

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DARIANA DE FREITAS SOUZA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE UM PROTÓTIPO E-
NOSE APLICADO AO MONITORAMENTO DE BIOGÁS GERADO DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DA VINHAÇA**

PONTA GROSSA - PR

2026

DARIANA DE FREITAS SOUZA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE UM PROTÓTIPO E-
NOSE APLICADO AO MONITORAMENTO DE BIOGÁS GERADO DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DA VINHAÇA**

**Development and Preliminary Evaluation of an e-Nose Prototype Applied to the
Monitoring of Biogas Generated from the Anaerobic Digestion of Vinasse**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Luiz Stevan Júnior

PONTA GROSSA - PR

2026



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DARIANA DE FREITAS SOUZA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE UM PROTÓTIPO E-
NOSE APLICADO AO MONITORAMENTO DE BIOGÁS GERADO DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DA VINHAÇA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado
como requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 19/junho/2026

Sérgio Luiz Stevan Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Josmar Ivanqui
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Bruno Miguel Holler
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

PONTA GROSSA - PR

2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado força, saúde e coragem para chegar até aqui.

Aos meus pais e às minhas irmãs, agradeço pelo amor, apoio e incentivo ao longo de toda a minha trajetória. Cada palavra de encorajamento e cada gesto de cuidado foram importantes para que eu continuasse seguindo em frente.

Ao meu esposo, deixo um agradecimento especial. Obrigada por estar ao meu lado nos momentos mais difíceis durante o curso, por me apoiar quando pensei em desistir, por acreditar em mim e por me dar força quando eu mais precisava. Sua presença, paciência e companheirismo foram fundamentais para que eu conseguisse concluir esta etapa.

Ao meu orientador, professor Dr. Sérgio Luiz Stevan Júnior, agradeço pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa no laboratório do CIEBE e do SENA, por ter acreditado na proposta deste projeto e por todo o apoio durante o desenvolvimento do trabalho. Sua orientação foi essencial para a construção desta pesquisa e para meu crescimento acadêmico.

Agradeço também ao Laboratório de Processos Biológicos (LPB), do Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), e ao professor Dr. Lucas Tadeu Fuess, por permitir a realização dos experimentos preliminares no laboratório e por contribuir para que esta etapa do trabalho fosse possível.

Por fim, agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e a todos os professores que fizeram parte da minha formação. Cada disciplina, orientação e ensinamento contribuíram de alguma forma para minha trajetória acadêmica. Em especial, agradeço à banca avaliadora por ter disponibilizado tempo para ler e avaliar este trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

O monitoramento do biogás produzido em reatores anaeróbios é importante para acompanhar a estabilidade do processo e apoiar o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, como a vinhaça de cana-de-açúcar. Atualmente, métodos como a cromatografia gasosa são usados para avaliar a composição do biogás, porém sua aplicação é pontual, depende de infraestrutura laboratorial e não permite acompanhamento contínuo em tempo real. Nesse contexto, narizes eletrônicos aparecem como alternativa promissora para o monitoramento qualitativo de misturas gasosas, pois utilizam o comportamento conjunto de sensores com respostas parcialmente seletivas. Ainda assim, há uma lacuna relacionada ao uso desses sistemas em biogás real, especialmente em condições sujeitas à umidade, variações operacionais e influência do histórico de exposição dos sensores. Diante disso, este trabalho desenvolveu e avaliou, em caráter preliminar, um protótipo de e-Nose para monitoramento qualitativo de biogás produzido em reatores anaeróbios alimentados com vinhaça. O sistema foi composto por sensores semicondutores de óxido metálico da linha MQ, sensores BME280 e ENS160+AHT21, multiplexador, conversor analógico-digital, válvulas, mini bomba de ar, interface *touchscreen*, armazenamento em cartão SD e envio de dados para a nuvem. Os experimentos foram realizados com biogás proveniente de reatores anaeróbios em configurações de fase única e de duas fases, com comparação qualitativa em relação aos dados de cromatografia gasosa. Os resultados mostraram que o protótipo foi capaz de operar com biogás real, executar ciclos automáticos de coleta e registrar variações nas respostas dos sensores após a injeção da mistura de biogás com ar ambiente. As leituras indicaram mudanças perceptíveis entre as etapas de pré-aquecimento e análise, embora também tenham sido observadas limitações relacionadas à limpeza entre ciclos, umidade, estabilidade da pressão, ajustes físicos do protótipo e integridade dos sensores ao longo do tempo. Conclui-se que o e-Nose desenvolvido apresenta potencial como ferramenta complementar para o acompanhamento qualitativo de biogás, contribuindo para o avanço de sistemas embarcados aplicados ao monitoramento de processos anaeróbios.

Palavras-chave: e-nose; sensores semicondutores de óxido metálico; sistemas embarcados; sensores MQ; reatores metanogênicos.

ABSTRACT

Monitoring the biogas produced in anaerobic reactors is important to monitor the stability of the process and support the energy use of organic waste, such as sugarcane vinasse. Currently, methods such as gas chromatography are used to evaluate the composition of biogas, but its application is punctual, depends on laboratory infrastructure and does not allow continuous monitoring in real time. In this context, electronic noses appear as a promising alternative for the qualitative monitoring of gas mixtures, as they use the joint behavior of sensors with partially selective responses. Still, there is a gap related to the use of these systems in real biogas, especially in conditions subject to humidity, operational variations, and the influence of sensor exposure history. In view of this, this work developed and evaluated, on a preliminary basis, an e-Nose prototype for qualitative monitoring of biogas produced in anaerobic reactors fed with vinasse. The system was composed of metal oxide semiconductor sensors from the MQ line, BME280 and ENS160+AHT21 sensors, multiplexer, analog-to-digital converter, valves, mini air pump, touch interface, SD card storage and data sending to the cloud. The experiments were carried out with biogas from anaerobic reactors in single-phase and two-phase configurations, with qualitative comparison in relation to gas chromatography data. The results showed that the prototype was able to operate on real biogas, perform automatic collection cycles, and record variations in sensor responses after injecting the biogas mixture with ambient air. The readings indicated noticeable changes between the preheating and analysis steps, although limitations related to cleaning between cycles, humidity, pressure stability, physical prototype adjustments, and sensor integrity over time were also observed. It is concluded that the developed e-Nose has potential as a complementary tool for the qualitative monitoring of biogas, contributing to the advancement of embedded systems applied to the monitoring of anaerobic processes.

Keywords: e-nose; metal oxide semiconductor sensors; embedded systems; MQ sensors; methanogenic reactors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura física e princípio de funcionamento dos sensores MQ: a) estrutura, terminais e ligação elétrica; b) princípio de resposta e conversão da variação de resistência em sinal de tensão	23
Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema típico de aquisição de dados	30
Figura 3 – Esquema de conexões elétricas e pinagem do microcontrolador ESP32 DevKit V1	38
Figura 4 – Frente e verso do módulo ENS160 + AHT21 utilizado no sistema.....	40
Figura 5 – Sensor BME280 utilizado para medição de pressão, umidade e temperatura	41
Figura 6 – Câmara de sensores e conector para mangueira: a) recipiente hermético de vidro; b) conector de rosca ¼” com engate para mangueira de 6 mm.	43
Figura 7 – Módulos utilizados na conversão analógico-digital e na multiplexação dos sinais: (a1) frente do ADS1115; (a2) verso do ADS1115; (b1) frente do CD74HC4067; (b2) verso do CD74HC4067.	43
Figura 8 – Módulo regulador <i>step-down</i> LM2596S utilizado no sistema	45
Figura 9 – Módulo de isolamento optoacoplador de 4 canais baseado no PC817	46
Figura 10 – Válvula solenoide FA0520E utilizada no sistema: componente à esquerda e desenho técnico à direita	47
Figura 11 – Mini bomba de ar utilizada para movimentação do biogás e ar ambiente no sistema	48
Figura 12 – Frente e Verso do Módulo SD Card e Adaptador com Cartão de Memória de 32GB	48
Figura 13 – <i>Display</i> TFT de 2,4 polegadas com <i>touchscreen</i> resistivo utilizado no sistema	49
Figura 14 – Estrutura física do e-Nose em diferentes ângulos, com destaque para a parte interna da unidade de controle.....	50
Figura 15 – Placa de circuito impresso dos sensores: (a) placa com sensores e módulos instalados; (b) placa com soquetes cerâmicos sem os sensores MQ.....	51
Figura 16 – Divisor de tensão aplicado ao sistema e-Nose para biogás: (a) princípio do divisor de tensão; (b) implementação do circuito na placa dos sensores.....	52
Figura 17 – Ligação entre os módulos ADS1115 e CD74HC4067 no sistema proposto...52	
Figura 18 – Vista da câmara montada com as conexões para passagem da amostra e as passagens elétricas do sistema	54
Figura 19 – Lógica de ligação entre reator anaeróbio, válvulas, mini bomba de ar e câmara de sensores no estado inicial.....	55
Figura 20 – Interfaces gráficas do e-Nose – Parte 1: a) tela de <i>login</i> ; b) menu principal; c) ajustes de coleta; d) monitoramento – subtela Etapas; e) monitoramento – subtela Operação 1; f) monitoramento – subtela Operação 2	63
Figura 21 – Interfaces gráficas do e-Nose – Parte 2: a) ajustes dos sensores MQ – configuração; b) ajustes dos sensores MQ – resultados; c) diagnóstico e-Nose – configuração; d) diagnóstico e-Nose – resultados; e) gerenciamento de dados no cartão SD – listagem de arquivos; f) gerenciamento de dados no cartão SD – exclusão de arquivos	66
Figura 22 – Interfaces gráficas do e-Nose – Parte 3: a) tela inicial de ajustes de rede; b) lista de redes encontradas; c) informações da rede selecionada; d) página <i>web</i> para	

digitação da senha; e) confirmação de conexão realizada; f) tela para esquecer rede salva	67
Figura 23 – Interface <i>web</i> alternativa para acompanhamento e comando do e-Nose.....	69
Figura 24a – Reatores anaeróbios de leito fixo estruturado em configuração de uma fase e duas fases, com destaque para o selo hídrico utilizado na saída de biogás.	75
Figura 24b – Cromatógrafo gasoso utilizado como método de referência, procedimento de injeção manual de 300 µL de biogás com seringa adaptada para coleta de gás e exemplo de cromatograma gerado pelo equipamento.	76
Figura 25 – Teste preliminar de deslocamento volumétrico da mini bomba de ar com seringa graduada	79

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição do biogás obtida por cromatografia gasosa para os reatores metanogênicos de fase única e de segunda fase, com frações normalizadas de metano e dióxido de carbono	84
Gráfico 2 - Comportamento dos sensores MQ durante o Experimento 1 do reator metanogênico de fase única, com interrupção da alimentação dos aquecedores durante a etapa de análise	86
Gráfico 3 - Comparação entre as médias das leituras dos sensores MQ no pré-aquecimento e na análise com biogás + ar ambiente nos experimentos realizados com o reator metanogênico de fase única e o reator metanogênico de segunda fase: a) Experimento 1 – reator metanogênico de segunda fase; b) Experimento 2, ciclo 1 – reator metanogênico de fase única; c) Experimento 2, ciclo 2 – reator metanogênico de fase única; d) Experimento 3, ciclo 1 – reator metanogênico de fase única; e) Experimento 3, ciclo 2 – reator metanogênico de fase única; f) Experimento 3, ciclo 3 – reator metanogênico de fase única.	87
Gráfico 4 - Sequência operacional do e-Nose durante: a) Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase e b) Experimento 2 do reator metanogênico de fase única	90
Gráfico 5 - Comportamento operacional do e-Nose durante o ciclo 2 do Experimento 3	92
Gráfico 6 - Registros da etapa de limpeza entre ciclos no Experimento 2 do reator metanogênico de fase única: a) ciclo 1; b) ciclo 2.....	93
Gráfico 7 - Comparação entre os volumes estimados e injetados na câmara dos sensores nas coletas dos reatores metanogênicos de fase única e de segunda fase	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais tipos de sensores de gás e seus mecanismos de detecção	22
Quadro 2 - Principais parâmetros de desempenho em sensores de gás	24
Quadro 3 - Classificação dos microcontroladores segundo a capacidade de processamento e aplicações.....	Erro! Indicador não definido.
Quadro 4 - Protocolos de comunicação aplicáveis a sistemas embarcados e IoT.....	31
Quadro 5 - Estudos correlatos sobre e-Nose em biogás e processos anaeróbios	35
Quadro 6 - Especificações e faixas de detecção dos sensores MQ utilizados no sistema .	39
Quadro 7 - Resistores de carga adotados e justificativa técnica.	39
Quadro 8 - Especificações do AHT21 e relevância para o sistema	40
Quadro 9 - Especificações do ENS160 e relevância para o sistema	41
Quadro 10 - Especificações técnicas do sensor BME280	42
Quadro 11 - Especificações técnicas do módulo ADS1115	44
Quadro 12 - Especificações técnicas do módulo CD74HC4067.....	44
Quadro 13 - Especificações técnicas do conversor <i>step-down</i>	45
Quadro 14 - Especificações técnicas do módulo optoacoplador de quatro canais PC817	46
Quadro 15 – Síntese das etapas de operação dos atuadores ao longo do ciclo de coleta..	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Organização dos dados salvos no Google Drive e no cartão SD	70
Tabela 2 – Tempos preliminares de deslocamento de ar nas mangueiras do e-Nose.....	80
Tabela 3 – Volumes estimados de biogás e ar ambiente admitidos na câmara durante as coletas.....	82
Tabela 4 - Condições gerais das coletas realizadas nos reatores metanogênico de fase única (RM1) e reator metanogênico de segunda fase (RM2).	83
Tabela 5 - Parametrização operacional dos ciclos de coleta do e-Nose	83
Tabela 6 - Síntese das condições internas da câmara e das instabilidades dos sensores MQ durante a análise da mistura	94
Tabela 7 - Taxas médias de variação de pressão no pré-aquecimento e na análise da mistura.....	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1N4007	Diodo retificador utilizado inicialmente como diodo de roda livre nas cargas indutivas.
1N5819	Diodo Schottky utilizado como proteção de resposta rápida nas cargas indutivas.
ADC	Analog-to-Digital Converter; conversor analógico-digital.
ADS1115	Módulo conversor analógico-digital externo de 16 bits utilizado na aquisição dos sinais.
AHT21	Sensor digital de temperatura e umidade relativa integrado ao módulo ENS160+AHT21.
AQI	Air Quality Index; índice de qualidade do ar.
BC337	Transistor bipolar NPN utilizado como chave eletrônica na etapa de acionamento.
BLE	Bluetooth Low Energy; tecnologia Bluetooth de baixo consumo.
BME280	Sensor de temperatura, umidade relativa e pressão utilizado no protótipo.
BME680	Sensor ambiental citado em estudo correlato de e-Nose.
CAN	Controller Area Network; protocolo de comunicação utilizado em aplicações automotivas e industriais.
CD74HC4067	Multiplexador analógico de 16 canais utilizado para selecionar os sinais dos sensores MQ.
CG	Cromatografia gasosa.
CIEBE	Centro de Pesquisa em Engenharia Biomédica e Instrumentação Eletrônica.
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor; semicondutor complementar de óxido metálico.
CS	Chip Select; sinal de seleção de dispositivo no barramento SPI.
CSTR	Continuous Stirred-Tank Reactor; reator de tanque continuamente agitado.
CSV	Comma-Separated Values; formato de arquivo com valores separados por vírgula.
DAQ	Data Acquisition; aquisição de dados.
DQO	Demanda química de oxigênio.
eCO ₂	Equivalent carbon dioxide; dióxido de carbono equivalente estimado pelo ENS160.
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos.
ENS160	Sensor digital multigás usado para estimar indicadores complementares de qualidade do ar.
e-Nose	Electronic Nose; nariz eletrônico.
ESP-WROOM-32	Módulo do microcontrolador ESP32 utilizado na placa ESP32 DevKit V1.
ESP32	Microcontrolador utilizado como unidade principal de controle do sistema.
FA0520E	Modelo de válvula solenoide utilizada no sistema de amostragem.
FAT32	Sistema de arquivos utilizado na formatação do cartão SD.

GC/FID	Gas Chromatography/Flame Ionization Detector; cromatografia gasosa com detector de ionização em chama.
GPIO	General Purpose Input/Output; entrada e saída de uso geral.
HTTP	Hypertext Transfer Protocol; protocolo de transferência de hipertexto.
PC	Inter-Integrated Circuit; circuito interintegrado.
IA	Inteligência artificial.
IDE	Integrated Development Environment; ambiente de desenvolvimento integrado.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IHM	Interface homem-máquina.
IoT	Internet of Things; Internet das Coisas.
KE-25	Modelo de sensor citado em estudo correlato de e-Nose.
LLE	Liquid-Liquid Extraction; extração líquido-líquido.
LM2596S	Módulo regulador de tensão step-down utilizado no sistema.
LPB	Laboratório de Processos Biológicos.
LSB	Least Significant Bit; bit menos significativo.
ME2-CO	Modelo de sensor de monóxido de carbono citado em estudo correlato.
MOS	Metal Oxide Semiconductor; semicondutor de óxido metálico.
MOX	Metal Oxide; óxido metálico.
MQ	Série de sensores de gás semicondutores de óxido metálico.
MQ-2	Sensor MQ associado a gases combustíveis, hidrogênio, álcool, metano, propano e butano/isobutano.
MQ-4	Sensor MQ associado principalmente ao metano.
MQ-5	Sensor MQ associado a gás liquefeito de petróleo, gás natural, propano e butano/isobutano.
MQ-6	Sensor MQ associado a gás liquefeito de petróleo, propano e butano/isobutano.
MQ-7	Sensor MQ citado em estudo correlato.
MQ-8	Sensor MQ citado em estudo correlato.
MQ-9	Sensor MQ associado a monóxido de carbono, metano e gás liquefeito de petróleo.
MQ-131	Sensor MQ citado em estudo correlato.
MQ-135	Sensor MQ citado em estudo correlato.
MQ-136	Sensor MQ associado ao sulfeto de hidrogênio.
MQ-137	Sensor MQ associado à amônia.
MQ-138	Sensor MQ associado a compostos orgânicos voláteis.
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport; protocolo leve de telemetria no modelo publicar/assinar.
MUX	Multiplexer; multiplexador.
NDIR	Non-Dispersive Infrared; infravermelho não dispersivo.
PC817	Optoacoplador utilizado no módulo de isolamento de quatro canais.
PCA	Principal Component Analysis; análise de componentes principais.
PID	Photoionization Detector; detector por fotoionização.
POST	Método de requisição HTTP utilizado para envio de dados.
QCM	Quartz Crystal Microbalance; microbalança de cristal de quartzo.
RM1	Reator metanogênico de fase única.
RM2	Reator metanogênico de segunda fase.

RS-232	Recommended Standard 232; padrão de comunicação serial.
RS-485	Recommended Standard 485; padrão de comunicação serial diferencial.
RTU	Remote Terminal Unit; unidade terminal remota.
SAW	Surface Acoustic Wave; onda acústica de superfície.
SCK	Serial Clock; sinal de clock do barramento SPI.
SCL	Serial Clock; linha de clock do barramento I ² C.
SD	Secure Digital; cartão de memória utilizado para armazenamento local.
SDA	Serial Data; linha de dados do barramento I ² C.
SDHC	Secure Digital High Capacity; cartão Secure Digital de alta capacidade.
SENA	Laboratório de Sensores, Nanoestruturas e Eletrônica Aplicada.
SHS	Departamento de Hidráulica e Saneamento.
SPI	Serial Peripheral Interface; interface serial periférica.
SS	Slave Select; seleção do dispositivo escravo no barramento SPI.
ST7789V	Controlador do display TFT utilizado no protótipo.
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol; conjunto de protocolos de comunicação em redes.
TFT	Thin-Film Transistor; tecnologia de display utilizada na interface do protótipo.
TGS2610	Modelo de sensor de gás citado em estudo correlato.
TGS2620	Modelo de sensor de gás citado em estudo correlato.
TGS825	Modelo de sensor de gás citado em estudo correlato.
TVOC	Total Volatile Organic Compounds; compostos orgânicos voláteis totais.
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter; transmissor e receptor assíncrono universal.
UR	Umidade relativa.
USB	Universal Serial Bus; barramento serial universal.
USP	Universidade de São Paulo.
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Wi-Fi	Tecnologia de rede local sem fio baseada no padrão IEEE 802.11.
XPT2046	Controlador do touchscreen resistivo do display utilizado no protótipo.

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem.
%UR	Umidade relativa expressa em porcentagem.
°C / °C	Grau Celsius.
μA	Microampere.
Φ	Diâmetro.
Ω	Ohm; unidade de resistência elétrica.
kΩ	Quilo-ohm.
A ₀	Canal A0 do conversor ADS1115.
C ₀ -C ₇	Canais do multiplexador CD74HC4067 utilizados para os sensores MQ.
C _{CH4}	Valor associado à concentração ou área cromatográfica de metano.
C _{CO2}	Valor associado à concentração ou área cromatográfica de dióxido de carbono.
CH ₄	Metano.
CO	Monóxido de carbono.
CO ₂	Dióxido de carbono.
d	Dia, quando usado em unidades como gDQO L ⁻¹ d ⁻¹ .
GB	Gigabyte.
gDQO L ⁻¹ d ⁻¹	Gramas de demanda química de oxigênio por litro por dia.
H ₂	Hidrogênio.
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio.
hPa	Hectopascal.
Hz	Hertz.
K	Kelvin.
kPa	Quilopascal.
kPa/s	Quilopascal por segundo.
L	Litro.
L·kPa·mol ⁻¹ ·K ⁻¹	Litro quilopascal por mol por kelvin.
mA	Miliampere.
MHz	Megahertz.
min	Minuto.
mL / ml	Mililitro.
mm	Milímetro.
mol	Mol.
N ₂	Nitrogênio.
n	Quantidade de matéria.
nF	Nanofarad.
n _f	Quantidade de matéria no estado final.
n _i	Quantidade de matéria no estado inicial.
NH ₃	Amônia.
O ₂	Oxigênio.
P	Pressão.
pH	Potencial hidrogeniônico.
P _f	Pressão final.
P _i	Pressão inicial.

ppb	Partes por bilhão.
ppm	Partes por milhão.
R	Constante universal dos gases.
R_S / R_0	Resistência de referência do sensor em ar limpo.
R_1	Resistor ligado entre a entrada e o ponto de leitura do divisor de tensão.
R_2	Resistor ligado entre o ponto de leitura e o terra no divisor de tensão.
R_L	Resistor de carga.
R_S	Resistência elétrica do sensor MQ na condição de leitura.
S_0-S_3	Sinais de seleção dos canais do multiplexador CD74HC4067.
s	Segundo.
SnO_2	Dióxido de estanho.
T	Temperatura.
$T^{\circ}C$	Temperatura em graus Celsius.
T_K	Temperatura em kelvin.
t_{10}	Tempo de recuperação do sensor.
t_{90}	Tempo de resposta do sensor.
t_f	Tempo final.
t_i	Tempo inicial.
T_i	Temperatura inicial.
Taxa	Taxa média de variação de pressão.
V	Volt, quando usado como unidade de tensão elétrica; volume, quando usado em equações de gases.
V1, V2 e V3	Válvulas 1, 2 e 3 do sistema de amostragem.
V_C	Volume útil estimado da câmara.
V_{in}	Tensão de entrada no divisor de tensão.
V_{inj}	Volume equivalente admitido ou injetado.
V_{LSB}	Resolução em tensão associada ao bit menos significativo do ADC.
V_{out}	Tensão de saída do divisor de tensão.
V_{ref}	Tensão de referência ou faixa de escala do ADC.
X_{CH_4}	Fração normalizada de metano no biogás.
X_{CO_2}	Fração normalizada de dióxido de carbono no biogás.
ΔP	Variação de pressão.
Δt	Intervalo de tempo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Hipóteses e objetivos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Geração de biogás em digestão anaeróbia.....	16
2.1.1	Digestão anaeróbia.....	16
2.1.2	Biorreatores anaeróbios e formação do <i>headspace</i>	17
2.1.3	Características do biogás	18
2.2	Tecnologia do nariz eletrônico (e-Nose).....	18
2.2.1	Histórico e definição.....	18
2.2.2	Comparação com o olfato humano e a arquitetura padrão do e-Nose.....	19
2.2.3	Aplicações gerais de sistemas e-Nose	20
2.3	Sensores de gás.....	21
2.3.1	Tipos de sensores de gás.....	21
2.3.2	Sensores semicondutores de óxido metálico	22
2.3.3	Princípios de funcionamento dos sensores de gás semicondutores	23
2.4	Variáveis complementares e sensores ambientais em sistemas e-Nose.....	25
2.5	Sistemas embarcados e <i>Internet</i> das Coisas (IoT).....	27
2.5.1	Sistemas embarcados	27
2.5.2	Microcontroladores.....	27
2.5.3	Aquisição de dados e conversão analógico-digital.....	28
2.5.4	Protocolos de comunicação serial.....	30
2.5.5	IoT e Conectividade sem fio.....	32
2.5.6	Interfaces homem-máquina	33
2.6	e-Nose aplicado a reatores anaeróbios.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Projeto de <i>hardware</i>.....	37
3.1.1	Microcontrolador ESP32 DevKit V1	37
3.1.2	Sensores de gás	38
3.1.3	Sensor de temperatura, umidade e indicadores complementares	40
3.1.4	Sensor de temperatura, umidade e pressão	41
3.1.5	Câmara de sensores.....	42
3.1.6	Conversão de sinais e multiplexação analógica.....	43

3.1.7	Conversores de tensão	44
3.1.8	Isolamento por optoacoplador	45
3.1.9	Atuadores do sistema de amostragem.....	47
3.1.10	Módulo de armazenamento local.....	48
3.1.11	<i>Display touchscreen</i>	49
3.1.12	Montagem física e conexão do e-Nose ao sistema de digestão anaeróbia	49
3.2	Projeto de <i>firmware</i>	55
3.2.1	Visão geral do <i>firmware</i>	55
3.2.2	Inicialização do sistema.....	57
3.2.3	Aquisição e tratamento das leituras dos sensores	58
3.2.4	Interface de usuário e navegação pelo <i>display touchscreen</i>	59
<u>3.2.4.1</u>	<u>Tela de <i>Login</i></u>	<u>60</u>
<u>3.2.4.2</u>	<u>Tela de Menu Principal</u>	<u>60</u>
<u>3.2.4.3</u>	<u>Tela de Ajustes de Coletas</u>	<u>61</u>
<u>3.2.4.4</u>	<u>Tela de Monitoramento de Coletas</u>	<u>62</u>
<u>3.2.4.5</u>	<u>Tela de Ajustes dos sensores MQ</u>	<u>63</u>
<u>3.2.4.6</u>	<u>Tela de Diagnóstico e-Nose</u>	<u>64</u>
<u>3.2.4.7</u>	<u>Tela de Gerenciamento de Dados SD Card</u>	<u>65</u>
<u>3.2.4.8</u>	<u>Tela de Configuração de Rede <i>Wi-Fi</i></u>	<u>67</u>
<u>3.2.4.9</u>	<u>Interface <i>web</i> alternativa</u>	<u>68</u>
3.2.5	Armazenamento de dados e comunicação em rede	69
3.2.6	Lógica de controle do ciclo de coleta	72
3.3	Procedimento experimental	73
3.3.1	Sistema de digestão anaeróbia e condições operacionais	74
3.3.2	Condições de conexão e rotina de coleta.....	77
3.3.3	Delineamento dos experimentos com o e-Nose.....	78
3.3.4	Testes preliminares e estimativa dos volumes admitidos	79
3.3.5	Condições gerais e parametrização operacional das coletas.....	82
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
4.1 (RM2)	Composição do biogás nos reatores de fase única (RM1) e de duas fases 84	
4.2	Resposta dos sensores MQ em relação à composição do biogás obtida por cromatografia gasosa	85
4.3	Operação em ciclos, limpeza e influência das condições internas	89
4.3.1	Operação em ciclos do e-Nose	89

4.3.2	Limpeza entre ciclos e retorno à condição inicial	92
4.3.3	Instabilidades de leitura e influência das condições internas durante a análise .	94
4.4	Controle de pressão e estimativa do volume injetado	96
4.5	Limitações experimentais e problemas observados no protótipo.....	100
5	CONCLUSÃO.....	102
	REFERÊNCIAS.....	103
	APÊNDICE A - GRÁFICOS DAS RESPOSTAS DOS SENSORES	113
	APÊNDICE B - LÓGICA DE OPERAÇÃO E-NOSE	114
	APÊNDICE C - DIAGRAMA MERMAID DE TODAS AS TELAS	115
	APÊNDICE D - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO E-NOSE	116
	ANEXO A - DATASHEET DOS SENSORES MOS (LINHA MQ).....	13

1 INTRODUÇÃO

A digestão anaeróbia é um processo biológico amplamente utilizado para o tratamento de resíduos orgânicos e para a recuperação de energia na forma de biogás. Nesse processo, a matéria orgânica é degradada na ausência de oxigênio por diferentes grupos de microrganismos, resultando principalmente na formação de metano e dióxido de carbono. Apesar de ser uma tecnologia consolidada, sua operação envolve uma série de variáveis que podem alterar o desempenho dos reatores e a composição do biogás produzido. Fatores como temperatura, pH, carga orgânica, alcalinidade, tempo de retenção, atividade microbiana e características do substrato influenciam diretamente o equilíbrio do processo (Chernicharo, 1997). Essa variabilidade se torna ainda mais relevante quando o substrato utilizado é a vinhaça de cana-de-açúcar, um resíduo líquido gerado em grande volume pelo setor sucroenergético, com alta carga orgânica e potencial para produção de biogás (Fuess et al., 2017).

O biogás proveniente da digestão anaeróbia não apresenta composição fixa. Embora seja formado principalmente por metano e dióxido de carbono, também pode conter outros compostos em menores proporções, como sulfeto de hidrogênio, amônia, hidrogênio, monóxido de carbono e compostos orgânicos voláteis. Mesmo em baixas concentrações, esses compostos podem interferir na qualidade do biogás, no desempenho energético do sistema e na estabilidade dos equipamentos utilizados no monitoramento (Gomes et al., 2025). Além disso, o biogás bruto normalmente apresenta umidade significativa, o que pode favorecer condensação e alterar as condições de medição. Por isso, o acompanhamento da mistura gasosa não deve se limitar apenas à análise isolada de um único componente.

Métodos analíticos como a cromatografia gasosa são amplamente utilizados para determinar a composição do biogás, principalmente por permitirem estimar as frações de metano e dióxido de carbono com maior confiabilidade. No entanto, apesar de sua importância como método de referência, a cromatografia exige equipamentos específicos, retirada manual de amostras, operação em laboratório e análises pontuais (Adorno; Hirasawa; Varesche, 2014). Isso limita seu uso como ferramenta de acompanhamento contínuo em tempo real, especialmente quando se deseja observar variações ao longo da operação dos reatores. Nesse cenário, torna-se interessante investigar alternativas de monitoramento de menor custo, capazes de acompanhar a mistura gasosa de forma mais frequente, ainda que com uma proposta mais qualitativa do que quantitativa.

Entre essas alternativas, os narizes eletrônicos (e-Nose) têm se destacado por utilizarem um conjunto de sensores com respostas a diferentes gases, com intensidades

distintas. Diferente de um sensor específico, que busca medir diretamente um único composto, o e-Nose trabalha com o comportamento conjunto das respostas geradas pelos sensores (Stevan Jr et al., 2023). Essa abordagem é interessante para misturas complexas, como o biogás, uma vez que a informação mais importante pode estar no padrão geral de resposta, e não necessariamente na leitura isolada de um sensor. Assim, em vez de interpretar cada sensor como medidor direto de um gás, o sistema pode ser usado para observar mudanças no perfil da amostra ao longo do tempo (Stevan Jr et al., 2023).

Apesar do potencial dessa abordagem, o uso de sensores MQ em biogás apresenta desafios importantes. Esses sensores são de baixo custo e relativamente simples de integrar a sistemas embarcados. Apresentam características de resposta de largo espectro, ou seja, não são seletivos. Suas leituras podem ser influenciadas por diferentes compostos presentes na mistura, pela umidade, pela temperatura, pelo tempo de aquecimento, pelo histórico de exposição e pela recuperação incompleta entre coletas. Dessa forma, tratar os dados como concentração direta de metano, dióxido de carbono ou outro composto e ainda não considerar o histórico de medições realizadas poderia levar a interpretações equivocadas dos dados coletados.

Neste trabalho, essa ideia foi aplicada ao desenvolvimento de um protótipo de e-Nose voltado ao monitoramento qualitativo de biogás produzido em reatores anaeróbios alimentados com vinhaça. O sistema foi desenvolvido com sensores MQ, sensores ambientais e módulos complementares, além de interface *touchscreen*, armazenamento local em cartão SD e envio de dados para a nuvem. O protótipo também foi projetado para operar em ciclos automáticos, incluindo etapas de limpeza, expurgo, pré-aquecimento, coleta e análise. Com isso, buscou-se construir uma ferramenta capaz de registrar a resposta dos sensores e acompanhar o comportamento da amostra durante diferentes condições experimentais.

Diante desse contexto, este trabalho parte da necessidade de avaliar se um protótipo de e-Nose, baseado em sensores MQ e variáveis complementares, pode contribuir para o monitoramento qualitativo do biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça. A investigação envolve tanto a construção e integração do sistema embarcado quanto a análise das respostas dos sensores durante a exposição à mistura de biogás com ar ambiente e durante a operação em ciclos consecutivos. Assim, o estudo busca verificar o potencial e as limitações do protótipo como ferramenta de acompanhamento do processo, considerando que suas leituras devem ser interpretadas como resposta conjunta à mistura gasosa, e não como medição direta da composição do biogás.

1.1 Hipóteses e objetivos

O presente trabalho tem como hipótese principal que **“um protótipo de e-Nose baseado em sensores MQ, sensores ambientais e sistema embarcado é capaz de registrar mudanças no perfil do biogás produzido em reatores anaeróbios alimentados com vinhaça, permitindo seu monitoramento qualitativo, mesmo sem substituir métodos analíticos de referência, como a cromatografia gasosa?”**. Nesse sentido, o objetivo principal do trabalho é **“desenvolver e avaliar, em caráter preliminar, um protótipo de e-Nose para monitoramento qualitativo de biogás produzido em reatores anaeróbios alimentados com vinhaça de cana-de-açúcar”**.

Embasando-se na contextualização inicial, na revisão da literatura e no desenvolvimento experimental apresentado ao longo deste trabalho, foram elaboradas três sub-hipóteses, relacionadas a três objetivos específicos.

Sub-hipótese 1: A integração entre sensores MQ, sensores ambientais, módulos de aquisição, atuadores, interface touch, armazenamento local e comunicação em rede permite construir um protótipo funcional de e-Nose, capaz de operar com biogás real em condições experimentais?

Objetivo específico 1: Projetar, montar e integrar o *hardware* e o *firmware* do e-Nose, incluindo sensores *MOS* (*Metal Oxide Semiconductor*, ou semicondutores de óxido metálico) da linha MQ, BME280, ENS160+AHT21, multiplexador CD74HC4067, conversor ADS1115, válvulas, mini bomba de ar, *display touchscreen*, cartão SD e envio de dados para a nuvem.

Sub-hipótese 2: As leituras brutas dos sensores MQ apresentam variações perceptíveis após a injeção da mistura de biogás com ar ambiente na câmara, permitindo identificar mudanças no comportamento da amostra?

Objetivo específico 2: Avaliar o comportamento dos sensores MQ durante os experimentos, comparando as leituras obtidas no pré-aquecimento e na etapa de análise após a injeção da mistura de biogás com ar ambiente.

Sub-hipótese 3: A operação cíclica do e-Nose permite acompanhar coletas consecutivas de biogás, mas sua resposta pode ser influenciada por efeito residual entre ciclos, umidade, temperatura, estabilidade da pressão e limitações físicas do protótipo?

Objetivo específico 3: Verificar o comportamento do e-Nose durante a operação em ciclos consecutivos, analisando a limpeza entre coletas, a estabilidade das leituras e as principais limitações observadas no protótipo durante os experimentos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A discussão teórica que sustenta este trabalho foi organizada em torno de três eixos diretamente ligados ao problema de pesquisa: a geração de biogás em digestão anaeróbia (com foco na biodigestão da vinhaça de cana-de-açúcar uma vez que essa foi a fonte de biogás usada neste trabalho), o funcionamento de narizes eletrônicos e os fundamentos de instrumentação embarcada necessários para aquisição e tratamento dos sinais. A intenção não é apresentar uma revisão bibliográfica aprofundada desses temas, mas reunir os conceitos que de fato ajudam a interpretar o comportamento do sistema desenvolvido para o monitoramento qualitativo de biogás.

2.1 Geração de biogás em digestão anaeróbia

2.1.1 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser entendida como uma sequência de etapas bioquímicas interdependentes, normalmente descritas como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Na hidrólise, a matéria orgânica particulada é convertida em compostos dissolvidos mais simples. Na acidogênese, esses compostos são transformados em ácidos orgânicos, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). Na acetogênese, os intermediários formados nas etapas anteriores são convertidos principalmente em acetato. Por fim, na metanogênese, esses produtos servem de substrato para a formação de metano (CH_4) e dióxido de carbono (Chernicharo, 1997).

