos, trabalhando somente com os dados intermediários, as liberações de BBTs ficam em aproximadamente 6850 ppm, ou seja, 0,68% de volume de concentração de CO₂, com máximo e mínimo em 2,80% a 0,09% de volume de concentração de CO₂, respectivamente. Em FMTs as liberações intermediárias ficaram próximas a 11429 ppm, ou seja, 1,14% de volume de concentração de CO₂, com máxima e mínima em 5,47% a 0,09% de volume de concentração de CO₂, respectivamente.

Com a expulsão automática, o tempo configurado pode ser aumentado, caso seja medido no tanque e a expulsão não tenha sido completada no tempo mínimo. Conforme a Tabela 16, com medições entre os dias 12/04/2023 e 12/06/2023, onde Q_{ac} é a quantidade de expulsões

que precisaram de aumento de tempo e $T_{\text{méd}}$ (hh:mm) é o tempo médio acrescido, as expulsões automáticas foram praticamente o dobro das expulsões manuais, tanto em FMTs quanto em BBTs. Ainda conforme a Tabela 16, mas dando foco às expulsões automáticas, praticamente metade delas precisaram de aumento de tempo, com uma média de acréscimo de tempo de 32 minutos para FMTs e 43 minutos para BBTs.

Tabela 16 - Tabela de detalhes de todas as expulsões realizadas entre o dia 12/04/2023 e 12/06/2023 e a quantidade de expulsões que receberam aumento de tempo e a média de aumento.

Detalhes de expulsões entre o dia 12/04/2023 e 12/06/2023				
Tanque	Tipo	Quantidade	Q_{ac}	T_{méd} (hh:mm)
FMT	Automático	26	13	0:32
FMT	Manual	15	-	-
BBT	Automático	17	9	0:43
BBT	Manual	9	-	-

Fonte: Do Autor, 2023.

É possível analisar que grande parte das expulsões automáticas precisam de aumento de tempo, ocorrendo com grande frequência por, no final do tempo, não se enquadrarem nos parâmetros de testes feitos, principalmente na concentração de oxigênio necessária ou para que dê tempo de o cervejeiro ir ao tanque conferir a expulsão.

6.12 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DAS EXPULSÕES

É essencial comparar os dados de liberação de oxigênio em expulsões manuais e automáticas já relatados com os dados de liberação de concentração de dióxido de carbono, além de também comparar entre BBTs e FMTs em cada uma das expulsões. A Tabela 17 mostra uma comparação de valores médios, máximos e mínimos de liberação de CO₂ e tempo de duração das expulsões, além do valor médio de O₂ de liberação medido pelos cervejeiros em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs.

É possível perceber que os valores de concentração de liberação de CO₂ ficaram mais altos em expulsões automáticas na média, mínima e máxima. A duração das expulsões, da mesma forma que a concentração de liberação, também apresentou valores mais altos na expulsão automática. Um destaque é o tempo máximo de expulsão manual, que é abaixo da média da expulsão no automático em BBTs e FMTs.

O oxigênio medido pelos cervejeiros em expulsões manuais é mais alto do que em expulsões automáticas. Tudo isso reforça que, de maneira geral, a expulsão manual é mais

rápida e mais eficiente, mostrando que a concentração de dióxido de carbono é menor nas liberações em expulsões manuais e, conseqüentemente, a porcentagem de oxigênio no tanque acaba sendo maior. Analisando o tempo médio, a diferença entre a expulsão manual e automática fica em aproximadamente 1 hora a mais na expulsão automática.

Tabela 17 - Tabela de comparações de concentração de CO₂, tempo e O₂ de liberação entre expulsões manuais e automáticas em BBTs e FMTs.

Comparação de concentrações de CO₂, O₂ e tempo de expulsão em expulsões automáticas e manuais em BBTs e FMTs							
Tipo de expulsão	Liberações CO₂ (ppm)			Duração (hh:mm)			O₂ liberação (%)
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	
Automático	12793	54700	880	03:48	04:54	02:46	20,75%
Manual	7547	22700	620	02:43	03:35	02:00	20,94%

Fonte: Do Autor, 2023.

A Tabela 18 mostra uma comparação de valores médios, máximos e mínimos de liberação de CO₂ e tempo de duração das expulsões, além de valor médio de O₂ de liberação medido pelos cervejeiros em expulsões automáticas e manuais em BBTs.

Tabela 18 - Tabela de comparações de concentração de CO₂, tempo e O₂ de liberação entre expulsões manuais e automáticas em BBTs.

Comparação de concentrações de CO₂, O₂ e tempo de expulsão em expulsões automáticas e manuais em BBTs							
Tipo de expulsão	Liberações CO₂ (ppm)			Duração (hh:mm)			O₂ liberação (%)
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	
Automático	9380	28000	880	04:05	04:44	03:00	20,77%
Manual	6137	22700	620	02:37	03:10	02:00	20,98%

Fonte: Do Autor, 2023.

Como já demonstrado anteriormente, o mesmo pode ser dito agora especificamente em BBTs em questão de concentração de liberação de CO₂, tempo de duração e oxigênio de liberação. A expulsão manual acaba sendo mais eficiente.

Analisando mais sobre o máximo de concentração de CO₂ liberado em BBTs, foram feitas liberações máximas de 28000 ppm e 22700 ppm e, retirando os valores máximos e mínimos, resultou em uma média de 6850 ppm na expulsão automática e 3375 ppm na expulsão manual. Caso fosse possível liberar com concentrações próximas aos valores máximos encontrados nesse trabalho, os tempos poderiam ser reduzidos mais ainda, visto que não

aconteceu nenhum problema nos tanques que fizeram liberações mais altas. Pode-se também, por segurança, trabalhar com margens próximas de 10000 ppm ou 15000 ppm, como sugestão.

A diferença de tempo na expulsão manual para a expulsão automática é muito grande, pois em BBTs, como já foi relatado, a válvula fica aberta 1 minuto e 30 segundos (contando o tempo dentro das 2 horas configuradas) e 1 minuto e 40 segundos a válvula fica fechada (que não contam no tempo). Isso acaba causando um atraso na expulsão pelo tempo de válvula fechada e que não tem o fluxo de ar atmosférico esterilizado retirando o ar com alta concentração de CO₂ do tanque. Enquanto isso, na expulsão manual, a válvula permanece com uma abertura de 20% todo o tempo da atividade, formando um fluxo laminar bem mais eficiente na retirada do CO₂, sendo um ganho de, em média, 1 hora e 30 minutos. Além disso, o compressor fica ligado enquanto a atividade de expulsão está sendo realizada, sendo um ganho de consumo da expulsão manual em relação à expulsão automática.

A Tabela 19 mostra uma comparação de valores médios, máximos e mínimos de liberação de CO₂ e tempo de duração das expulsões, além de valor médio de O₂ de liberação medido pelos cervejeiros em expulsões automáticas e manuais em FMTs.

Tabela 19 - Tabela de comparações de concentração de CO₂, tempo e O₂ de liberação entre expulsões manuais e automáticas em FMTs.

Comparação de concentrações de CO₂, O₂ e tempo de expulsão em expulsões automáticas e manuais em FMTs							
Tipo de expulsão	Liberações CO₂ (ppm)			Duração (hh:mm)			O₂ liberação (%)
	Média	Máximo	Mínimo	Média	Máximo	Mínimo	
Automático	15069	54700	920	03:37	04:54	02:46	20,72%
Manual	10367	20000	5100	02:55	03:35	02:10	20,80%

Fonte: Do Autor, 2023.

Em FMTs, levando em conta os valores de concentração de liberação de CO₂, tempo de duração da expulsão e oxigênio de liberação, expostos na Tabela 19, a expulsão manual também acaba sendo mais eficiente do que a expulsão automática, completando a expulsão em menor tempo com menores valores de concentração de CO₂ e, conseqüentemente, maior valor de oxigênio. É necessário destacar a alta concentração de CO₂ de liberação, de 54700 ppm. O valor de concentração na expulsão manual máximo foi menor do que nos BBTs, enquanto o valor mínimo na expulsão automática foi de 920 ppm e na expulsão manual foi de 5100 ppm.