Em meios com disponibilidade de sulfato, também pode ocorrer sulfetogênese, processo relevante quando se trabalha com substratos como a vinhaça de cana-de-açúcar. Nessa condição, bactérias redutoras de sulfato podem competir com os microrganismos metanogênicos por substratos como hidrogênio e acetato, favorecendo a formação de sulfeto de hidrogênio (H_2S). Por isso, a composição do biogás não é fixa e pode variar conforme a estabilidade do processo, a atividade microbiana, a carga orgânica aplicada e as características do substrato utilizado (Chernicharo, 1997; Ferraz Júnior et al., 2016).

A digestão anaeróbia pode ser conduzida em sistemas de fase única ou com separação de fases. Nos sistemas de fase única, as etapas fermentativas e metanogênicas ocorrem no mesmo reator, de modo que diferentes grupos microbianos compartilham o mesmo ambiente operacional. Já nos sistemas com separação de fases, a etapa acidogênica ocorre em um primeiro reator, enquanto a produção de metano é conduzida em uma etapa posterior. Essa

configuração permite ajustar melhor as condições de operação para cada grupo microbiano, uma vez que os microrganismos envolvidos na formação de ácidos orgânicos e os microrganismos metanogênicos apresentam exigências distintas de pH, tempo de retenção e estabilidade do meio (Ferraz Júnior et al., 2016).

No tratamento anaeróbio da vinhaça de cana-de-açúcar, a separação de fases tem sido apontada como uma estratégia importante para melhorar o desempenho do processo. Ferraz Júnior et al. (2016) compararam um sistema metanogênico de fase única com um sistema de duas fases e observaram maior remoção de matéria orgânica e maior recuperação de energia no sistema com separação de fases. De forma semelhante, Fuess et al. (2017) destacam que essa configuração pode favorecer a estabilidade operacional e o aproveitamento energético em sistemas aplicados à vinhaça. Assim, a separação de fases é relevante neste trabalho porque ajuda a contextualizar as diferenças esperadas entre os reatores avaliados e a composição do biogás monitorado pelo e-Nose.

2.1.2 Biorreatores anaeróbios e formação do *headspace*

Os biorreatores anaeróbios são estruturas projetadas para manter a biomassa microbiana em contato com o substrato sob ausência de oxigênio, permitindo a degradação da matéria orgânica e a formação de biogás. De forma geral, esses sistemas possuem uma região de alimentação, por onde o afluente entra no reator, uma região reacional, onde ocorre a atividade microbiana, uma saída para o efluente tratado e uma região superior destinada ao acúmulo do biogás produzido (Chernicharo, 1997).

A região superior do reator, chamada de *headspace*, corresponde ao espaço onde o biogás se acumula antes de ser conduzido para medição, queima, armazenamento ou aproveitamento energético. Esse ponto é importante para sistemas de monitoramento, pois a composição do gás presente no *headspace* reflete, de forma indireta, o estado do processo anaeróbio. Alterações na produção de metano, dióxido de carbono, hidrogênio e sulfeto de hidrogênio podem indicar mudanças na estabilidade do reator, na atividade microbiana ou nas condições operacionais do sistema. No caso de reatores usados para produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar, o *headspace* ganha relevância porque a mistura gasosa pode variar conforme a carga orgânica aplicada, o pH, a alcalinidade, a temperatura e a presença de sulfato no substrato (Fuess et al., 2017).

2.1.3 Características do biogás

A composição do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça pode variar de forma significativa em função de fatores como temperatura, pH, alcalinidade, macronutrientes, micronutrientes, tempo metabólico e fonte de carbono. Em geral, metano e dióxido de carbono são os componentes predominantes, mas a mistura também pode conter, em menores proporções, nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H_2). Além disso, diferenças na carga orgânica aplicada aos reatores, no volume e no tipo de reator utilizado, bem como no tipo de matéria-prima, também contribuem para a variação do rendimento de metano. Diante dessa variabilidade, o acompanhamento do processo não deve se restringir à quantificação isolada de um único gás, mas considerar o comportamento global da mistura gasosa (Fuess, 2012; Mendonça, 2023; Santos, 2020).

Temperatura e umidade também precisam ser consideradas como variáveis importantes para o monitoramento. O aumento da temperatura acelera reações biológicas e reduz a solubilidade dos gases, favorecendo sua liberação no *headspace* do reator. Já a umidade do biogás bruto, frequentemente elevada, pode causar condensação em tubulações, intensificar corrosão (principalmente quando associada à presença de sulfeto no biogás) e comprometer a estabilidade de equipamentos e medições (Coelho, 2018; Fuess et al., 2017).

Nesse contexto, como diferentes variáveis do processo podem alterar tanto o comportamento do biogás quanto as condições de medição, é importante considerar esses efeitos desde o início em sistemas de monitoramento contínuo. Isso se torna ainda mais relevante em sistemas baseados em sensores, uma vez que parâmetros como temperatura e umidade influenciam diretamente as respostas obtidas. Assim, o acompanhamento dessas variáveis é essencial para interpretar corretamente os dados e garantir a confiabilidade do processo de amostragem. Além disso, compreender a estrutura básica do biorreator e a função do *headspace* contribui para justificar o uso de sistemas de monitoramento gasoso, como o e-Nose, no acompanhamento qualitativo do processo.

2.2 Tecnologia do nariz eletrônico (e-Nose)

2.2.1 Histórico e definição

O desenvolvimento do e-Nose está associado às primeiras tentativas de transformar odores em sinais mensuráveis. Entre os registros iniciais, destacam-se os experimentos de Hogewind e Zwaardemaker (1919), realizados no início do século XX, nos quais substâncias

odoríferas eram detectadas a partir de variações de carga elétrica produzidas durante a pulverização da água. Embora ainda preliminar, esse arranjo já indicava uma ideia central para a área: diferentes compostos poderiam gerar respostas distintas em um sistema de detecção não biológico. Posteriormente, Moncrieff (1961) propôs um instrumento para medir e classificar odores com base em materiais de revestimento aplicados sobre um sensor térmico. A principal contribuição desse estudo foi demonstrar que a discriminação de aromas poderia ocorrer pela interação entre diferentes materiais sensíveis. Poucos anos depois, Wilkens e Hartman (1964) avançaram nessa lógica ao explorar um sistema eletroquímico com múltiplos eletrodos e resposta diferencial, aproximando-se do conceito moderno de nariz eletrônico.

O avanço dessa tecnologia foi favorecido pelo uso de sensores semicondutores de óxido metálico, como os sensores Taguchi, e pelo aperfeiçoamento das técnicas de processamento de sinais. Como esses sensores apresentam baixa seletividade individual, sua aplicação se tornou especialmente relevante em sistemas voltados à análise multivariada de misturas gasosas. Nesse contexto, Gardner e Bartlett (1994) definiram o nariz eletrônico como um instrumento composto por um conjunto de sensores químicos com especificidade parcial, associado a um sistema de reconhecimento de padrões, capaz de reconhecer odores simples ou complexos.

2.2.2 Comparação com o olfato humano e a arquitetura padrão do e-Nose

A comparação entre o olfato humano e o e-Nose é pertinente porque ambos se baseiam em uma lógica de interpretação combinatória. Segundo Menini (2010), no sistema olfativo humano, um mesmo receptor pode responder a diferentes moléculas, enquanto cada odor é percebido a partir de uma combinação específica de respostas. De modo semelhante, no e-Nose, os sensores atuam como elementos parcialmente seletivos, enquanto os métodos de processamento de sinais interpretam o padrão gerado pelo conjunto de respostas. No entanto, o nariz eletrônico não “sente cheiro” como um ser humano, nem substitui diretamente a percepção humana ou métodos analíticos de referência. Seu objetivo é converter as respostas dos sensores em dados que possam ser analisados por métodos estatísticos, quimiométricos ou computacionais. Essa abordagem é especialmente útil em misturas compostas por diferentes substâncias, nas quais a informação mais relevante está no perfil conjunto das respostas, e não na medição isolada de um único composto (Craven, M. A; Gardner, J. W; Bartlett, P. N, 1969).

Em termos de funcionamento, o e-Nose é normalmente estruturado em etapas integradas, que incluem a introdução da amostra, a exposição ao conjunto de sensores, o condicionamento dos sinais, o processamento dos dados e o reconhecimento dos padrões

gerados. Burlachenko et al. (2016) destacam que a etapa de amostragem influencia diretamente a qualidade dos resultados, pois interfere na forma como a mistura analisada entra em contato com os sensores. Assim, o desempenho do sistema depende não apenas dos sensores utilizados, mas também da forma como a amostra é conduzida, estabilizada e interpretada.

2.2.3 Aplicações gerais de sistemas e-Nose

A tecnologia de nariz eletrônico tem sido aplicada em diferentes áreas nas quais a análise de misturas gasosas ou compostos voláteis é relevante. Esses sistemas são utilizados para reconhecer padrões associados à qualidade, ao estado de conservação, ao processo produtivo ou às condições ambientais de uma amostra. Por isso, aparecem em estudos relacionados à qualidade de alimentos e bebidas, ao monitoramento de bioprocessos, à avaliação de fermentações e ao acompanhamento de culturas agrícolas (Karakaya; Ulucan; Turkan, 2020; Peris; Escuder-Gilabert, 2013).

Na indústria de bebidas, por exemplo, sistemas baseados nesse princípio já foram utilizados no desenvolvimento de protótipos capazes de estimar o teor alcoólico em cervejas (Voss et al., 2019) e na análise discriminatória de vinhos produzidos a partir de diferentes espécies de mirtilo, permitindo diferenciar suas assinaturas olfativas específicas (Stevan Jr et al., 2023). Em aplicações em campo aberto, nas quais há variações naturais de temperatura e umidade, a tecnologia de nariz eletrônico também tem apresentado resultados relevantes. Estudos com pessegueiros (Stevan Jr. et al., 2024; Voss; Stevan; Ayub, 2019) e videiras (Garcia et al., 2024) mostram que esses sistemas podem ser utilizados para acompanhar estágios fenológicos e auxiliar na classificação de fases de desenvolvimento das plantas.

No contexto do monitoramento de bioprocessos, Savand-Roumi et al. (2022) desenvolveram um e-Nose específico para análise de biogás, composto por seis sensores MOS e operando em três etapas: linha de base (baseline), amostragem e purga. A interpretação dos dados foi realizada por análise de componentes principais (PCA), e os autores propuseram dois índices de monitoramento relacionados ao tempo de recuperação do sistema após a exposição ao biogás e à posição relativa das respostas dos sensores na análise multivariada. Com base nesses parâmetros, o sistema foi utilizado para acompanhar o estado do digestor e auxiliar na decisão de alimentação. De modo geral, esses estudos demonstram que a eficiência do e-Nose depende da integração entre sistema de amostragem, sensores e técnicas de interpretação de dados. Também evidenciam que esses sistemas podem identificar alterações em misturas gasosas ao longo do tempo, mesmo em ambientes sujeitos a variações externas. Essa característica reforça o potencial da tecnologia para aplicações em processos anaeróbios, nos

quais a composição do biogás varia conforme as condições operacionais e o estado biológico do reator.

2.3 Sensores de gás

Os sensores de gás desempenham papel importante em sistemas de detecção, monitoramento e análise de gases, pois convertem interações físico-químicas entre os gases e o material sensor em sinais mensuráveis (Stevan Jr; Silva, 2015). Em sistemas de nariz eletrônico, essa resposta não é necessariamente interpretada como a medição direta de um único composto, mas como parte de um padrão gerado por um conjunto de sensores com diferentes sensibilidades à mistura analisada. Neste trabalho, o foco está voltado para os sensores semicondutores de óxido metálico (MOS), especialmente os sensores da série MQ, utilizados no desenvolvimento experimental do e-Nose. Dessa forma, esta seção apresenta inicialmente uma visão geral dos principais tipos de sensores de gás. Em seguida, são discutidos os sensores MOS, seu princípio de funcionamento e os principais fatores que influenciam sua resposta durante ciclos sucessivos de medição.

2.3.1 Tipos de sensores de gás

Os sensores de gás podem ser classificados de acordo com o princípio de funcionamento utilizado para detectar a presença de gases. Essa classificação é importante porque a interação entre a amostra gasosa e o elemento sensor pode ser convertida em diferentes tipos de sinais, como sinais elétricos, ópticos, térmicos, acústicos ou magnéticos. A escolha do tipo de sensor depende da aplicação, do custo, da faixa de operação, da facilidade de integração e das características da mistura analisada. O Quadro 1 apresenta os principais tipos de sensores de gás e seus respectivos mecanismos de detecção.

Embora existam diferentes tecnologias para detecção de gases, sistemas de nariz eletrônico frequentemente utilizam sensores que não respondem de forma exclusiva a um único composto. Essa característica é desejável nesse tipo de aplicação, pois cada sensor reage de maneira diferente aos diversos componentes presentes na mistura analisada. Como resultado, o conjunto de sensores gera padrões de resposta que podem ser utilizados para diferenciar gases e identificar características específicas dos gases avaliados (Gardner; Bartlett, 1994; Röck; Barsan; Weimar, 2008). Nesse contexto, os sensores MOS se destacam pela simplicidade de operação, pelo baixo custo e pela compatibilidade com sistemas embarcados.

Quadro 1 - Principais tipos de sensores de gás e seus mecanismos de detecção

Tipo	Princípio de funcionamento
Resistivo / quimiorresistivo	A presença do gás altera a resistência elétrica do material sensor.
Eletroquímico	A interação do gás com eletrodos gera corrente ou tensão proporcional à concentração.
Óptico	A medição ocorre por mudanças em propriedades ópticas, como absorbância, fluorescência ou índice de refração.
Catalítico	O sensor detecta o calor liberado pela combustão catalítica do gás.
Acústico (SAW/QCM)	A adsorção de massa modifica a frequência de ressonância do dispositivo piezoelétrico.
PID	Moléculas ionizáveis são excitadas por radiação ultravioleta e geram corrente mensurável.
Condutividade térmica	A leitura decorre da diferença de condutividade térmica entre a mistura gasosa e um gás de referência.
Magnético	Explora propriedades paramagnéticas, especialmente úteis para gases como o oxigênio.

Fonte: Elaborada pela autora (2026) com base em (Litani et al., 2025; Liu et al., 2024; Salimian; Hemmati; Ghaemi, 2025; Shi et al., 2024; Wang et al., 2010; Zhang et al., 2025)

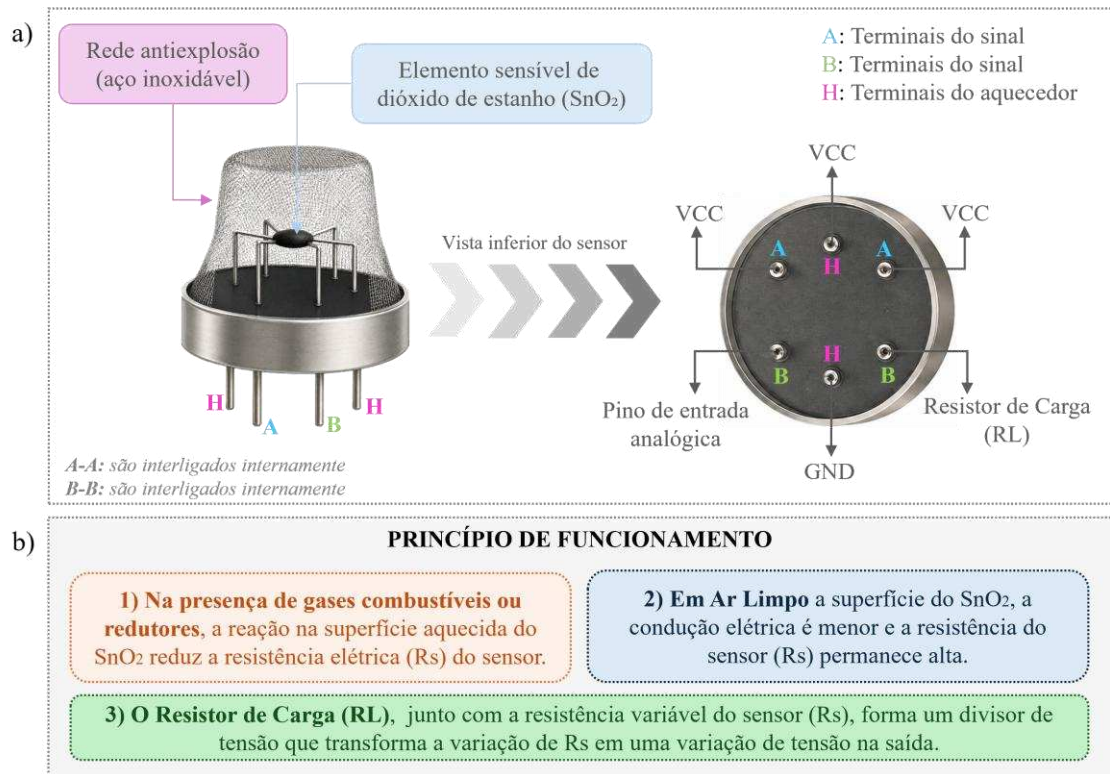
Nota: As siglas SAW, QCM e PID correspondem, respectivamente, a *Surface Acoustic Wave* (onda acústica de superfície), *Quartz Crystal Microbalance* (microbalança de cristal de quartzo) e *Photoionization Detector* (detector por fotoionização).

2.3.2 Sensores semicondutores de óxido metálico

Os sensores semicondutores de óxido metálico, também chamados de sensores MOS, pertencem ao grupo dos sensores resistivos ou quimiorresistivos. Nesses dispositivos, a interação entre a mistura gasosa e a camada ativa do sensor provoca alterações na resistência elétrica do material. Em termos de instrumentação, o sensor atua como um transdutor, convertendo uma variação físico-química em uma resposta elétrica mensurável (Stevan Jr; Silva, 2015).

Nos sensores da série MQ, a camada ativa é geralmente composta por dióxido de estanho (SnO₂). Quando moléculas presentes na amostra entram em contato com a superfície do material sensor, ocorrem processos de adsorção que modificam o equilíbrio de cargas na camada ativa. Como consequência, há alteração da resistência elétrica do sensor, que pode ser convertida em um sinal de tensão por meio do circuito de leitura (Stevan Jr; Silva, 2015). Esses sensores são comuns em protótipos de baixo custo por serem acessíveis, facilmente encontrados no mercado e simples de integrar a microcontroladores (Khorramifar et al., 2023; Yang et al., 2019). Essa relação entre interação química, variação de resistência e obtenção da resposta do sensor, é representada na Figura 1, na qual apresenta a estrutura básica de um sensor MQ, seus terminais e o princípio de conversão da variação de resistência em sinal de tensão.

Figura 1 – Estrutura física e princípio de funcionamento dos sensores MQ: a) estrutura, terminais e ligação elétrica; b) princípio de resposta e conversão da variação de resistência em sinal de tensão



Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado dos *datasheets* do fabricante do Anexo A

Apesar dessas vantagens, a resposta dos sensores MOS não depende apenas da presença do gás de interesse. Fatores como temperatura, umidade, envelhecimento do material, contaminação superficial e sensibilidade cruzada também influenciam o sinal obtido (Chai et al., 2022; Wang et al., 2010). Essa característica pode representar uma limitação quando se deseja quantificar diretamente um único gás, pois a resposta medida pode resultar da combinação de diferentes interferentes presentes na mistura.

No entanto, em sistemas de nariz eletrônico, essa sensibilidade cruzada pode ser explorada de forma positiva. Como o objetivo não é necessariamente isolar a resposta de um único composto, mas identificar padrões associados a diferentes amostras, a resposta combinada dos sensores pode contribuir para a caracterização da mistura analisada (Mei et al., 2024).

2.3.3 Princípios de funcionamento dos sensores de gás semicondutores

A interpretação das respostas obtidas em um e-Nose depende não apenas do princípio de funcionamento dos sensores, mas também de parâmetros que descrevem seu comportamento durante a exposição à amostra e durante a etapa de recuperação. Esses parâmetros permitem

avaliar a intensidade da resposta, a estabilidade do sinal, a reversibilidade e a capacidade do sensor de operar em ciclos consecutivos de medição. O Quadro 3 apresenta os principais parâmetros de desempenho utilizados na avaliação de sensores de gás e suas respectivas definições operacionais.

Quadro 2 - Principais parâmetros de desempenho em sensores de gás

Parâmetro	Descrição operacional
Resposta	Variação do sinal elétrico do sensor quando exposto ao gás em comparação com sua linha de base em ar limpo.
Tempo de resposta (t90)	Intervalo necessário para que o sinal atinja aproximadamente 90% da variação total após a exposição à amostra.
Tempo de recuperação (t10)	Intervalo necessário para que o sinal retorne a aproximadamente 10% da variação total após a retirada do gás.
Sensibilidade	Capacidade do sensor de produzir mudança mensurável no sinal diante de pequenas variações de concentração.
Seletividade	Capacidade relativa de responder com maior intensidade ao gás de interesse, mesmo na presença de interferentes.
Limite de detecção	Menor concentração que pode ser distinguida do ruído do sistema com confiabilidade.
Faixa dinâmica	Intervalo de concentração no qual a resposta do sensor permanece útil para interpretação, antes de saturar.
Reversibilidade	Capacidade do sensor de retornar à linha de base após a remoção do gás, sem manter resposta residual significativa.

Fonte: Elaborada pela autora (2026), com base em (Tonezzer; Van Duy, 2023)

Entre esses parâmetros, a estabilidade da resposta e a repetibilidade são especialmente relevantes em sistemas operados em ciclos, como o nariz eletrônico desenvolvido neste trabalho. A repetibilidade indica o quanto o sensor consegue reproduzir respostas parecidas quando a mesma amostra é medida repetidamente sob as mesmas condições de operação. Quando o sinal se modifica ao longo do tempo, mesmo sem alteração na amostra, a comparação entre diferentes coletas pode ser comprometida (Padilla et al., 2010; Sharma et al., 2001).

Um dos fatores que podem prejudicar essa estabilidade é a saturação do sensor. Esse fenômeno ocorre quando a concentração do gás se aproxima ou ultrapassa a faixa útil de resposta. Em sensores de superfície, como os MOS, a saturação está associada à ocupação gradual dos sítios ativos, isto é, das regiões da superfície onde ocorrem a adsorção e as reações com as moléculas da amostra. Quando grande parte desses sítios já está ocupada, novas moléculas passam a exercer menor influência sobre o sinal, que tende a se estabilizar. Como consequência, a sensibilidade do sensor é reduzida em concentrações mais elevadas. (Marikutsa et al., 2021).

Outro fenômeno que pode comprometer a estabilidade das leituras é a deriva (drift), que corresponde a alterações lentas na resposta do sensor ao longo do tempo, mesmo quando não há mudanças significativas na amostra. Em sensores MOS, esse fenômeno pode apresentar

deslocamento da linha de base ou mudança na intensidade da resposta, dificultando a comparação entre coletas com vários ciclos consecutivos (Müller; Sberveglieri, 2022). Em sistemas de nariz eletrônico, a deriva é considerada um dos principais desafios para aplicações de longa duração, pois afeta a repetibilidade das leituras. Por isso, uma resposta reversível, capaz de se aproximar novamente da condição inicial após o sensor não estar mais em contato com a amostra, é uma característica necessária em sensores de gás (Göpel; Schierbaum, 1991; Mukherjee; Gaur; Majumder, 2012).

Para favorecer essa recuperação da resposta, entre um ciclo de medição e outro, o sensor costuma a passar por um processo de limpeza, a qual pode ser exposto a ar ambiente. Essa etapa permite que parte das moléculas adsorvidas na superfície ativa se desprenda, ajudando o sensor a retornar, parcial ou totalmente, às suas condições iniciais. No entanto, esse retorno à linha de base pode ser lento ou incompleto, principalmente quando há influência da umidade, adsorção persistente ou exposições repetidas à amostra analisada (Khorramifar et al., 2023; Rescalli et al., 2023). Neste trabalho, esses fenômenos são importantes para compreender possíveis diferenças entre ciclos de coleta, a necessidade da limpeza com ar ambiente e a influência residual de uma medição sobre a próxima.

2.4 Variáveis complementares e sensores ambientais em sistemas e-Nose

Em sistemas e-Nose, além dos sensores principais responsáveis pela resposta à mistura analisada, o registro de variáveis complementares pode auxiliar na interpretação dos sinais. Essa necessidade ocorre porque sensores MOS, como os da série MQ, são influenciados pelas condições de medição. Entre as variáveis mais relevantes estão temperatura, umidade relativa e pressão, pois elas podem alterar a estabilidade da linha de base, a intensidade das respostas e as condições físicas da amostra (Cai et al., 2024; Chai et al., 2022; Robbiani et al., 2023).

Nesse contexto, sensores ambientais e módulos digitais complementares podem ser empregados para registrar variáveis auxiliares durante a operação de sistemas e-Nose. Esses dispositivos não substituem os sensores principais, mas fornecem informações adicionais sobre as condições em que a amostra foi analisada. Entre esses dispositivos, sensores como o BME280 permitem medir temperatura, umidade relativa e pressão barométrica, variáveis úteis para contextualizar a resposta dos sensores MOS.

A pressão é especialmente relevante em sistemas nos quais há controle de injeção ou deslocamento de volumes de gás e ar ambiente, pois se relaciona com o volume, a temperatura e a quantidade de gás presente no sistema. Essa relação é descrita pela equação dos gases ideais e permite compreender por que variações de pressão podem alterar as condições físicas da

amostra no interior da câmara. Assim, seu registro contribui para a interpretação dos volumes injetados e das condições de medição durante as coletas (BOSCH SENSORTEC, 2022; Da Silva; De Castro, 2018).

Além dos sensores ambientais, módulos digitais como o ENS160+AHT21 também podem atuar como sensores complementares em sistemas e-Nose. O ENS160 é um sensor digital multigás baseado em tecnologia MOS, voltado à estimativa de indicadores relacionados à qualidade do ar interno, como eCO₂, TVOC e AQI. O eCO₂ corresponde ao dióxido de carbono equivalente (*equivalent carbon dioxide*), o TVOC representa os compostos orgânicos voláteis totais (*Total Volatile Organic Compounds*) e o AQI corresponde ao índice de qualidade do ar (*Air Quality Index*). O AHT21, por sua vez, é um sensor digital voltado à medição de temperatura e umidade relativa (AOSONG, 2021; SCIOSENSE, 2023).

É importante destacar que o eCO₂ não corresponde à medição direta de dióxido de carbono (CO₂). Sensores específicos de CO₂ geralmente utilizam métodos físicos, como absorção de radiação infravermelha não dispersiva, conhecida pela sigla NDIR (*Non-Dispersive Infrared*). No caso do ENS160, o eCO₂ é uma estimativa equivalente, calculada a partir dos sinais processados pelo próprio sensor e voltada principalmente a aplicações de qualidade do ar interno. Por isso, quando utilizado em sistemas aplicados ao biogás, esse parâmetro deve ser interpretado apenas como indicador complementar, e não como medida direta da concentração de CO₂ na mistura analisada (Murata Manufacturing, 2026; SCIOSENSE, 2023).

O TVOC representa uma estimativa dos compostos orgânicos voláteis totais. Em sistemas e-Nose, esse indicador pode contribuir para a leitura geral da mistura analisada, especialmente quando avaliado junto às respostas dos sensores principais e às condições de temperatura e umidade. No entanto, assim como o eCO₂, deve ser tratado como informação auxiliar, pois não identifica individualmente os compostos presentes nem substitui métodos analíticos de referência (Pardo; Sberveglieri, 2005; SCIOSENSE, 2023).

De modo geral, variáveis complementares e sensores ambientais ampliam a interpretação dos dados em sistemas e-Nose, pois permitem relacionar as respostas dos sensores principais às condições em que a amostra foi analisada. No contexto de sensores MOS, esse acompanhamento é especialmente importante porque temperatura, umidade e pressão podem interferir na estabilidade das leituras, na recuperação entre coletas e nas condições físicas da amostra dentro da câmara.

2.5 Sistemas embarcados e *Internet* das Coisas (IoT)

2.5.1 Sistemas embarcados

Sistemas embarcados são sistemas computacionais dedicados a funções específicas e integrados a um equipamento maior. Ao contrário de computadores de uso geral, sua arquitetura é orientada para tarefas bem definidas, geralmente com restrições de processamento, memória, consumo de energia e tempo de resposta (Marwedel, 2021; Perim; Nascimento, 2017). Em instrumentação, essa especialização é uma vantagem, porque permite integrar aquisição de sinais, controle de atuadores, comunicação e interface de usuário em uma única plataforma de menor custo e maior portabilidade.

Em sistemas e-Nose, o sistema embarcado não exerce apenas uma função auxiliar. Ele atua como a parte que coordena o funcionamento do sistema, pois permite coordenar a leitura dos sensores, o acionamento do sistema de amostragem, o registro dos dados, a interface local e o envio das informações para armazenamento remoto. Dessa forma, o desempenho do sistema depende não apenas do conjunto de sensores, mas também da capacidade do *hardware* e do *firmware* de executar a sequência de operação de forma controlada e repetível (Douglass, 2011; Marwedel, 2021).

Essa integração normalmente é realizada por meio de microcontroladores, módulos de aquisição de dados, conversores analógico-digitais (ADC), protocolos de comunicação, recursos de conectividade e interfaces de interação com o usuário. Esses elementos permitem que o sistema embarcado registre, organize e transmita dados durante a operação, aproximando a instrumentação eletrônica de aplicações baseadas em *Internet* das Coisas. Por isso, as próximas subseções apresentam os principais recursos embarcados relacionados ao desenvolvimento de sistemas e-Nose.

2.5.2 Microcontroladores

2.5.2 Microcontroladores

Microcontroladores são circuitos integrados que reúnem, em um único chip, unidade central de processamento, memória e periféricos de entrada e saída. Essa integração permite sua aplicação em sistemas embarcados de instrumentação e controle, nos quais é necessário executar rotinas de leitura, processamento, acionamento e comunicação de forma coordenada (Barrett; Pack, 2006; Perim; Nascimento, 2017).

Em aplicações de instrumentação, a escolha do microcontrolador deve estar relacionada às necessidades do sistema desenvolvido. Entre os principais critérios, destacam-se a quantidade de entradas e saídas digitais disponíveis, a compatibilidade com sensores e atuadores, a presença de interfaces de comunicação, a capacidade de processamento, a memória disponível e a possibilidade de integração com conversores, módulos de armazenamento e interfaces de usuário (Catsoulis, 2005; Douglass, 2011).

Em sistemas de nariz eletrônico, o microcontrolador atua como unidade de coordenação do sistema. Sua função não se limita à leitura dos sensores, pois também pode envolver o controle dos ciclos de operação, o acionamento de válvulas e bombas, o gerenciamento do aquecimento dos sensores, o registro dos dados coletados e a comunicação com outros módulos do protótipo. Dessa forma, o microcontrolador contribui para que as etapas de limpeza, estabilização, exposição da amostra e aquisição dos sinais ocorram de maneira organizada e reprodutível.

Além disso, sensores utilizados em sistemas de nariz eletrônico podem fornecer sinais analógicos ou digitais, exigindo diferentes estratégias de aquisição. Sensores analógicos, como os sensores semicondutores de óxido metálico, dependem da conversão analógico-digital para que suas respostas sejam interpretadas pelo sistema. Quando o número de sensores é superior à quantidade de entradas disponíveis, podem ser empregados multiplexadores e conversores analógico-digitais externos, ampliando a capacidade de aquisição do sistema. Já sensores ambientais digitais, como sensores de temperatura, umidade e pressão, geralmente se comunicam por barramentos específicos, como I²C ou SPI.

Assim, no contexto de um nariz eletrônico aplicado ao monitoramento de biogás, o microcontrolador deve ser compreendido como o elemento responsável pela integração entre sensores, atuadores, armazenamento, interface e comunicação. Sua seleção deve considerar o conjunto de tarefas exigidas pelo protótipo, e não apenas características isoladas de processamento. A aquisição dos sinais provenientes dos sensores, especialmente quando envolve conversão analógico-digital e condicionamento de dados, é apresentada na próxima subseção (Marwedel, 2021; Stevan Jr; Silva, 2015).

2.5.3 Aquisição de dados e conversão analógico-digital

A interface de aquisição de dados, também chamada de DAQ (*Data Acquisition*), estabelece a ponte entre os sinais provenientes dos sensores e o processamento digital em sistemas embarcados. A qualidade das leituras depende, inicialmente, do condicionamento de sinal, etapa responsável por preparar o sinal analógico bruto para a conversão. Esse processo

pode envolver amplificação, adequação da faixa de tensão, redução de ruídos e filtragem, dependendo das características do sensor, do conversor utilizado e da aplicação (Ahmed Pranto et al., 2024; Shi et al., 2008).

Após o condicionamento, o ADC relaciona o sinal de entrada a uma tensão de referência, ou a uma faixa de escala definida, e o representa por um valor digital discreto. Em termos teóricos, a conversão envolve três etapas principais: amostragem, quantização e codificação. A menor variação de tensão que o sistema consegue distinguir depende da faixa de operação do conversor e da sua resolução, sendo usualmente expressa pelo valor de LSB (*Least Significant Bit*, ou *bit* menos significativo), que representa a menor variação de entrada capaz de produzir mudança no valor digital de saída.

Esse valor pode ser obtido pela Equação 1, em que V_{LSB} corresponde à resolução em tensão do ADC, V_{ref} representa a tensão de referência ou a faixa de escala considerada, e n é o número de *bits* de resolução. Assim, quanto maior a resolução do ADC, menor será o valor de V_{LSB} e maior será a capacidade teórica do sistema de distinguir pequenas variações no sinal analógico (Sanderson, 2010).

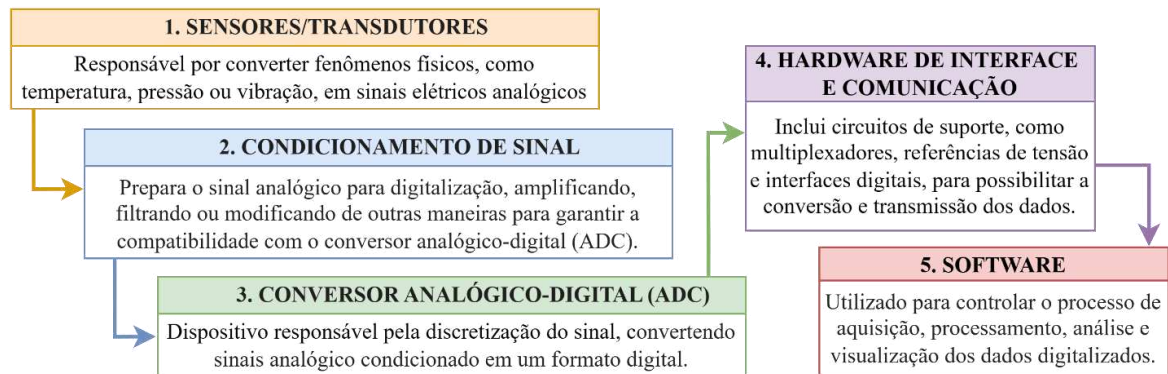
$$V_{LSB} = \frac{V_{ref}}{2^n} \quad (1)$$

Em sistemas com múltiplos sensores, o uso de multiplexadores permite ampliar o número de canais adquiridos de forma organizada e econômica. Nessa configuração, diferentes sinais podem ser selecionados sequencialmente ao conversor, reduzindo a quantidade de conversores necessários e facilitando a integração com o microcontrolador.

De forma resumida, esse fluxo de aquisição e tratamento dos sinais é apresentado na Figura 2, que mostra a sequência entre sensores/transdutores, condicionamento de sinal, conversão analógico-digital, interface de comunicação e *software*. Como ilustrado nessa figura, a leitura de sensores em sistemas embarcados não depende apenas da medição em si, mas de um encadeamento de etapas que prepara o sinal, realiza sua digitalização e viabiliza seu processamento posterior.

Além da conversão dos sinais, sistemas embarcados também dependem de interfaces de comunicação para troca de dados entre sensores, conversores, módulos de armazenamento, *displays* e plataformas externas. Por isso, a próxima subseção apresenta os principais protocolos de comunicação serial utilizados nesse tipo de aplicação.

Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema típico de aquisição de dados



Fonte: Elaborada pela autora (2026), baseado em (Perim; Nascimento, 2017)

2.5.4 Protocolos de comunicação serial

Microcontroladores precisam se comunicar com periféricos próximos, como *displays*, memórias, sensores e conversores, para ler sinais e acionar atuadores em sistemas embarcados. Para isso, utilizam protocolos de comunicação serial, que reduzem o número de pinos necessários e simplificam o *hardware*. Entre os protocolos mais comuns nesse contexto estão o I²C (*Inter-Integrated Circuit*, ou circuito interintegrado), o SPI (*Serial Peripheral Interface*, ou interface serial periférica) e a UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, ou transmissor e receptor assíncrono universal) (Catsoulis, 2005; Gbati, 2024; Lacamera, 2023).

Esses protocolos podem ser classificados em síncronos e assíncronos, conforme a forma de sincronização entre os dispositivos. Nos protocolos síncronos, como I²C e SPI, transmissor e receptor compartilham um sinal de *clock*, que define o instante em que cada *bit* deve ser enviado e lido. Já nos protocolos assíncronos, como a UART, não há uma linha de *clock* compartilhada; nesse caso, a comunicação depende de parâmetros previamente configurados entre os dispositivos, como taxa de transmissão e formato dos dados (Lacamera, 2023).

O protocolo I²C caracteriza-se por ser uma comunicação síncrona half-duplex baseada em apenas duas linhas: a linha de dados, denominada SDA (*Serial Data*), responsável pela transmissão e recepção de dados, e a linha de *clock*, denominada SCL (*Serial Clock*), responsável pela sincronização da comunicação entre os dispositivos. Sua principal vantagem está na arquitetura endereçada, que permite conectar múltiplos dispositivos ao mesmo barramento sem a necessidade de diversas linhas de seleção, simplificando o projeto e reduzindo custo (Polstra, 2015).