O tempo máximo da expulsão manual foi quase o mesmo do tempo médio da expulsão automática. Sendo o tempo médio de expulsão manual de 2 horas e 55 minutos, houve um

ganho de 42 minutos em relação à expulsão automática. Nos FMTs a diferença entre as expulsões é bem menor do que nos BBTs, mas ainda com ganho de tempo.

Analisando mais sobre o máximo de concentração de CO₂ liberado em FMTs, foram feitas liberações máximas de 54700 ppm e 20000 ppm e, retirando os valores máximos e mínimos, resultou em uma média de 11429 ppm na expulsão automática e 6000 ppm na expulsão manual. Caso fosse possível liberar com concentrações próximas aos valores máximos encontrados nesse trabalho, os tempos poderiam ser reduzidos mais ainda, visto que não aconteceu nenhum problema nos tanques que fizeram liberações mais altas. Pode-se também, por segurança, trabalhar com margens entre 40000 ppm ou 20000 ppm, como sugestão.

Os experimentos desse trabalho podem ser relacionados com a Tabela 20, que demonstra experimentos realizados por Elmore (1980 *apud* Priest; Campbell, 2003). Não foi possível encontrar detalhes sobre o experimento feito, como as dimensões e *design* do tanque ou dos tanques, erro das medidas, a metodologia de expulsão, fluxo de ar para expulsão, locais de saída de ar, entre outros. O estudo é do ano de 1980 e, comparando com uma cervejaria com tecnologias atuais, pôde ser visto que há diferença entre os resultados obtidos no estudo de Elmore e o que foi feito nesse trabalho. A Tabela 20 pode ser, então, retratada no gráfico da Figura 70, podendo ser vista a queda de concentração de CO₂ pelo tempo de expulsão.

Tabela 20 - Taxa de retirada de CO₂ de um tanque de cervejaria pelo tempo de expulsão.

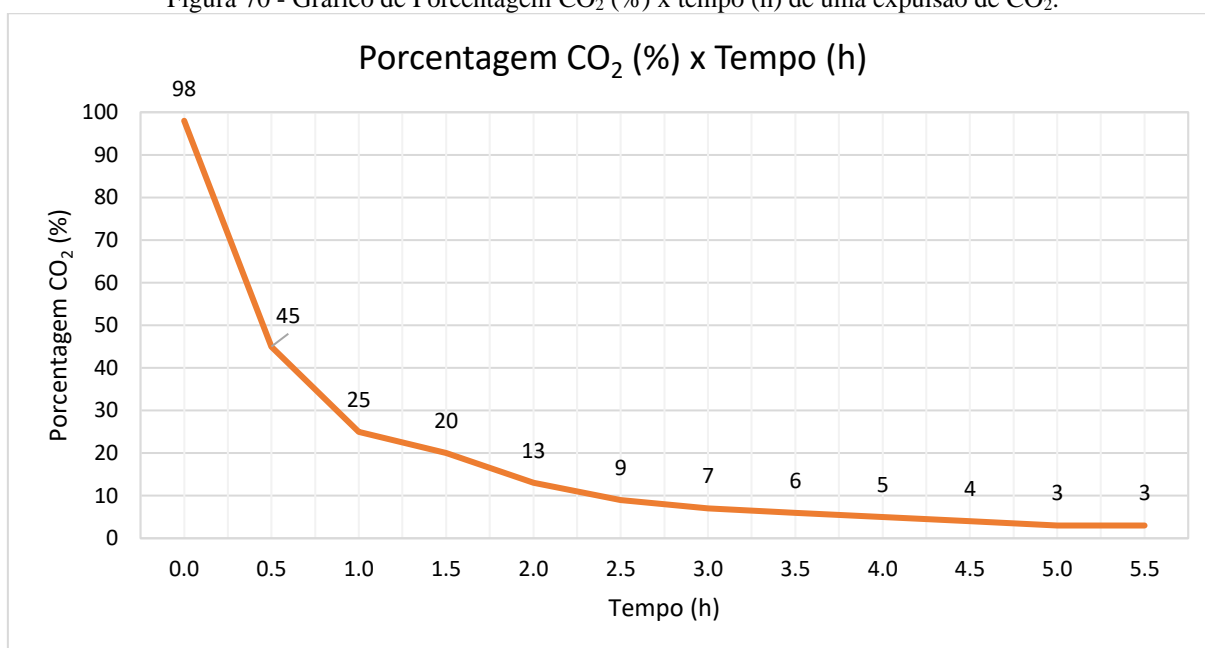
Tempo de expulsão e porcentagem de CO₂ no tanque	
Tempo (h)	Porcentagem de CO₂ (%)
0.0	98
0.5	45
1.0	25
1.5	20
2.0	13
2.5	9
3.0	7
3.5	6
4.0	5
4.5	4
5.0	3
5.5	3

Fonte: Adaptado de Elmore, 1980 *apud* Priest; Campbell, 2003.

O experimento acaba resultando em 3% de volume de CO₂ estabilizado no final, sem outros detalhes. Pode ser visto que, após as 2 horas de expulsão, ela passa a ser bem mais lenta,

claro que tudo depende da metodologia de expulsão, mas faz sentido que dentro do tanque já comece a ter grande parte de ar com concentração mais baixa e que cada vez fique mais difícil retirar CO₂ do tanque. É muito clara a diferença de tempo, necessitando de 5 horas para chegar a 3%, enquanto que nos experimentos realizados nesse projeto, pôde-se obter 920 ppm, que seria 0,09% de volume de CO₂ em 3 horas e 13 minutos de expulsão. A redução do tempo e consequente redução de consumo de energia é evidente ao longo desses 40 anos após esses experimentos, o que evidencia o avanço tecnológico.

Figura 70 - Gráfico de Porcentagem CO₂ (%) x tempo (h) de uma expulsão de CO₂.



Fonte: Do Autor, 2023.

Pensando que 30000 ppm seria o mínimo nesse experimento de Elmore, é possível comparar com os resultados desse trabalho, que nos tanques menores o valor máximo foi de 28000 ppm, caso ele estivesse buscando esse resultado final. No caso de FMTs, a concentração de CO₂ máxima de 54700 ppm estaria próxima a 4 horas no experimento da Tabela 20. Pela média de tempo de 3 horas e 37 minutos na expulsão automática observaria uma taxa de 15069 ppm, enquanto que no estudo de Elmore seria de 60000 ppm.

6.13 REDUÇÃO DO TEMPO DE EXPULSÃO

Outro objetivo do estudo foi analisar a possibilidade de reduzir os tempos de expulsão, agora entendendo como se comporta a concentração de CO₂. É necessário combinar o valor acima de 20% de oxigênio, que os cervejeiros preferem seguir na liberação do tanque, com a

concentração de CO₂. Então, foram feitas várias medições enquanto a expulsão estava acontecendo.

Foram feitas medições com 58000 ppm, 57000 ppm, 50000 ppm, 45000 ppm e 42000 ppm em algumas expulsões, tanto manuais quanto automáticas. Em BBTs, em todas as medições com concentrações abaixo ou igual a 50000 ppm foi possível ter medições de oxigênio acima de 20%. Em FMTs, em todas as medições com concentrações abaixo ou igual a 55000 ppm foi possível ter medições de oxigênio acima de 20%.

Nas expulsões manuais, o tempo é bem reduzido e o projeto apoiava muito bem nas liberações das expulsões. No que diz respeito às expulsões automáticas, o projeto tem o potencial de oferecer um suporte mais eficaz, especialmente na minimização dos acréscimos de tempo associados a essas expulsões, seguindo, no mínimo, o tempo padrão configurado. Isso se torna crucial, dado o elevado número de casos em que as expulsões estão sujeitas a extensões de tempo.

Os casos são específicos, como já dito que não necessariamente o menor tempo de expulsão causa medições com concentrações maiores ou o contrário, mas, utilizando os dados acima, relacionando concentração de CO₂ com o oxigênio medido nos tanques, podem ser feitas algumas análises utilizando os gráficos do Anexo B e Anexo C. Se fosse padronizado liberar para a assepsia com 30000 ppm nos BBTs e FMTs, valor abaixo como forma de segurança, o gráfico do Anexo B mostra que o tempo economizado seria de 1 hora e 30 minutos. No gráfico do Anexo C, o tempo economizado seria de 1 hora.