Já o SPI é um protocolo síncrono full-duplex projetado para maior velocidade de transferência. Ele utiliza, em geral, quatro linhas principais: MOSI (*Master Out, Slave In*), que

conduz os dados do dispositivo mestre para o escravo; MISO (*Master In, Slave Out*), que conduz os dados do escravo para o mestre; SCK (*Serial Clock*), responsável pelo sinal de *clock*; e SS (*Slave Select*), usada para selecionar o dispositivo escravo com o qual a comunicação será realizada. Embora ofereça maior desempenho, o SPI exige mais pinos do microcontrolador, já que cada dispositivo normalmente demanda uma linha própria de seleção (Harris; Harris, 2022).

A UART, por sua vez, é um protocolo assíncrono utilizado para comunicação serial ponto a ponto. Diferente do I²C e do SPI, ela não utiliza sinal de *clock* compartilhado, dependendo da configuração prévia da taxa de transmissão e do formato dos dados entre os dispositivos. Por sua simplicidade, é amplamente utilizada em sistemas embarcados para comunicação entre microcontroladores, módulos externos, interfaces de depuração e dispositivos que exigem troca de dados direta (Lacamera, 2023).

Além desses protocolos locais, existem outras tecnologias de comunicação utilizadas em sistemas embarcados e aplicações de IoT (*Internet of Things*, ou *Internet das Coisas*), tanto com fio quanto sem fio. O Quadro 4 apresenta uma comparação geral entre essas tecnologias, destacando o tipo de comunicação, o meio físico, aplicações típicas e características principais. A comparação tem caráter contextual, pois algumas tecnologias apresentadas atuam em camadas diferentes da comunicação, como é o caso do MQTT, que opera na camada de aplicação.

Quadro 3 - Protocolos de comunicação aplicáveis a sistemas embarcados e IoT

Protocolo	Tipo	Meio físico	Aplicações típicas	Características
RS-232/485	Assíncrono	Com fio	Chão de fábrica e longas distâncias	Alta imunidade a ruído e maior alcance.
CAN	Síncrono	Com fio	Automotivo e industrial crítico	Alta confiabilidade e prioridade de mensagens.
USB	Síncrono	Com fio	Periféricos de computador	Plug and play e alta taxa de transferência.
Ethernet	Síncrono	Com fio	Redes locais e <i>gateways</i>	Alta velocidade e robustez com TCP/IP.
Modbus-RTU	Assíncrono	Com fio	Automação industrial	Modelo mestre/escravo e ampla adoção.
Wi-Fi	Síncrono	Sem fio	IoT e acesso à <i>Internet</i>	Alta taxa de dados e integração nativa com IP.
Bluetooth	Assíncrono	Sem fio	Wearables e curto alcance	Baixo consumo na variante BLE.
Zigbee	Síncrono	Sem fio	Domótica e redes de sensores	Baixo consumo e topologia mesh.
MQTT	Camada de aplicação	Híbrido	Nuvem e telemetria IoT	Modelo publicar/assinar e pacote leve.

Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado de (Abdelwahed et al., 2025; Dhruva et al., 2024; Dutta; Basu, 2024; Henschen; Lee, 2024; Hkiri et al., 2025; Li; Sun, 2024; Mehta; Reddy, 2015; Neto; Gomes; Vale, 2024; Rondon et al., 2022; Scarlett; Brennan, 2011; Toulson; Wilmshurst, 2012; Zuhaer et al., 2026)

Em sistemas embarcados, a escolha do protocolo depende de requisitos como velocidade, quantidade de dispositivos conectados, distância, número de pinos disponíveis e nível de confiabilidade desejado. Protocolos como I²C, SPI e UART são especialmente úteis para a troca local de dados entre microcontroladores e periféricos, enquanto recursos de conectividade sem fio permitem ampliar o sistema para acesso remoto. Essa ampliação é discutida na próxima subseção, com foco em IoT e conectividade sem fio.

2.5.5 IoT e Conectividade sem fio

A *Internet das Coisas*, ou IoT (*Internet of Things*), descreve a conexão de objetos físicos à *Internet* para coleta, troca e processamento de dados. A partir desse conceito, dispositivos antes isolados, como sensores, atuadores, equipamentos industriais e sistemas de monitoramento, passaram a se comunicar com plataformas remotas, possibilitando automação de tarefas, armazenamento distribuído e apoio à tomada de decisão em diferentes áreas (Stevan Jr, 2024).

Na arquitetura típica da IoT, o fluxo de informação se inicia nos dispositivos de borda, formados por sensores e microcontroladores responsáveis pela coleta de dados no ambiente. Em seguida, essas informações podem ser transmitidas para *gateways*, isto é, dispositivos intermediários que recebem dados dos equipamentos locais e fazem a ponte com redes externas ou serviços em nuvem, onde os dados são armazenados, processados e analisados. Essa estrutura favorece a integração entre aquisição local, formação de históricos e acesso remoto aos registros obtidos durante a operação do sistema (Gonçalves, 2024).

Entre as tecnologias sem fio utilizadas em sistemas embarcados, o *Wi-Fi* se destaca pela taxa de transmissão e pela possibilidade de conexão direta com redes locais e serviços na *Internet*. Em aplicações de monitoramento, essa conectividade permite que dados coletados localmente sejam enviados para armazenamento remoto, ampliando a segurança dos registros e reduzindo a dependência exclusiva de armazenamento físico no próprio dispositivo (Gonçalves, 2024).

No contexto do monitoramento de biogás, a conectividade sem fio amplia as possibilidades do sistema embarcado ao permitir não apenas o registro local, mas também o armazenamento remoto dos dados, a redundância das informações e maior rastreabilidade das coletas. Ainda assim, sua adoção deve ser compatível com a robustez exigida pelo sistema experimental, de modo que a conectividade atue como um recurso complementar para reforçar a confiabilidade do monitoramento, e não como uma fonte adicional de complexidade.

2.5.6 Interfaces homem-máquina

Interfaces homem-máquina (IHM) são sistemas que permitem a interação entre pessoas e equipamentos, convertendo comandos do usuário em ações do sistema e retornando informações por meios visuais, táteis, sonoros ou de outra natureza. Seu objetivo é tornar a operação mais simples, eficiente e compreensível, especialmente em equipamentos que exigem configuração, acompanhamento de variáveis e resposta a diferentes condições de funcionamento (Boy, 2017)

Ao longo do tempo, as IHM evoluíram de controles simples, baseados em botões e chaves, para soluções mais interativas, como telas sensíveis ao toque e interfaces gráficas. Em sistemas embarcados, podem ser classificadas como locais, quando instaladas no próprio equipamento, ou remotas, quando acessadas por redes e plataformas externas. Essa distinção é relevante porque algumas aplicações exigem configuração presencial do sistema, enquanto outras se beneficiam do armazenamento remoto e do acesso posterior aos dados gerados (Knapp, 2011; Zhu et al., 2021).

Em sistemas e-Nose, uma IHM local pode contribuir para a parametrização dos ciclos de operação, a visualização das respostas dos sensores durante a coleta, o acesso a rotinas de diagnóstico, calibração e gerenciamento de dados. Além de exibir informações, a interface pode organizar comandos e estados operacionais, reduzir erros de operação e favorecer a padronização das coletas. Assim, em instrumentos embarcados de monitoramento, a IHM atua como elemento de apoio à autonomia do sistema e à interação direta entre usuário e equipamento.

2.6 e-Nose aplicado a reatores anaeróbios

A aplicação de sistemas e-Nose em processos ambientais tem sido estudada principalmente em situações nas quais a composição da amostra varia ao longo do tempo e métodos laboratoriais pontuais não são suficientes para acompanhar a dinâmica do processo. Em aplicações industriais, ambientais e de tratamento de resíduos, esses sistemas têm sido utilizados para monitorar odores, emissões de gases e variações associadas à operação de processos, com vantagens relacionadas à rapidez de resposta, possibilidade de uso no local e menor dependência de coleta e análise laboratorial (Capelli; Sironi; Del Rosso, 2014; Deshmukh et al., 2015; Prudenza; Bax; Capelli, 2023).

No contexto da digestão anaeróbia, o interesse por essa tecnologia é reforçado pela sensibilidade do processo a distúrbios operacionais, o que justifica a busca por estratégias

automáticas de monitoramento e controle (Nguyen et al., 2015). Nesse cenário, a análise não invasiva dos gases acumulados no *headspace* de reatores anaeróbios por meio de conjuntos de sensores tem se mostrado promissora, pois permite detectar precocemente instabilidades antes que parâmetros da fase líquida sofram alterações irreversíveis (Savand-Roumi et al., 2022).

Segundo Adam et al. (2015), em escala piloto os narizes eletrônicos foram capazes de diferenciar condições estáveis, fases de transição e situações de colapso do processo. Em escala real, também demonstraram potencial para emitir alertas antecipados de falhas mais severas, ainda que nem todas as perturbações menores tenham sido identificadas e pelo menos um alarme falso relevante tenha sido registrado. Esses resultados indicam que os gases acumulados no *headspace* podem fornecer informações importantes sobre o estado do processo anaeróbio (Adam et al., 2015).

O Quadro 6 sintetiza estudos correlatos que utilizaram sensores de gás ou sistemas e-Nose em aplicações relacionadas a biogás, resíduos orgânicos e processos anaeróbios. A comparação tem caráter contextual e permite observar diferentes abordagens de sensores, substratos, reatores e estratégias de interpretação dos dados.

De modo geral, os estudos apresentados indicam que conjuntos de sensores com diferentes sensibilidades podem ampliar a capacidade de discriminação em sistemas voltados ao monitoramento de biogás e resíduos orgânicos. No entanto, os sinais obtidos precisam ser interpretados com cautela, pois sensores semicondutores podem responder simultaneamente a diferentes substâncias presentes na mistura analisada. Por esse motivo, muitos estudos utilizam métodos estatísticos e computacionais para auxiliar a interpretação dos dados. Entre eles, a Análise de Componentes Principais, conhecida como *PCA*, é usada para reduzir a quantidade de variáveis e facilitar a visualização de agrupamentos entre amostras. Já os modelos de classificação e as redes neurais são estratégias que podem ser empregadas para reconhecer padrões nas respostas dos sensores e separar amostras em grupos, desde que exista uma base de dados suficiente para treinamento e validação. Neste trabalho, essas técnicas são mencionadas como possibilidades de apoio à interpretação em estudos futuros, pois a avaliação realizada teve caráter preliminar e qualitativo.

Quadro 4 - Estudos correlatos sobre e-Nose em biogás e processos anaeróbios

Ref.	Objetivo da pesquisa	Sensores utilizados	Substrato / reator	Principais resultados
[1]	Desenvolver sistema eletrônico para monitorar concentração de biogás e validar purificação.	TGS825, sensor para detecção de metano (CH ₄), temperatura e umidade	Resíduos de tofu / escala comercial	Sistema desenvolvido e validado, com resposta rápida e monitoramento em tempo real.
[2]	Validar dispositivo portátil de baixo custo para medir altas concentrações de metano.	MQ-4 e BME280	Etanol celulósico / leite fluidizado	O MQ-4 mediu até 110.000 ppm de metano com baixo erro.
[3]	Aplicar e-Nose para monitorar cheiros liberados e otimizar degradação térmica.	MQ-4, MQ-9, MQ-131, MQ-135, MQ-136, MQ-137, TGS2610 e TGS2620	Subprodutos de aves / cozedor em lote	PCA separou emissões e destacou sensores com melhor desempenho.
[4]	Usar e-Nose no <i>headspace</i> para guiar automaticamente a taxa de alimentação do digestor.	MQ-4, MQ-5, MQ-8, MQ-135, MQ-136 e TGS825	Resíduos alimentares / CSTR e batch	Controle bem-sucedido e vantagem do MQ-4 na leitura de metano (CH ₄).
[5]	Desenvolver e-Nose inteligente com IA para mapear contaminação e dispersão de biogás.	MQ-2, MQ-4, MQ-6, MQ-7, MQ-135, MQ-136, MQ-138, ME2-CO, KE-25 e BME680	Biogás real / aterro sanitário	Modelo embarcado atingiu alta precisão com matriz otimizada.

Fonte: Elaborada pela autora (2026), com base nos autores [1], [2], [3], [4], [5].

Nota: As referências indicadas na coluna “Ref.” correspondem aos seguintes estudos: [1] Yuniarti, Sarjiya e Pertiwinigrum (2013); [2] Yang et al. (2013); [3] Farmanesh, Mohtasebi e Omid (2019); [4] Savand-Roumi et al. (2022); [5] Muniz (2023).

Trabalhos recentes também têm mostrado a viabilidade de arquiteturas compactas baseadas em sensores MOS e eletrônica embarcada para monitoramento de gases em campo. Furuta et al. (2024), por exemplo, desenvolveram um só sensor de baixo custo para medição de metano, com sensores MOS, armazenamento de dados e telemetria, submetido a testes de campo por vários meses. Esse tipo de abordagem aproxima a tecnologia de aplicações fora do laboratório, nas quais portabilidade, simplicidade construtiva e processamento local ganham importância.

Ainda assim, a transição para uso em campo exige cautela. Furuta et al. (2024) observaram variação temporal na resposta dos sensores e destacaram que calibrações obtidas em laboratório podem não se transferir adequadamente para condições reais. Além disso, Wörner, Eimler e Pein-Hackelbusch (2025) reforçam que a deriva permanece entre os principais desafios em sistemas de nariz eletrônico baseados em sensores de óxido metálico.

No caso específico do biogás bruto, esse cuidado é ainda mais importante. A amostra proveniente de reatores anaeróbios pode apresentar alta umidade, vapor de água condensável, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e traços de outros compostos capazes de interferir na resposta dos sensores e na estabilidade do sistema eletrônico. O sulfeto de hidrogênio, em especial, é relevante por seu potencial corrosivo, principalmente quando associado à presença

de umidade (Coelho, 2018; Fuess et al., 2017). Essa condição pode afetar contatos elétricos, conectores, trilhas da placa de circuito impresso e a própria superfície ativa dos sensores, alterando a linha de base, favorecendo deriva e reduzindo a repetibilidade das leituras ao longo do tempo (Wörner; Eimler; Pein-Hackelbusch, 2025).

Por isso, o uso de e-Nose em reatores anaeróbios exige mais do que a escolha dos sensores. A exposição ao biogás bruto torna necessário controlar, de forma sistemática, as condições de contato entre a amostra e o sistema de medição, incluindo tempo de exposição, etapas de purga, temperatura, umidade e estabilidade das respostas. Esse controle é essencial porque alterações na leitura podem estar associadas tanto a mudanças reais na composição do biogás quanto a efeitos indesejados da própria amostra sobre os sensores e sobre a eletrônica, como condensação, corrosão, acúmulo de resíduos, instabilidade do sistema de medição e deriva temporal (Cai et al., 2024; Chai et al., 2022; Wörner; Eimler; Pein-Hackelbusch, 2025).

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de sistemas e-Nose voltados ao monitoramento qualitativo de biogás em reatores anaeróbios, especialmente quando se busca uma alternativa complementar aos métodos analíticos pontuais. A aplicação em condições reais, ainda estão em etapa inicial de avaliação, permitindo avaliar limitações importantes relacionadas à umidade, recuperação entre ciclos, estabilidade dos sensores, resposta à mistura analisada e integração entre sensores, instrumentação embarcada e armazenamento de dados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais utilizados e os procedimentos adotados no desenvolvimento do e-Nose proposto. A organização busca tornar mais clara a relação entre o projeto de *hardware*, o projeto de *firmware* e os experimentos realizados. Assim, primeiro é apresentado o projeto de *hardware*, envolvendo a concepção, a montagem e a integração dos componentes físicos e dos circuitos eletrônicos. Em seguida, é descrito o projeto de *firmware*, responsável pelo *software* embarcado usado no controle do *hardware*. Por fim, é apresentado o procedimento experimental adotado para viabilizar os experimentos com o protótipo e atender aos objetivos propostos no trabalho.

3.1 Projeto de *hardware*

Esta seção apresenta o projeto de *hardware* do e-Nose desenvolvido neste trabalho, descrevendo os principais componentes utilizados na montagem do protótipo e a função de cada um no sistema. A descrição começa pelo ESP32 DevKit V1, responsável pela integração dos módulos, e segue com os sensores utilizados para leitura do biogás e acompanhamento das condições internas da câmara. Também são apresentados os módulos de aquisição dos sinais, a alimentação elétrica, os circuitos de acionamento, a câmara de sensores, o sistema de amostragem, o módulo de armazenamento local, a interface *touchscreen*, a montagem física do protótipo e sua conexão ao sistema de digestão anaeróbia.

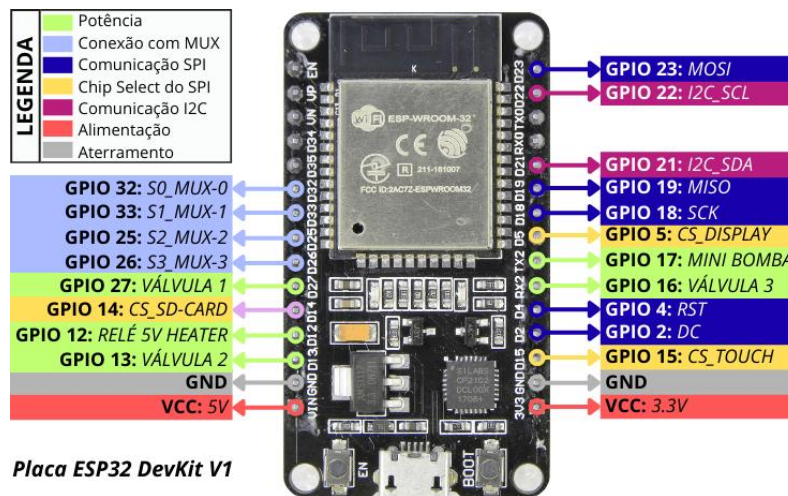
3.1.1 Microcontrolador ESP32 DevKit V1

O sistema desenvolvido neste trabalho utilizou a placa ESP32 DevKit V1, baseada no módulo ESP-WROOM-32. Essa placa foi escolhida por reunir, em um único dispositivo, capacidade de processamento, conectividade *Wi-Fi* e diferentes interfaces de comunicação, características necessárias para integrar sensores, atuadores, *display*, cartão SD e possibilitar o envio remoto dos dados. No e-Nose, o ESP32 foi responsável pelo controle geral do sistema, coordenando a leitura dos sensores, o acionamento das válvulas, da mini bomba de ar e da alimentação dos aquecedores dos sensores MQ, além da comunicação com o *display*, do armazenamento dos dados em cartão SD e do envio remoto das leituras por meio de integração com o *Google Apps Script*.

Do ponto de vista das conexões elétricas, os pinos GPIO (*General Purpose Input/Output*, ou entrada e saída de uso geral) do ESP32 foram distribuídos conforme a função

de cada módulo no sistema. As comunicações I²C (*Inter-Integrated Circuit*, ou circuito interintegrado) e SPI (*Serial Peripheral Interface*, ou interface serial periférica) foram empregadas para organizar a troca de dados com periféricos específicos, enquanto outros pinos digitais foram destinados ao controle dos atuadores e dos sinais associados ao MUX (*multiplexer*, ou multiplexador). Essa distribuição permitiu centralizar o controle do protótipo no ESP32 e organizar as conexões apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de conexões elétricas e pinagem do microcontrolador ESP32 DevKit V1



Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado do *datasheet* (ESPRESSIF SYSTEMS, 2019).

3.1.2 Sensores de gás

Neste trabalho, os sensores de gás foram definidos considerando a composição esperada do biogás produzido na biodigestão da vinhaça e a resposta observada em testes preliminares com biogás. Como o biogás apresenta predominantemente metano e dióxido de carbono, além de poder conter sulfeto de hidrogênio em menores proporções, foram selecionados sensores com respostas associadas a diferentes substâncias presentes nesse contexto. A câmara principal do e-Nose foi projetada com oito sensores semicondutores de óxido metálico, ou MOS (*Metal Oxide Semiconductor*), da série MQ: MQ-2, MQ-4, MQ-5, MQ-6, MQ-9, MQ-136, MQ-137 e MQ-138. A escolha desse conjunto teve como objetivo registrar respostas complementares diante do biogás, considerando que os sensores MQ apresentam respostas de amplo espectro. As principais características dos sensores selecionados, incluindo substâncias associadas e faixas de detecção indicadas pelos fabricantes, estão apresentadas no Quadro 6. Essas informações foram utilizadas como referência para a seleção dos sensores e para a definição inicial das condições de operação do sistema.

Quadro 5 - Especificações e faixas de detecção dos sensores MQ utilizados no sistema

Sensor	Gases / compostos associados	Faixa de detecção
MQ-2	Gás liquefeito de petróleo, hidrogênio, álcool, metano, propano e butano/isobutano	200 a 10.000 ppm; para metano, 5.000 a 20.000 ppm
MQ-4	Metano	200 a 10.000 ppm
MQ-5	Gás liquefeito de petróleo, gás natural, propano e butano/isobutano	200 a 10.000 ppm
MQ-6	Gás liquefeito de petróleo, propano e butano/isobutano	200 a 10.000 ppm
MQ-9	Monóxido de carbono, metano e gás liquefeito de petróleo	Monóxido de carbono: 20 a 2.000 ppm; metano/gás liquefeito de petróleo: 500 a 10.000 ppm
MQ-136	Sulfeto de hidrogênio	1 a 100 ppm
MQ-137	Amônia	5 a 200 ppm
MQ-138	Benzeno, álcool e compostos orgânicos voláteis	10 a 1.000 ppm para benzeno/álcool; 10 a 3.000 ppm para propano

Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado dos *datasheets* do fabricante do Anexo A

Para a leitura dos sensores MQ, foram definidos diferentes valores de resistor de carga (R_L). No projeto, utilizaram-se resistores de 10 k Ω para os sensores MQ-2 e MQ-9, e de 22 k Ω para os sensores MQ-4, MQ-5, MQ-6, MQ-136, MQ-137 e MQ-138. Esses valores foram definidos com base nas faixas indicadas nos *datasheets* e nas condições de leitura adotadas para o protótipo, sem objetivo de calibração quantitativa formal. Os valores adotados são apresentados no Quadro 7.

Quadro 6 - Resistores de carga adotados e justificativa técnica.

Sensor	RL do projeto	RL sugerido em <i>datasheet</i>
MQ-2	10 k Ω	20 k Ω (faixa: 5 a 47 k Ω)
MQ-4	22 k Ω	20 k Ω (faixa: 10 a 47 k Ω)
MQ-5	22 k Ω	20 k Ω (faixa: 10 a 47 k Ω)
MQ-6	22 k Ω	20 k Ω (faixa: 10 a 47 k Ω)
MQ-9	10 k Ω	20 k Ω (faixa: 10 a 47 k Ω)
MQ-136	22 k Ω	20 k Ω (faixa: 10 a 47 k Ω)
MQ-137	22 k Ω	47 k Ω (faixa: 10 a 100 k Ω)
MQ-138	22 k Ω	47 k Ω (faixa: 20 a 100 k Ω)

Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado dos *datasheets* do fabricante do Anexo A

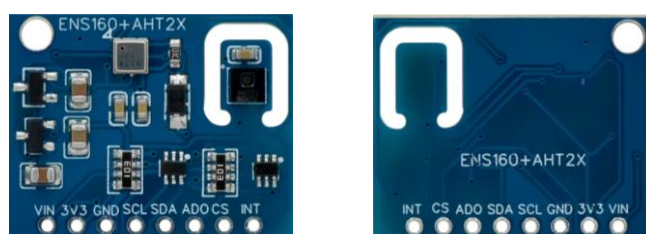
Nota: A faixa indicada no datasheet corresponde ao intervalo recomendado pelo fabricante para o resistor de carga R_L , dentro do qual o sensor pode operar com resposta elétrica adequada ao circuito de leitura.

Os resistores de carga foram soldados à placa de circuito impresso desenvolvida para o protótipo. A definição desses valores buscou compatibilizar a resposta dos sensores MQ com o circuito de aquisição, mantendo o foco na avaliação preliminar e qualitativa do comportamento dos sensores quando expostos ao biogás.

3.1.3 Sensor de temperatura, umidade e indicadores complementares

Além dos sensores MQ, o sistema utilizou o módulo ENS160+AHT21 para registrar variáveis complementares durante as coletas. O módulo foi escolhido por integrar, em uma única placa, o sensor ENS160, responsável por fornecer indicadores digitais de dióxido de carbono equivalente e compostos orgânicos voláteis totais, e o sensor AHT21, utilizado para medir temperatura e umidade relativa. Ele foi conectado ao ESP32 por meio da comunicação I²C e alimentado com 3,3 V provenientes do microcontrolador, valor compatível com a interface de comunicação utilizada. A Figura 3 apresenta o módulo ENS160+AHT21 utilizado no protótipo.

Figura 4 – Frente e verso do módulo ENS160 + AHT21 utilizado no sistema



Fonte: Adaptado do datasheet do fabricante (SCIOSENSE, 2023)

No e-Nose, o módulo ENS160 forneceu leituras digitais de eCO₂, correspondente ao dióxido de carbono equivalente, e TVOC, referente aos compostos orgânicos voláteis totais. Esses valores foram registrados como indicadores complementares durante as coletas. O eCO₂ foi tratado apenas como indicador adicional, pois não representa uma medição direta da concentração real de dióxido de carbono no biogás. O AHT21, integrado ao mesmo módulo, foi utilizado para registrar temperatura e umidade relativa dentro da câmara. As principais especificações do ENS160 e do AHT21 são apresentadas, respectivamente, nos Quadros 9 e 10.

Quadro 7 - Especificações do AHT21 e relevância para o sistema

Atributo	Especificação	Função no sistema
Precisão de temperatura	±0,3 °C	Acompanhamento da temperatura interna.
Precisão de umidade	±2% UR	Acompanhamento da umidade relativa interna.
Faixa de umidade	0% a 100% UR	Registro em diferentes condições de operação.
Tempo de resposta	< 10 s	Atualização das leituras durante as coletas.

Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado do datasheet do fabricante (SCIOSENSE, 2023)

Quadro 8 - Especificações do ENS160 e relevância para o sistema

Parâmetro técnico	Valor / faixa	Função no sistema
Tensão de alimentação do sensor	1,71 a 1,98 V	Faixa especificada para o <i>chip</i> ENS160.
Tensão de interface	1,71 a 3,6 V	Compatível com comunicação em 3,3 V.
Tensão usada no protótipo	3,3 V	Alimentação fornecida pelo ESP32 ao módulo ENS160+AHT21.
Consumo de corrente ativa	29 mA	Corrente associada à operação ativa do sensor.
Faixa de saída eCO ₂	400 a 65.000 ppm	Indicador complementar; não corresponde à medição direta de dióxido de carbono.
Faixa de saída TVOC	0 a 65.000 ppb	Indicador complementar associado aos compostos orgânicos voláteis totais.
Comunicação	I ² C / SPI	No protótipo, foi utilizada comunicação I ² C.
Temperatura de operação	-40 °C a +85 °C	Faixa de operação especificada para o sensor.

Fonte: Elaborada pela autora (2026), adaptado do datasheet do fabricante (SCIOSENSE, 2023)

3.1.4 Sensor de temperatura, umidade e pressão

Também foi utilizado o sensor BME280 para registrar temperatura, umidade relativa e pressão interna da câmara durante as coletas. Esse sensor foi escolhido devido à sua capacidade de medir pressão na faixa de 300 a 1100 hPa, temperatura entre -40 °C e 85 °C e umidade relativa de 0 a 100 %, que atendem às necessidades do sistema durante os testes preliminares com biogás. Além disso, a escolha do BME280 também se deve às baixas incertezas de medição informadas pelo fabricante para as três grandezas monitoradas, com erro típico de ± 0.12 hPa para pressão, ± 1 °C para temperatura e ± 3 % para umidade relativa, que contribuem para maior confiabilidade no acompanhamento das condições dentro da câmara. A Figura 5 apresenta o módulo BME280 utilizado no protótipo.

Figura 5 – Sensor BME280 utilizado para medição de pressão, umidade e temperatura

Fonte: Adaptado dos *datasheets* do fabricante (BOSCH SENSORTTEC, 2022)

As principais especificações do BME280 consideradas no projeto são apresentadas no Quadro 10. Esses dados foram utilizados para verificar a compatibilidade do sensor com o ESP32, a faixa de operação prevista para as coletas e as variáveis registradas durante o funcionamento do e-Nose.

Como o AHT21 já faz parte do módulo ENS160 utilizado no sistema e o BME280 também fornece medições de temperatura e umidade relativa, ambos os sensores puderam contribuir para o acompanhamento das condições ambientais dentro da câmara. Além dessas

variáveis, o BME280 fornece a leitura de pressão, parâmetro necessário para acompanhar as etapas de limpeza, expurgo, coleta e análise, além de ser utilizado posteriormente na estimativa dos volumes admitidos. A estimativa dos volumes admitidos a partir das variações de pressão é apresentada posteriormente na seção 3.3.5. As leituras de temperatura e umidade relativa foram utilizadas para contextualizar as respostas dos sensores MQ durante as coletas

Quadro 9 - Especificações técnicas do sensor BME280

Parâmetro técnico	Especificação
Variáveis medidas	Temperatura, umidade relativa e pressão
Faixa de medição de pressão	300 a 1100 hPa
Temperatura de operação	-40 °C a 85 °C
Tensão de operação	3 a 3,3 V em corrente contínua
Corrente de consumo do <i>chip</i>	0,1 a 3,6 µA, conforme o modo de operação
Precisão relativa da pressão	±0,12 hPa em 3,3 V
Precisão de temperatura	±1 °C
Interface de comunicação	I ² C e SPI

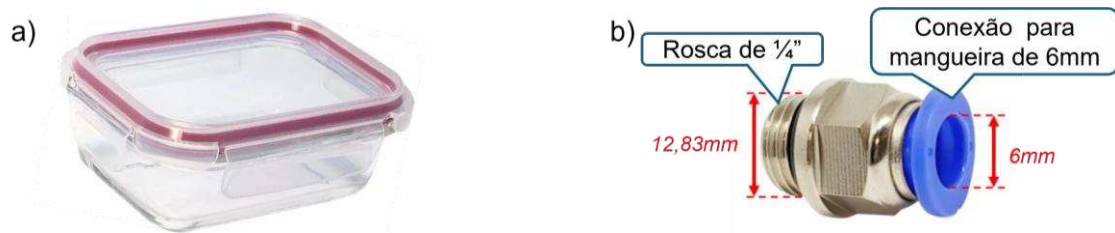
Fonte: Adaptado dos *datasheets* do fabricante (BOSCH SENSORTEC, 2022)

3.1.5 Câmara de sensores

A câmara de sensores é a parte do e-Nose onde o biogás permanece em contato com os sensores durante as coletas. No protótipo desenvolvido, essa câmara abriga os oito sensores MOS da série MQ, o BME280, o módulo ENS160+AHT21, o ADS1115 e o CD74HC4067. Essa organização concentra, em uma mesma região, os sensores expostos ao biogás e os módulos responsáveis pelo condicionamento e aquisição dos sinais. Para essa função, foi utilizado um recipiente hermético adaptado, com volume aproximado de 370 mL, dimensões externas de 14,5 cm × 10,4 cm × 4,7 cm, corpo em vidro borossilicato, tampa em polipropileno e vedação em silicone.

A Figura 6 apresenta os principais elementos utilizados na construção da câmara de sensores antes da montagem final. A escolha do recipiente considerou a necessidade de manter o biogás em contato com os sensores em uma região fechada, além de reduzir a entrada de ar externo e possíveis vazamentos durante as coletas. A adaptação da tampa, as passagens dos fios, os reforços de vedação e a montagem final da câmara no conjunto do e-Nose são apresentados posteriormente na Seção 3.1.12.

Figura 6 – Câmara de sensores e conector para mangueira: a) recipiente hermético de vidro; b) conector de rosca 1/4" com engate para mangueira de 6 mm.



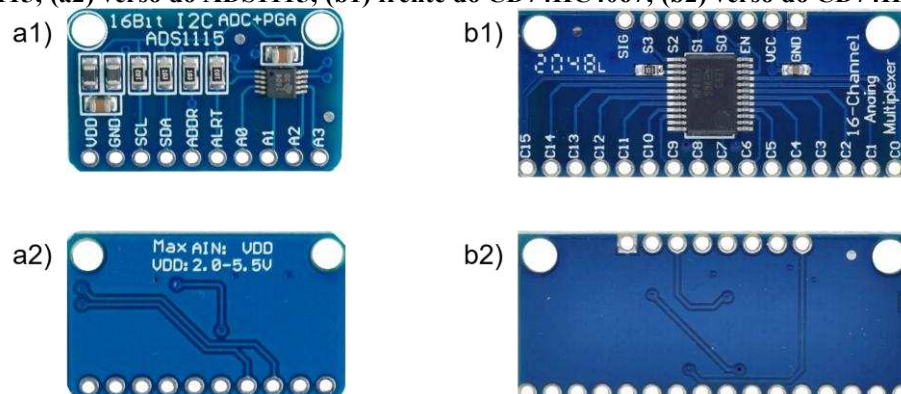
Fonte: Elaborada pela autora (2026)

3.1.6 Conversão de sinais e multiplexação analógica

Nesta etapa do projeto, foi necessário definir uma forma de adquirir os sinais dos sensores MQ sem ocupar grande quantidade de pinos do ESP32. Embora o microcontrolador possua entradas analógicas, a quantidade de sensores exigia uma organização de leitura que preservasse pinos para outras funções do sistema. Por isso, foi adotada uma estrutura externa de aquisição, composta pelo ADC ADS1115 e pelo multiplexador analógico CD74HC4067.

Nessa estrutura, o CD74HC4067 foi utilizado para selecionar sequencialmente os canais de leitura, enquanto o ADS1115 realizou a conversão dos sinais selecionados em valores digitais para leitura pelo ESP32. Dessa forma, a aquisição dos sinais dos sensores MQ foi concentrada em uma arquitetura mais compacta, sem exigir uma entrada analógica exclusiva para cada sensor. A Figura 7 apresenta os módulos utilizados nessa etapa de aquisição, indicando a frente e o verso do ADS1115 e do CD74HC4067.

Figura 7 –Módulos utilizados na conversão analógico-digital e na multiplexação dos sinais: (a1) frente do ADS1115; (a2) verso do ADS1115; (b1) frente do CD74HC4067; (b2) verso do CD74HC4067.



Fonte: Adaptada do datasheet do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2024)

O ADS1115 foi utilizado como ADC externo de 16 *bits*, com comunicação I²C. Conforme o datasheet do fabricante, o dispositivo possui amplificador de ganho programável, comparador interno e taxa de conversão configurável entre 8 e 860 amostras por segundo. No protótipo, o módulo foi alimentado com 3,3 V e utilizado para converter o sinal selecionado

pelo multiplexador. As principais especificações técnicas do ADS1115 são apresentadas no Quadro 11.

Quadro 10 - Especificações técnicas do módulo ADS1115

Parâmetro técnico	Especificação
Tipo de componente	ADC externo
Resolução	16 bits
Interface de comunicação	I ² C
Tensão de operação	2,0 a 5,5 V
Tensão utilizada no protótipo	3,3 V
Entradas analógicas	4 entradas em modo simples ou 2 entradas diferenciais
Taxa de conversão	8 a 860 amostras por segundo
Amplificador de ganho programável	Até 16 vezes
Corrente em modo contínuo	Aproximadamente 150 μ A

Fonte: Adaptado do datasheet do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2024)

O CD74HC4067 foi utilizado como multiplexador analógico de 16 canais. No protótipo, foram empregados 8 canais, correspondentes aos oito sensores MQ selecionados para a câmara principal. Essa configuração permitiu selecionar sequencialmente o sinal enviado ao ADS1115, reduzindo a quantidade de entradas necessárias no conversor e auxiliando na organização da etapa de aquisição. As principais especificações técnicas do CD74HC4067 são apresentadas no Quadro 12.

Quadro 11 - Especificações técnicas do módulo CD74HC4067

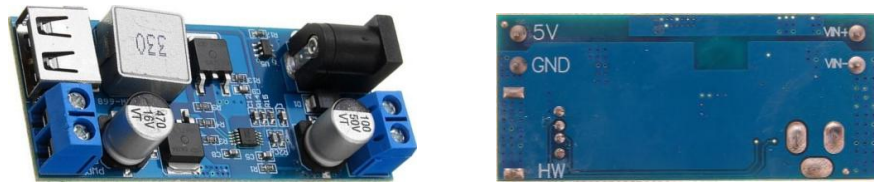
Parâmetro técnico	Especificação
Tipo de componente	Multiplexador analógico CMOS
Número de canais	16 canais
Sinal comum	Pino SIG
Linhas de seleção	S0, S1, S2 e S3
Tensão de operação	2,0 a 6,0 V
Resistência em condução	Aproximadamente 70 Ω em 4,5 V
Temperatura de operação	-55 °C a 125 °C

Fonte: Adaptado do datasheet do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2024)

3.1.7 Conversores de tensão

Para a alimentação do sistema, foram utilizados dois conversores do tipo *step-down*, modelo LM2596S. Esses módulos foram responsáveis por reduzir a tensão de entrada de 12 V para aproximadamente 5,24 V (valor medido nos terminais de saída do conversor), valor utilizado na alimentação dos ramos principais do protótipo. O módulo regulador comercial utilizado é apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Módulo regulador *step-down* LM2596S utilizado no sistema



Fonte: Adaptado dos *datasheets* do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2023)

As principais especificações do conversor *step-down* utilizado no protótipo são apresentadas no Quadro 14. Esses dados foram considerados para definir a alimentação dos ramos do sistema, uma vez que o módulo permite reduzir a tensão de entrada para uma saída próxima de 5 V, compatível com os componentes alimentados nessa etapa do circuito.