Os compressores utilizados na atividade apresentam potência de 186,5 kW. Fazendo uma simulação utilizando a tarifa de energia elétrica sem impostos da Cemig (dia 12/06/2023) para consumo na bandeira verde para o grupo de consumidores da cervejaria em que os experimentos foram realizados, em Consumo Ponta é de R\$ 0,54111/kWh e no Consumo Fora Ponta é de R\$ 0,37203/kWh. Ocorreria uma economia de, aproximadamente, R\$ 73,42 a R\$ 106,79 por hora reduzida de utilização do compressor, utilizando como cálculo somente a potência ativa dos compressores.

Somente nas expulsões manuais, que não têm um tempo fixo e vai de cada operador conferir continuamente, mas que em média utilizam 4 horas de expulsão, a redução de tempo foi de em média de 1 hora e 23 minutos em BBTs e de 1 hora e 5 minutos em FMTs.

7 CONCLUSÃO

O processo de fabricação de cerveja gera contaminantes em equipamentos, exigindo um sistema de CIP para limpar os equipamentos, evitando a entrada de microrganismos e garantindo a qualidade da cerveja. A limpeza de CIP utilizando NaOH é a mais eficaz, principalmente em tanques de fermentação, por ser um bom agente contra sujeiras orgânicas. Os tanques ficam preenchidos com CO₂ resultante da fermentação e para pressurização. A reação de NaOH com CO₂ pode causar uma diminuição no poder de limpeza de NaOH e em pior caso, pode ocasionar vácuo e implosão do tanque. Então, fica necessário retirar o CO₂ de dentro dos tanques antes da limpeza alcalina, isso é feito injetando ar atmosférico esterilizado.

A expulsão manual ou automática requer monitoramento da ausência de CO₂ utilizando olfato do cervejeiro e um medidor de gases (O₂), embora essas medidas sejam indiretas e subjetivas. O projeto propõe o uso de sensores NDIR para monitorar a concentração de CO₂, temperatura e umidade em tanques de cerveja, visando determinar o momento ideal para iniciar a assepsia. É utilizado também, um ESP32 para processar e transmitir os dados via MQTT para um Raspberry Pi, que armazena os dados no InfluxDB e podem ser visualizados no Grafana, oferecendo uma interface gráfica para acompanhamento e análise, com potencial para reduzir o tempo de expulsão e economizar energia elétrica nas instalações ao evitar tempos excessivos de expulsão, por utilizarem compressores de ar.

O projeto buscou dar mais entendimento sobre a atividade de expulsão de CO₂, já que alguns detalhes não eram de conhecimento de várias pessoas que trabalham na atividade há anos, principalmente por caracterizar numericamente alguns parâmetros da expulsão como concentração do gás, temperatura e umidade. Além disso, o projeto apresenta uma metodologia científica para a indústria através de um equipamento que pode dar mais segurança à atividade, diminuindo as chances de erros humanos.

É importante destacar os erros humanos e a segurança da atividade, pois, em outras unidades, a atividade de expulsão é conferida abrindo o fundo do tanque e colocando uma vela acesa dentro do tanque, o que pode ocasionar diversos riscos de acidentes e erros. Então, o projeto é um avanço em conjunto com os testes da unidade em que o projeto foi aplicado, visto que já vinha sendo utilizado um detector de gases (O₂) pelos cervejeiros e o tanque não é aberto.

Atualmente, para a liberação da atividade, um cervejeiro utiliza um detector de gases que mede apenas a concentração do oxigênio presente no ar de saída do tanque, que deve estar próximo a 20%, e o cervejeiro inala o ar que está saindo do tanque. O CO₂, quando em uma concentração alta, é asfixiante e a pessoa não consegue se manter inalando por muito tempo

esse gás e quando está com baixa concentração é possível respirar normalmente o ar que está saindo do tanque. Então, a atividade é liberada por um método indireto (via oxigênio) e um método subjetivo (cervejeiro inalando). O projeto tratou de uma nova metodologia sobre a liberação da atividade, medindo diretamente no tanque a concentração de CO₂, que é o gás alvo da atividade.

Ficou claro que os sensores NDIR podem ser utilizados para construir um equipamento de monitoramento de concentração de CO₂. Como a atividade inicia com alta concentração de dióxido de carbono e diminui ao longo do tempo, sensores que medem altas concentrações (acima de 100000 ppm ou 10% de volume) são ideais para visualizar uma boa parte da queda de concentração, visto que esse projeto enfrentou dificuldades no começo por utilizar sensores de concentração mais baixa.

Além disso, os dados das medições podem ser vistos em tempo real de qualquer lugar, pela Internet, pois são gerados gráficos e telas simples, expostas em um site que facilita a análise de pessoas leigas, tornando os números, que muitas vezes são complexos, em informações visuais que podem ser analisadas de forma precisa.

Questões de comunicação são essenciais em um ambiente industrial, principalmente pelos equipamentos encontrados na área e pelas diversas estruturas e ruídos, necessitando de uma rede de comunicações extensa e robusta. Os testes foram realizados por redes de celulares e do Raspberry Pi, que são limitadas, mas se houvesse uma rede mais robusta teriam menos experimentos com resultados em falha. O uso do PageKite foi exclusivamente para possibilitar o acesso ao servidor no Raspberry Pi a partir da Internet. Como melhoria para trabalho futuro, o sistema de comunicação e os serviços instalados no Raspberry Pi podem ser mantidos, visto que a rede utiliza meios de comunicação segura, porém seria utilizada somente de forma local, diminuindo riscos de ataques externos à rede, o que aumenta a segurança dos dados e o que para a indústria seria o ideal. O projeto pode também ser simplificado para permitir a análise dos dados sem a necessidade de representação gráfica, sendo possível exibir os valores dos parâmetros medidos diretamente em um *display* integrado na caixa de medição.

Ficou claro que a temperatura, a umidade e a pressão não são fatores para a liberação dos tanques, sendo determinados principalmente pelo tratamento no sistema de compressão de ar, que depende da temperatura e umidade do ar que entra no sistema. Então, para simplificar o projeto, poderia ser utilizado somente o sensor de concentração de dióxido de carbono.

O projeto teve seu uso muito significativo nas expulsões manuais, pois com ele foi possível garantir concentrações de CO₂ menores e ainda reduzir bastante o tempo da expulsão. Isto porque a maioria dos operadores inicia a atividade e deixa por um período de tempo que,

na maioria das vezes, é de 4 horas. Logo, houve um ganho de tempo de aproximadamente 1 hora e 23 minutos em BBTs e 1 hora e 5 minutos em FMTs, em média.

As medições de expulsões automáticas nos dois tipos de tanques seguiram conforme o tempo padrão, apresentando valores mais altos de liberação do que na expulsão manual, o que era esperado pela metodologia de como é feita a expulsão. No caso da expulsão automática, nenhum ajuste foi feito, os dados foram coletados e analisados para possíveis reduções de tempo.

Há diferenças de valores de concentração de CO₂ entre os dois tipos de tanques, o que pode ser justificado pela diferença entre suas dimensões. Pelos valores de concentração máxima encontrados tanto em BBTs quanto em FMTs é possível ter liberações com tempos mais reduzidos, podendo não ser conforme os valores máximos, mas em valores acima dos valores médios encontrados ou conforme os valores médios. Então, é possível trabalhar em conjunto com a medição de oxigênio dos cervejeiros para liberar os tanques com aproximadamente 20% de oxigênio e com BBTs e FMTs tendo um valor de concentração padrão para cada tipo tanque e para cada tipo de expulsão. Esses valores devem ser especificados em conjunto com o assepsista, o gerente de processos e os cervejeiros, podendo ter como base esse estudo, que mostrou liberações com concentrações bem altas e que não geraram qualquer tipo de problemas à atividade de limpeza, nem a tanques e estruturas.

Como exposto, pela potência do compressor utilizado na atividade e o custo de energia na fábrica, economias de minutos são essenciais financeiramente a longo prazo. Reduções de horas, como nas expulsões manuais, são economias de custo de produção que geram grande impacto a cada vez que a atividade for realizada.

Adicionalmente, é importante observar que outros tanques de menor porte também empregam o processo de expulsão de CO₂, tornando a caixa de medição potencialmente útil para esses casos. No entanto, os tanques menores possuem um tempo de expulsão mais curto, variando de 30 minutos a 1 hora, em comparação aos dois tanques inicialmente observados. Além disso, a maioria desses tanques menores opera de forma automática, uma vez que a realização manual não é economicamente viável. Mesmo assim, eles realizam o mesmo tipo de expulsão, o que poderia fornecer um campo adicional para estudos e investigações.

Torna-se evidente, portanto, que o projeto apresenta dados até então promissores, podendo desempenhar um papel pioneiro na diminuição do tempo de expulsão. Isso é alcançado por meio da utilização da concentração de CO₂, resultando na redução da necessidade de compressores de ar e, por conseguinte, na economia de energia elétrica. Além disso, a caixa de medição pode ser simplificada para exibir os dados de maneira direta por meio de um *display*.

REFERÊNCIAS

41J BLOG. **Throwing the BME280 Combined Pressure/Humidity Sensor in a SEM.** 2016. Disponível em: <http://41j.com/blog/2016/10/throwing-the-bme280-combined-pressurehumidity-sensor-in-a-sem/>. Acesso em: 28 mar. 2023.

ASHFAQUE-E-ALAM; Md; ISLAM; Md Rakibul; FARIA, Ismat Jabeen. Development and validation of a low-cost visible light spectrophotometer. In: **2017 4th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)**. IEEE, 2017. p. 653-657.

ATWELL, C.; MARTIN, E.; MONTAGUE, G.; SWUSTE, J.; PICKSLEY, M. 2017. **Optimization of cleaning detergent use in brewery fermenter cleaning.** *J. Inst. Brew.*, 123: 70–76. doi: 10.1002/jib.393. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.393>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BARTH, Roger; FARBER, Matthew. **Mastering brewing science: Quality and production.** John Wiley & Sons, 2019. Acesso em: 24 mar. 2022.

BOSCH. **BME280 – Integrated Environmental Unit.** 2022. Disponível em: https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/product_flyer/bst-bme280-fl000.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

BOSCH. **BME280 measuring principle.** 2019. Disponível em: <https://community.bosch-sensortec.com/t5/MEMS-sensors-forum/BME280-measuring-principle/td-p/7674>. Acesso em: 27 mar. 2023.

BOULTON, Christopher; QUAIN, David. **Brewing yeast and fermentation.** John Wiley & Sons, 2008. Acesso em: 20 mar. 2022.

BRIGGS, D. E.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. B. C. A.; BOULTON, C. A. (2004). **Brewing: science and practice** (Vol. 108). Woodhead Publishing. Acesso em: 20 fev. 2022.

BÜRKLE GMBH. **Chemical resistance of plastics.** 2015. Disponível em: https://www.kendrion.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Datasheets_Operating_instructions/Valves_Fluid_Control/Chemical-resistance-valve-technology-Kendrion-EN.pdf. Acesso em: 01 maio 2023.

CAMARA, Romulo. **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.

CANASSA, Thalita A; LAMONATO, Anna Luisa; RIBEIRO, Allan Victor. **Utilização da lei de Lambert-Beer para determinação da concentração de soluções.** 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/JETI/article/view/5930>. Acesso em: 15 mar. 2022.

CANDIDO, Renato. **How To Set Up a PageKite Front-End Server on Debian 9.** 2019. Disponível em: <https://www.digitalocean.com/community/tutorials/how-to-set-up-a-pagekite-front-end-server-on-debian-9>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CARNEIRO DA CUNHA, B.; MACÊDO BATISTA, D. Avaliação da Integração do Protocolo MQTT em uma Plataforma de Cidades Inteligentes. **Revista Eletrônica de Iniciação Científica em Computação**, [S. l.], v. 20, n. 2, 2022. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/journals/index.php/reic/article/view/2221>. Acesso em: 24 abr. 2023.

COSTA, João Lauro Beserra da. **Sistema de coleta de dados por meio de rede de sensores sem fio aplicado ao monitoramento de estruturas na construção civil**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/64497/1/2022_tcc_jlbcosta.pdf. Acesso em: 22 jun. 2022.

CUSTODIO, Rogério; KUBOTA, Lauro T.; DE ANDRADE, João Carlos. Lei dos processos de absorção da radiação. **Revista Chemkeys**, n. 3, p. 1-5, 2000. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/view/9615/5035>. Acesso em: 22 mar. 2022.

DINCULEANÓ, D.; CHENG, X. Vulnerabilidades e Limitações do Protocolo MQTT Usado entre Dispositivos IoT. **Ciências Aplicadas**, v. 9, n. 5, pág. 848, 27 fev. 2019.

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: 20 abr. 2022.

DO, Bao Khanh. **Data Visualization with Integration of Grafana and Quanta Platform**. 2021.

ERIKS. **PETg Chemical resistance**. 2023. Disponível em: <https://solutions-in-plastics.info/fr/plastics/datasheets/petg/eriks%20-%20petg%20chemical%20resistance.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

ESP32 ESP-IDF. **BME280 with ESP32 ESP-IDF and Display Readings on OLED**. 2022. Disponível em: <https://esp32tutorials.com/bme280-esp32-esp-idf-oled/>. Acesso em: 01 maio 2023.

ESPRESSIF. **ESP32**. 2022a. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 10 jul. 2022.

ESPRESSIF. **ESP32-WROOM-32D e ESP32-WROOM-32U -- Datasheet**. 2022b. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf. Acesso em: 01 jul. 2022.

GRAFANA. **Get started with Grafana and InfluxDB**. 2023a. Disponível em: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/getting-started/get-started-grafana-influxdb/>. Acesso em: 18 abr. 2023.

GRAFANA. **What is Grafana?** 2023b. Disponível em: <https://grafana.com/oss/grafana/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

GUOAN, Xiao. **Differences Between Forward Proxy and Reverse Proxy**. 2022. Disponível em: <https://www.linuxbabe.com/it-knowledge/differences-between-forward-proxy-and-reverse-proxy>. Acesso em: 24 abr. 2023.

GUOAN, Xiao. **Expose Localhost to Internet with PageKite on Ubuntu**. 2019. Disponível em: <https://www.linuxbabe.com/linux-server/expose-localhost-to-internet-pagekite-ubuntu>. Acesso em: 24 abr. 2023.

HUINFINITO. **Módulo Sensor Barômetro/Temperatura/Umidade - BME280**. 2022. Disponível em: <https://www.huinfinito.com.br/sensores/1346-modulo-sensor-barometrotemperaturaunidade-bme280.html>. Acesso em: 26 mar. 2023.

INFLUXDATA. **Telegraf**. 2022. Disponível em: <https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

INFLUXDATA. **What is time series data**. 2023. Disponível em: <https://www.influxdata.com/what-is-time-series-data/>. Acesso em: 25 abr. 2023

JUNGES, A. L.; BÜHLER, A. J.; MASSONI, N. T.; SIEBENEICHLER, Á. F. S. 2020. **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*, 37(2), 849-864. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2020v37n2p849/43914>. Acesso em: 18 mar. 2022.

KANEGSBURG, Barbara; KANEGSBURG, Edward (Ed.). *Handbook for Critical Cleaning*, - 2 Volume Set. CRC Press, 2020. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?id=mMeZIGJ2UwUC&pg=PA276&lpg=PA276&dq=Neutralization,+cleaning+agents+\(NaOH\)+with+CO2+beer&source=bl&ots=uHzeFpIyoG&sig=ACfU3U1XhTPlio0p42x6fMtoXgKhxQ2nMg&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjJ58j2xKX2AhVwppUCHSHfD9QQ6AF6BAgeEAM#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=mMeZIGJ2UwUC&pg=PA276&lpg=PA276&dq=Neutralization,+cleaning+agents+(NaOH)+with+CO2+beer&source=bl&ots=uHzeFpIyoG&sig=ACfU3U1XhTPlio0p42x6fMtoXgKhxQ2nMg&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKEwjJ58j2xKX2AhVwppUCHSHfD9QQ6AF6BAgeEAM#v=onepage&q&f=false). Acesso em: 15 mar. 2022.