A partir dessa etapa de conversão, a alimentação em aproximadamente 5,24 V foi distribuída aos diferentes circuitos do protótipo conforme a demanda de cada conjunto de componentes. A organização dessa distribuição, incluindo a separação entre controle, aquisição e acionamento dos dispositivos, é apresentada na Seção 3.1.12, juntamente com a montagem física do e-Nose.

Quadro 12 - Especificações técnicas do conversor *step-down*

Parâmetro técnico	Especificação
Faixa de tensão de entrada	9 a 36 V em corrente contínua
Tensão de entrada utilizada no protótipo	12 V
Tensão de saída nominal	5,2 V em corrente contínua
Corrente máxima de saída	5 A para entrada entre 9 e 32 V; 3,5 A para entrada entre 32 e 36 V
Temperatura de operação	-40 °C a 125 °C

Fonte: Adaptado dos *datasheets* do fabricante (TEXAS INSTRUMENTS, 2023)

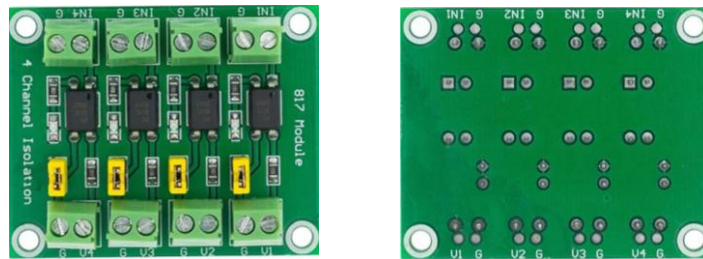
3.1.8 Isolamento por optoacoplador

Para separar os sinais de controle do ESP32 dos circuitos responsáveis pelo acionamento dos atuadores, foi utilizado um módulo optoacoplador de quatro canais baseado no PC817. Essa separação foi adotada como decisão de projeto, considerando que o ESP32 opera com sinais de 3,3 V e baixa corrente, enquanto as válvulas, a mini bomba de ar e o circuito de aquecimento dos sensores MQ exigem uma etapa própria de acionamento. No protótipo, os lados lógico e de potência do módulo foram mantidos com referências de terra separadas, permitindo isolamento elétrico entre o microcontrolador e os circuitos de acionamento.

Na prática, o optoacoplador foi utilizado para transferir o comando enviado pelo ESP32 à etapa de potência sem conexão elétrica direta entre as duas partes do circuito. Essa solução foi empregada com o objetivo de aumentar a separação entre a eletrônica de controle e os atuadores, especialmente durante o chaveamento de cargas como válvulas e mini bomba de

ar. No entanto, não foram realizados ensaios comparativos com e sem optoacoplamento; portanto, este trabalho não quantifica o ganho dessa escolha em relação a alternativas mais simples, como alimentação única com filtragem e desacoplamento capacitivo. A Figura 9 apresenta o módulo utilizado no projeto para realizar essa separação entre os dois estágios do sistema.

Figura 9 – Módulo de isolamento optoacoplador de 4 canais baseado no PC817



Fonte: Adaptado dos *datasheets* do fabricante (SHARP CORPORATION, 2018)

As principais especificações do módulo optoacoplador utilizado no protótipo são apresentadas no Quadro 14. Essas informações foram consideradas para sua integração ao ESP32 e à etapa de acionamento dos atuadores, especialmente por permitir operação com sinais de controle de 3,3 V e separação elétrica entre os lados lógico e de potência.

Quadro 13 - Especificações técnicas do módulo optoacoplador de quatro canais PC817

Parâmetro técnico	Especificação
Optoacoplador utilizado	PC817
Tensão de operação na entrada	3,3 a 5 V
Tensão máxima de saída	Até 30 V, dependendo do circuito externo
Corrente máxima de saída	Até 50 mA por canal

Fonte: Adaptado dos *datasheets* do fabricante (SHARP CORPORATION, 2018)

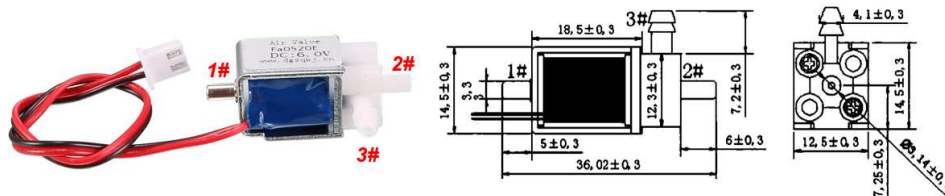
Além do optoacoplador, a etapa de acionamento contou com transistores BC337, utilizados como chaves eletrônicas para acionar as válvulas, a mini bomba de ar e o módulo relé de 5 volts responsável pela alimentação dos aquecedores dos sensores MQ. Dessa forma, o ESP32 permaneceu responsável apenas pelo envio dos comandos de controle, enquanto o acionamento das cargas foi realizado por uma etapa separada de potência. Também foram previstos componentes de proteção contra transientes associados ao chaveamento das cargas, especialmente nas válvulas e na mini bomba de ar. Os detalhes de montagem física, ligação dos componentes de proteção e ajustes realizados no circuito são apresentados na Seção 3.1.12. Como trabalho futuro, recomenda-se avaliar experimentalmente a necessidade do optoacoplador, comparando essa solução com alternativas de menor custo, como alimentação compartilhada, desacoplamento capacitivo e filtragem adequada da linha de alimentação.

3.1.9 Atuadores do sistema de amostragem

O sistema de amostragem do e-Nose utilizou atuadores para transportar o biogás e ar ambiente e alternar sua passagem dentro da câmara durante as etapas de operação. Para isso, foram empregadas três válvulas FA0520E e uma mini bomba de ar. As válvulas foram utilizadas para alterar o percurso da amostra, enquanto a mini bomba de ar foi responsável por promover sua movimentação pelas mangueiras e pela câmara de sensores.

A válvula FA0520E utilizada no sistema é apresentada na Figura 10. Essa válvula possui três vias e duas posições, operando como uma chave de direcionamento. Segundo o datasheet do fabricante, o componente apresenta tensão nominal de 6 V em corrente contínua e corrente de operação de 240 mA, com variação de $\pm 15\%$. No protótipo, as válvulas foram alimentadas com aproximadamente 5,24 V, conforme a tensão disponível no ramo de potência descrito na Seção 3.1.7. Quando desenergizada, a válvula conecta as portas #1 e #3, mantendo a porta #2 fechada. Quando energizada, a passagem ocorre entre as portas #3 e #2, mantendo a porta #1 fechada. Essa alternância permitiu modificar o percurso do biogás e ar ambiente, conforme a etapa de funcionamento definida pelo sistema.

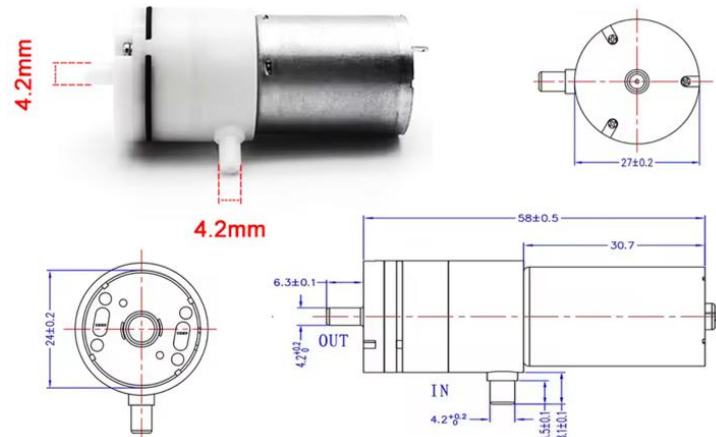
Figura 10 – Válvula solenoide FA0520E utilizada no sistema: componente à esquerda e desenho técnico à direita



Fonte: Adaptada do datasheet do fabricante (DONGGUAN ZHIRONG, 2019)

Para transportar a amostra de gás pelo sistema, foi utilizada a mini bomba de ar apresentada na Figura 11. No protótipo, a mini bomba de ar foi utilizada para injetar e expurgar a mistura (biogás e ar ambiente) pelas mangueiras, permitindo sua passagem pela câmara de sensores durante as diferentes etapas de operação do e-Nose. De acordo com as informações técnicas do fornecedor, a mini bomba de ar possui tensão nominal de 6 V e faixa de operação entre 5,2 e 6,5 V. No protótipo, assim como as válvulas, a bomba foi alimentada com aproximadamente 5,24 V, devido à tensão disponível. Para a versão de 6 V, a corrente em carga é inferior a 420 (mA), a vazão é igual ou superior a 2,5 L por minuto e a capacidade de sucção pode chegar a -55 kPa (quilopascas). A forma como esses componentes são acionados durante cada etapa do ciclo é definida pelo *firmware* e é descrita na Seção 3.2.6.

Figura 11 – Mini bomba de ar utilizada para movimentação do biogás e ar ambiente no sistema



Fonte: Adaptada das informações técnicas disponibilizadas pelo fornecedor USINAINFO (2026)

3.1.10 Módulo de armazenamento local

Para o armazenamento local dos dados, foi utilizado um módulo de cartão SD com comunicação SPI. No projeto, foi adotado um microcartão SD de 32 gigabytes, formatado em FAT32 e alimentado com 3,3 V. Esse módulo foi usado para registrar os dados gerados durante as coletas diretamente no protótipo, funcionando como armazenamento local independente da conexão com a *Internet*. A Figura 12 mostra a frente e o verso do módulo SD Card utilizado no sistema.

Figura 12 – Frente e Verso do Módulo SD Card e Adaptador com Cartão de Memória de 32GB



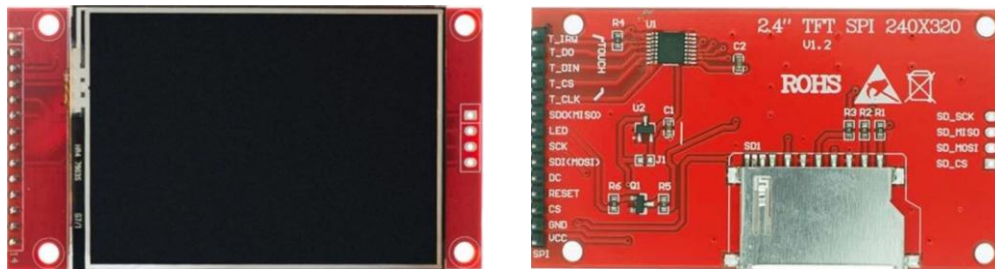
Fonte: Adaptada das informações técnicas disponibilizadas pelo fornecedor Curto Circuito (2026)

O módulo de cartão SD utilizou comunicação SPI e compartilhou esse barramento com o *display*. Para evitar conflito entre os dois módulos, cada dispositivo foi conectado a um pino próprio de seleção de *chip*, ou CS (*Chip Select*). Dessa forma, o ESP32 selecionava separadamente o cartão SD ou o *display* conforme a operação executada. A organização dos dados em arquivos CSV, a rotina de gravação local e o envio complementar para a nuvem são descritos na Seção 3.2.5, junto ao projeto de *firmware*.

3.1.11 Display touchscreen

Neste projeto, foi utilizado um *display* TFT de 2,4 polegadas, com resolução de 320×240 pixels e controlador ST7789V, adotado como interface homem-máquina principal do e-Nose. O módulo também possui *touchscreen* resistivo controlado pelo XPT2046, permitindo a interação direta do usuário com o sistema por meio do toque. A Figura 13 apresenta o *display touchscreen* utilizado no protótipo.

Figura 13 – Display TFT de 2,4 polegadas com *touchscreen* resistivo utilizado no sistema



Fonte: Adaptada do datasheet do fabricante (SITRONIX TECHNOLOGY CORPORATION, 2014)

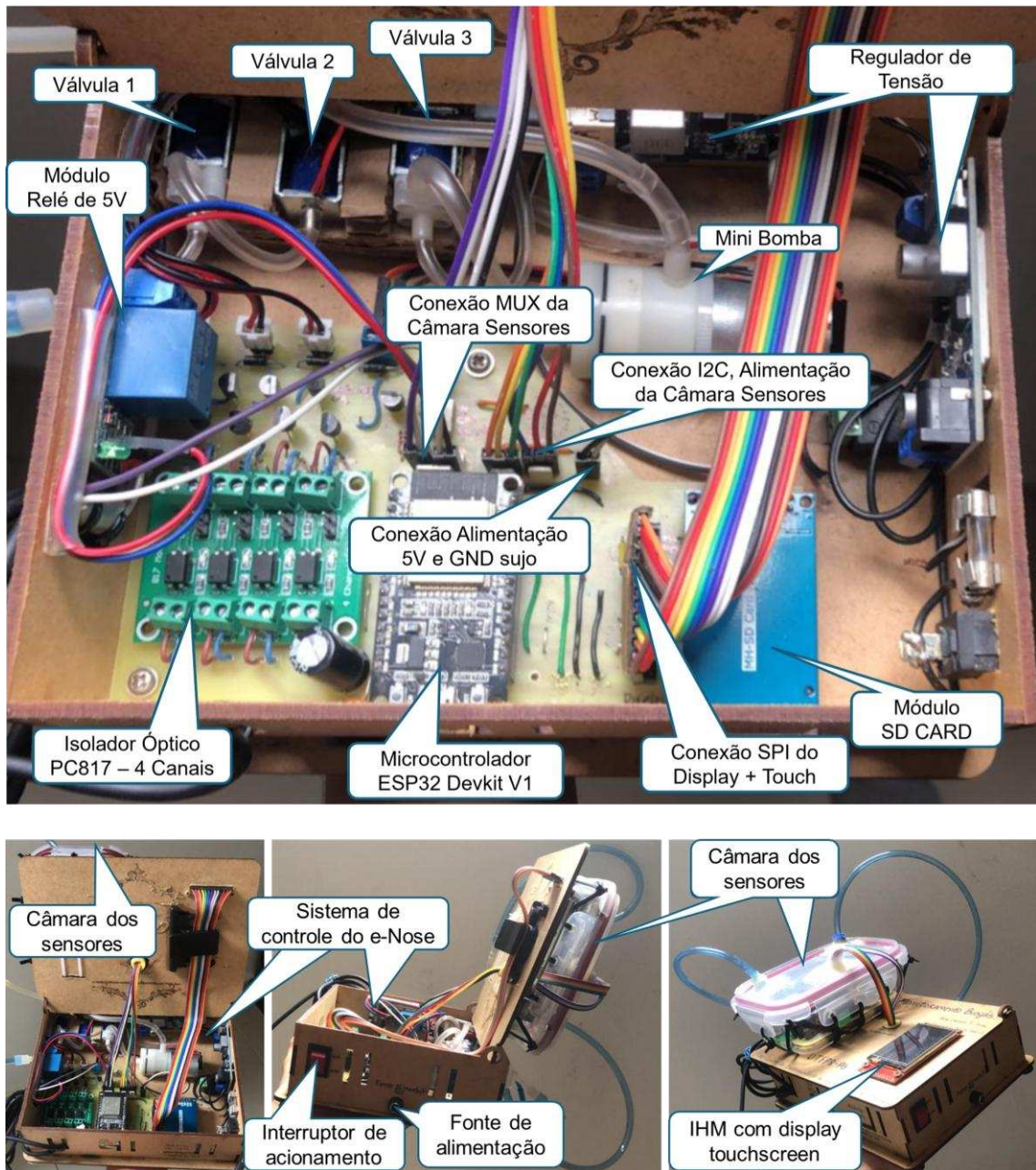
O *display* TFT e o controlador *touchscreen* foram conectados ao ESP32 por comunicação SPI, com sinais de seleção próprios para diferenciar o acesso aos periféricos compartilhados nesse barramento. No sistema desenvolvido, o *display* foi usado para concentrar funções de operação e acompanhamento do e-Nose, incluindo configuração de coletas, visualização das leituras dos sensores, diagnóstico, calibração, gerenciamento de dados e configuração de rede. O detalhamento das telas desenvolvidas e da lógica implementada no *firmware* é apresentado na Seção 3.2.4.

3.1.12 Montagem física e conexão do e-Nose ao sistema de digestão anaeróbia

A montagem física do e-Nose foi organizada em uma unidade de controle e uma câmara de sensores. A unidade de controle concentrou o ESP32, os módulos de alimentação, armazenamento, interface e acionamento dos atuadores, enquanto a câmara reuniu os sensores e os módulos responsáveis pela aquisição dos sinais. O diagrama completo do circuito montado, com as ligações entre microcontrolador, sensores, módulos auxiliares e atuadores, é apresentado no Apêndice D.

A estrutura física do e-Nose é apresentada na Figura 14, com diferentes vistas do equipamento e destaque para a parte interna da unidade de controle. Essa organização permitiu separar a região de processamento e acionamento da região de contato entre a mistura analisada e os sensores.

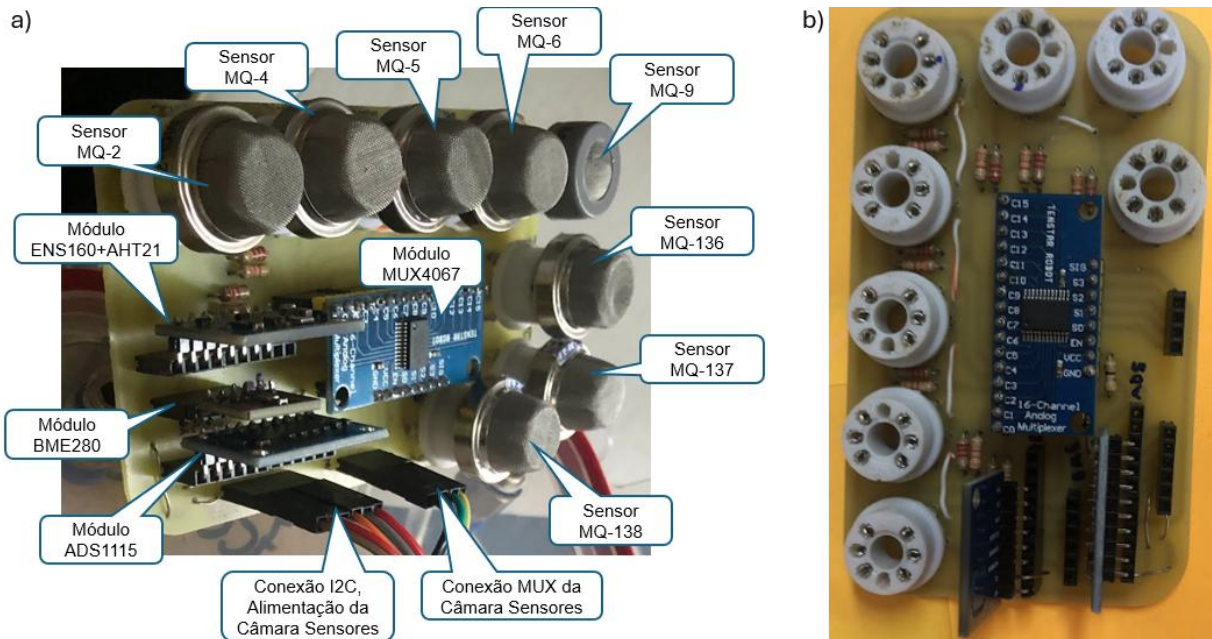
Figura 14 – Estrutura física do e-Nose em diferentes ângulos, com destaque para a parte interna da unidade de controle



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A câmara de sensores foi organizada em uma placa de circuito impresso, desenvolvida para concentrar os soquetes dos sensores MQ, os sensores complementares e os módulos de aquisição. Na Figura 15a, observa-se a placa com os sensores e módulos instalados, incluindo os sensores MQ-2, MQ-4, MQ-5, MQ-6, MQ-9, MQ-136, MQ-137 e MQ-138, além dos módulos BME280, ENS160+AHT21, ADS1115 e CD74HC4067. A Figura 15b mostra a mesma placa sem os sensores MQ, evidenciando os soquetes cerâmicos, a disposição dos componentes e a organização das trilhas e conexões.

Figura 15 – Placa de circuito impresso dos sensores: (a) placa com sensores e módulos instalados; (b) placa com soquetes cerâmicos sem os sensores MQ



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

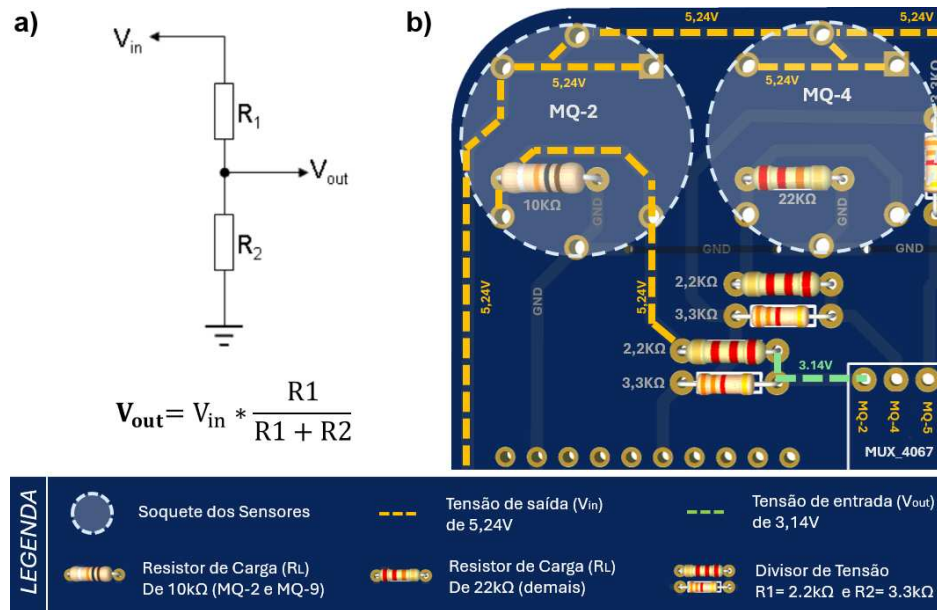
Esse arranjo foi adotado para facilitar a substituição dos sensores MQ, a manutenção da placa e a integração entre o conjunto de sensores, os sensores complementares e o circuito de aquisição. Como os sensores e módulos ficaram instalados no interior da câmara, a montagem permitiu concentrar a região de leitura em uma única estrutura, exposta diretamente à amostra de biogás e ar ambiente durante as coletas.

Para adequar os sinais analógicos dos sensores MQ à faixa de leitura do CD74HC4067 e do ADS1115, foram utilizados divisores de tensão. A estrutura básica do divisor é apresentada na Figura 16a, em que V_{in} representa a tensão aplicada ao circuito, V_{out} representa a tensão reduzida, R_1 é o resistor ligado entre a entrada e o ponto de leitura, e R_2 é o resistor ligado entre esse ponto e o terra. A relação entre essas variáveis é apresentada na Equação 2.

$$V_{out} = V_{in} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Essa solução foi aplicada conforme mostrado na Figura 16b. Como os sensores MQ foram alimentados com aproximadamente 5,24 V, seus sinais passaram por divisores formados por resistores de 22 kΩ e 33 kΩ antes de serem encaminhados ao circuito de leitura. Essa redução foi necessária porque o CD74HC4067 e o ADS1115 operaram com alimentação de 3,3 V. Dessa forma, o divisor de tensão limitou o sinal aplicado às entradas do sistema de aquisição.

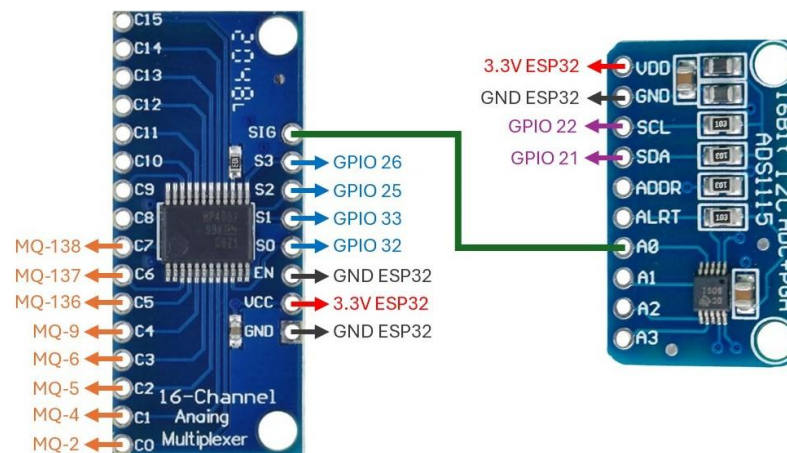
Figura 16 – Divisor de tensão aplicado ao sistema e-Nose para biogás: (a) princípio do divisor de tensão; (b) implementação do circuito na placa dos sensores



Fonte: Elaborada pela autora (2026), elaborado no simulador online (MASTERPLC, 2026)

Na placa da câmara, os oito sensores MQ foram conectados aos canais C0 a C7 do CD74HC4067, e a saída comum do multiplexador foi ligada ao canal A0 do ADS1115. A seleção dos canais do multiplexador foi realizada pelo ESP32 por meio dos sinais S0, S1, S2 e S3. A ligação entre os módulos ADS1115 e CD74HC4067 é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Ligação entre os módulos ADS1115 e CD74HC4067 no sistema proposto



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Na montagem final, a alimentação foi distribuída em dois ramos: um destinado à parte de controle e aquisição, incluindo o ESP32 e os módulos alimentados em 3,3 V; e outro destinado à parte de potência, responsável pelas válvulas, mini bomba de ar e aquecedores dos sensores MQ. Essa organização seguiu a separação elétrica descrita nas seções 3.1.7 e 3.1.8.

Na etapa de acionamento, os transistores BC337 foram utilizados como chaves eletrônicas para acionar as válvulas, a mini bomba de ar e o módulo relé de 5 V responsável pela alimentação dos aquecedores dos sensores MQ. Nas válvulas e na mini bomba de ar, por serem cargas indutivas, foi utilizado inicialmente o diodo 1N4007 em antiparalelo com a carga, atuando como diodo de roda livre para limitar a tensão reversa gerada no desligamento.

Durante os ajustes do sistema, o diodo inicialmente utilizado na proteção das cargas foi substituído pelo diodo 1N5819. Essa substituição foi realizada porque, durante o acionamento das válvulas e da mini bomba de ar, foram observadas reinicializações do ESP32, indicando interferências associadas ao chaveamento das cargas indutivas. O 1N5819 foi adotado por ser um diodo *Schottky*, com resposta rápida e menor queda de tensão direta, características adequadas para atuar como caminho de recirculação da corrente gerada pelas cargas indutivas no momento do desligamento. Após essa substituição, o problema de reinicialização do microcontrolador deixou de ocorrer nos testes de funcionamento do protótipo. Também foram instalados capacitores cerâmicos de 100 nF, nos terminais das válvulas e da mini bomba de ar, em paralelo com os diodos, com a finalidade de auxiliar na redução de ruídos e variações rápidas associadas ao chaveamento (Scherz; Monk, 2016);

A câmara de sensores foi integrada fisicamente ao protótipo por meio da adaptação da tampa do recipiente hermético. Essa tampa recebeu conexões para a passagem da amostra, além de aberturas destinadas aos fios de alimentação e aos sinais dos sensores e módulos instalados no interior da câmara. Como pequenas aberturas poderiam provocar vazamentos ou entrada indesejada de ar, as regiões adaptadas foram reforçadas com cola para cano, fita veda-rosca, silicone e abraçadeiras nas mangueiras.

A Figura 18 mostra a câmara já montada, com a tampa adaptada para receber as mangueiras e os fios dos sensores. A conexão indicada como Válvula 1 corresponde ao ponto de entrada do biogás na câmara. Já a conexão indicada como Válvula 3 está associada à injeção de ar ambiente e ao expurgo da mistura de biogás e ar ambiente após a etapa de análise. Dessa forma, o direcionamento do conteúdo que entra e sai da câmara ocorre conforme o acionamento das válvulas durante a rotina de operação do e-Nose.

Figura 18 – Vista da câmara montada com as conexões para passagem da amostra e as passagens elétricas do sistema



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

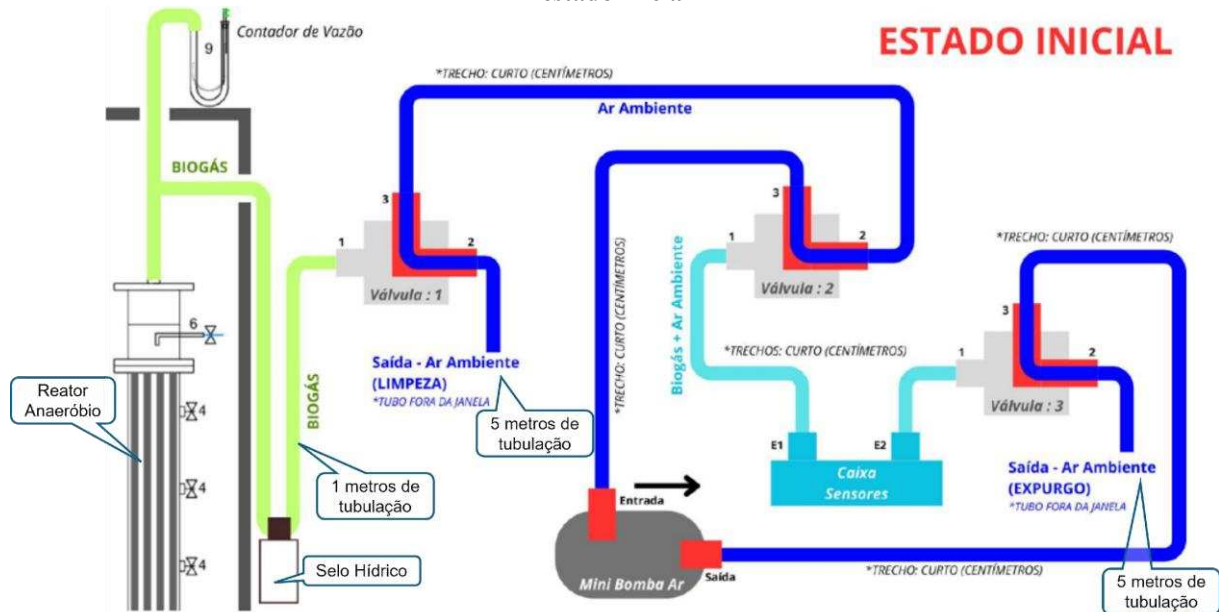
Além das mangueiras, a tampa recebeu passagens seladas para os fios necessários ao funcionamento dos sensores e módulos internos. Em uma dessas passagens foram conduzidos os sinais S0, S1, S2 e S3, responsáveis pela seleção dos canais do multiplexador CD74HC4067. Na outra, foram conduzidos os fios de comunicação e alimentação, incluindo o barramento I²C, a alimentação de 3,3 V, a alimentação de 5 V e os GNDs.

A conexão física entre o e-Nose e o sistema de digestão anaeróbia foi feita por tubo rígido de 6 mL, a partir de um selo hídrico intermediário, e não diretamente no *headspace* dos reatores. Essa escolha foi adotada como proteção para a mini bomba de ar, as válvulas e os demais componentes, reduzindo o risco de arraste de espuma ou líquido do reator para o interior do equipamento.

Além da conexão com o sistema de digestão anaeróbia, foram usadas duas mangueiras de 5 metros direcionadas para fora da sala experimental. Uma delas permitia captar ar ambiente externo à sala para as etapas de limpeza e diluição do biogás, evitando que o e-Nose utilizasse ar do próprio laboratório, onde havia outros reatores em operação. Essa escolha reduziu o risco de interferência de gases presentes na sala sobre a próxima coleta. A outra mangueira era usada para direcionar para fora da sala o conteúdo retirado da câmara após a análise. A Figura 19 apresenta a lógica de ligação do sistema no estado inicial.

A Figura 18 mostra a conexão entre o reator anaeróbio, o selo hídrico, as válvulas, a mini bomba de ar e a câmara de sensores. A figura também mostra os percursos associados à injeção de ar ambiente, à passagem do biogás e ao expurgo, permitindo visualizar como as válvulas e a mini bomba de ar direcionam a amostra durante a operação do e-Nose. A operação ilustrativa completa do sistema consta no Apêndice B

Figura 19 – Lógica de ligação entre reator anaeróbio, válvulas, mini bomba de ar e câmara de sensores no estado inicial



Fonte: Elaborada pela autora (2026), operação ilustrativa completa consta no Apêndice B

3.2 Projeto de *firmware*

Esta seção apresenta a organização do *firmware* desenvolvido para o e-Nose. A descrição envolve a estrutura do código, a inicialização dos módulos, a leitura dos sensores, o controle dos atuadores, o armazenamento dos dados, a comunicação em rede e a navegação pelo *display touchscreen*. Também são apresentadas as telas desenvolvidas e a forma como os comandos realizados pelo usuário foram vinculados às rotinas de funcionamento do sistema. Os fluxos de navegação e de operação foram representados por diagramas Mermaid, uma linguagem de marcação usada para criar fluxogramas e outros diagramas a partir de descrições textuais. Esses diagramas foram reunidos no Apêndice C devido à sua extensão e para evitar sobrecarga visual no corpo do capítulo.

3.2.1 Visão geral do *firmware*

O *firmware* do e-Nose foi desenvolvido para controlar os ciclos de coleta, acompanhar as leituras dos sensores e executar as rotinas de armazenamento local e envio remoto dos dados. Ele atua como o núcleo lógico do sistema, integrando aquisição de dados, acionamento dos atuadores, interface pelo *display touchscreen*, conectividade *Wi-Fi*, armazenamento em cartão SD e envio por meio do *Google Apps Script*.

O desenvolvimento foi realizado no Visual Studio Code, editor de código com suporte a extensões, depuração e gerenciamento de projetos, com a extensão PlatformIO, ambiente voltado ao desenvolvimento de sistemas embarcados e projetos para microcontroladores

(Microsoft, 2026; PlatformIO, 2026). A organização do código foi baseada na separação entre interface gráfica, configuração de coletas, monitoramento, conectividade, leitura dos sensores, controle dos atuadores, calibração operacional dos sensores MQ, diagnóstico e armazenamento dos dados. Essa divisão facilitou a manutenção do *firmware* e permitiu que as rotinas associadas a cada função do e-Nose fossem localizadas em arquivos específicos. A estrutura principal de pastas e arquivos do projeto foi organizada conforme apresentado a seguir:

Na etapa de aquisição, o *firmware* seleciona os canais do multiplexador CD74HC4067 e lê os valores convertidos pelo ADS1115, permitindo a leitura escalonada dos sensores MQ. Além disso, registra informações do BME280 e do módulo ENS160+AHT21, incluindo temperatura, umidade relativa, pressão interna da câmara e indicadores complementares associados às condições internas da câmara.

Enose_Biogas		
	.pio/	
	.vscode/	
	lib/	
	include/	
	0_PROGRAMA_PRINCIPAL.cpp	→ Lógica Principal, Wi-Fi, SD, Loop
	1_TELA_LOGIN.h	→ Login + Teclado Numérico + Senha
	2_TELA_MENU_PRINCIPAL.h	→ Menu, Acesso para Telas Secundárias
	3_TELA_AJUSTES_COLETA.h	→ Configurações de Tempo/Pressão/Ciclos
	4_TELA_MONITORAMENTO.h	→ Controle/Leitura De Sensores/Gravação
	5_TELA_DADOS_SD.h	→ Interface De Leitura De Dados Do SD
	6_TELA_DIAGNÓSTICO_ENOSE.h	→ Diagnóstico Geral
	7_TELA_AJUSTE_WIFI.h	→ Scan, Conexão, Portal AP
	8_TELA_AJUSTES_MQS.h	→ Valores / Calibração MQ
	9_TELA_AP_HTML.h	→ Interface Web
	10_INTERFACE_GERAL.h	→ Cores, Funções Gráficas, Display Global
	11_ACIONAM_VALVULAS_BOMBA.h	→ Controle de atuadores
	12_MUX_ADS_MQS.h	→ Leitura MQ Via Multiplexador + ADS
	src/	
	main.cpp	→ Chama Setup() e Loop()
	.gitignore	
	platformio.ini	

Os procedimentos das coletas foram organizados em ciclos compostos por etapas sequenciais, incluindo estado inicial, limpeza, expurgo A, pré-aquecimento, coleta, análise, expurgo B, estabilização e finalização do ciclo. Em cada etapa, o *firmware* registra informações como data, hora, número do ciclo, etapa em execução, estado dos atuadores e leituras dos sensores. Essa estrutura é sintetizada no Quadro 16.

A lógica de execução foi baseada em rotinas periódicas, *buffers* e verificações por tempo, reduzindo bloqueios durante a atualização da interface, leitura dos sensores, gravação dos dados e verificação da conexão *Wi-Fi*. Essa estrutura permitiu coordenar diferentes funções do *firmware* durante as coletas, sem divisão explícita de tarefas entre os núcleos do ESP32.

Quadro 14 – Síntese das etapas de operação dos atuadores ao longo do ciclo de coleta

Etapas do ciclo	Critério principal	Função no ciclo
Estado inicial	Sistema parado	Mantém o sistema em espera.
Limpeza	Tempo e pressão	Prepara a câmara com ar ambiente.
Expurgo A	Pressão	Remove o conteúdo inicial da câmara.
Pré-aquecimento	Tempo	Aquece os sensores MQ.
Coleta	Tempo e pressão	Admite biogás e ar ambiente.
Análise	Tempo	Mantém o biogás diluído na câmara..
Expurgo B	Pressão	Remove o conteúdo da câmara.
Estabilização	Tempo curto	Prepara o próximo ciclo.

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: A operação ilustrativa completa, com o estado individual de válvulas, mini bomba de ar e aquecimento, consta no Apêndice B.

3.2.2 Inicialização do sistema

Assim que o *firmware* é iniciado, o ESP32 configura os pinos associados ao aquecimento dos sensores MQ, ao multiplexador CD74HC4067 e aos atuadores, como válvulas e mini bomba de ar. Esses sinais são colocados inicialmente em nível baixo, mantendo os componentes desligados até que o programa autorize seu acionamento. Esse cuidado evita ativações indesejadas logo ao ligar o equipamento. Na sequência, o *firmware* inicializa recursos básicos do ESP32, incluindo a comunicação serial, o temporizador de segurança do sistema e o barramento I²C. O barramento I²C opera com frequência de 100 kHz. Após essa preparação inicial, o *firmware* inicializa o *display* TFT com *touchscreen* e realiza a inicialização do cartão SD. Como o cartão SD compartilha o barramento SPI com o *display*, o sistema executa tentativas de inicialização em frequências diferentes, primeiro em 4 MHz e depois em 2 MHz, caso a primeira tentativa não seja bem-sucedida.

Em seguida, são inicializados os pinos de seleção do multiplexador e os módulos de leitura conectados ao barramento I²C. O sistema verifica a comunicação com o BME280, o ENS160 e o ADS1115 e aplica as configurações iniciais necessárias para as coletas. O BME280 opera em modo normal, com filtro interno desativado; o ENS160 é colocado em modo padrão de operação; e o ADS1115 recebe a configuração de ganho adotada no projeto. Essa configuração corresponde a uma faixa de leitura de $\pm 4,096$ V no conversor, com resolução de 0,125 μ V por passo.

O sensor AHT21, integrado ao módulo ENS160, é verificado nas rotinas associadas ao monitoramento e diagnóstico do sistema. Dessa forma, a inicialização geral prepara os principais módulos de aquisição, enquanto as telas e rotinas específicas atualizam os estados de funcionamento dos sensores durante a operação. O *firmware* também inicializa as rotinas associadas ao aquecimento dos sensores MQ e aos atuadores. Após a configuração dos pinos,

as válvulas, a mini bomba de ar e o controle do aquecimento permanecem desligados até o início de uma etapa operacional definida pelo ciclo de coleta. Essa organização mantém o sistema em condição segura após a energização.

Durante a inicialização, o sistema ainda carrega parâmetros salvos anteriormente na memória *flash* do ESP32. Entre esses dados estão as credenciais de *Wi-Fi*, o estado de conexão salvo, os tempos e pressões definidos para as etapas de coleta e o número de ciclos configurado pelo usuário. Em seguida, o *firmware* tenta iniciar a conexão *Wi-Fi* previamente salva de forma não bloqueante, ou seja, sem deixar o sistema parado aguardando a conexão ser concluída. Dessa forma, o e-Nose prossegue para a tela de *login* e mantém a interface local disponível, enquanto a conexão é verificada pelas rotinas do *firmware*.

Ao final da inicialização, o *display* apresenta a tela de *login* e o sistema permanece aguardando a interação do usuário. Assim, a etapa de inicialização prepara os módulos de aquisição, armazenamento, comunicação e controle, além de recuperar as configurações necessárias para que o e-Nose possa iniciar a operação de forma organizada. O detalhamento das telas exibidas no *display* e da navegação entre elas é apresentado na Seção 3.2.4.

3.2.3 Aquisição e tratamento das leituras dos sensores

A aquisição de dados do e-Nose foi organizada para reunir as leituras dos sensores MQ, dos sensores complementares e das variáveis internas da câmara. Os oito sensores MQ foram conectados ao multiplexador CD74HC4067, cuja saída comum foi lida pelo conversor analógico-digital ADS1115. Durante a operação, o ESP32 seleciona um canal por vez no multiplexador e, após uma espera de 10 ms, realiza a leitura correspondente. Esse intervalo foi adotado para permitir uma pequena acomodação do sinal após a troca de canal do multiplexador. Como os sensores MQ apresentam resposta relativamente lenta às mudanças da mistura gasosa, quando comparados ao tempo de leitura do conversor, não foi aplicado filtro digital específico nessa etapa; as leituras foram registradas em sua forma bruta para posterior comparação entre as etapas do ciclo. Em cada instante de aquisição, foi realizada uma leitura por canal selecionado. Não foi implementada repetição automática da conversão em caso de falha ou leitura discrepante. Como melhoria futura, recomenda-se incluir uma rotina de dupla leitura ou média de leituras consecutivas por canal, descartando a primeira leitura após a troca do multiplexador quando necessário, para reduzir possíveis efeitos de acomodação e aumentar a robustez da aquisição.

Como os sinais dos sensores MQ passam por divisores de tensão antes de serem encaminhados ao CD74HC4067 e ao ADS1115, a tensão lida pelo sistema é menor do que a

tensão existente antes dessa redução. Por isso, o *firmware* aplica um fator de correção de aproximadamente 1.67, utilizado para estimar o valor do sinal antes da redução aplicada pelo divisor. Durante as coletas, esse valor corrigido é utilizado como leitura principal dos sensores MQ, sendo exibido na tela de monitoramento e registrado junto aos demais dados do ciclo. A resistência R_s , correspondente à resistência elétrica do sensor MQ na condição de leitura, é calculada nas rotinas de calibração operacional. Nessa etapa, R_s é usada para determinar R_0 , que representa a resistência de referência obtida em ar. Esses valores são utilizados para caracterizar e ajustar a operação dos sensores MQ, mas a tela de monitoramento e os registros das coletas utilizam como leitura principal a tensão corrigida dos sensores.

Além dos sensores MQ, o sistema registra leituras do BME280 e do módulo ENS160+AHT21, incluindo pressão interna da câmara, temperatura, umidade relativa, dióxido de carbono equivalente e compostos orgânicos voláteis totais. Essas variáveis são registradas junto às leituras dos sensores MQ para contextualizar as condições de operação durante as coletas. No *firmware* utilizado, esses dados são armazenados como informações complementares, sem aplicação de compensação matemática automática sobre os sinais dos sensores MQ. Cada registro gerado durante a operação reúne as leituras dos sensores, as variáveis complementares e informações do ciclo em execução, como data, hora, etapa operacional e estado dos atuadores. A forma de organização desses registros para armazenamento local e envio remoto é apresentada na Seção 3.2.6.

3.2.4 Interface de usuário e navegação pelo *display touchscreen*

A interface de usuário do e-Nose é organizada para permitir a configuração, o acompanhamento e o acionamento das principais rotinas do sistema por meio do *display* TFT com *touchscreen*. Por essa interface, o usuário acessa as telas de *login*, menu principal, ajustes de coleta, monitoramento das coletas, diagnóstico, calibração operacional dos sensores MQ, gerenciamento dos arquivos do cartão SD e configuração da rede *Wi-Fi*. As interfaces gráficas foram inicialmente planejadas e simuladas no *software* PICSimLab, um simulador de placas de desenvolvimento utilizado para simulação de sistemas com microcontroladores, antes de serem carregadas no *display* físico (Lopes, 2024).

Essa etapa permitiu definir a aparência das telas, a posição dos botões e a organização das informações de forma mais rápida do que gravar o código repetidamente no ESP32 a cada alteração visual. As Figuras 20 a 23 apresentam capturas de tela obtidas no simulador, representando a versão planejada das interfaces. Após essa etapa, as telas foram testadas no *display* físico, com ajustes nas funções de *touchscreen* e na navegação entre as interfaces. Os

fluxos completos de navegação, representados por diagramas Mermaid, são apresentados no Apêndice C.

3.2.4.1 Tela de Login

A tela de *login*, apresentada na Figura 20a, é a primeira interface exibida ao usuário e tem a função de restringir o acesso às telas de operação do e-Nose. Essa tela foi implementada como uma medida de segurança operacional, evitando que configurações, comandos de coleta, diagnóstico ou calibração operacional sejam acessados sem a inserção da senha. Nessa tela, o *firmware* permanece em espera pela senha, exibindo o título “SENHA”, um campo para digitação e um teclado numérico virtual.

O usuário insere a senha pelo *touchscreen*, podendo apagar os dígitos digitados ou confirmar a entrada pelo botão SEGUIR, quando esse botão é pressionado, o *firmware* verifica a senha informada. Caso o valor digitado esteja correto, o sistema libera o acesso e avança para a próxima tela. Caso a senha esteja incorreta, a mensagem “Senha Incorreta!!!” é exibida durante aproximadamente 2 segundos. Após esse intervalo, o campo de senha é apagado e a tela retorna ao estado inicial, permitindo nova tentativa. Nessa versão do *firmware*, não há limite de tentativas de digitação.

3.2.4.2 Tela de Menu Principal

A tela de menu principal, apresentada na Figura 20b, funciona como o ponto central de navegação do e-Nose. Ela é exibida após o *login* quando o sistema já possui uma conexão *Wi-Fi* configurada ou quando o usuário opta por continuar sem configurar a rede naquele momento. Caso o e-Nose ainda não esteja conectado ao *Wi-Fi* após o *login*, o *firmware* direciona o usuário para a tela de ajustes de rede, onde é possível selecionar uma rede disponível, configurar a conexão ou pular essa etapa. A interface reúne os botões de acesso às principais telas do sistema, incluindo ajustes de coletas, dados do cartão SD, ajustes de *Wi-Fi*, monitoramento, diagnóstico e ajustes dos sensores MQ. Por meio do *touchscreen*, o usuário escolhe a tela desejada e o *firmware* direciona o sistema para a interface correspondente.

O botão BLOQUEAR TELA retorna a interface para a tela de *login* e restringe novamente o acesso às demais telas. Essa ação não interrompe as rotinas em execução no *firmware*; assim, um ciclo já iniciado continua sendo executado em segundo plano, mesmo que a interface esteja bloqueada. Essa função foi incluída como medida de segurança operacional, permitindo bloquear o acesso ao sistema durante uma coleta e impedir que outra pessoa altere

configurações ou cancele a operação sem inserir a senha. Já o botão de TELA EXTERNA, foi usada para direcionar o usuário para uma interface *WEB* das telas de Ajustes de Coletas e Monitoramento que serão abordados a seguir.

3.2.4.3 Tela de Ajustes de Coletas

A tela de ajustes de coletas, apresentada na Figura 20c, foi desenvolvida para permitir que o usuário configure os parâmetros de operação do e-Nose antes do início das coletas. Sua função é tornar o ciclo de operação ajustável pela própria interface, sem necessidade de alterar o código ou regravar o *firmware* no ESP32. No contexto do sistema, cada ciclo representa uma operação automatizada de coleta, na qual o *firmware* percorre sequencialmente as etapas de limpeza, expurgo A, pré-aquecimento, coleta, análise e expurgo B. Essa organização já foi sintetizada na Seção 3.2.1, que apresenta a visão geral das etapas operacionais do *firmware*.

Essa tela é uma das interfaces centrais do sistema, pois define os tempos, as pressões e a quantidade de ciclos que serão executados durante as coletas de biogás. A quantidade de ciclos corresponde ao número de repetições automáticas da sequência de operação, permitindo que o e-Nose realize coletas sucessivas conforme a configuração definida pelo usuário. A seleção da etapa é feita pela lateral da interface e, ao tocar em uma delas, o sistema carrega os valores previamente salvos para edição. A definição dos parâmetros por tempo e pressão é detalhada posteriormente nas Seções 3.3.5 e 3.3.6, que tratam, respectivamente, dos testes preliminares e estimativa dos volumes admitidos e das condições gerais e parametrização operacional dos experimentos.

A interface possui seletores para ajuste de minutos, segundos, pressão e quantidade de ciclos. Quando o usuário altera esses valores, o *firmware* atualiza os campos exibidos e recalcula informações associadas ao processo, como o tempo total configurado. Para evitar leituras duplicadas causadas por toques muito rápidos, é aplicado um intervalo de proteção de 150 milissegundos entre comandos consecutivos no *touchscreen*. Os parâmetros configurados são salvos na memória do ESP32, permitindo que tempos, pressões e número de ciclos sejam mantidos mesmo após o desligamento ou reinício do equipamento. Ao tocar em VOLTAR, o *firmware* retorna ao menu principal sem iniciar a operação. Ao tocar em INICIAR, o sistema passa para a tela de monitoramento e inicia a sequência automática de coleta, preparando a interface, verificando o cartão SD, criando o arquivo de registro e acionando a rotina de operação do ciclo.

3.2.4.4 Tela de Monitoramento de Coletas

A tela de monitoramento de coletas, apresentada nas Figuras 20d a 20f, foi desenvolvida como continuação operacional da tela de ajustes de coletas. Após a configuração dos parâmetros e o início do ciclo, essa interface permite acompanhar a execução da coleta diretamente no e-Nose, sem depender da consulta posterior dos arquivos no computador. Sua função é mostrar, durante a operação, a etapa atual do ciclo, o tempo restante, o estado dos atuadores e as leituras dos sensores expostos ao biogás na câmara. Com isso, o usuário pode verificar visualmente se os sensores estão conectados e sendo lidos, se as válvulas, a mini bomba de ar e o aquecimento dos sensores MQ estão sendo acionados conforme a etapa em execução, além de identificar mais rapidamente possíveis falhas de operação. No topo da tela, o usuário pode alternar entre três subtelas: Etapas, Operação 1 e Operação 2. Essa tela é vinculada ao ciclo configurado na tela de ajustes de coletas, não sendo usada para os procedimentos independentes de diagnóstico ou de ajustes dos sensores MQ.

Na subtelas Etapas, apresentada na Figura 20d, o *firmware* mostra a etapa em execução, o tempo restante, o ciclo atual e a quantidade total de ciclos programada. Também são exibidos os estados da mini bomba de ar e das válvulas, além dos indicadores de funcionamento de módulos como Google Sheets, quando há conexão *Wi-Fi*, cartão SD, MUX4067, ADS1115, BME280 e ENS160. A subtelas Operação 1, apresentada na Figura 20e, exibe as leituras dos sensores complementares e das condições internas da câmara, incluindo pressão, temperatura, umidade relativa, dióxido de carbono equivalente e compostos orgânicos voláteis totais. A subtelas Operação 2, apresentada na Figura 20f, exibe as leituras dos sensores MQ. Para cada sensor, são organizados os valores mínimo, máximo e atual.

Os valores mínimo e máximo são atualizados conforme novas leituras ficam abaixo ou acima dos registros anteriores, enquanto o valor atual corresponde à leitura mais recente disponível. A atualização visual ocorre em intervalos curtos, mas as leituras dos sensores são disponibilizadas conforme a rotina escalonada de aquisição, com registros completos a cada aproximadamente 1 segundo. Na parte inferior da tela ficam os botões INICIAR, PARAR e VOLTAR. O botão INICIAR aciona a sequência automática de operação quando os parâmetros já foram configurados. O botão PARAR interrompe a operação automática, força o salvamento dos registros ainda pendentes e retorna o sistema ao estado inativo. O botão VOLTAR retorna ao menu principal quando a operação permite essa ação.

Figura 20 – Interfaces gráficas do e-Nose – Parte 1: a) tela de *login*; b) menu principal; c) ajustes de coleta; d) monitoramento – subtela Etapas; e) monitoramento – subtela Operação 1; f) monitoramento – subtela Operação 2



Fonte: Elaborada pela autora (2026), à partir de capturas obtidas no PICSIMLab

3.2.4.5 Tela de Ajustes dos sensores MQ

A tela de ajustes dos sensores MQ foi desenvolvida para configurar e acompanhar procedimentos necessários ao preparo operacional desses sensores, especialmente quando são novos ou ficam longo período sem uso. Por isso, a interface permite selecionar aquecimento prolongado, definir o tempo de pré-aquecimento e configurar a quantidade de amostras usadas na obtenção de R_0 , que corresponde à resistência de referência do sensor em ar. Esse valor é importante porque, conforme indicado nos *datasheets* dos sensores MQ, a resposta desses sensores pode ser analisada pela relação R_s/R_0 , em que R_s representa a resistência do sensor na condição de leitura. Assim, o R_0 salvo pelo sistema pode ser usado posteriormente no tratamento dos dados para normalizar a resposta individual de cada sensor, sem caracterizar

uma calibração quantitativa formal. A tela é dividida em duas subtelas principais: Configuração, apresentada na Figura 21a, e Resultados, apresentada na Figura 21b.

Na subtelas Configuração, o usuário define como o procedimento será executado. É possível ativar ou desativar o aquecimento dos sensores, ativar a calibração operacional, escolher a duração do aquecimento em 24 ou 48 horas, ajustar o tempo de pré-aquecimento e definir a quantidade de amostras por sensor. As opções de 24 e 48 horas foram incluídas com base nos *datasheets* dos sensores MQ, que recomendam aquecimento prolongado especialmente quando o sensor é novo ou ficou longo período sem uso. Já a subtelas Resultados apresenta os valores de R_0 obtidos após a calibração operacional, além de informações usadas para acompanhar as condições do sistema durante o procedimento.

Na parte inferior da tela ficam os botões INICIAR, CANCELAR e VOLTAR. Ao iniciar o procedimento, o *firmware* reinicia os dados temporários da calibração operacional e verifica se os módulos necessários estão respondendo, como BME280 e ADS1115. Também são acompanhadas as condições de temperatura e umidade relativa antes do avanço para as etapas seguintes, pois os *datasheets* dos sensores MQ indicam faixas recomendadas de operação e essas variáveis podem influenciar a resposta dos sensores, conforme discutido na Seção 2.4. Essa verificação evita que o procedimento seja iniciado sem que os módulos principais e as condições internas da câmara estejam sendo acompanhados adequadamente.

Após essa verificação, o *firmware* executa o modo definido pelo usuário, mantendo o aquecimento pelo período selecionado e, quando aplicável, iniciando a calibração operacional dos sensores MQ. Durante esse processo, as leituras são realizadas de forma sequencial, seguindo a mesma estrutura de aquisição descrita na Seção 3.2.3. Ao final do procedimento, os valores de R_0 são salvos na memória do ESP32 e passam a ser exibidos na subtelas Resultados, permitindo seu uso posterior sem necessidade de repetir a calibração a cada reinicialização do sistema. O botão CANCELAR interrompe o procedimento em andamento e leva o sistema ao estado cancelado. O botão VOLTAR retorna para a tela anterior ou para o menu, reiniciando os estados necessários para evitar que algum procedimento permaneça ativo indevidamente.

3.2.4.6 Tela de Diagnóstico e-Nose

A tela de diagnóstico do e-Nose foi desenvolvida para permitir verificações manuais do sistema sem iniciar uma coleta completa. Sua finalidade é possibilitar a limpeza da câmara de sensores de forma independente do ciclo configurado na tela de ajustes de coletas, além de permitir a leitura dos sensores apenas para acompanhamento da resposta dos módulos. Nesse modo, as leituras são exibidas na interface, mas não são registradas no cartão SD nem enviadas

para a planilha *on-line*, pois a tela tem função de verificação operacional, e não de coleta de dados. A interface possui duas abas principais: Sensores, apresentada na Figura 21c, e Monitoramento, apresentada na Figura 21d.

Na aba Sensores, o usuário configura o tempo do procedimento, escolhe o modo de operação por meio das chaves Leitura ou Limpeza e inicia a rotina desejada. A aba Monitoramento apresenta os valores lidos durante o diagnóstico, incluindo informações dos sensores MQ, BME280 e ENS160+AHT21. Enquanto o diagnóstico não está em execução, o usuário pode alternar entre as abas, ajustar o tempo e escolher o modo de operação. O *firmware* só permite iniciar o diagnóstico quando um modo foi selecionado e quando o tempo configurado é maior que zero. Ao tocar em INICIAR, o sistema inicializa os pinos das válvulas e da mini bomba de ar, verifica a comunicação com os sensores e módulos de leitura e muda automaticamente para a aba de monitoramento. Quando o modo Limpeza é selecionado, o *firmware* executa uma sequência automática com as válvulas e a mini bomba de ar antes da etapa de leitura. Nessa rotina, as válvulas são acionadas em ordem temporizada e, em seguida, a mini bomba de ar é ligada por alguns segundos. Após essa sequência, o sistema segue para o pré-aquecimento e para o monitoramento.

Na parte inferior da tela ficam os botões CANCELAR, INICIAR e VOLTAR. O botão CANCELAR interrompe o diagnóstico em andamento, desliga o aquecimento dos sensores MQ, desativa válvulas e mini bomba de ar e retorna o sistema ao estado parado. O botão VOLTAR só permite retornar ao menu principal quando não há diagnóstico em execução, evitando que o usuário saia da tela enquanto alguma rotina ainda está ativa. Durante todo o procedimento, o *firmware* atualiza o *status* da tela, o tempo restante e os valores medidos. Quando o tempo configurado termina, o diagnóstico é marcado como concluído, a tela é redesenhada e os comandos voltam a ficar disponíveis.

3.2.4.7 Tela de Gerenciamento de Dados SD Card

A tela de gerenciamento de dados no cartão SD, apresentada nas Figuras 21e e 21f, foi desenvolvida para permitir a conferência dos arquivos de coleta diretamente pelo e-Nose, sem necessidade de remover o cartão SD e conectá-lo a um computador. Com essa tela, o usuário consegue verificar se os arquivos estão sendo criados e salvos corretamente no armazenamento local, além de consultar informações básicas de cada registro disponível no cartão. Ao entrar nessa tela, o *firmware* acessa a pasta principal do cartão SD, carrega os arquivos disponíveis e organiza a listagem para exibição. Como o espaço da tela é limitado, os arquivos são

apresentados em páginas, com até cinco itens por página. Para cada arquivo, são exibidos o nome, o tamanho e um ícone de lixeira.

O botão ATUALIZAR permite realizar uma nova leitura do cartão SD, útil para conferir alterações na lista de arquivos, enquanto os botões ANT e PROX permitem navegar entre as páginas. O botão VOLTAR retorna ao menu principal. Quando o usuário toca no ícone de lixeira de um arquivo, o *firmware* exibe uma janela de confirmação antes da exclusão. Se o usuário escolher SIM, o arquivo selecionado é removido do cartão SD; se escolher NÃO, a exclusão é cancelada e a tela retorna à listagem. Esse cuidado reduz o risco de apagar registros por toque acidental, mantendo o gerenciamento dos dados mais seguro durante o uso do equipamento.

Figura 21 – Interfaces gráficas do e-Nose – Parte 2: a) ajustes dos sensores MQ – configuração; b) ajustes dos sensores MQ – resultados; c) diagnóstico e-Nose – configuração; d) diagnóstico e-Nose – resultados; e) gerenciamento de dados no cartão SD – listagem de arquivos; f) gerenciamento de dados no cartão SD – exclusão de arquivos

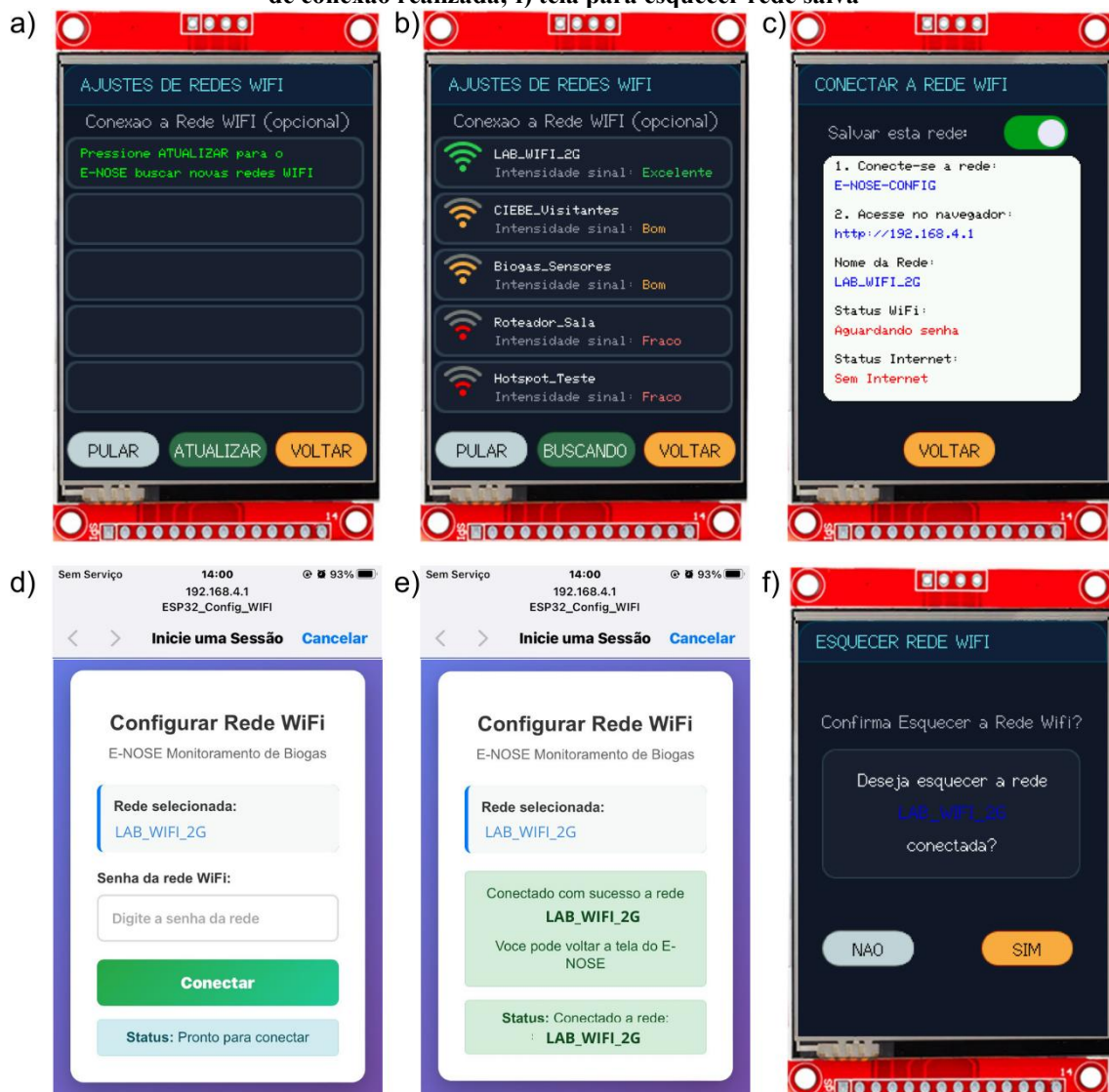


Fonte: Elaborada pela autora (2026), a partir de capturas obtidas no PICSimLab

3.2.4.8 Tela de Configuração de Rede *Wi-Fi*

A tela de configuração de rede *Wi-Fi*, apresentada na Figura 22, foi desenvolvida para permitir que o usuário conecte o e-Nose a uma rede sem alterar o código. A interface organiza esse processo em etapas: busca de redes disponíveis, seleção da rede desejada, configuração da senha por meio de uma página *web* local e, quando necessário, remoção de uma rede previamente salva.

Figura 22 – Interfaces gráficas do e-Nose – Parte 3: a) tela inicial de ajustes de rede; b) lista de redes encontradas; c) informações da rede selecionada; d) página *web* para digitação da senha; e) confirmação de conexão realizada; f) tela para esquecer rede salva



Fonte: Elaborada pela autora (2026), a partir de capturas obtidas no PICSimLab

A subtela de seleção de rede, apresentada nas Figuras 22a e 22b, exibe até cinco redes *Wi-Fi* por vez, cada uma em um painel próprio. As redes encontradas são organizadas de acordo com a intensidade do sinal, da mais forte para a mais fraca, facilitando a escolha de uma conexão

com melhor disponibilidade no local de uso. O botão ATUALIZAR inicia uma nova busca sem interromper a interface; assim, o *firmware* continua atualizando o sistema enquanto aguarda o resultado do escaneamento. Ao final da busca, as redes encontradas são reorganizadas e exibidas novamente.

Quando a tela é aberta automaticamente após o *login*, o botão PULAR permite continuar usando o e-Nose sem configurar a conexão *Wi-Fi* naquele momento. Quando a tela é acessada pelo menu principal e já existe uma rede conectada ou salva, esse comando é substituído pela opção ESQUECER, usada para apagar as credenciais armazenadas e desconectar o sistema da rede atual. As redes exibidas na subtela de seleção funcionam como botões independentes. Assim, quando o usuário toca sobre uma das redes listadas, o *firmware* registra o nome escolhido e inicia o modo de configuração local.

A subtela de conexão, apresentada na Figura 22c, mostra o nome da rede selecionada, o endereço de acesso pelo navegador e o estado da tentativa de conexão. Em seguida, o ESP32 cria temporariamente uma rede local em modo ponto de acesso, permitindo que o usuário informe a senha por meio de um celular ou computador, conforme ilustrado nas Figuras 22d e 22e. Essa solução foi adotada porque a inserção de senhas *Wi-Fi* diretamente no *display* exigiria um teclado alfanumérico completo, o que tornaria a interface mais complexa.

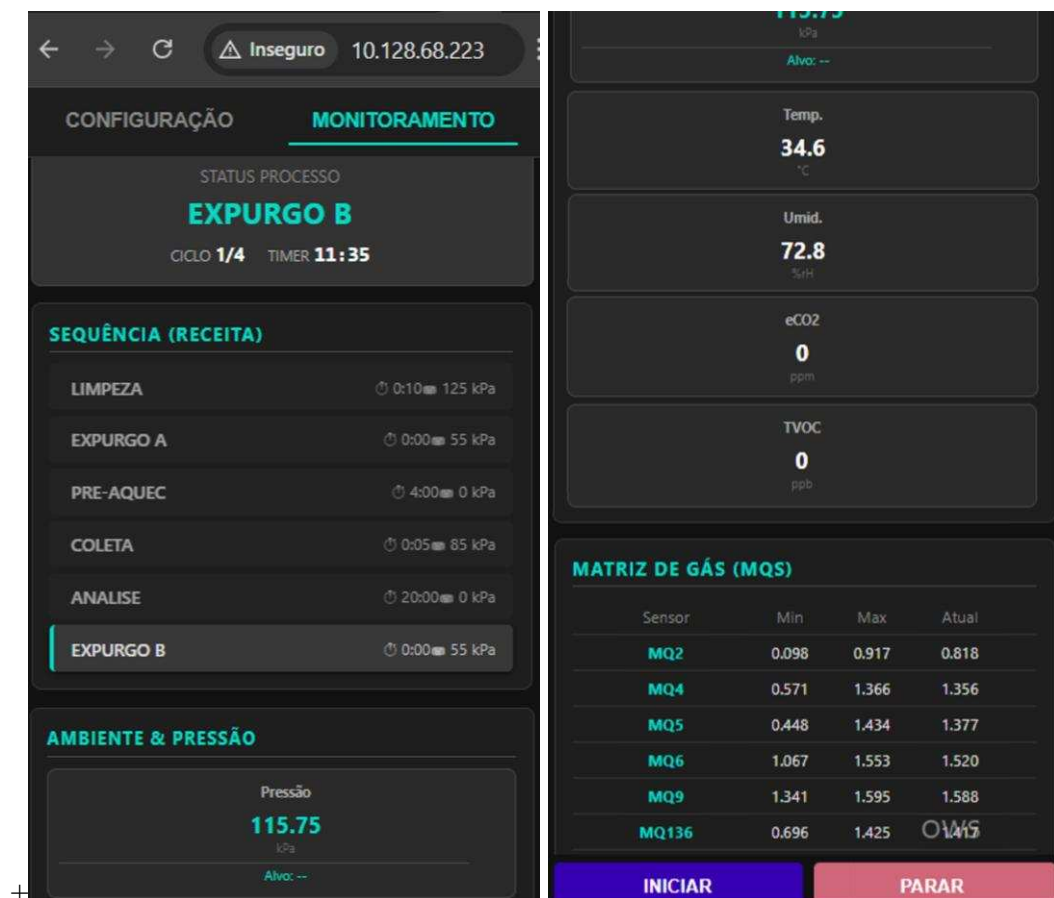
Após o envio da senha pela página *web*, o *firmware* testa a conexão e, se ela for bem-sucedida, pode salvar as credenciais na memória do ESP32 para reconexões futuras. Além das etapas de seleção e conexão, a tela apresenta o botão VOLTAR, usado para retornar à interface anterior quando o estado atual da configuração permite essa ação. Durante o uso dessa tela, o *firmware* também verifica a condição da rede *Wi-Fi* e o acesso à *Internet*, atualizando os ícones de *status* quando a conexão é estabelecida.

3.2.4.9 Interface *web* alternativa

Além das telas exibidas no *display*, o *firmware* também inclui uma interface *web* embarcada no ESP32, apresentada na Figura 23. Essa interface foi desenvolvida como alternativa após a ocorrência de um problema técnico no funcionamento do *display*, associado ao compartilhamento do barramento SPI com o módulo de cartão SD. A falha observada, seus impactos na operação do protótipo e a necessidade de uma forma alternativa de interação com o sistema são discutidos com maior detalhe no Capítulo 4. Com isso, tornou-se possível manter uma forma adicional de acompanhamento e interação com o e-Nose por meio de um celular ou computador conectado ao sistema.

A interface *web* foi estruturada com funcionamento equivalente às telas de ajustes de coletas e de monitoramento de coletas, descritas nas Seções 3.2.4.3 e 3.2.4.4. Assim, ela permite configurar parâmetros, iniciar ou interromper a operação e acompanhar as leituras principais durante a coleta. As demais telas do *display* não foram reproduzidas nessa interface, pois a página *web* foi desenvolvida como alternativa operacional voltada às funções essenciais de configuração e acompanhamento da coleta.

Figura 23 – Interface *web* alternativa para acompanhamento e comando do e-Nose



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

3.2.5 Armazenamento de dados e comunicação em rede

O e-Nose armazena os dados localmente em um cartão SD, utilizando arquivos no formato CSV. Esse formato foi adotado por ser simples de organizar, compatível com *softwares* de planilha e adequado para posterior análise dos registros. Durante a operação, os dados salvos incluem data, hora, número do ciclo, etapa em execução, estado dos atuadores, leituras dos sensores MQ, variáveis registradas pelo BME280 e pelo AHT21, além dos indicadores fornecidos pelo ENS160.

A estrutura dos campos registrados é apresentada na Tabela 1. Ela reúne os dados de identificação da coleta, os estados dos atuadores e as variáveis medidas ou registradas pelos sensores. Os campos Heater, Bomba, V1, V2 e V3 indicam, respectivamente, o estado do aquecimento dos sensores MQ, da mini bomba de ar e das três válvulas. Já os campos Pres_BME, Umid_BME e Temp_BME correspondem às leituras do BME280; Umid_ENS e Temp_ENS correspondem às leituras do AHT21; e eCO2 e TVOC correspondem aos indicadores fornecidos pelo ENS160. Os campos MQ2, MQ4, MQ5, MQ6, MQ9, MQ136, MQ137 e MQ138 correspondem às leituras dos sensores MQ.

Tabela 1 - Organização dos dados salvos no Google Drive e no cartão SD

Data	Hora	Ciclo	Etapas	Heater	Mini Bomba de ar	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3
20/01/2026	13:46:55	1	LIMPEZA	0	0	0	0	1
20/01/2026	13:46:56	1	LIMPEZA	0	1	0	0	1
20/01/2026	13:46:57	1	LIMPEZA	0	1	0	0	1
20/01/2026	13:46:58	1	LIMPEZA	0	1	0	0	1
20/01/2026	13:46:59	1	LIMPEZA	0	1	0	0	1

Pressão BME280 (kPa)	Umidade BME280 (%UR)	Temperatura BME280 (°C)	Umidade AHT21 (%UR)	Temperatura AHT21 (°C)	eCO2	TVOC
91,58	73,82	25,28	66,37	26,67	431	38
91,58	73,66	25,29	66,36	26,69	419	32
91,58	73,66	25,29	66,36	26,69	419	32
91,78	73,80	25,30	66,26	26,70	426	35
91,78	73,79	25,30	66,14	26,70	428	36

MQ 2	MQ 4	MQ 5	MQ 6	MQ 9	MQ 136	MQ 137	MQ 138
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A coleta é realizada com resolução temporal aproximada de 1 Hz, com geração de um registro completo a cada 1 segundo aproximadamente. Esse intervalo foi adotado como compromisso entre o acompanhamento das variações dos sensores e a estabilidade operacional do sistema. Como os sensores MQ apresentam resposta ao longo do tempo, durante a exposição à amostra, essa taxa permite acompanhar a tendência dos sinais ao longo das etapas do ciclo sem gerar volume excessivo de dados, acessos muito frequentes ao cartão SD ou transmissões remotas em excesso.

O intervalo de registro é controlado pelo *firmware* sem paralisar o funcionamento do sistema. Enquanto aguarda o momento da próxima leitura, o ESP32 continua executando outras rotinas, como atualização da interface, controle das etapas de operação e verificação da conexão

Wi-Fi. Para reduzir o número de acessos ao cartão SD, os registros não são gravados individualmente a cada leitura; eles são armazenados temporariamente em um *buffer* na memória do ESP32 e gravados em bloco quando esse *buffer* atinge 10 registros. Dessa forma, a escrita no cartão ocorre aproximadamente a cada 10 segundos.