KUMAR, Aman. **How to Install TIG stack (Telegraf, Influx and Grafana) on Ubuntu**. 2021. Disponível em: <https://onlyoneaman.medium.com/how-to-install-tig-stack-telegraf-influx-and-grafana-on-ubuntu-405755901ac2>. Acesso em: 25 mar. 2023.

KUNZE, Wolfgang; MANGER, Hans-Jürgen. 2004. **Technology Brewing and Malting**. 3rd international ed. Berlin: VLB Berlin.

LAMMEL, G.; WAFFENSCHMIDT, S.; FEYH, A.; O'BRIEN, G.; GRAHAM, A. 2019. **Combined pressure and humidity sensor**. *U.S. Patent No. 10,184,910*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. 22 jan. 2019.

LIGHT, Roger A. Mosquitto: server and client implementation of the MQTT protocol. **Journal of Open Source Software**, v. 2, n. 13, p. 265, 2017.

LUZ, Roger. **MQTT man page**. 2022. Disponível em: <https://mosquitto.org/man/mqtt-7.html>. Acesso em: 17 jul. 2022.

MARTIN, C. R.; ZENG, N.; KARION, A.; DICKERSON, R. R.; REN, X.; TURPIE, B. N.; WEBER, K. J. Evaluation and environmental correction of ambient CO₂ measurements from a low-cost NDIR sensor. **Atmospheric measurement techniques**. *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2383–2395, <https://doi.org/10.5194/amt-10-2383-2017>, 2017

MH-Z14. **Intelligent Infrared Carbon Dioxide Module (Model: MH-Z14)**. 2016. Disponível em: https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z14_co2-manual-v2_6.pdf. Acesso em: 10 mar. 2022.

MH-Z16. **MH-Z16 Infrared CO2 Gas Module**. 2022. Disponível em: https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z16_co2-manual-v2_6.pdf. Acesso em: 05 out. 2022.

MH-Z19C. **Infrared CO2 Sensor Module (Model: MH-Z19C)**. 2021. Disponível em: [https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual\(ver1_2\).pdf](https://www.winsen-sensor.com/d/files/mh-z19c-pins%26terminal-type-co2-manual(ver1_2).pdf). Acesso em: 10 mar. 2022.

MOUSER. **BME 280 - Combined humidity and pressure sensor**. 2021. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/783/bst_bme280_ds002-2238172.pdf. Acesso em: 26 mar. 2023.

MOUSER. **ESP32-DevKitC-32UE**. 2022. Disponível em: https://br.mouser.com/images/espressifsystems/hd/ESP32-DevKitC-32UE_SPL.jpg. Acesso em: 02 jul. 2022.

MSA. **ALTAIR® 4XR Detector Multigás**. 2021. Disponível em: https://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/Catalogo_Altair_4XR-PT. Acesso em: 01 maio 2023.

NAQVI, Syeda Noor Zehra; YFANTIDOU, Sofia; ZIMÁNYI, Esteban. Time series databases and influxdb. **Studienarbeit, Université Libre de Bruxelles**, v. 12, 2017.

NIST. **Carbon dioxide**. 2022. Disponível em: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC>. Acesso em: 18 mar. 2022.

PAGEKITE. **What can I do with PageKite?** 2023a. Disponível em: <https://pagekite.net/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

PAGEKITE. **PageKite Features**. 2023b. Disponível em: <https://pagekite.net/support/intro/features/>. Acesso em: 20 abr. 2023.

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.

PLAZIT POLYGAL. **Chemical Compatibility Chart for Plazit-Polygal PLAZGAL PETG Sheets**. 2020. Disponível em: <https://plazit-polygal.com/wp-content/uploads/filr/1416/Chemical%20Compatibility%20Chart%20PLAZGAL%20PETG%20REV%2001.pdf>. Acesso em: 01 maio 2023.

PRIEST F. G.; I. CAMPBELL. 2003. **Brewing Microbiology**. 3rd Edition. New York: Springer Science Business Media. (<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9250-5>). Acesso em: 23 mar. 2022.

RANDOM NERD TUTORIALS. **Install Mosquitto MQTT Broker on Raspberry Pi**. 2023. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/how-to-install-mosquitto-broker-on-raspberry-pi/>. Acesso em: 05 maio 2023.

RASPBERRY. **Raspberry Pi 3 Model B+**. 2014. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/robocore-lojavirtual/735/rpi-brief.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.

REHAN, Syed; VIERU, Catalin. **Integrate open source InfluxDB and Grafana with AWS IoT to visualize time series data**. 2020. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/blogs/iot/influxdb-and-grafana-with-aws-iot-to-visualize-time-series-data/>. Acesso em: 06 jun. 2022.

RIBAS, Renato P. **Microsistemas Integrados (MEMS)**. Universidade Estadual de Campinas, 2000.

SCHAEFFER, Robson Dagmar. **Estudo e desenvolvimento de um sensor de CO₂ de baixo custo**. 2004. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4199/000453557.pdf?sequence=1&isAllowed=>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SGX SENSORTECH. **Infrared Sensor Application Note 1 A Background to Gas Sensing by Non-Dispersive Infrared (NDIR)**. 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: 15 mar. 2022.

STANGA, Mario. **Sanitation: cleaning and disinfection in the food industry**. John Wiley & Sons, 2010.

STEINECKER. **Steinecker fermentation and storage tanks**. 2021. Disponível em: https://www.steinecker.com/media/downloads/gaer-lagertanks_en.pdf. Acesso em: 20 mar. 2022.

STEWART, Graham G.; RUSSELL, Inge; ANSTRUTHER, Anne (Ed.). **Handbook of brewing**. 3 ed. CRC Press, 2017.

TEIXEIRA FILHO, Rubens Rodrigues. **Internet das coisas aplicada em sistemas eletropneumáticos no controle de atuadores utilizando os protocolos ZigBee e MQTT**. 2022. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

THINGSPEAK. **ThingSpeak - The IoT Platform with MATLAB Analytics**. 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/>. Acesso em: 05 maio 2023.

TORRES, Andrei B. B.; ROCHA, Atslands R.; DE SOUZA, José Neuman. Análise de Desempenho de Brokers MQTT em Sistema de Baixo Custo. *In: WORKSHOP EM DESEMPENHO DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS E DE COMUNICAÇÃO (WPERFORMANCE)*, 15., 2016, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2016. p. 2804-2815. ISSN 2595-6167. DOI: <https://doi.org/10.5753/wperformance.2016.9727>.

TWI. What is petg? (Everything you need to know). 2023. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg#HowisitMade>. Acesso em: 01 maio 2023.

VIRGAMET. Martensitic stainless steel X3CRNIMO13-4, 1.4313, F6NM, UNS S41500, AISI 415 quenched and tempered in accordance with en 10088-1, ASTM A240, ASME SA240. 2022. Disponível em: <https://virgamet.com/1-4313-x3crnimo134-f6nm-uns-s41500-z6cn1304-425c11-stainless-steel#:~:text=1.4313%2C%20F6NM%2C%20AISI%20415%20%2D%20stainless%20steel>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ZHOU, Libing; HE, Yaoyi; ZHANG, Qing; ZHANG, Lei. Carbon Dioxide Sensor Module Based on NDIR Technology. Micromachines, v. 12, n. 7, p. 845, 20 jul. 2021

ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO SENSOR MH-Z16

Winsen
炜盛科技

ZHENGZHOU WINSEN ELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD

http://www.winsen-sensor.com
Tel:0086-371-67169097

E-mail:sales@winsensor.com
Fax:0086-371-60932988

INSPECTION REPORT

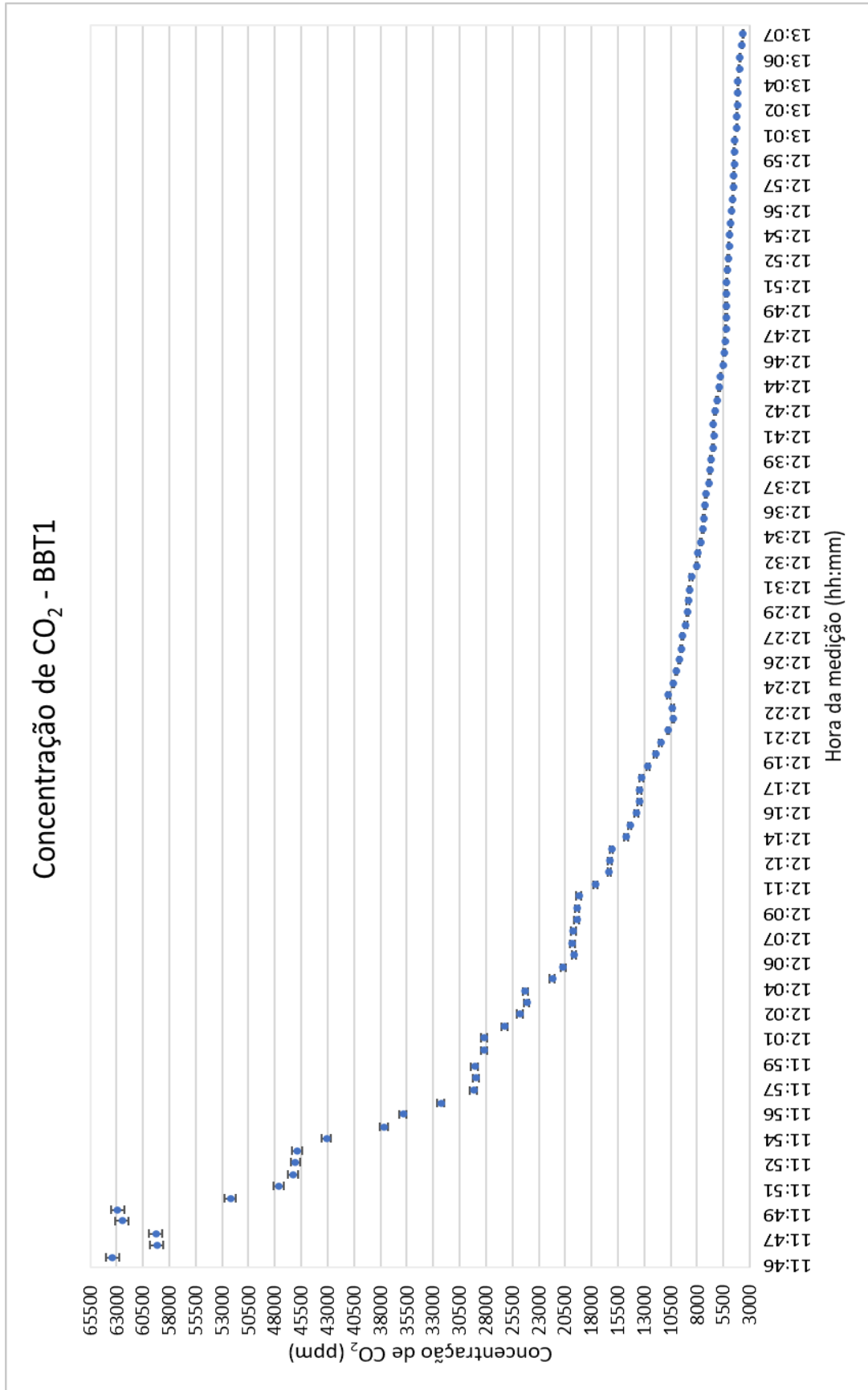
No.: JL-8.6-09a

Serial No.: 2210291

Customer	603458			
Model	MH-Z16	Quantity	2 pcs	
Batch No.	40000241571	Inspection Date	2022/10/18	
Appearance	Good			
Function	Good			
Target Gas	CO ₂			
Precision	±(50ppm+5% of measure value)			
Detection Range	0-100000ppm			
Output Signals	UART/PWM			
Inspection Points(ppm)	400	10000	—	—
Display Values(ppm)	412	9990	—	—
Output Voltage (V)	—	—	—	—
Package	Good			
Inspection Condition	Temp: 21 °C		Humidity: 32 %RH	
Inspection Result	Good			

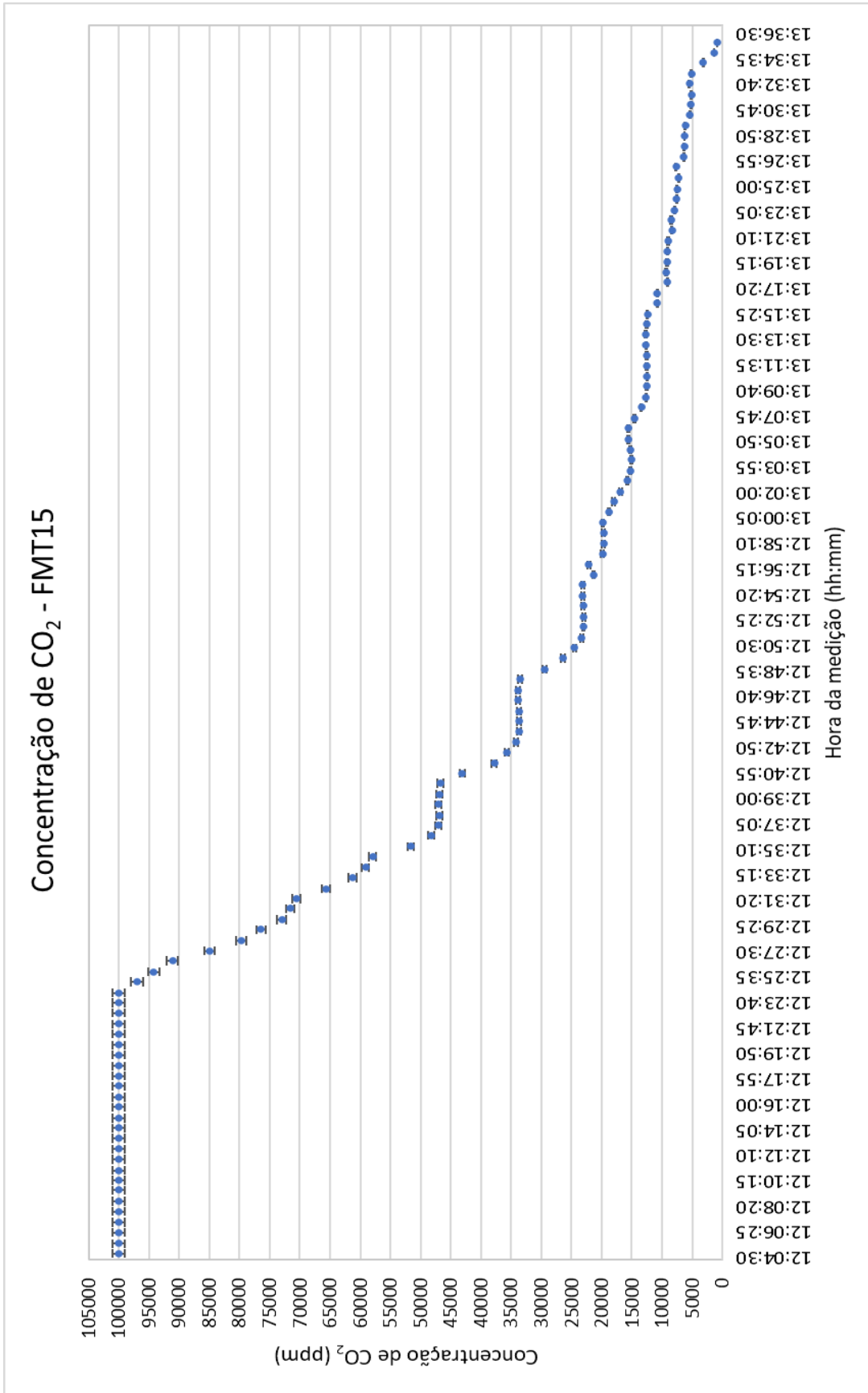
Inspector: Li kangQC Supervisor: Guangji

ANEXO B – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM BBT EM UMA EXPULSÃO MANUAL