O *firmware* também antecipa a gravação em situações específicas, como no encerramento de um ciclo ou quando a operação é interrompida pelo usuário, reduzindo o risco de perda de informações ainda pendentes. Ainda assim, uma perda abrupta de alimentação antes da gravação do *buffer* pode afetar os registros temporariamente armazenados. Por isso, a gravação em bloco foi adotada como uma estratégia de equilíbrio: reduz acessos repetidos ao cartão SD e melhora a estabilidade da operação, mas não elimina completamente a possibilidade de perda em situações de desligamento inesperado.

Como o cartão SD e o *display* TFT compartilham o barramento SPI, o *firmware* utiliza sinalizadores de controle para coordenar o acesso aos periféricos durante a gravação dos dados. Entre esses sinalizadores, há um indicador que informa quando o cartão SD está em processo de escrita e outro associado à existência de registros pendentes no *buffer* de memória. Quando a escrita no cartão está ativa, a atualização gráfica é suspensa temporariamente, sem um tempo fixo predefinido, permanecendo pausada apenas enquanto a gravação está em andamento. Após a finalização da escrita, a interface volta a ser atualizada no próximo ciclo visual, programado para intervalos de aproximadamente 50 milissegundos.

Além do armazenamento local, os dados podem ser enviados remotamente por meio de requisições HTTP POST para um endpoint desenvolvido no *Google Apps Script*. Para esse envio, o ESP32 utiliza a mesma lógica de agrupamento adotada na gravação local: os registros são reunidos em blocos de 10 linhas antes da transmissão, desde que haja conexão *Wi-Fi* disponível. As linhas enviadas ao *Google Apps Script* têm a mesma estrutura dos registros salvos no cartão SD, pois são geradas a partir do mesmo conjunto de campos apresentado na Tabela 1.

No *Google Apps Script*, os blocos recebidos permanecem armazenados temporariamente enquanto a operação de coleta está ativa. As mensagens de início e encerramento enviadas pelo *firmware* delimitam cada operação completa, permitindo que, ao final da sequência programada, o *script* gere um único arquivo CSV em uma pasta específica do Google Drive. Assim, quando uma coleta é configurada com mais de um ciclo, os registros são organizados no mesmo arquivo, em linhas sucessivas, sendo diferenciados pela coluna Ciclo. Com essa organização, o *firmware* passa a contar com duas formas de registro dos dados: local e remota. As limitações observadas durante o uso dessas rotas são discutidas no Capítulo

4, especialmente quanto à estabilidade do armazenamento e aos impactos sobre a obtenção dos dados das coletas.

3.2.6 Lógica de controle do ciclo de coleta

A lógica de controle do ciclo de coleta é organizada por meio de uma máquina de estados, responsável por comandar automaticamente as válvulas, a mini bomba de ar e o aquecimento dos sensores MQ durante a operação do e-Nose. Essa estrutura define a sequência operacional do sistema, composta por:



estabilização e finalização do ciclo, conforme sintetizado na Seção 3.2.1. Em cada ciclo, o sistema executa automaticamente as seguintes etapas: Devido à extensão do diagrama Mermaid dessa máquina de estados, sua representação foi inserida no Apêndice C, no item h) Lógica de acionamento dos atuadores – Partes 1 e 2. Assim, esta seção apresenta a explicação textual do funcionamento implementado no *firmware*.

Quando o usuário toca em INICIAR na tela de ajustes de coletas ou na tela de monitoramento, o *firmware* inicia a sequência de operação. Nesse momento, a interface é reiniciada para o início da coleta, são realizadas leituras iniciais dos sensores e o sistema prepara as rotinas de registro dos dados, já descritas na Seção 3.2.5. Depois disso, o processo passa para o estado ativo, e a máquina de estados começa a executar as etapas programadas.

O avanço entre as etapas ocorre a partir dos tempos definidos pelo usuário e da pressão interna da câmara medida pelo BME280. Em algumas fases, o sistema permanece em determinada condição durante o período configurado; em outras, a mudança de etapa depende da pressão atingir o valor de referência definido nos ajustes de coleta. Dessa forma, o *firmware* não depende apenas de temporizações fixas, mas também considera o comportamento da câmara durante a entrada do biogás, a admissão de ar ambiente e o expurgo. A definição dos parâmetros de tempo, pressão e admissão de ar ambiente é detalhada nas Seções 3.3.5 e 3.3.6.

Para tornar o controle por pressão mais estável, o *firmware* aplica uma proteção temporária após mudanças no estado das válvulas, da mini bomba de ar ou do aquecimento dos sensores MQ. Sempre que algum desses atuadores é acionado ou desligado, o sistema aguarda 1.5 segundo antes de considerar uma nova leitura de pressão do BME280 para decidir o avanço da máquina de estados. Durante esse intervalo, é mantida como referência a última pressão

válida registrada. Essa estratégia reduz a chance de oscilações momentâneas, associadas ao chaveamento dos atuadores, serem interpretadas como condição real de avanço entre etapas.

Após o estado inicial, a máquina de estados executa a sequência de limpeza e expurgo A. Nessa fase, o *firmware* aciona as válvulas e a mini bomba de ar conforme a lógica programada e pode repetir parte da rotina inicial antes do avanço para o pré-aquecimento. Essa repetição ajuda a retirar da câmara o que ainda pode ter permanecido da coleta anterior, antes da entrada de uma nova porção de biogás.

Depois do pré-aquecimento, a máquina de estados avança para a etapa de coleta, na qual ocorre a entrada do biogás na câmara e, posteriormente, a admissão de ar ambiente conforme os critérios definidos para a operação. Em seguida, a sequência passa pelas etapas de análise, expurgo B e estabilização. Ao final, os atuadores são desligados e o ciclo é concluído. Ao término de cada ciclo, o *firmware* força o salvamento dos dados ainda pendentes e verifica se ainda existem ciclos programados. Caso existam, o sistema aguarda uma pausa de aproximadamente 5 minutos antes de reiniciar a sequência. Quando todos os ciclos são concluídos, a operação é finalizada e o sistema retorna ao estado parado.

3.3 Procedimento experimental

Esta seção descreve como os experimentos foram conduzidos com o e-Nose, considerando os reatores utilizados, o método de referência por cromatografia gasosa, as condições gerais das coletas, a parametrização operacional aplicada e a forma de organização dos dados gerados. Diferente das seções anteriores, que abordaram a construção do protótipo e o desenvolvimento do *firmware*, aqui o foco está em como o sistema foi utilizado durante os experimentos.

Neste trabalho, optou-se por não aplicar pré-tratamento ao biogás antes da entrada no e-Nose. Assim, o sistema operou com biogás bruto, permitindo observar as respostas dos sensores em uma condição mais próxima da forma como o biogás era disponibilizado no sistema experimental. Essa escolha também implicou maior influência da umidade e de compostos presentes no próprio biogás, aspectos considerados posteriormente na interpretação dos resultados.

Antes da exposição ao biogás, os sensores MQ permaneceram operando por 24 horas, conforme recomendação indicada nos *datasheets* para o preparo operacional desses sensores. Esse procedimento foi configurado diretamente pela tela “Ajustes dos sensores MQ”, descrita na Seção 3.2.4.5, que permite selecionar o aquecimento prolongado dos sensores antes das coletas. Essa etapa foi adotada para favorecer a estabilização inicial dos sensores e reduzir a

influência de variações associadas ao primeiro acionamento, antes do contato com o biogás produzido nos reatores.

3.3.1 Sistema de digestão anaeróbia e condições operacionais

As coletas de biogás foram realizadas no Laboratório de Processos Biológicos (LPB), vinculado ao Departamento de Hidráulica e Saneamento (SHS) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP), em São Carlos, SP¹. Os experimentos foram conduzidos utilizando dois reatores anaeróbios de leito fixo estruturado para produção de biogás a partir da vinhaça de cana-de-açúcar. Um deles operou em configuração metanogênica de fase única, alimentado com vinhaça bruta, enquanto o outro correspondeu à segunda fase metanogênica de um sistema em duas fases, no qual a vinhaça passava previamente por um reator fermentativo. Ambos possuíam volume útil de 2,5 L e foram mantidos em regime mesofílico, a 30 °C.

Em ambos os reatores, o afluyente, seja vinhaça bruta ou previamente fermentada, foi diluído para atender a uma carga orgânica volumétrica de 20 gDQO L⁻¹ d⁻¹, valor que representa a quantidade de matéria orgânica, expressa em demanda química de oxigênio (DQO) aplicada diariamente por litro de volume útil do reator. O sistema operou com tempo de detenção hidráulica de 24 horas. No reator de fase única, foi realizada dosagem contínua de hidróxido de cálcio no ponto de alimentação, associada ao monitoramento do pH na saída, enquanto o reator de duas fases operou sem alcalinização. Essas condições operacionais foram importantes para gerar biogases associados a configurações biológicas distintas.

A adoção dessas duas configurações teve como objetivo expor o e-Nose a biogases produzidos sob diferentes condições operacionais. Considerando a configuração dos reatores e os dados de cromatografia gasosa discutidos posteriormente na Seção 4.1, o sistema de duas fases apresenta um biogás com maior fração de metano em relação ao reator de fase única. Com isso, foi possível avaliar a resposta dos sensores em condições distintas de produção de biogás.

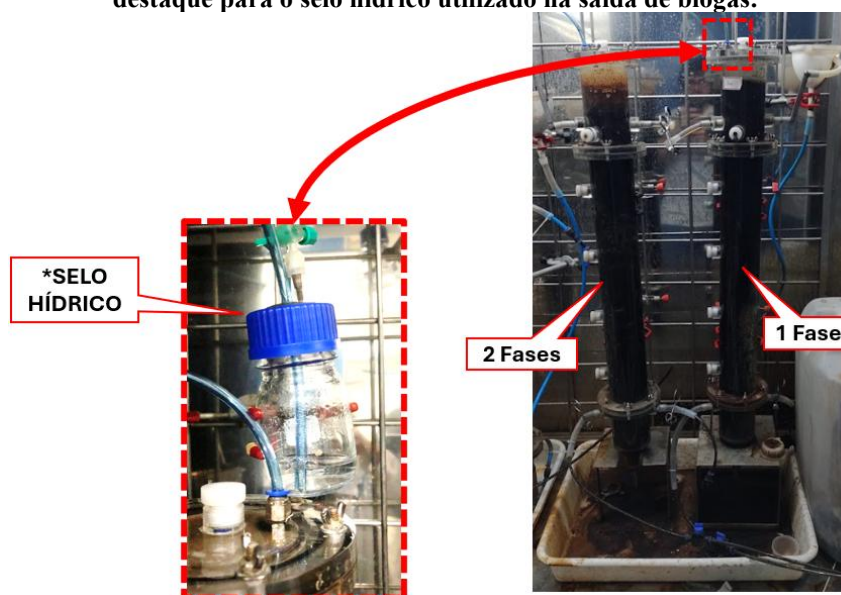
Conforme descrito na Seção 3.1.12, a conexão entre os reatores e o e-Nose foi realizada a partir do selo hídrico, utilizado como ponto intermediário de proteção no percurso do biogás. Nos experimentos, o biogás passava pelo e-Nose e, em seguida, seguia para o sistema de medição de vazão do próprio reator, baseado em tubo em U. Esse sistema de medição fazia

¹ Mais informações sobre o LPB podem ser obtidas em: [Laboratório de Processos Biológicos \(LPB\) | Departamento de Hidráulica e Saneamento - SHS/EESC/USP](#)

parte da montagem dos reatores, mas seus dados não foram utilizados nas análises deste trabalho.

A Figura 24 apresenta os reatores anaeróbios utilizados nos experimentos, com destaque para o selo hídrico instalado na saída de biogás. A conexão física entre o e-Nose e o sistema de digestão anaeróbia foi descrita anteriormente na seção de montagem física e conexão aos reatores. A escolha desse sistema experimental se justifica porque a digestão anaeróbia é sensível a variações operacionais, exigindo acompanhamento das condições do processo para avaliação de estabilidade e desempenho (Nguyen et al., 2015). Nesse contexto, o uso do e-Nose permitiu acompanhar as respostas dos sensores diante de biogases produzidos em diferentes condições operacionais, complementando as análises de referência descritas nas seções seguintes.

Figura 24a – Reatores anaeróbios de leito fixo estruturado em configuração de uma fase e duas fases, com destaque para o selo hídrico utilizado na saída de biogás.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A composição do biogás foi avaliada por cromatografia gasosa, utilizada neste trabalho como método de referência para comparação com as respostas obtidas pelo e-Nose. As análises foram realizadas no cromatógrafo gasoso apresentado na Figura 24a. Após o término de cada coleta realizada pelo equipamento, uma amostra de 300 μL de biogás era retirada do selo hídrico com uma seringa adaptada para coleta de gás e, em seguida, injetada manualmente no cromatógrafo. A imagem destacada em vermelho na Figura 24a ilustra esse procedimento de injeção da amostra no equipamento. Dessa forma, a análise cromatográfica era associada temporalmente ao ciclo correspondente do e-Nose.

Figura 25b – Cromatógrafo gasoso utilizado como método de referência, procedimento de injeção manual de 300 µL de biogás com seringa adaptada para coleta de gás e exemplo de cromatograma gerado pelo equipamento.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

No cromatógrafo gasoso, a amostra injetada é transportada pelo sistema interno do equipamento e seus componentes são separados ao longo da coluna cromatográfica. Ao final desse processo, o detector gera um cromatograma, ou seja, um gráfico de sinal em função do tempo, no qual diferentes compostos aparecem como picos característicos. A representação destacada em azul na Figura 24a mostra esse tipo de saída gráfica gerada pelo equipamento, com os picos correspondentes aos gases detectados. Neste trabalho, a análise cromatográfica forneceu os picos correspondentes ao metano e ao dióxido de carbono. A partir das áreas desses picos, foram calculadas as concentrações relativas desses dois componentes e, em seguida, realizada a normalização apresentada nas Equações 3 e 4.

A composição do biogás foi avaliada por cromatografia gasosa, utilizada neste trabalho como método de referência para comparação com as respostas obtidas pelo e-Nose. Após o término de cada coleta realizada pelo equipamento, uma amostra de 300 mL de biogás era retirada do selo hídrico com uma seringa e injetada no cromatógrafo. Dessa forma, a análise cromatográfica era associada temporalmente ao ciclo correspondente do e-Nose. A análise cromatográfica forneceu os picos correspondentes ao metano e ao dióxido de carbono. A partir das áreas desses picos, foram calculadas as concentrações relativas desses dois componentes e, em seguida, realizada a normalização apresentada nas Equações 3 e 4.

$$x_{\text{CH}_4} = \frac{C_{\text{CH}_4}}{C_{\text{CH}_4} + C_{\text{CO}_2}} * 100 \quad (3)$$

$$x_{\text{CO}_2} = \frac{C_{\text{CO}_2}}{C_{\text{CH}_4} + C_{\text{CO}_2}} * 100 \quad (4)$$

Em que x_{CH_4} representa a fração normalizada de metano no biogás, expressa em porcentagem (%), e x_{CO_2} representa a fração normalizada de dióxido de carbono, também expressa em porcentagem (%). As parcelas C_{CH_4} e C_{CO_2} correspondem aos valores obtidos a partir das áreas dos picos cromatográficos, na mesma base de concentração. Como as equações utilizam uma razão entre essas parcelas, a unidade é cancelada durante a normalização.

Essa normalização considera apenas metano e dióxido de carbono, que foram os componentes utilizados na comparação com as respostas do e-Nose. Portanto, os valores normalizados não representam a composição total do biogás. O sulfeto de hidrogênio não foi incluído porque, durante o período experimental, o cromatógrafo utilizado para fazer a medição de sulfeto de hidrogênio estava em manutenção. No laboratório, essa análise é feita em um equipamento específico, com hidrogênio como gás de arraste. Assim, a comparação com o e-Nose ficou limitada aos dados de metano e dióxido de carbono obtidos por cromatografia gasosa.

A avaliação experimental do e-Nose foi realizada por comparação entre as respostas dos sensores e os resultados obtidos por cromatografia gasosa. Foram consideradas 7 amostras cromatográficas, sendo 6 referentes ao reator metanogênico de fase única e 1 referente ao reator metanogênico de segunda fase. Para a comparação, cada resultado da cromatografia gasosa foi associado à coleta do e-Nose realizada no mesmo período. Os resultados dessas amostras são apresentados na Seção 4.1, juntamente com a discussão da composição do biogás obtida pelo método de referência.

3.3.2 Condições de conexão e rotina de coleta

Conforme descrito na Seção 3.1.12, a conexão entre os reatores e o e-Nose foi realizada a partir do selo hídrico, e não diretamente no *headspace* dos reatores. Durante os experimentos, o equipamento era conectado ao sistema de digestão anaeróbia apenas nos períodos destinados às coletas de biogás. Essa organização permitiu que o biogás fosse admitido no e-Nose conforme a rotina programada.

A rotina automática usada nos experimentos seguiu a máquina de estados descrita na Seção 3.2.6, com etapas de limpeza, expurgo A, pré-aquecimento, coleta, análise, expurgo B e estabilização. Os parâmetros operacionais adotados durante as coletas são detalhados posteriormente na Seção 3.3.4. As coletas ocorreram, em geral, de segunda-feira a sábado, aproximadamente entre 13 horas e 18 horas. No entanto, a frequência das coletas e o número de ciclos por operação variaram ao longo dos experimentos, em função dos ajustes operacionais

realizados no e-Nose e das manutenções corretivas necessárias durante o desenvolvimento do sistema.

Os experimentos foram iniciados no reator metanogênico de fase única, inicialmente com um ciclo operacional por coleta. Conforme o sistema apresentou comportamento mais estável, passaram a ser realizados dois e, posteriormente, três ciclos consecutivos nesse mesmo reator. Essa progressão teve como objetivo observar a resposta preliminar dos sensores ao biogás, verificar a necessidade de limpeza entre ciclos e acompanhar a repetibilidade dos sinais em leituras sucessivas. Posteriormente, foi realizado apenas um ciclo operacional no reator metanogênico de segunda fase. Novas medições não foram realizadas nesse reator em razão da programação de desligamento dos reatores para o dia subsequente, circunstância que inviabilizou a continuidade dos experimentos nessa configuração.

3.3.3 Delineamento dos experimentos com o e-Nose

Para organizar a apresentação e a discussão dos resultados, as coletas realizadas com o e-Nose foram agrupadas de acordo com o reator utilizado e com o número de ciclos operacionais executados em cada coleta. Essa organização permite diferenciar as respostas obtidas no reator metanogênico de fase única da resposta obtida no reator metanogênico de segunda fase, além de facilitar a comparação entre operações com um, dois e três ciclos consecutivos. Essa distinção também é importante porque os dois reatores produzem biogás com composições distintas, o que pode influenciar o comportamento dos sensores e os padrões observados nas análises.

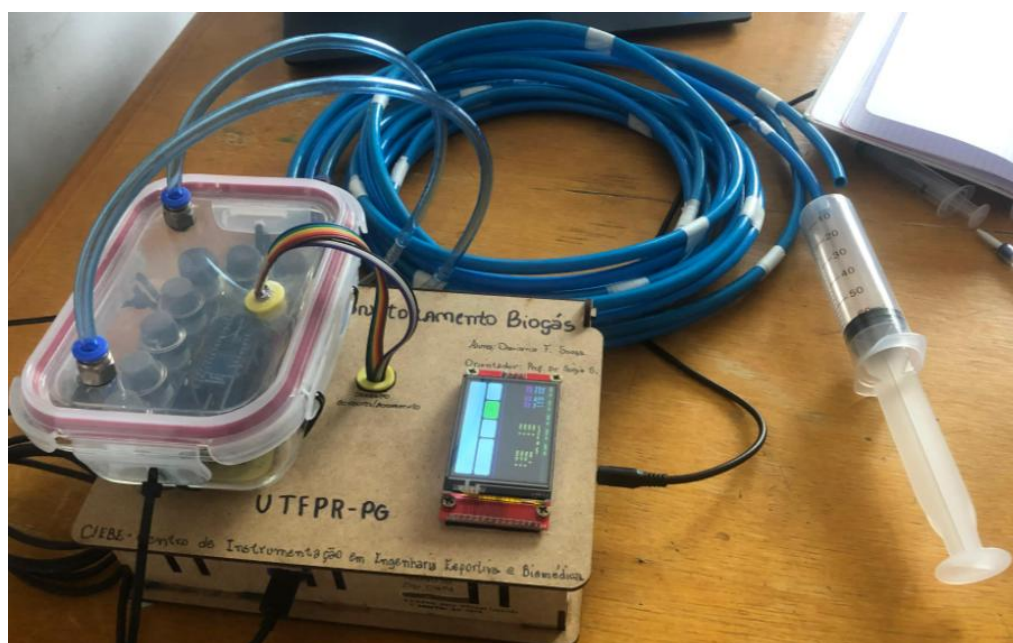
No reator metanogênico de fase única, as coletas foram agrupadas em três experimentos principais. O Experimento 1 corresponde à coleta com um ciclo operacional; o Experimento 2 corresponde à coleta com dois ciclos consecutivos; e o Experimento 3 corresponde à coleta com três ciclos consecutivos. Essa divisão será utilizada no Capítulo 4 para comparar o comportamento dos sensores ao biogás em diferentes condições de repetição da rotina de coleta.

Além desses experimentos, foi considerada uma coleta complementar no reator metanogênico de segunda fase, realizada com um ciclo operacional. Essa coleta foi mantida separada dos experimentos do reator metanogênico de fase única porque corresponde a uma configuração distinta de produção de biogás. Os parâmetros operacionais associados a essas coletas, incluindo número de ciclos, número de limpezas, intervalo entre ciclos, condições ambientais e ajustes de tempo e pressão, são apresentados posteriormente na Seção 3.3.6.

3.3.4 Testes preliminares e estimativa dos volumes admitidos

Para definir a rotina de acionamento da mini bomba de ar e das válvulas nas etapas de limpeza, entrada de biogás, admissão de ar ambiente e expurgo, foram realizados testes preliminares de deslocamento de ar. Inicialmente, verificou-se o funcionamento da mini bomba de ar por meio de um teste empírico com seringa graduada, conforme apresentado na Figura 25. Nesse procedimento, a mini bomba de ar foi conectada diretamente à seringa, sem ligação com a câmara do e-Nose, e mediu-se o tempo necessário para deslocar um volume conhecido de 60 mL.

Figura 26 – Teste preliminar de deslocamento volumétrico da mini bomba de ar com seringa graduada



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Com base na relação entre o volume deslocado e o tempo medido, foi possível estimar a vazão média aproximada da mini bomba de ar em diferentes condições de acionamento. Esses resultados serviram como referência inicial para compreender o comportamento do sistema e auxiliar na definição dos tempos de acionamento adotados nas etapas de operação do e-Nose. Em seguida, foram realizados testes com o e-Nose conectado às mangueiras de 5 metros e 6 mL de diâmetro, ainda sem conexão com a câmara de sensores.

Nessa etapa, as mangueiras foram avaliadas separadamente, utilizando-se uma referência volumétrica conhecida para verificar o deslocamento de ar ao longo do conjunto. As condições testadas corresponderam ao arranjo empregado posteriormente durante as coletas de biogás. Os tempos obtidos nesses testes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempos preliminares de deslocamento de ar nas mangueiras do e-Nose

Etapa	V1	V2	V3	Bomba	Volume	Mangueira	Tempo
Limpeza da mangueira					60 mL	Φ6mm	7,7 s
Limpeza/Injeção					60 mL	Φ6mm	2,8 s
Expurgo de Ar ambiente					60 mL	Φ6mm	15,7 s

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: Para ilustrar o estado de atuação de cada um dos atuadores do sistema foi usado uma notação de cor onde **verde** significa **ligado** e **vermelho** significa **desligado**. A mangueira usada nos testes, bem como usado nas coletas tinha 5 metros de comprimento. O termo ‘s’ significa segundos. O termo ‘V’ significa válvula. O termo ‘ml’ significa mL. O termo ‘mm’ significa milímetro.

Após os testes preliminares com seringa graduada, os volumes admitidos na câmara passaram a ser estimados a partir da variação de pressão medida pelo BME280. Essa abordagem foi adotada porque, durante as coletas, o biogás e o ar ambiente eram deslocados pelo acionamento da mini bomba de ar e das válvulas, e não inseridos manualmente com seringa. Assim, a variação de pressão na câmara foi usada como base para estimar o volume equivalente admitido em cada etapa da operação do e-Nose.

Para essa estimativa, considerou-se a câmara como um volume fixo e aplicou-se a equação de estado dos gases ideais, comparando as condições de pressão e temperatura antes e depois da admissão. Conforme descrito na Seção 3.1.5, a câmara possui volume interno aproximado de 370 mL. Porém, para os cálculos, foi adotado um volume útil estimado de 315 mL, descontando-se aproximadamente o espaço ocupado pela placa de circuito impresso, sensores e demais componentes internos.

Essa aproximação foi adotada como estimativa operacional, pois o objetivo era calcular volumes equivalentes de biogás e ar ambiente admitidos na câmara a partir das variações medidas de pressão e temperatura, e não realizar uma medição volumétrica direta. A equação dos gases ideais foi utilizada por se tratar de uma relação simples entre pressão, volume, temperatura e quantidade de gás, adequada para uma estimativa nas condições do experimento, em que não houve aplicação de altas pressões ou temperaturas extremas.

Inicialmente, a temperatura medida em graus Celsius foi convertida para K, conforme a Equação 5:

$$T_K = T_{°C} + 273,15 \quad (5)$$

em que T_K representa a temperatura em K e $T_{°C}$ representa a temperatura em graus Celsius. Com a temperatura convertida e a pressão expressa em kPa, a quantidade de matéria na câmara foi estimada pela Equação 6:

$$n = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (6)$$

em que n representa a quantidade de matéria, P representa a pressão medida na câmara, V representa o volume útil estimado da câmara, R representa a constante universal dos gases e T representa a temperatura em K. Para esse cálculo, foram considerados $V_C = 0,315$ litro e $R = 8,314 \text{ L} \cdot \text{kPa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (litro kPa por mol por K), onde V_C é o volume da câmara. A diferença entre as quantidades de matéria nos estados final e inicial foi utilizada para estimar o volume equivalente admitido na câmara, conforme a Equação 7:

$$V_{inj} = \frac{(n_f - n_i)RT_i}{P_i} \quad (7)$$

Em que V_{inj} representa o volume equivalente admitido; n_f corresponde à quantidade de matéria no estado final; n_i corresponde à quantidade de matéria no estado inicial; R representa a constante universal dos gases; T_i corresponde à temperatura inicial, em K; e P_i corresponde à pressão inicial, em kPa. Como o resultado dessa expressão é obtido em litros, os valores foram convertidos para mL. A partir desse procedimento, foram estimados os volumes equivalentes de biogás e de ar ambiente admitidos na câmara durante os experimentos. Esses volumes são apresentados na Tabela 3.

A admissão de ar ambiente após a entrada do biogás foi tratada como uma etapa de diluição dentro da câmara. Essa estratégia foi adotada porque, em aplicações com sensores MQ, a concentração de metano presente no biogás pode ultrapassar a faixa útil de resposta dos sensores quando não há diluição, levando a sinais pouco informativos, com risco de operação em região não linear ou próxima da saturação, conforme discutido por Yang et al. (2019). Durante os testes preliminares, também foram observadas leituras com entrada direta de biogás, sem admissão posterior de ar ambiente; nessa condição, os sinais dos sensores apresentaram pouca variação após a exposição inicial, o que reforçou a inclusão da diluição na rotina do e-Nose.

No estudo de Yang et al. (2019), a diluição foi realizada em uma câmara com volume conhecido, por meio do controle do volume de biogás introduzido em ar, além de testes com misturas de biogás padrão e ar em diferentes proporções. Neste trabalho, os volumes adotados não tiveram caráter de otimização da diluição, mas resultaram da parametrização preliminar do sistema, considerando o acionamento da mini bomba de ar e das válvulas, a variação de pressão na câmara e a admissão controlada de ar ambiente durante a rotina automática do e-Nose.

Tabela 3 – Volumes estimados de biogás e ar ambiente admitidos na câmara durante as coletas

Coleta	Gás	Volume estimado admitido (mL)
Experimento 1 (RM2)	Biogás	15,65
	Ar ambiente	299,45
	Total admitido	315,10
Experimento 2 (RM1) - ciclo 1	Biogás	116,00
	Ar ambiente	78,92
	Total admitido	194,92
Experimento 2 (RM1) - ciclo 2	Biogás	116,50
	Ar ambiente	78,53
	Total admitido	195,03
Experimento 3 (RM1) - ciclo 1	Biogás	142,51
	Ar ambiente	176,96
	Total admitido	319,46
Experimento 3 (RM1) - ciclo 2	Biogás	142,96
	Ar ambiente	176,32
	Total admitido	319,27
Experimento 3 (RM1) - ciclo 3	Biogás	143,41
	Ar ambiente	176,32
	Total admitido	319,72

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: RM1 corresponde ao reator metanogênico de fase única, enquanto RM2 corresponde ao reator metanogênico de segunda fase. O Experimento 1 do RM1 não foi incluído na estimativa dos volumes porque não foi concluído devido a uma falha de operação, discutida na Seção 4.2. Os volumes apresentados correspondem a estimativas obtidas a partir das leituras de pressão e temperatura na câmara, não a medições volumétricas diretas.

3.3.5 Condições gerais e parametrização operacional das coletas

As condições gerais e os parâmetros operacionais das coletas foram organizados a partir dos registros realizados durante os experimentos com o e-Nose. Os valores de tempo e pressão configurados para cada etapa não tiveram caráter de otimização formal, mas corresponderam a ajustes operacionais definidos durante o desenvolvimento dos experimentos, com base no comportamento observado do sistema e na necessidade de favorecer a limpeza da câmara, a entrada do biogás, a admissão de ar ambiente e o expurgo entre ciclos.

A Tabela 4 apresenta as condições gerais das coletas realizadas nos reatores metanogênico de fase única (RM1) e metanogênico de segunda fase (RM2). Foram organizados o número de ciclos, o número total de rotinas de limpeza executadas, o intervalo entre ciclos e as condições climáticas registradas no período de cada coleta.

Tabela 4 - Condições gerais das coletas realizadas nos reatores metanogênico de fase única (RM1) e reator metanogênico de segunda fase (RM2).

Coletas	Nº de ciclos	Nº de limpezas	Intervalo entre ciclos	Temperatura ambiente	Umidade relativa	Condições climáticas
Experimento 1 (RM1)	1	1	-	30,5 °C	-	Chuvoso
Experimento 2 (RM1)	2	2	5 min	26 °C	79%	Chuvoso
Experimento 3 (RM1)	3	4	5 min	25 °C	80%	Chuvoso
Experimento 1 (RM2)	1	4	5 min	24 °C	83%	Garoa

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: RM1 corresponde ao reator metanogênico de fase única, enquanto RM2 corresponde ao reator metanogênico de segunda fase. O número de limpezas corresponde ao total de rotinas de limpeza executadas durante a operação de coleta, incluindo as realizadas antes e/ou entre ciclos. As condições climáticas foram registradas a partir do Google Clima. O traço indica dado não registrado.

A Tabela 5 apresenta a parametrização operacional dos ciclos de coleta do e-Nose. Nela estão indicados os tempos e as pressões configurados na interface do sistema para as etapas de limpeza, expurgo A, pré-aquecimento, coleta, análise e expurgo B. A lógica de avanço entre etapas, baseada em tempo e/ou pressão, foi descrita anteriormente na Seção 3.2.6.

Tabela 5 - Parametrização operacional dos ciclos de coleta do e-Nose

Coletas	Limpeza	Expurgo A	Pré - Aquecimento	Coleta	Análise	Expurgo B
Experimento 1 (RM1)	10 s e 123 kPa	60 kPa	5 min	5 s e 63 kPa	15 min	60 kPa
Experimento 2 (RM1)	10 s e 120 kPa	70 kPa	5 min	5 s e 96 kPa	20 min	70 kPa
Experimento 3 (RM1)	10 s e 125 kPa	55 kPa	1 min	5 s e 80 kPa	20 min	55 kPa
Experimento 1 (RM2)	10 s e 125 kPa	55 kPa	4 min	5 s e 80 kPa	20 min	55 kPa

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: RM1 corresponde ao reator metanogênico de fase única, enquanto RM2 corresponde ao reator metanogênico de segunda fase. Os valores apresentados correspondem aos parâmetros configurados na interface do e-Nose para cada etapa. Nas etapas com tempo e pressão, ambos os valores foram usados como referências de controle, conforme a lógica descrita na Seção 3.2.6.

Após as coletas, os arquivos gerados pelo e-Nose foram organizados de acordo com o reator utilizado e com a identificação dos experimentos descrita na Seção 3.3.4. As informações de data e hora registradas pelo sistema, cuja estrutura foi apresentada na Seção 3.2.5, auxiliaram na associação entre os dados do e-Nose e os resultados obtidos por cromatografia gasosa, conforme descrito na Seção 3.3.2. Quando ocorreram falhas durante alguma coleta, a situação foi registrada manualmente em caderno de laboratório, permitindo identificar quais dados seriam considerados na análise e quais deveriam ser desconsiderados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Composição do biogás nos reatores de fase única (RM1) e de duas fases (RM2)

Os reatores utilizados nesta pesquisa correspondem aos mesmos sistemas estudados por Gomes et al. (2025), a partir dos quais foram realizadas as coletas de biogás usadas na avaliação do e-Nose. No estudo desses autores, foram reportados teores médios de metano de aproximadamente $61,6 \pm 6,2\%$ para o reator metanogênico de fase única e $78,3 \pm 3,0\%$ para o reator metanogênico de segunda fase. Esses valores indicam uma tendência de maior participação de metano no sistema em duas fases, servindo como referência para contextualizar os resultados cromatográficos obtidos neste trabalho.

O Gráfico 1 apresenta a composição normalizada do biogás obtida por cromatografia gasosa para as amostras associadas aos dois reatores. Nas coletas do reator metanogênico de fase única, a fração normalizada de metano variou entre 50,39% e 57,93%, enquanto a fração normalizada de dióxido de carbono variou entre 42,07% e 49,61%. Esses resultados mostram que, nas amostras do reator metanogênico de fase única, as frações normalizadas de metano e dióxido de carbono ficaram próximas entre si. Ainda assim, o metano apresentou valores um pouco maiores em todas as coletas desse reator.

Gráfico 1 - Composição do biogás obtida por cromatografia gasosa para os reatores metanogênicos de fase única e de segunda fase, com frações normalizadas de metano e dióxido de carbono



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: Na figura, CH₄ corresponde ao metano e CO₂ corresponde ao dióxido de carbono. Embora o eixo vertical indique concentração do biogás, os valores apresentados correspondem às frações normalizadas entre metano e dióxido de carbono, calculadas conforme o procedimento descrito na Seção 3.3.2. Portanto, os percentuais não representam a composição total do biogás, pois outros constituintes não foram incluídos na normalização.

No reator metanogênico de segunda fase, a amostra analisada apresentou fração normalizada de 73,86% de metano e 26,14% de dióxido de carbono. Esse resultado acompanha a tendência indicada por Gomes et al. (2025), com maior participação de metano no biogás proveniente do sistema em duas fases. Assim, os dados cromatográficos mostram que os dois reatores forneceram biogases com composições distintas, principalmente em relação ao equilíbrio entre metano e dióxido de carbono. Essa diferença é relevante para a interpretação das respostas dos sensores do e-Nose nas seções seguintes.

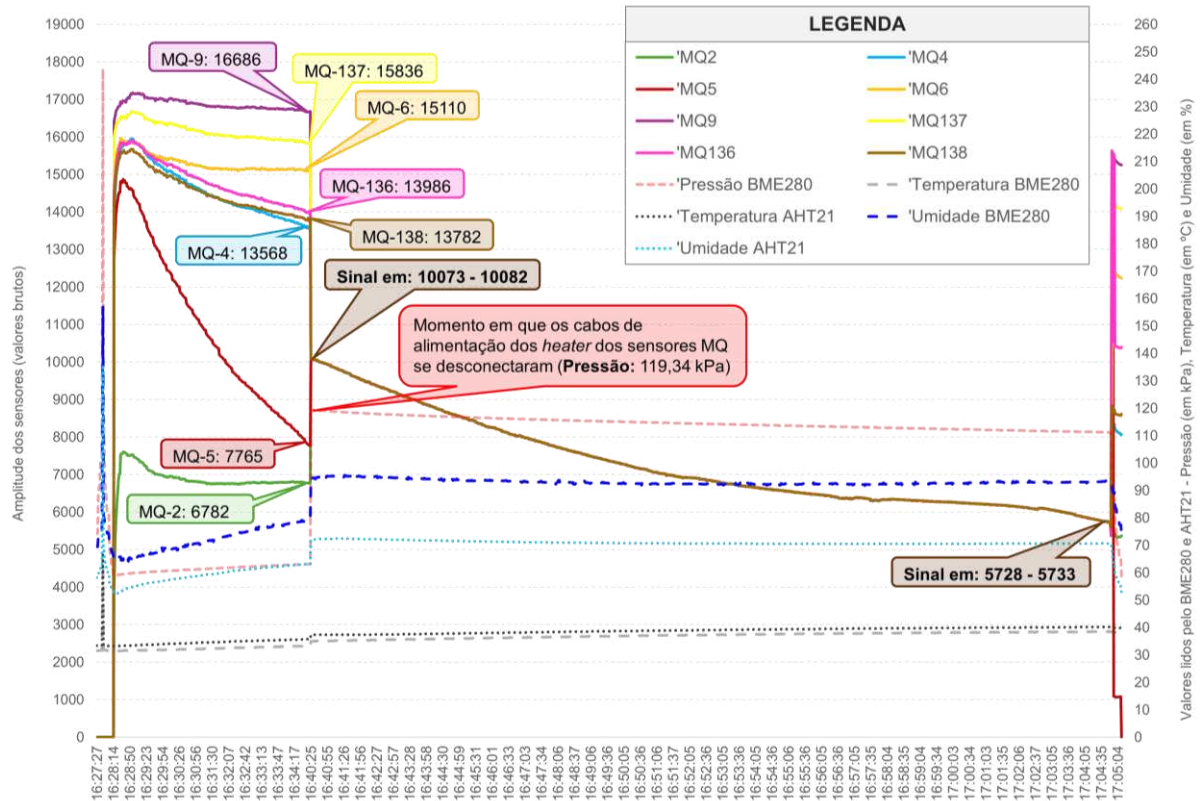
4.2 Resposta dos sensores MQ em relação à composição do biogás obtida por cromatografia gasosa

Nesta seção, as respostas dos sensores MQ foram analisadas a partir das médias das leituras brutas registradas no pré-aquecimento e na análise com biogás diluído. Esses valores não foram convertidos em concentração dos componentes do biogás, pois não era o foco nestes testes preliminares. Por isso, a interpretação foi feita comparando quanto cada sensor mudou, em média, entre as duas etapas de cada ciclo, e não apenas qual sensor apresentou maior valor médio durante a análise. No Experimento 1 do reator metanogênico de fase única, a coleta foi realizada com apenas um ciclo e é mostrado no Gráfico 2.