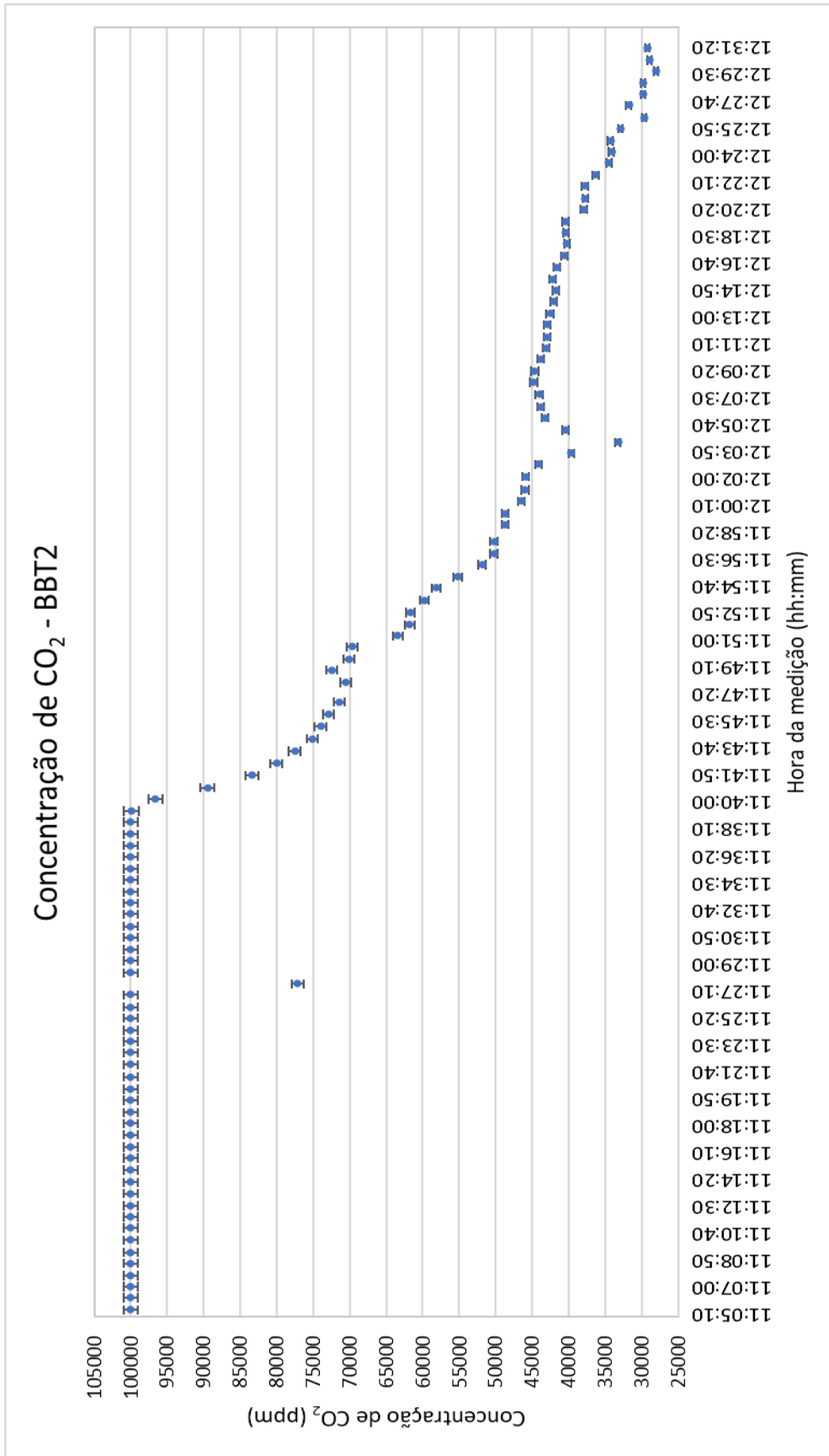
Nota: após experimentos realizados com o sensor MH-Z16, utilizando erro padrão, ficou definido que o erro utilizado seria de ± 20 ppm + 1% do valor da medida e não somente 1% do valor da medida como sugere a acurácia dada pelo fabricante. As barras de erro ficaram muito pequenas, mas estão presentes, o erro é muito pequeno.

ANEXO C – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM FMT EM UMA EXPULSÃO MANUAL



Nota: após experimentos realizados com o sensor MH-Z16, utilizando erro padrão, ficou definido que o erro utilizado seria de ± 20 ppm + 1% do valor da medida e não somente 1% do valor da medida como sugere a acurácia dada pelo fabricante. As barras de erro ficaram muito pequenas, mas estão presentes, o erro é muito pequeno.

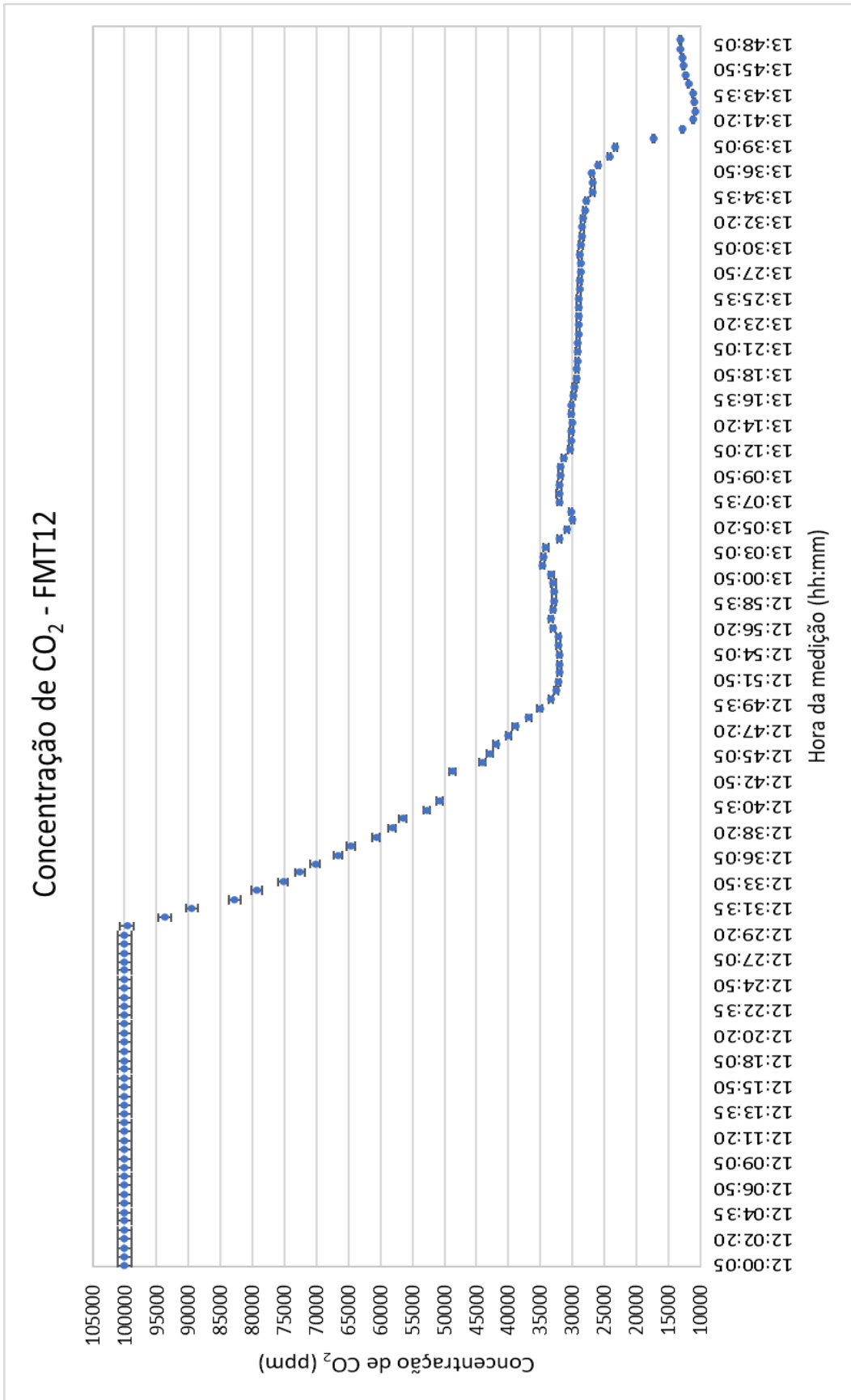
ANEXO D – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM BBT EM UMA EXPULSÃO AUTOMÁTICA



Nota: após experimentos realizados com o sensor MH-Z16, utilizando erro padrão, ficou definido que o erro utilizado seria de ± 20 ppm + 1% do valor da medida e não somente 1% do valor da medida como sugere a acurácia dada pelo fabricante. As barras de erro ficaram muito pequenas, mas estão presentes, o erro é muito pequeno.

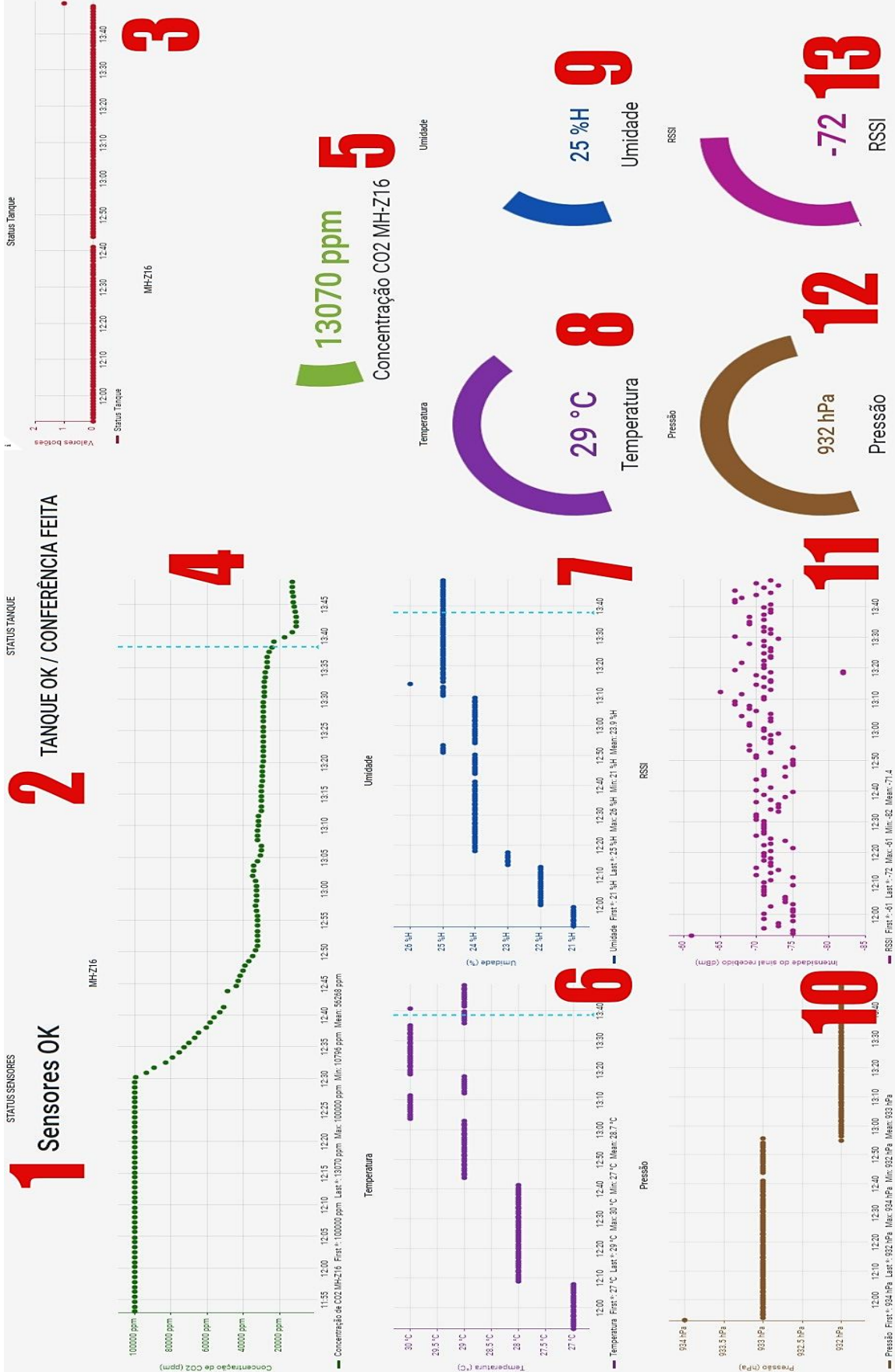
Houve dois pontos de queda de concentração que ficaram explícitos no gráfico, um deles às 11:27 e outro às 12:04. Eles foram motivados pela retirada da mangueira de saída dos tanques, que é inserida na caixa de medição, pelos operadores para conferir a porcentagem de oxigênio no tanque com o outro equipamento, resultando em uma queda de concentração por não estar recebendo o ar de saída do tanque.

ANEXO E – GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE CO₂ EM UM FMT EM UMA EXPULSÃO AUTOMÁTICA



Nota: após experimentos realizados com o sensor MH-Z16, utilizando erro padrão, ficou definido que o erro utilizado seria de ± 20 ppm + 1% do valor da medida e não somente 1% do valor da medida como sugere a acurácia dada pelo fabricante. As barras de erro ficaram muito pequenas, mas estão presentes, o erro é muito pequeno. As 12:41 pode ser visto que houve um espaço vazio no gráfico que foi motivado por uma falha de comunicação e que não resultou em um valor de medição.

APÊNDICE A – PÁGINA GRAFANA



Nota: detalhes na página 134.

Número 1 – destaca o *status* dos sensores, no qual alguns detalhes de funcionamento dos sensores podem ser visualizados. Nesse caso, todos os sensores estão funcionando corretamente. Há diversas mensagens para orientar sobre o funcionamento dos sensores.

Número 2 – destaca o *status* de conferência do tanque.

Número 3 – gráfico do *status* de conferência do tanque.

São três mensagens possíveis e valores no *Status* Tanque (número 2 e número 3):

- “Tanque não ok/sem conferência”: é o *status* inicial, quando a atividade de expulsão ainda está sendo realizada e o cervejeiro não conferiu. No *Status* Tanque é o valor 0;
- “Tanque não ok/conferência feita”: quando o cervejeiro já conferiu se a expulsão ocorreu, mas ainda são mantidos altos níveis de CO₂. No *Status* Tanque é o valor 2; e
- “Tanque ok/conferência feita”, quando a expulsão foi finalizada e conferida pelo cervejeiro. No *Status* Tanque é o valor 1.

Número 4 – gráfico de medições de concentração de CO₂ ao longo do tempo realizadas pelo sensor MH-Z16. Em destaque no tracejado azul, o momento que o cervejeiro liberou o tanque para assepsia.

Número 5 – medidor que mostra o último valor de concentração de dióxido de carbono recebido pelo sistema, junto com a barra verde que mostra quanto a medição vale em relação ao intervalo de leitura do sensor, que no caso do MH-Z16 a barra verde foi configurada para mostrar entre 400 a 100000 ppm.

Número 6 – gráfico de medições de temperatura realizadas pelo sensor BME280.

Número 7 – gráfico de medições de umidade realizadas pelo sensor BME280.

Número 8 – medidor que mostra o último valor recebido de temperatura. A barra de relação com o intervalo de medição de temperatura conta com uma faixa de 0 a 40 °C.

Número 9 – medidor que mostra o último valor recebido de umidade. A barra de relação com o intervalo de medição de umidade conta com uma faixa de 0 a 100%.

Número 10 – gráfico de medições de pressão realizadas pelo sensor BME280.

Número 11 – gráfico de intensidade de *Wifi* RSSI que o ESP32 faz leitura em relação ao *Wifi* criado pelo Raspberry Pi.

Número 12 – medidor que mostra o último valor recebido de pressão. A barra de relação com o intervalo de medição de pressão conta com uma faixa de 0 a 1100 hPa.

Número 13 – medidor de último valor recebido sobre RSSI.

Em destaque no tracejado azul (gráficos de número 4, 6 e 7), o momento que o cervejeiro liberou o tanque para assepsia.