No fim do pré-aquecimento, os sensores ainda apresentavam respostas com valores diferentes entre si, como mostrado no Gráfico 1. No entanto, no início da etapa de análise, quando a pressão interna estava em 119,34 kPa, a conexão de alimentação dos aquecedores dos sensores MQ se soltou. Essa falha provocou uma alteração abrupta nos sinais registrados. Após a perda de alimentação dos aquecedores, os sensores deixaram de apresentar respostas distintas.

Inicialmente, os oito sensores passaram a registrar valores muito próximos entre si, na faixa de 10073 a 10082, e poucos segundos depois praticamente todos se concentraram entre 10065 e 10067. Ao final da etapa, os sinais permaneceram praticamente coincidentes, na faixa de 5728 a 5733. Por esse motivo, o Experimento 1 do reator metanogênico de fase única não foi usado para avaliar a resposta dos sensores ao biogás diluído. Sua análise ficou limitada ao registro da falha operacional e ao comportamento dos sinais após a interrupção da alimentação dos aquecedores.

Gráfico 2 - Comportamento dos sensores MQ durante o Experimento 1 do reator metanogênico de fase única, com interrupção da alimentação dos aquecedores durante a etapa de análise



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: Os valores apresentados correspondem a leituras brutas dos sensores MQ, sem conversão para concentração de gases. A figura também apresenta variáveis complementares registradas durante a coleta. A falha indicada no gráfico corresponde à interrupção da alimentação dos aquecedores dos sensores MQ durante a etapa de análise.

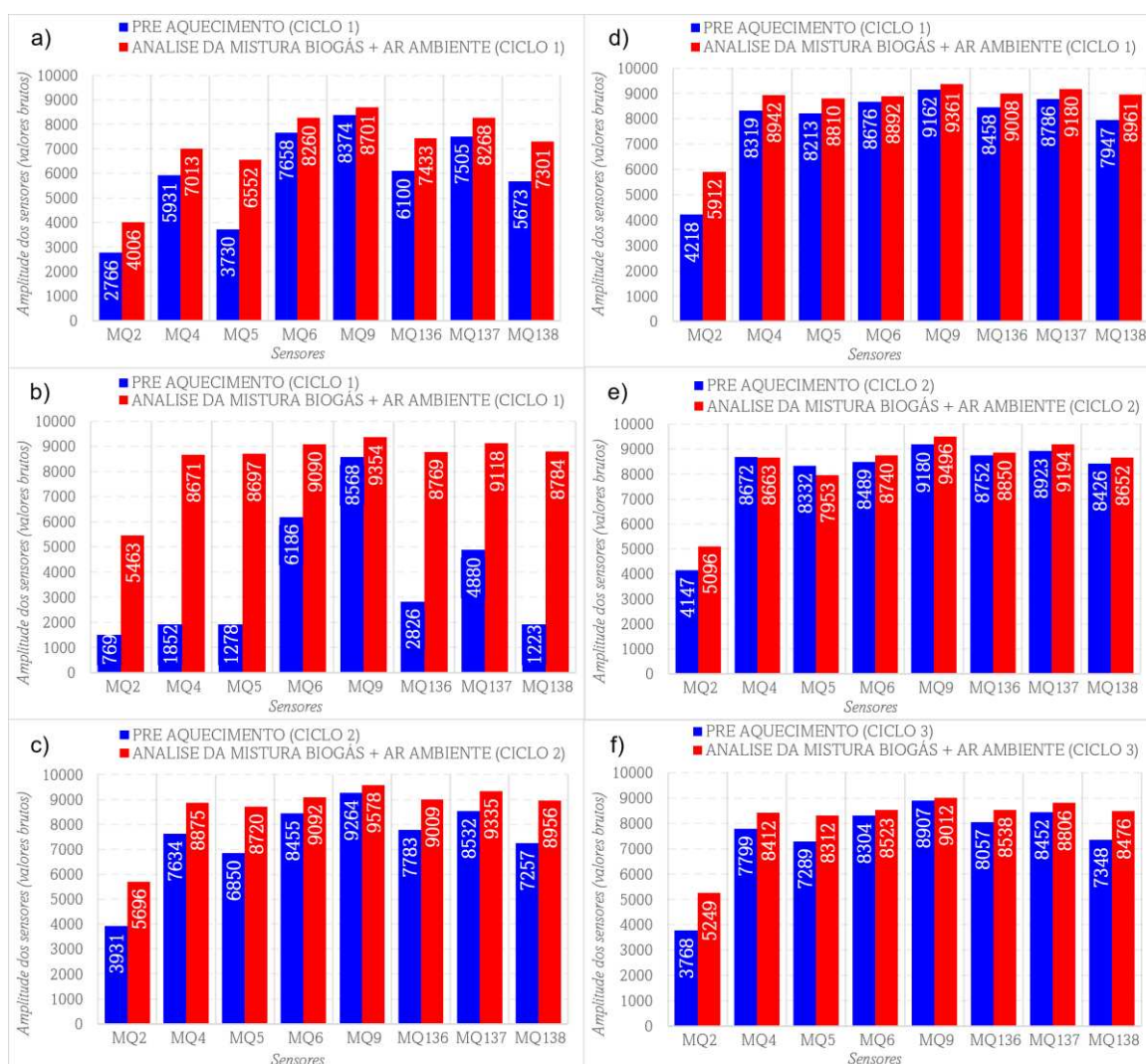
O Gráfico 3 reúne os ciclos válidos usados na comparação das respostas dos sensores MQ. O gráfico a) corresponde ao Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase; os gráficos b) e c) correspondem aos ciclos 1 e 2 do Experimento 2 do reator metanogênico de fase única; e os gráficos d), e) e f) correspondem aos ciclos 1, 2 e 3 do Experimento 3 do reator metanogênico de fase única. Na figura, as barras em azul, do pré-aquecimento, representam a condição dos sensores antes da entrada do biogás da coleta, enquanto as barras vermelhas, da análise, representam a resposta após a entrada do biogás seguida da admissão de ar ambiente.

No Experimento 2 do reator metanogênico de fase única, o ciclo 1 apresentou maior diferença entre pré-aquecimento e análise do que o ciclo 2. No primeiro ciclo, vários sensores iniciaram o pré-aquecimento com leituras mais baixas e responderam mais após a entrada do biogás diluído. No segundo ciclo, as leituras no pré-aquecimento já estavam mais altas para a maioria dos sensores, reduzindo a diferença observada na etapa de análise.

Esse comportamento indica que o intervalo de 5 minutos (adotado tanto no Experimento 2 quanto no Experimento 3) entre os ciclos pode não ter sido suficiente para que

os sensores retornassem completamente à condição inicial. Em sensores MOS/MQ, a resposta depende da variação da resistência da camada semicondutora de dióxido de estanho quando ocorre interação com os componentes da amostra. Se ainda há influência de compostos adsorvidos na superfície do sensor ou recuperação incompleta após o ciclo anterior, a leitura inicial pode permanecer mais alta e a resposta no ciclo seguinte pode parecer menor (Barsan; Koziej; Weimar, 2007; Saruhan; Lontio Fomekong; Nahirniak, 2021; Wang et al., 2010).

Gráfico 3 - Comparação entre as médias das leituras dos sensores MQ no pré-aquecimento e na análise com biogás + ar ambiente nos experimentos realizados com o reator metanogênico de fase única e o reator metanogênico de segunda fase: a) Experimento 1 – reator metanogênico de segunda fase; b) Experimento 2, ciclo 1 – reator metanogênico de fase única; c) Experimento 2, ciclo 2 – reator metanogênico de fase única; d) Experimento 3, ciclo 1 – reator metanogênico de fase única; e) Experimento 3, ciclo 2 – reator metanogênico de fase única; f) Experimento 3, ciclo 3 – reator metanogênico de fase única.



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: Os valores correspondem às médias das leituras brutas dos sensores MQ em cada etapa, sem conversão para concentração de gases. Na figura, “PRÉ-AQUECIMENTO” corresponde à etapa de pré-aquecimento, enquanto “ANÁLISE DA MISTURA BIOGÁS + AR AMBIENTE” corresponde à etapa de análise com biogás diluído. As indicações presentes na própria figura para os reatores correspondem ao reator metanogênico de fase única e ao reator metanogênico de segunda fase.

No Experimento 3 (Gráfico 3d, 3e e 3f) do reator metanogênico de fase única, a diferença entre pré-aquecimento e análise foi pequena para grande parte dos sensores, principalmente no ciclo 2. Além do possível efeito residual já discutido, esse resultado pode ter sido influenciado pelo menor tempo de pré-aquecimento adotado nesse experimento, configurado em 1 minuto. Como sensores MOS/MQ dependem de aquecimento e estabilização para apresentar leituras mais consistentes, um pré-aquecimento mais curto pode ter contribuído para leituras iniciais ainda instáveis e para menor diferença após a entrada do biogás diluído (Saruhan; Lontio Fomekong; Nahirniak, 2021; Wang et al., 2010)

Nos experimentos do reator metanogênico de fase única, os sensores que apresentaram resposta em mais ciclos de análise foram MQ-2, MQ-138, MQ-5, MQ-4 e MQ-136. A resposta de MQ-4 e MQ-5 é compatível com a presença de metano no biogás, já que esses sensores apresentam sensibilidade a esse gás. O MQ-136 também é importante nesta análise porque apresenta sensibilidade ao sulfeto de hidrogênio, componente que pode estar presente em sistemas anaeróbios alimentados com vinhaça devido à presença de sulfato, conforme discutido por Ferraz Júnior et al. (2016). Já MQ-2 e MQ-138 apresentam sensibilidade cruzada a diferentes substâncias; portanto, sua resposta indica resposta à mistura analisada, sem permitir associação a um único componente específico.

No Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase (Gráfico 3a), a cromatografia gasosa indicou fração normalizada de 73,86% de metano e 26,14% de dióxido de carbono. Esse teor de metano foi maior que o observado nos Experimentos 2 e 3 do reator metanogênico de fase única, nos quais a fração normalizada de metano variou entre 50,39% e 57,93%. Considerando apenas essa composição, poderia ser esperado que sensores com sensibilidade ao metano, como MQ-4 e MQ-5, apresentassem médias de leitura mais altas durante a análise.

No entanto, esse comportamento não foi observado de forma direta, como pode ser visto no Gráfico 3a. No Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase, MQ-4 e MQ-5 não estiveram entre os sensores com maiores médias de leitura durante a análise. Esse resultado mostra que a resposta dos sensores MQ não pode ser explicada apenas pela fração de metano obtida por cromatografia gasosa. A leitura desses sensores depende também da faixa útil de operação, da diluição, da forma de exposição ao biogás, da condição inicial dos sensores e das condições ambientais. Essa interpretação é coerente com estudos que mostram que sensores MQ aplicados ao biogás podem exigir diluição e controle das condições de operação para produzir respostas mais interpretáveis, especialmente quando há concentrações mais altas de metano (Fakra *et al.*, 2020; Nagahage; Nagahage; Fujino, 2021; Yang *et al.*, 2019)

O Gráfico 3a também mostra que os sensores MQ-9, MQ-6 e MQ-137 apresentaram médias de leitura mais altas em vários ciclos. Porém, esses sensores já começaram algumas

coletas com valores altos no pré-aquecimento e, em muitos casos, mudaram pouco durante a análise. Por isso, uma média de leitura mais alta não significa, necessariamente, maior resposta ao biogás. Nesta análise, foi mais importante observar quanto a leitura mudou entre o pré-aquecimento e a análise do que considerar apenas o valor registrado em uma única etapa.

De forma geral, os sensores que mais responderam ao biogás diluído foram semelhantes entre os experimentos, principalmente MQ-5, MQ-138, MQ-136, MQ-2 e MQ-4. A intensidade das respostas variou entre os ciclos, mas a diferença entre os reatores não foi tão evidente quanto seria esperado apenas pela composição obtida por cromatografia gasosa. Ainda assim, por se tratar de uma avaliação preliminar, os resultados foram satisfatórios para mostrar que o e-Nose registrou mudanças nas leituras após a entrada do biogás e que o conjunto de sensores apresentou potencial para acompanhar variações da mistura analisada. Dessa forma, a principal contribuição desta etapa foi indicar quais sensores apresentaram resposta com maior frequência e reforçar que a interpretação deve considerar o padrão conjunto das respostas, e não a leitura isolada de um único sensor.

4.3 Operação em ciclos, limpeza e influência das condições internas

Nesta seção, é discutido o funcionamento do e-Nose durante a operação em ciclos consecutivos, com foco na execução das etapas programadas, na limpeza entre coletas e na influência das condições internas da câmara sobre as leituras dos sensores MQ. Foram considerados o Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase e os Experimentos 2 e 3 do reator metanogênico de fase única. O Experimento 1 do reator metanogênico de fase única não foi incluído nesta análise devido à falha na alimentação dos aquecedores dos sensores MQ, já discutida na Seção 4.2 e apresentada no Gráfico 1.

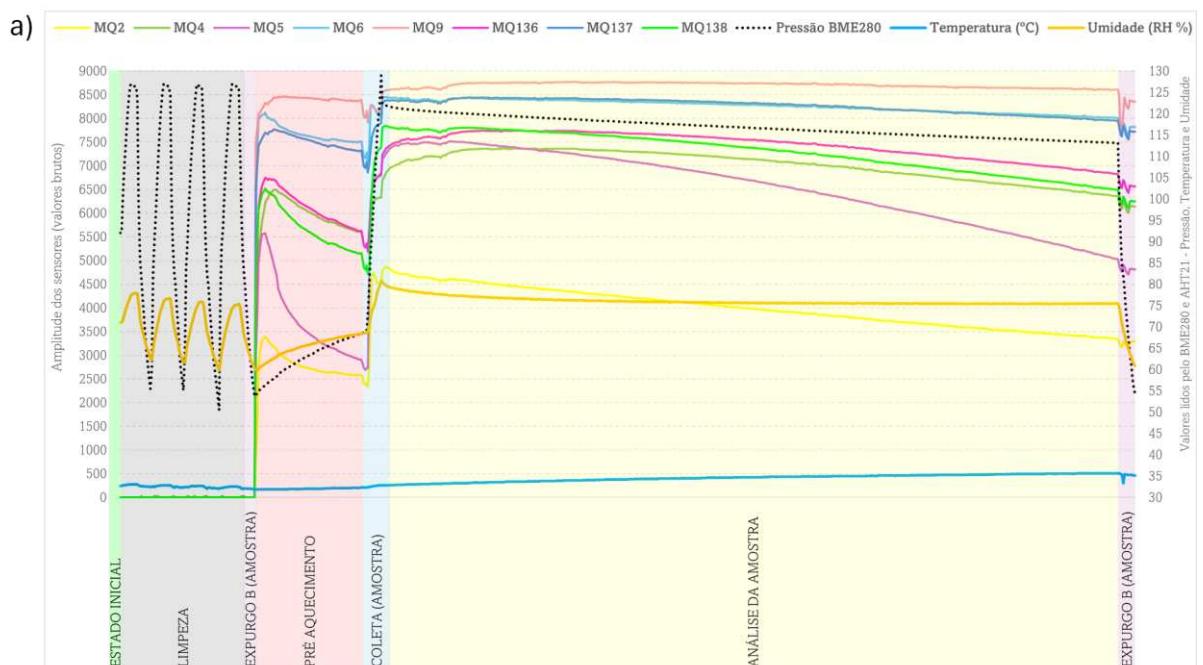
4.3.1 Operação em ciclos do e-Nose

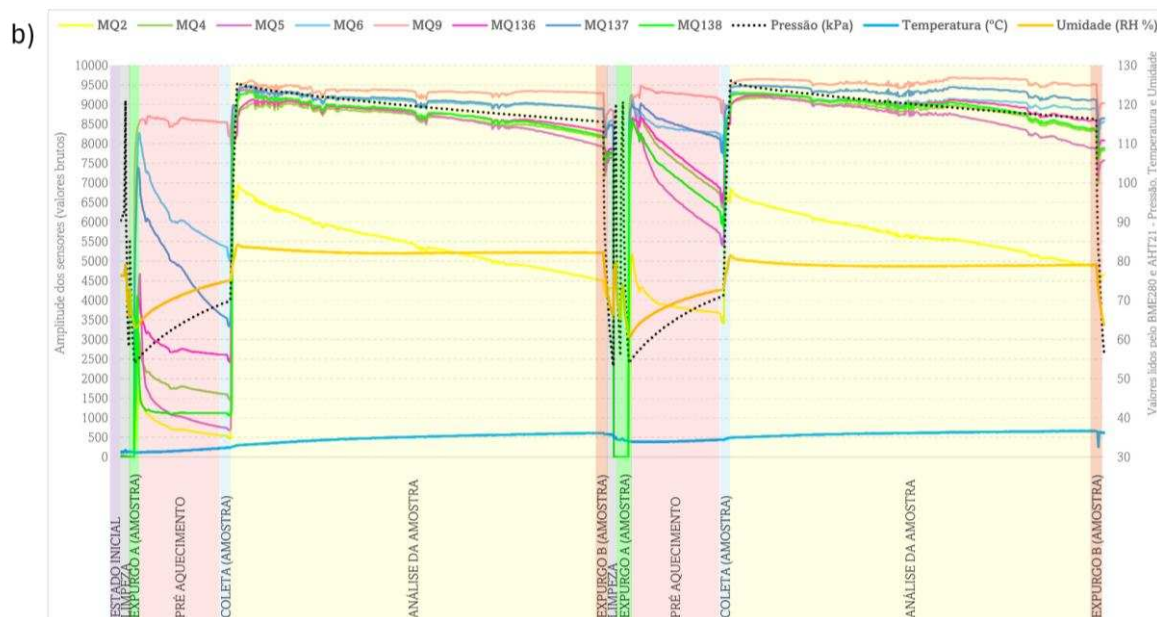
O e-Nose foi programado para executar automaticamente uma sequência de etapas, incluindo Limpeza, Expurgo A, pré-aquecimento, Coleta, Análise e Expurgo B, conforme a lógica operacional descrita na Seção 3.2.6. Nesta subseção, a análise se concentra em verificar se o sistema executou corretamente essa sequência nos experimentos considerados. No Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase, o sistema realizou quatro repetições das etapas de Limpeza e Expurgo A antes da coleta, conforme apresentado no Gráfico 4a. Nessa configuração, a Limpeza foi realizada com injeção de ar ambiente até 125 kPa, enquanto o Expurgo A foi configurado para 55 kPa. Em seguida, ocorreu o pré-aquecimento dos sensores

por 4 minutos, seguido da entrada do biogás diluído e da etapa de Análise, na qual os sensores permaneceram expostos à mistura inserida na câmara. Ao final, o sistema executou o Expurgo B, removendo a mistura analisada.

No Experimento 2 do reator metanogênico de fase única, o sistema foi configurado para dois ciclos consecutivos, com intervalo de 5 minutos entre eles. Conforme apresentado no Gráfico 4b, o e-Nose executou as etapas programadas nos dois ciclos, incluindo as rotinas de Limpeza e Expurgo A, o pré-aquecimento de 5 minutos, a Coleta, a Análise e o Expurgo B. A pausa entre os ciclos contribuiu para evitar o início imediato de uma nova coleta, permitindo que a câmara passasse por uma etapa de renovação antes da entrada de um novo biogás.

Gráfico 4 - Sequência operacional do e-Nose durante: a) Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase e b) Experimento 2 do reator metanogênico de fase única





Fonte: Elaborada pela autora (2026)

No Experimento 3 do reator metanogênico de fase única, o sistema foi configurado para três ciclos consecutivos (Gráfico 5). Os ciclos 1 e 3 executaram a sequência operacional sem ocorrência equivalente à observada no ciclo 2. Durante o ciclo 2, houve atraso no acionamento da válvula 1, responsável pela passagem do biogás pela mangueira que interliga o sistema à câmara dos sensores. No momento em que a válvula deveria abrir, o aquecimento dos sensores, a válvula 3 e a mini bomba de ar já estavam em funcionamento.

As válvulas e a mini bomba de ar utilizadas são especificadas para 6 V, mas o circuito foi alimentado com 5 V porque, no momento da montagem, os conversores disponíveis forneciam essa tensão. Essa escolha havia funcionado nos testes preliminares em protoboard e na própria placa de circuito impresso. No entanto, durante o ciclo 2 do Experimento 3, a válvula 1 permaneceu com o comando de acionamento ativo por aproximadamente 19 segundos e só completou a abertura após um peteleco na válvula. Esse comportamento sugere que a alimentação em 5 V pode ter ficado próxima do limite necessário para vencer a resistência inicial do mecanismo interno da válvula, principalmente com outros atuadores ligados simultaneamente.

Essa falha indica que o sistema ainda precisa de ajustes na alimentação dos atuadores para operar com maior estabilidade em ciclos consecutivos. Como os atuadores são especificados para 6 V, uma melhoria recomendada é substituir o conversor de 5 V por um conversor de 6 V, garantindo uma alimentação mais adequada às válvulas e à mini bomba de ar. Apesar dessa falha no ciclo 2 do Experimento 3, os demais ciclos avaliados demonstraram que o e-Nose conseguiu executar a sequência de operação proposta.

alta antes das novas coletas. Por esse motivo, os gráficos desse experimento foram mantidos no Apêndice A.

Gráfico 6 - Registros da etapa de limpeza entre ciclos no Experimento 2 do reator metanogênico de fase única: a) ciclo 1; b) ciclo 2



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: A figura apresenta as leituras brutas dos sensores MQ e as variáveis internas registradas entre a etapa de Limpeza e o início da Coleta. As variações de pressão fazem parte da rotina de admissão de ar ambiente e expurgo da câmara.

Essa condição é relevante porque os sensores MQ também são influenciados pelas condições ambientais presentes na câmara. Os *datasheets* desses sensores normalmente apresentam curvas obtidas em condições de referência próximas de 20°C e 55 ± 5% de umidade relativa. Quando a umidade se afasta dessa faixa, a resposta pode ser modificada, pois o vapor de água interfere nas reações de superfície da camada semicondutora de dióxido de estanho, alterando a resistência do sensor. Essa influência da umidade em sensores de óxido metálico também é discutida por Wang et al. (2010).

Além da umidade, os resultados indicam que parte da influência da mistura anterior pode ter permanecido na câmara ou nos próprios sensores. Conforme discutido na Seção 4.2,

nos experimentos com mais de um ciclo, as leituras no pré-aquecimento do ciclo seguinte não retornaram exatamente ao mesmo patamar observado no ciclo anterior. Dessa forma, a limpeza entre ciclos contribuiu para preparar a câmara para uma nova coleta, mas ainda não garantiu o retorno completo dos sensores à condição inicial entre ciclos consecutivos.

4.3.3 Instabilidades de leitura e influência das condições internas durante a análise

Durante a etapa de análise, foram observadas oscilações nas leituras dos sensores MQ nos Experimentos 2 e 3 do reator metanogênico de fase única. A avaliação dessas instabilidades considerou, em conjunto, as leituras dos sensores e as condições internas registradas durante a permanência do biogás diluído na câmara. Em todos os ciclos analisados, a pressão não permaneceu constante durante a etapa de Análise, apresentando queda de aproximadamente 8,5 a 10 kPa. Ao mesmo tempo, a umidade permaneceu em faixas altas, entre aproximadamente 72% e 84%, com diminuição gradual ao longo da análise, enquanto a temperatura aumentou entre 1,6 e 3,65 °C. Essas variações indicam que a condição interna da câmara não permaneceu estável durante a análise, o que ajuda a explicar parte das oscilações observadas nas leituras dos sensores MQ. A Tabela 6 apresenta uma síntese das condições internas observadas durante a etapa de Análise e do comportamento geral dos sensores MQ em cada ciclo.

Tabela 6 - Síntese das condições internas da câmara e das instabilidades dos sensores MQ durante a análise da mistura

Experimento	Ciclo	Pressão durante a análise	Umidade média	Temperatura média	Comportamento dos MQ
Exp. 2	1	125,55 → 115,60 kPa	84,30 → 82,20%	32,95 → 36,10 °C	ruído mais forte no início e eventos pontuais no meio
Exp. 2	2	126,11 → 116,30 kPa	81,55 → 79,15%	34,95 → 36,55 °C	início mais organizado, ruídos mais perceptíveis no meio e um evento próximo ao fim
Exp. 3	1	125,77 → 116,70 kPa	80,45 → 77,60%	32,15 → 35,80 °C	ruídos distribuídos, com queda brusca conjunta no trecho final
Exp. 3	2	124,53 → 116,00 kPa	78,60 → 75,10%	33,65 → 36,50 °C	ruídos mais fortes do início até próximo da metade e nova instabilidade perto do fim
Exp. 3	3	123,72 → 114,60 kPa	75,40 → 72,40%	33,85 → 36,10 °C	maior instabilidade entre os ciclos, com vários eventos conjuntos no fim

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: As setas indicam a variação entre o início e o fim da etapa de Análise. A correlação foi calculada a partir das variações consecutivas das leituras brutas dos sensores MQ durante essa etapa. O intervalo de 0,87 a 0,95 indica alta semelhança entre as variações dos sensores. O percentual de 69% a 83% indica a proporção de leituras consecutivas em que vários sensores variaram no mesmo sentido, aumentando ou diminuindo simultaneamente.

As instabilidades observadas durante a análise ocorreram de forma simultânea em vários sensores MQ. A correlação entre as variações dos sensores ficou entre 0,87 e 0,95, e

entre 69% e 83% das leituras consecutivas apresentaram variação no mesmo sentido. Isso significa que vários sensores aumentaram ou diminuíram juntos de uma leitura para a seguinte. Esse comportamento indica que as oscilações não estavam associadas a um sensor isolado, mas provavelmente a uma alteração que afetou vários sensores ao mesmo tempo durante a análise.

O Experimento 3 foi o mais afetado por instabilidades durante a análise. Enquanto no Experimento 2 os maiores saltos ficaram entre 132 e 178 (valores em unidades brutas), no Experimento 3 chegaram a 291, 371 e 409 (valores em unidades brutas), principalmente nos ciclos 1 e 3. Esse comportamento pode estar relacionado ao menor tempo de pré-aquecimento adotado no Experimento 3, configurado em 1 minuto, enquanto o Experimento 2 utilizou 5 minutos. Como sensores MQ dependem de aquecimento e estabilização para apresentar leituras mais consistentes, o menor tempo de pré-aquecimento pode ter contribuído para maior instabilidade durante a etapa de análise.

Além do pré-aquecimento, as condições internas da câmara também ajudam a explicar as instabilidades observadas. Tanto o biogás quanto o ar ambiente usado na limpeza e na diluição não passaram por uma etapa prévia de pré tratamento para reduzir a umidade antes de entrarem na câmara dos sensores. Essa escolha foi adotada porque as coletas tinham caráter preliminar e buscavam verificar o comportamento geral do sistema em operação.

No entanto, a literatura mostra que o condicionamento da amostra é importante em medições com biogás, principalmente para reduzir a umidade e outras interferências antes do contato com os sensores. Yang et al. (2019), por exemplo, utilizaram material secante em um sistema com sensor MQ-4 aplicado ao biogás, justamente porque a umidade pode afetar a sensibilidade do sensor. De forma mais geral, Dinh et al. (2021) discutem que a remoção de umidade é uma etapa importante em sistemas de amostragem de gases, pois o vapor de água pode interferir nas medições. Assim, a ausência de pré-tratamento neste trabalho pode ter contribuído para manter a umidade em uma faixa alta durante a análise, favorecendo oscilações nas leituras dos sensores.

A queda de pressão ao longo da análise indica que a mistura de biogás e ar ambiente ainda passava por acomodação dentro da câmara e das mangueiras após a etapa de coleta. Como vários sensores oscilaram ao mesmo tempo, é provável que parte dessas instabilidades esteja relacionada à condição geral do sistema durante a análise, e não a um problema isolado em sensores específicos.

De modo geral, os resultados indicam que as instabilidades durante a análise foram influenciadas por uma combinação de fatores, incluindo menor tempo de pré-aquecimento no Experimento 3, umidade alta, variação de temperatura, queda de pressão e acomodação da

mistura dentro da câmara. Mesmo assim, o e-Nose conseguiu registrar as respostas dos sensores durante os ciclos e permitiu acompanhar o comportamento do sistema em operação com biogás. Esses resultados são relevantes para uma avaliação preliminar, pois mostraram que o protótipo funciona em ciclos e também permitiram identificar os principais pontos que precisam ser ajustados. Assim, os tempos de pré-aquecimento, limpeza, expurgo e estabilização devem ser revisados em novas coletas, com o objetivo de reduzir oscilações e melhorar a repetibilidade do sistema.

4.4 Controle de pressão e estimativa do volume injetado

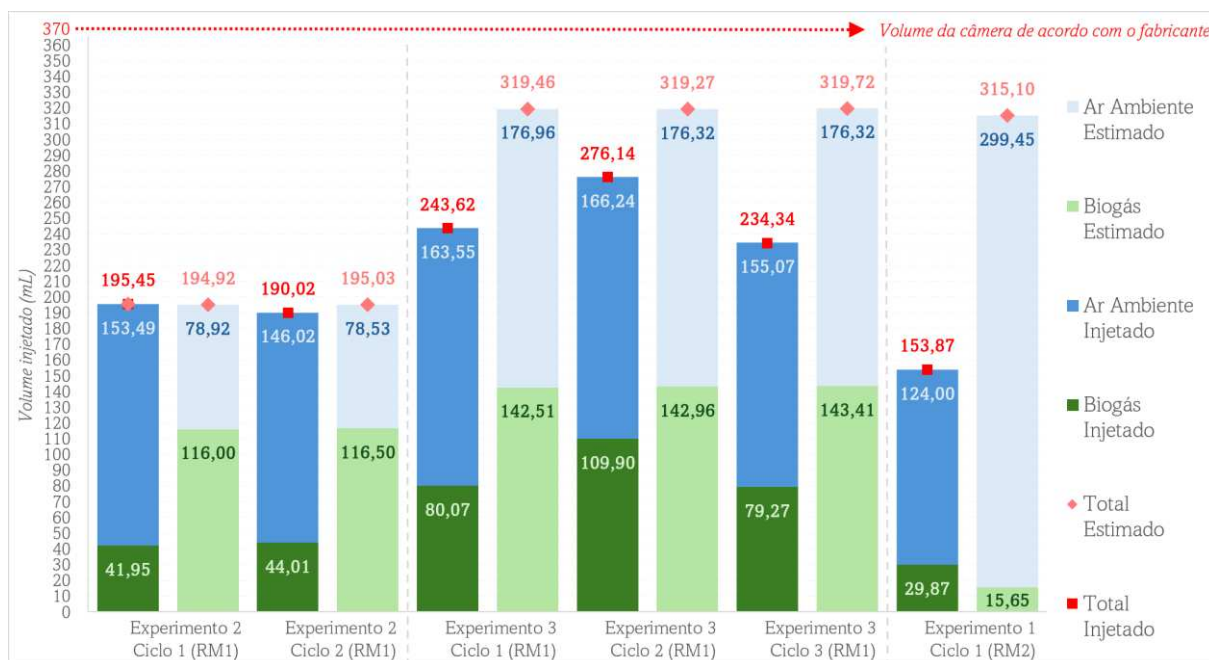
A pressão foi uma variável importante para acompanhar o funcionamento do e-Nose durante as coletas, pois serviu como referência indireta para estimar o volume admitido na câmara. Conforme descrito na Seção 3.3.4, os volumes foram estimados a partir das leituras de pressão e temperatura, considerando o volume útil da câmara e a equação dos gases ideais. Nesta seção, a discussão se concentra nos resultados obtidos com esse procedimento, comparando os volumes esperados pela parametrização com os volumes calculados a partir das leituras reais registradas durante os experimentos. O Gráfico 6 apresenta essa comparação para as coletas realizadas nos reatores metanogênicos. A linha pontilhada em vermelho indica o volume de 370 mL, informado pelo fabricante da câmara. No entanto, os cálculos foram feitos considerando o volume útil de 315 mL, conforme definido na Seção 3.3.4.

No Experimento 2, o Expurgo A foi ajustado para 70 kPa e o tempo de pré-aquecimento foi mantido em 5 minutos. Esse valor de pressão inicial estava mais próximo da pressão ambiente, de aproximadamente 93 kPa, do que nas coletas seguintes, em que o Expurgo A foi ajustado para 55 kPa. Por isso, a perda de pressão teve menor influência nesse experimento. Além disso, o volume estimado foi menor em comparação aos demais experimentos porque a pressão inicial desejada era mais alta. Como a câmara já continha mais gás no início da coleta, foi necessário injetar um volume menor para atingir a pressão final desejada de 120 kPa.

A Figura 31 mostra que, no Experimento 2, o volume total injetado ficou próximo do volume estimado. No ciclo 1, a diferença entre o volume estimado (194.92 mL) e o volume injetado (195.45 mL) foi de apenas 0.53 mL. Já no ciclo 2, a diferença entre o volume estimado (195.03 mL) e o volume injetado (190.02 mL) foi de 5.01 mL. Embora o volume total tenha ficado próximo do valor planejado, a quantidade de cada gás na mistura foi diferente da esperada. Nos dois ciclos, entrou menos biogás e mais ar ambiente do que o esperado. Isso

indica que, embora o volume total tenha ficado próximo do previsto, os sensores foram expostos a uma mistura mais diluída em biogás.

Gráfico 7 - Comparação entre os volumes estimados e injetados na câmara dos sensores nas coletas dos reatores metanogênicos de fase única e de segunda fase



Fonte: Elaborada pela autora (2026)

Nota: RM1 corresponde ao reator metanogênico de fase única, enquanto RM2 corresponde ao reator metanogênico de segunda fase. Na figura, os volumes estimados representam os valores esperados pela parametrização da coleta, enquanto os volumes injetados representam os valores calculados a partir das leituras reais de pressão e temperatura. As barras em verde correspondem ao biogás, e as barras em azul correspondem ao ar ambiente. As barras em tons mais claros indicam os volumes estimados, enquanto as barras em tons mais escuros indicam os volumes injetados. Os marcadores em vermelho representam o volume total injetado, e os marcadores em rosa representam o volume total estimado.

Após o Experimento 2, foi necessário abrir a câmara para corrigir uma falha no sensor BME280. A limpeza da placa resolveu o problema do sensor, mas a vedação da câmara não ficou tão eficiente quanto antes. Por causa disso, a câmara passou a perder mais pressão, o que afetou as coletas do Experimento 3 do do reator metanogênico de fase única e o Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase.

No Experimento 3 do reator metanogênico de fase única, os parâmetros de coleta foram ajustados na tentativa de reduzir os efeitos causados pelo problema de vedação da câmara. O Expurgo A foi reduzido de 70 kPa para 55 kPa e o tempo de pré-aquecimento foi diminuído de 5 minutos para 1 minuto. Além disso, a parametrização apresentada na Tabela 5 da Seção 3.3.6 previa a injeção de biogás até atingir 80 kPa e, em seguida, a injeção de ar ambiente até atingir 125 kPa.

Entretanto, esses valores correspondiam apenas à condição planejada. Na prática, devido à vedação comprometida da câmara, a pressão interna variava durante o pré-aquecimento. Como não existia uma etapa adicional de expurgo após essa fase, a pressão desejada não era restabelecida antes do início da coleta. Dessa forma, as pressões efetivamente atingidas durante a injeção de biogás e ar ambiente diferiram das pressões previstas na parametrização, resultando em volumes injetados diferentes dos valores estimados.

Uma possível solução seria adicionar uma nova etapa de expurgo após o pré-aquecimento, permitindo reajustar a pressão interna da câmara antes do início da coleta. Com isso, haveria maior controle sobre os volumes injetados e, teoricamente, os resultados ficariam mais próximos dos valores planejados. No entanto, essa modificação não foi implementada no código porque os reatores seriam desligados na manhã seguinte à coleta e o cromatógrafo gasoso utilizado como método de referência para caracterização/comparação da composição do biogás estaria indisponível, pois seria utilizado por outros pesquisadores.

A redução do tempo de pré-aquecimento para 1 minuto foi adotada porque os sensores já haviam sido aquecidos em testes realizados pouco antes da coleta. Além disso, como essa etapa ocorria antes da entrada de biogás e ar ambiente, sua redução também diminuía o tempo em que a câmara permanecia sujeita às variações de pressão causadas pela vedação comprometida.

Mesmo com essas alterações, os resultados do Experimento 3 continuaram diferentes do que havia sido planejado. Os volumes calculados a partir das leituras reais de pressão e temperatura foram menores do que os volumes previstos pela parametrização da coleta. Em relação ao volume total previsto, o volume efetivamente injetado foi aproximadamente 75.84 mL menor no ciclo 1 (243.62 mL), 43.13 mL menor no ciclo 2 (276.14 mL) e 85.38 mL menor no ciclo 3 (234.34 mL). Portanto, nos três ciclos, o volume real ficou abaixo do valor almejado.

Esse comportamento mostra que a estratégia adotada no Experimento 3 não foi suficiente para compensar totalmente o problema de vedação. A redução do pré-aquecimento para 1 minuto diminuiu o tempo disponível para a variação de pressão, mas a câmara continuou apresentando instabilidade. Como consequência, os volumes reais de biogás e ar ambiente não acompanharam os valores estimados pela parametrização.

Além disso, durante a realização desse experimento, foi observado que a câmara apresentava uma perda de pressão mais rápida do que a observada anteriormente, indicando que o problema de vedação havia piorado. Como consequência, a diferença entre os volumes estimados e os volumes injetados de fato, foi a maior observada entre os experimentos realizados. O volume total estimado era de 315.10 mL, enquanto o volume total injetado foi de

153.87 mL. Esse resultado reforça que a vedação comprometida passou a influenciar diretamente as coletas realizadas depois do Experimento 2, tornando a condição real de operação diferente da condição prevista inicialmente.

Para complementar essa análise da Figura 31, foi calculada a taxa média de variação de pressão durante o pré-aquecimento e durante a análise da mistura. Essa taxa foi obtida pela diferença entre a pressão final e a pressão inicial, dividida pelo intervalo de tempo correspondente, conforme a Equação 8:

$$\text{Taxa} = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{P_f - P_i}{t_f - t_i} \quad (8)$$

em que ΔP corresponde à variação de pressão e Δt ao intervalo de tempo analisado. Os termos P_f e P_i representam, respectivamente, a pressão final e a pressão inicial, enquanto t_f e t_i correspondem ao tempo final e ao tempo inicial. No pré-aquecimento, a taxa apresenta valores positivos, indicando aumento da pressão até a condição anterior à coleta. Já durante a análise da mistura de biogás e ar ambiente, os valores são negativos, indicando perda de pressão durante a permanência da amostra na câmara. As médias obtidas para cada experimento são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Taxas médias de variação de pressão no pré-aquecimento e na análise da mistura

	Taxa Média (Pré - Aquecimento)	Taxa Média (Análise da amostra)
Experimento 1	0,0808 kPa/s	-0,0076 kPa/s
Experimento 2	0,0547 kPa/s	-0,0082 kPa/s
Experimento 3	0,0929 kPa/s	-0,0074 kPa/s

Fonte: Elaborada pela autora (2026)

A Tabela 7 ajuda a explicar por que os volumes injetados ficaram diferentes dos volumes estimados na Figura 31. No pré-aquecimento, a pressão da câmara aumentou antes mesmo da entrada do biogás. Esse aumento foi pequeno no Experimento 2 do reator metanogênico de fase única, com taxa média de 0,0547 kPa/s, e foi maior no Experimento 3 do reator metanogênico de fase única e no Experimento 1 do reator metanogênico de segunda fase, com 0,0929 kPa/s e 0,0808 kPa/s. Durante a análise da mistura, a pressão caiu em todos os experimentos, com taxas próximas entre si, variando de -0,0074 a -0,0082 kPa/s. Isso indica que a câmara perdeu pressão enquanto o biogás diluído estava exposto aos sensores durante 20 minutos, tempo definido na parametrização da etapa de análise.

Esse comportamento confirma que a abertura da câmara para manutenção do sensor BME280 afetou a estabilização da pressão interna, fazendo com que a pressão mudasse mais antes do início das coletas. Como o cálculo dos volumes injetados depende da pressão, essa

instabilidade fez com que a entrada de biogás e ar ambiente não ocorresse exatamente nas condições previstas pela parametrização, afetando o volume calculado para a injeção de biogás diluído.

De forma geral, os resultados mostraram que o controle de pressão implementado no e-Nose foi importante para acompanhar a condição interna da câmara e estimar os volumes de biogás e ar ambiente admitidos durante as coletas. Mesmo com as limitações encontradas, o sistema permitiu identificar as diferenças entre os volumes previstos pela parametrização e os volumes calculados a partir dos valores de pressão e temperatura. No entanto, os resultados também demonstraram que a vedação da câmara é um ponto crítico para a confiabilidade das coletas, já que a instabilidade da pressão alterou as condições iniciais de injeção e, consequentemente, os volumes calculados para a entrada dos gases.

Portanto, como melhorias do protótipo e-Nose, recomenda-se revisar o modelo construtivo da câmara e melhorar o sistema de vedação, além de implementar no código uma etapa adicional de expurgo ou reajuste de pressão após o pré-aquecimento. Essas modificações contribuiriam para reduzir as variações acumuladas antes da coleta, melhorar o controle da condição inicial da câmara e aproximar os volumes injetados dos valores definidos na parametrização.

4.5 Limitações experimentais e problemas observados no protótipo

Os resultados desta etapa devem ser interpretados considerando o caráter preliminar dos testes realizados. O protótipo ainda estava em fase de ajuste, e algumas limitações físicas, eletrônicas e operacionais foram observadas durante as coletas.

Uma das primeiras limitações foi a falha no salvamento dos dados no cartão SD instalado na placa de circuito impresso. Embora o cartão não apresentasse defeito, o armazenamento local não funcionou de forma adequada, e as coletas passaram a depender do envio dos dados para a nuvem. A principal hipótese foi a ocorrência de conflito no barramento SPI compartilhado com o *display* TFT e o touch XPT2046. Foram testadas alternativas como remapeamento de pinos, *bit-banging*, isolamento resistivo na linha MISO, uso de resistores e capacitores, além da verificação das trilhas e da alimentação, mas o problema não foi resolvido de forma definitiva.

Também foi observada a limitação do microcontrolador utilizado, principalmente pela quantidade restrita de pinos e pelo compartilhamento dos barramentos SPI e I²C entre diferentes módulos. Essa condição aumentou a possibilidade de conflitos de comunicação entre *display*, touch, cartão SD e sensores, além de reduzir a margem para expansão do protótipo. Assim, uma

versão futura do e-Nose deve considerar um microcontrolador com mais pinos disponíveis e melhor separação entre os periféricos.

Outra limitação importante esteve relacionada à câmara de sensores. O pote hermético utilizado apresentou melhor comportamento sob pressão negativa, mas, sob pressão positiva, ocorreram vazamentos e deformação da tampa. Essa deformação alterava o volume interno da câmara, o que dificultou o controle preciso do volume injetado e limitou a aplicação da lei dos gases ideais no cálculo experimental. Mesmo após ajustes com abraçadeiras, silicone, fita vedarossa, cola de cano e troca de conectores, a vedação não foi totalmente resolvida.

Durante as coletas, também ocorreram falhas pontuais dentro da câmara. Em uma delas, cabos *jumper* internos se soltaram durante a pressurização, sendo posteriormente soldados diretamente na placa. Em outra situação, o sensor BME280 deixou de funcionar temporariamente e voltou ao normal após limpeza da placa com álcool isopropílico. Esses problemas indicam que a montagem interna ainda precisava de maior robustez mecânica e melhor proteção dos componentes.

O módulo ENS160 também apresentou limitação durante os testes. No primeiro experimento do reator metanogênico de fase única, ele ainda registrou resposta, mas em alguns momentos atingiu o valor máximo de leitura. No experimento seguinte, passou a registrar valores zerados de forma contínua e deixou de fornecer dados nos testes posteriores. Como não foi possível confirmar a causa dessa falha, a análise dos resultados foi concentrada principalmente nos sensores MQ e nas variáveis medidas pelos sensores BME280 e AHT21.

Além disso, o sistema foi operado sem pré-tratamento da amostra, o que aproximou os testes das condições reais do biogás bruto, mas também aumentou a interferência de fatores externos na resposta dos sensores. A umidade foi o fator mais observado nos dados, enquanto outros compostos presentes no biogás, como o sulfeto de hidrogênio, devem ser considerados com cautela, sem atribuir diretamente a eles alterações específicas nas leituras.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu e avaliou, em caráter preliminar, um protótipo de e-Nose para monitoramento qualitativo do biogás produzido em reatores anaeróbios alimentados com vinhaça de cana-de-açúcar. O sistema integrou sensores MQ, sensores ambientais, módulos de aquisição, atuadores, interface *touchscreen*, armazenamento local e envio remoto de dados, demonstrando que a arquitetura proposta é viável para operar com biogás real em condições experimentais.

Durante as coletas, o e-Nose executou ciclos compostos por limpeza, expurgo, pré-aquecimento, coleta e análise. As leituras brutas dos sensores MQ apresentaram mudanças após a entrada do biogás diluído, principalmente nos sensores MQ-5, MQ-138, MQ-136, MQ-2 e MQ-4. Esses resultados indicam que o conjunto de sensores foi sensível à mistura analisada, permitindo observar variações de comportamento entre as etapas.

A cromatografia gasosa foi utilizada neste trabalho como método de referência para caracterizar a composição do biogás em termos de metano e dióxido de carbono, mas não substituiu a necessidade de avaliar o comportamento operacional do e-Nose. Os resultados mostraram que a resposta do sistema também foi influenciada pela diluição com ar ambiente, pela umidade, pela temperatura, pela pressão, pelo histórico de exposição dos sensores e pela diferença entre volumes estimados e injetados.

As principais limitações estiveram relacionadas à vedação da câmara, à instabilidade de pressão, ao acionamento dos atuadores, ao armazenamento local e à ausência de pré-tratamento do biogás. Mesmo assim, o protótipo registrou respostas suficientemente consistentes para demonstrar seu potencial como ferramenta de monitoramento qualitativo. Assim, o trabalho estabeleceu uma base experimental para aprimorar o sistema em versões futuras, com maior estabilidade, repetibilidade e possibilidade de comparação mais completa com métodos de referência.

REFERÊNCIAS

ABDELWAHED, Salma H.; HEFNY, Ibrahim M.; HEGAZY, Mohamed; SAID, Lobna A.; SOLTAN, Ahmed. Survey of IoT multi-protocol gateways: Architectures, protocols and cybersecurity. **Internet of Things**, [S.l.], v. 33, p. 101703, set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101703>.

ADAM, Gilles; LEMAIGRE, Sébastien; GOUX, Xavier; DELFOSSE, Philippe; ROMAIN, Anne-Claude. Upscaling of an electronic nose for completely stirred tank reactor stability monitoring from pilot-scale to real-scale agricultural co-digestion biogas plant. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 178, p. 285–296, fev. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.106>.

ADORNO, Maria Angela Tallarico; HIRASAWA, Julia S.; VARESCHE, Maria Bernadete Amâncio. Development and Validation of Two Methods to Quantify Volatile Acids (C2-C6) by GC/FID: Headspace (Automatic and Manual) and Liquid-Liquid Extraction (LLE). **American Journal of Analytical Chemistry**, [S.l.], v. 05, n. 07, p. 406–414, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajac.2014.57049>.

AHMED PRANTO, Md. Tanvir; JUBERI, Hridi; SHAWON, Md. Sabbir Hossain; ADOR, Md. Sazzad Hossain; RAHMAN, Aquib; KAFY, Abdullahil; CHOUDHURY, Imtiaz Ahmed. Review of the current issues of connectivity, durability and reliability of sensors and their solutions. **Comprehensive Materials Processing**. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 153–164. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00042-X>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978032396020500042X>. Acesso em: 29 abr. 2026.

AOSONG, ELECTRONICS. **AHT21 Data Sheet: Humidity and Temperature Sensor**. Guangzhou: Aosong Electronics, 2021. Disponível em: https://www.aosong.com/userfiles/files/media/Data%20Sheet%20AHT21.pdf?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 11 jan. 2026.

BARRETT, Steven F.; PACK, Daniel J. **Microcontrollers Fundamentals for Engineers and Scientists**. Cham: Springer International Publishing, 2006. (Synthesis Lectures on Digital Circuits & Systems). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79737-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-79737-8>. Acesso em: 29 abr. 2026.

BARSAN, Nicolae; KOZIEJ, Dorota; WEIMAR, Udo. Metal oxide-based gas sensor research: How to? **Sensors and Actuators, B: Chemical**, [S.l.], 30 jan. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.09.047>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2006.09.047>.

BOSCH SENSORTEC. **BME280: Digital Humidity, Pressure and Temperature Sensor**. Reutlingen: Bosch Sensortec, 2022. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme280-ds002.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2026.

BOY, Guy A. (org.). **The Handbook of Human-Machine Interaction: A Human-Centered Design Approach**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 1 nov. 2017. DOI:

<https://doi.org/10.1201/9781315557380>. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781317029472>. Acesso em: 27 maio 2026.

BURLACHENKO, Julia; KRUGLENKO, Ivanna; SNOPOK, Boris; PERSAUD, Krishna. Sample handling for electronic nose technology: State of the art and future trends. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [S.l.], v. 82, p. 222–236, set. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.06.007>.

CAI, Minhao; XU, Sai; ZHOU, Xingxing; LU, Huazhong. Electronic Nose Humidity Compensation System Based on Rapid Detection. **Sensors**, [S.l.], v. 24, n. 18, p. 5881, 10 set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24185881>.

CAPELLI, Laura; SIRONI, Selenia; DEL ROSSO, Renato. Electronic Noses for Environmental Monitoring Applications. **Sensors**, [S.l.], v. 14, n. 11, p. 19979–20007, 24 out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s141119979>.

CATSOULIS, John. **Designing Embedded Hardware**. Sebastopol: O'Reilly Media, 2005.

CHAI, Hongfeng; ZHENG, Zichen; LIU, Kewei; XU, Jinyong; WU, Kaidi; LUO, Yifan; LIAO, Hanlin; DEBLIQUY, Marc; ZHANG, Chao. Stability of Metal Oxide Semiconductor Gas Sensors: A Review. **IEEE Sensors Journal**, [S.l.], v. 22, n. 6, p. 5470–5481, 15 mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148264>.

CHERNICHARO, Carlos Augusto De Lemos. **Reatores Anaerobicos**. [S.l.]: Editora UFMG, 30 jun. 1997.

COELHO, Suani Teixeira. **Tecnologias de produção e uso de biogás e biometano**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente da Universidade de São Paulo, 10 ago. 2018. 217 p.

CRAVEN, M. A; GARDNER, J. W; BARTLETT, P. N. Electronic noses—development and future prospects. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, [S.l.], v. 15, n. 9, p. 486–493, 1969.

CURTOCIRCUITO. Micro SD Card Micro SDHC Mini TF Card Adapter Reader Module for Arduino. **Curto Circuito**. 2026. Disponível em: https://curtocircuito.com.br/modulo-micro-sd-card.html?srsltid=AfmBOoo7uOs0jc3toN9dETR5f7oxx_NX_Q0YHdCXIAMghR-SgSfWqoUC. Acesso em: 16 fev. 2026.

DA SILVA, Leonardo M.; DE CASTRO, Arthur H. Revisiting ideal gases and proposal of a simple experiment for determining atmospheric pressure in the laboratory. **Química Nova**, [S.l.], 28 mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170221>. Disponível em: http://quimicanova.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=6773&nomeArquivo=ED20170493.pdf. Acesso em: 27 maio 2026.

DESHMUKH, Sharvari; BANDYOPADHYAY, Rajib; BHATTACHARYYA, Nabarun; PANDEY, R.A.; JANA, Arun. Application of electronic nose for industrial odors and gaseous emissions measurement and monitoring – An overview. **Talanta**, [S.l.], v. 144, p. 329–340, nov. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2015.06.050>.

DHRUVA, Anantha D.; BABU, Sarath; CHAKRABORTY, Abhishek; MANOJ, B.S. Computing Platforms for the Internet of Things. **Encyclopedia of Sustainable Technologies**. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 780–799. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00068-1>.

Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323903868000681>. Acesso em: 29 abr. 2026.

DINH, Trieu-Vuong; KIM, Jo-Chun. Moisture Removal Techniques for a Continuous Emission Monitoring System: A Review. **Atmosphere**, [S.l.], v. 12, n. 1, p. 61, 1 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos12010061>.

DONGGUAN ZHIRONG, VACUUM EQUIPMENT CO. LTD. **Fa0520E DC6.0V Product Specification**. Dongguan: Dongguan Zhirong Vacuum Equipment Co., Ltd., 2019. Disponível em: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/4663/4663_C14660_DC_6V.pdf. Acesso em: 16 fev. 2026.

DOUGLASS, Bruce Powel. **Design patterns for embedded systems in C: an embedded software engineering toolkit**. 1st ed. Oxford ; Burlington, MA: Newnes/Elsevier, 2011. 450 p.

DUTTA, Dhrubajyoti; BASU, Rajlaxmi. Microcontroller RISC and ARM in industrial controls. **Plant Intelligent Automation and Digital Transformation**. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 127–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824457-9.00002-9>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128244579000029>. Acesso em: 29 abr. 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32 Datasheet**. Shanghai: Espressif Systems, 2019. Disponível em: https://academy.cba.mit.edu/classes/networking_communications/ESP32/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 12 jan. 2026.

FAKRA, Ali Hamada Damien; ANDRIATOAVINA, Dolly Armel Sylvain; RAZAFINDRALAMBO, Ny Aina Manitra Nany; AMARILLIS, Kamil Abdallah; ANDRIAMAMPIANINA, José Marie Michel. A simple and low-cost integrative sensor system for methane and hydrogen measurement. **Sensors International**, [S.l.], 1 jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100032>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2020.100032>.

FERRAZ JÚNIOR, Antônio Djalma Nunes; KOYAMA, Mirian H.; DE ARAÚJO JÚNIOR, Moacir M.; ZAIAT, Marcelo. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 89, p. 245–252, abr. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.064>.

FUESS, Lucas Tadeu. **Qual o valor da vinhaça: mitigação e impacto ambiental e recuperação de energia por meio da digestão anaeróbica**. [S.l.]: Cultura Acadêmica Editora, 27 set. 2012.

FUESS, Lucas Tadeu; KIYUNA, Luma Sayuri Mazine; FERRAZ, Antônio Djalma Nunes; PERSINOTI, Gabriela Felix; SQUINA, Fabio Marcio; GARCIA, Marcelo Loureiro; ZAIAT, Marcelo. Thermophilic two-phase anaerobic digestion using an innovative fixed-bed reactor for enhanced organic matter removal and bioenergy recovery from sugarcane vinasse. **Applied Energy**, [S.l.], v. 189, p. 480–491, mar. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.071>.

FURUTA, Daniel; WILSON, Bruce; PRESTO, Albert A.; LI, Jiayu. Design and evaluation of a low-cost sensor node for near-background methane measurement. **Atmospheric**

Measurement Techniques, [S.l.], v. 17, n. 7, p. 2103–2121, 16 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/amt-17-2103-2024>.

GARCIA, Alan Fernando Coelho; AYUB, Ricardo Antonio; ROCHA, José Carlos Ferreira Da; SIQUEIRA, Hugo Valadares; STEVAN, Sergio Luiz. Phenological Stages Analysis in Grapevines Using an Electronic Nose. **Agricultural Research**, [S.l.], v. 13, n. 4, p. 636–653, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40003-024-00730-w>.

GARDNER, Julian W.; BARTLETT, Philip N. A brief history of electronic noses. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [S.l.], v. 18, n. 1–3, p. 210–211, mar. 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0925-4005\(94\)87085-3](https://doi.org/10.1016/0925-4005(94)87085-3).

GBATI, Israel. **Bare-Metal Embedded C Programming: Develop high-performance embedded systems with C for Arm microcontrollers**. 1. ed. Birmingham: Packt Publishing Limited, 2024. 1 p.

GOMES, Kaio G.; SOUZA, Dariana F.; ROGERI, Renan C.; ARAUJO, Matheus N.; FUESS, Lucas T. DO QUALI-QUANTITATIVE VARIATIONS IN SUGARCANE VINASSE-DERIVED BIOGAS REALLY IMPACT ENERGY RECOVERY? *In*: XV LATIN AMERICAN WORKSHOP AND SYMPOSIUM ON ANAEROBIC DIGESTION: CONTRIBUTING TO THE ENERGY TRANSITION AND DECARBONIZATION. 2025. **XV Latin American Workshop and Symposium on Anaerobic Digestion**. 2025. n. XV.

GONÇALVES, Hiram de Melo. **Manual de Internet da Coisas IOT**. Brasília, DF: Condor Digital, 2024. 17–19, 35–38, 41–43 e 266 p.

GÖPEL, Wolfgang; SCHIERBAUM, Klaus-Dieter. Definitions and Typical Examples. *In*: GÖPEL, W.; HESSE, J.; ZEMEL, J. N. (org.). **Sensors Set**. 1. ed. [S.l.]: Wiley, 30 nov. 1991. v. 2, ed. 1, p. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527619269.ch1a>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9783527619269.ch1a>. Acesso em: 29 abr. 2026.

HARRIS, Sarah L.; HARRIS, David. Embedded I/O Systems. **Digital Design and Computer Architecture**. [S.l.]: Elsevier, 2022. p. 542.e1-542.e64. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820064-3.00019-2>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128200643000192>. Acesso em: 29 abr. 2026.

HENSCHEN, Lawrence J.; LEE, Julia C. Introduction to Internet of Things and embedded systems. **Embedded System Design**. [S.l.]: Elsevier, 2024. p. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18470-3.00001-4>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780443184703000014>. Acesso em: 29 abr. 2026.

HKIRI, Amal; KARMANI, Mouna; ALASMARY, Fawaz Hasan; BEN BAHRI, Omar; MURAYR, Ahmed Mohammed; MACHHOUT, Mohsen. In-depth study of lightweight block ciphers: Performance assessment and implementation on sensor motes. **Alexandria Engineering Journal**, [S.l.], v. 113, p. 461–479, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.11.023>.

HOGEWIND, F.; ZWAARDEMAKER, H. On Spray-Electricity and Waterfall-Electricity. *In*: ROYAL NETHERLANDS ACADEMY OF ARTS AND SCIENCES (KNAW). 1919. 1919. v. 22, p. 429–437.

KARAKAYA, Diclehan; ULUCAN, Oguzhan; TURKAN, Mehmet. Electronic Nose and Its Applications: A Survey. **International Journal of Automation and Computing**, [S.l.], v. 17, n. 2, p. 179–209, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11633-019-1212-9>.

KHORRAMIFAR, Ali; KARAMI, Hamed; LVOVA, Larisa; KOLOURI, Alireza; ŁAZUKA, Ewa; PIŁAT-ROŻEK, Magdalena; ŁAGÓD, Grzegorz; RAMOS, Jose; LOZANO, Jesús; KAVEH, Mohammad; DARVISHI, Yousef. Environmental Engineering Applications of Electronic Nose Systems Based on MOX Gas Sensors. **Sensors**, [S.l.], v. 23, n. 12, p. 5716, 19 jun. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23125716>.

KNAPP, Eric. How Industrial Networks Operate. **Industrial Network Security**. [S.l.]: Elsevier, 2011. p. 89–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-645-2.00005-7>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781597496452000057>. Acesso em: 29 abr. 2026.

LACAMERA, Daniele. **Embedded Systems Architecture: Design and write software for embedded devices to build safe and connected systems**. 1. ed. Birmingham: Packt Publishing Limited, 2023. 1 p.

LI, Yan; SUN, Bin. An intelligent indoor fire localization system combining dynamic clustering algorithm and particle swarm optimization algorithm. **Journal of Building Engineering**, [S.l.], v. 98, p. 111180, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111180>.

LITANI, Kenta; ICHIKAWA, Kenta; TOMA, Koji; ARAKAWA, Takahiro; MITSUBAYASHI, Kohji. Biofluorometric sniffing technologies for measuring and imaging of human-borne volatile markers. **Comprehensive Analytical Chemistry**. [S.l.]: Elsevier, 2025. v. 110, p. 99–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2024.11.004>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0166526X24001454>. Acesso em: 29 abr. 2026.

LIU, Yi-Hsing; YOUNG, Sheng-Joue; JI, Liang-Wen; CHU, Yen-Lin; CHANG, Shou-Jinn. High-sensitive ethanol gas sensor using Ag modified ZnO nanosheets. **Talanta Open**, [S.l.], v. 10, p. 100386, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.talo.2024.100386>.

LOPES, Luis Claudio Gambôa. PICSIMLab 0.9.2. 2024. Disponível em: https://lcgamboa.github.io/picsimlab_docs/stable/. Acesso em: 28 set. 2025.

MARIKUTSA, Artem; RUMYANTSEVA, Marina; KONSTANTINOVA, Elizaveta A.; GASKOV, Alexander. The Key Role of Active Sites in the Development of Selective Metal Oxide Sensor Materials. **Sensors**, [S.l.], v. 21, n. 7, p. 2554, 6 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21072554>.

MARWEDEL, Peter. **Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things**. Cham: Springer International Publishing, 2021. (Embedded Systems). DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60910-8>. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-60910-8>. Acesso em: 29 abr. 2026.

MASTERPLC. Simulador de circuito on-line. **MasterPLC**. 2026. Disponível em: <https://pt.masterplc.com/simulador-de-circuito/>. Acesso em: 1 fev. 2026.

MEHTA, B.R.; REDDY, Y.J. Serial communications. **Industrial Process Automation Systems**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 307–339. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800939-0.00009-7>. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128009390000097>. Acesso em: 29 abr. 2026.

MEI, Haixia; PENG, Jingyi; WANG, Tao; ZHOU, Tingting; ZHAO, Hongran; ZHANG, Tong; YANG, Zhi. Overcoming the Limits of Cross-Sensitivity: Pattern Recognition Methods for Chemiresistive Gas Sensor Array. **Nano-Micro Letters**, [S.l.], v. 16, n. 1, p. 269, dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01489-z>.

MENDONÇA, N. F. **Avaliação dos impactos ambientais associados à inserção do sistema de biodigestão anaeróbica ao processamento da vinhaça em biorrefinarias de cana-de-açúcar**. 2023. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. .

MENINI, Anna (org.). **The Neurobiology of Olfaction**. Boca Raton (FL): CRC Press/Taylor & Francis, 2010. (Frontiers in Neuroscience). Disponível em: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK55980/>. Acesso em: 29 abr. 2026.

MICROSOFT. Documentation for Visual Studio Code. 2026. Disponível em: <https://code.visualstudio.com/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

MONCRIEFF, R. W. An instrument for measuring and classifying odors. **Journal of Applied Physiology**, [S.l.], v. 16, n. 4, p. 742–749, 1 jul. 1961. Disponível em: <https://doi.org/10.1152/jappl.1961.16.4.742>.

MUKHERJEE, K; GAUR, A P S; MAJUMDER, S B. Investigations on irreversible- and reversible-type gas sensing for ZnO and Mg_{0.5} Zn_{0.5} Fe₂ O₄ chemi-resistive sensors. **Journal of Physics D: Applied Physics**, [S.l.], v. 45, n. 50, p. 505306, 19 dez. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/50/505306>.

MÜLLER, Gerhard; SBERVEGLIERI, Giorgio. Origin of Baseline Drift in Metal Oxide Gas Sensors: Effects of Bulk Equilibration. **Chemosensors**, [S.l.], v. 10, n. 5, p. 171, 2 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors10050171>.

MURATA MANUFACTURING. Basic knowledge of CO₂ sensors. **Murata Manufacturing**. 2026. Disponível em: <https://www.murata.com/products/sensor/co2/overview/basic>. Acesso em: 11 jan. 2026.

NAGAHAGE, Isura Sumeda Priyadarshana; NAGAHAGE, Ekanayaka Achchillage Ayesha Dilrukshi; FUJINO, Takeshi. Assessment of the applicability of a low-cost sensor-based methane monitoring system for continuous multi-channel sampling. **Environmental Monitoring and Assessment**, [S.l.], 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09290-w>. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09290-w>.

NETO, Almir; GOMES, Luis; VALE, Zita. Open collaborative smart plugs for energy management. **HardwareX**, [S.l.], v. 19, p. e00549, set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2024.e00549>.

NGUYEN, Duc; GADHAMSHETTY, Venkataramana; NITAYAVARDHANA, Saoharit; KHANAL, Samir Kumar. Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review. **Bioresource Technology**, [S.l.], v. 193, p. 513–522, out. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.080>.

PADILLA, M.; PERERA, A.; MONTOLIU, I.; CHAUDRY, A.; PERSAUD, K.; MARCO, S. Drift compensation of gas sensor array data by Orthogonal Signal Correction. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, [S.l.], v. 100, n. 1, p. 28–35, jan. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2009.10.002>.

PARDO, M.; SBERVEGLIERI, G. Sensors and data analysis for electronic nose. **Anales de la Asociación Química Argentina**, [S.l.], v. 93, n. 1–3, p. 89–98, 2005.

PERIM, Victor Gonçalves de Carvalho Feitosa; NASCIMENTO, Jefferson Nataline Rosa do. **Microcontroladores e microprocessadores**. [S.l.]: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. 232 p.

PERIS, Miguel; ESCUDER-GILABERT, Laura. On-line monitoring of food fermentation processes using electronic noses and electronic tongues: A review. **Analytica Chimica Acta**, [S.l.], v. 804, p. 29–36, dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2013.09.048>.

PLATFORMIO. PlatformIO IDE for VSCode. 2026. Acesso em: 28 jun. 2025.

POLSTRA, Philip. Input and output devices. **Hacking and Penetration Testing with Low Power Devices**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p. 123–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800751-8.00006-6>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128007518000066>. Acesso em: 29 abr. 2026.

PRUDENZA, Stefano; BAX, Carmen; CAPELLI, Laura. Implementation of an electronic nose for real -time identification of odour emission peaks at a wastewater treatment plant. **Heliyon**, [S.l.], v. 9, n. 10, p. e20437, out. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20437>.

RESCALLI, Andrea; MARZORATI, Davide; GELOSA, Simone; CELLESI, Francesco; CERVERI, Pietro. Temperature Modulation of MOS Sensors for Enhanced Detection of Volatile Organic Compounds. **Chemosensors**, [S.l.], v. 11, n. 9, p. 501, 15 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11090501>.

ROBBIANI, Stefano; LOTESORIERE, Beatrice Julia; DELLACÀ, Raffaele L.; CAPELLI, Laura. Physical Confounding Factors Affecting Gas Sensors Response: A Review on Effects and Compensation Strategies for Electronic Nose Applications. **Chemosensors**, [S.l.], v. 11, n. 10, p. 514, 29 set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11100514>.

RÖCK, Frank; BARSAN, Nicolae; WEIMAR, Udo. Electronic Nose: Current Status and Future Trends. **Chemical Reviews**, [S.l.], v. 108, n. 2, p. 705–725, 1 fev. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/cr068121q>.

RONDON, Luis Puche; BABUN, Leonardo; ARIS, Ahmet; AKKAYA, Kemal; ULUAGAC, A. Selcuk. Survey on Enterprise Internet-of-Things systems (E-IoT): A security perspective. **Ad Hoc Networks**, [S.l.], v. 125, p. 102728, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102728>.

SALIMIAN, Firouzeh; HEMMATI, Alireza; GHAEMI, Ahad. A review of nanostructured carbon dioxide sensors based on electrical and thermal conductivity. **Results in Engineering**, [S.l.], v. 26, p. 105633, jun. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105633>.

SANDERSON, M.L. Electrical Measurements. **Instrumentation Reference Book**. [S.l.]: Elsevier, 2010. p. 439–498. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8308-1.00027-9>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750683081000279>. Acesso em: 29 abr. 2026.

SANTOS, Fernando (org.). **Sugarcane biorefinery, technology and perspectives**. London San Diego, CA Cambridge, MA: Academic Press is an imprint of Elsevier, 2020. 1 p. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00884-4>.

SARUHAN, Bilge; LONTIO FOMEKONG, Roussin; NAHIRNIAK, Svitlana. Review: Influences of Semiconductor Metal Oxide Properties on Gas Sensing Characteristics. **Frontiers in Sensors**, [S.l.], v. 2, p. 657931, 20 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsens.2021.657931>.

SAVAND-ROUMI, Ehsan; MOHTASEBI, Seyed Saeid; RAFIEE, Shahin; GHANAVATI, Hossein; KHOSHNEVISAN, Benyamin. Introducing new monitoring indices from the headspace of biogas digester via e-nose: A case study. **Measurement**, [S.l.], v. 190, p. 110769, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.110769>.

SCARLETT, Jason J.; BRENNAN, Robert W. Evaluating a new communication protocol for real-time distributed control. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [S.l.], v. 27, n. 3, p. 627–635, jun. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.10.009>.

SCHERZ, Paul; MONK, Simon. **Practical Electronics for Inventors, Fourth Edition**. 4th edition. New York, N.Y: McGraw-Hill Education, 2016. 1 p.

SCIOSENSE. **ENS160 Datasheet: Digital Metal-Oxide Multi-Gas Sensor**. Eindhoven: ScioSense, 2023. Disponível em: <https://www.sciosense.com/wp-content/uploads/2023/12/ENS160-Datasheet.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2026.

SHARMA, Rajnish K.; CHAN, Philip C.H.; TANG, Zhenan; YAN, Guizhen; HSING, I-Ming; SIN, Johnny K.O. Investigation of stability and reliability of tin oxide thin-film for integrated micro-machined gas sensor devices. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [S.l.], v. 81, n. 1, p. 9–16, dez. 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(01\)00920-0](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(01)00920-0).

SHARP CORPORATION. **PC817XxNSZ1B Series**. [S.l.]: Sharp Corporation, 2018. Disponível em: https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/PC817XxNSZ1B_e.pdf. Acesso em: 16 fev. 2026.

SHI, Yan; DOU, Huifang; ZHOU, Anhong; CHEN, YangQuan. Design and fabrication of a miniaturized electrochemical instrument and its preliminary evaluation. **Sensors and Actuators B: Chemical**, [S.l.], v. 131, n. 2, p. 516–524, maio 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.12.053>.

SHI, Yushu; NI, Lanxiu; WANG, Zhenming; CHEN, Meng; FENG, Liang. Ultrathin two-dimensional materials: New opportunities and challenges in ultra-sensitive gas sensing. **Coordination Chemistry Reviews**, [S.l.], v. 505, p. 215691, abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215691>.

SITRONIX TECHNOLOGY CORPORATION. **ST7789V: 240RGB x 320 dot 262K Color with Frame Memory Single-Chip TFT Controller/Driver**. [S.l.]: Sitronix Technology

Corporation, 2014. Disponível em: <https://newhavendisplay.com/content/datasheets/ST7789V.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2026.

STEVAN JR, Sergio Luiz. **Internet das coisas: fundamentos e aplicações em Arduino e NodeMCU**. [S.l.]: Erica, Iatria, 13 maio 2024. 224 p.

STEVAN JR., Sergio Luiz; GARCIA, Alan Fernando Coelho; MENEGOTTO, Bruno Adriano; ROCHA, Jose Carlos Ferreira Da; SIQUEIRA, Hugo Valadares; AYUB, Ricardo Antonio. Phenological stages analysis in peach trees using electronic nose. **Open Agriculture**, [S.l.], v. 9, n. 1, p. 20220337, 6 set. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0337>.

STEVAN JR, Sérgio Luiz; SILVA, Rodrigo Adamshuk. **Automação e instrumentação industrial com arduino: teoria e projetos**. [S.l.]: Erica, Iatria, 13 maio 2015.

STEVAN JR, Sergio Luiz; SIQUEIRA, Hugo Valadares; MENEGOTTO, Bruno Adriano; SCHROEDER, Lucas Caillot; PESSENTI, Isabela Leticia; AYUB, Ricardo Antonio. Discrimination analysis of wines made from four species of blueberry through their olfactory signatures using an E-nose. **LWT**, [S.l.], v. 187, p. 115320, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115320>.

TEXAS INSTRUMENTS. **ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator**. Dallas: Texas Instruments, 2024. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2026.

TEXAS INSTRUMENTS. **Módulo regulador step-down LM2596S**. Dallas: Texas Instruments, 2023. Disponível em: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2026.

TONEZZER, Matteo; VAN DUY, Lai. Gas Sensors. **Encyclopedia of Sensors and Biosensors**. [S.l.]: Elsevier, 2023. p. 185–208. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822548-6.00113-8>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128225486001138>. Acesso em: 29 abr. 2026.

TOULSON, Rob; WILMSHURST, Tim. Advanced Serial Communications. **Fast and Effective Embedded Systems Design**. [S.l.]: Elsevier, 2012. p. 243–271. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097768-3.00012-X>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008097768300012X>. Acesso em: 29 abr. 2026.

USINAINFO. Mini Bomba de Ar 6V 1,8L/Min - A370PM. 2026. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/bombinha-de-agua-e-ar/mini-bomba-de-ar-6v-18lmin-a370pm-8716.html>. Acesso em: 17 fev. 2026.

VOSS, Henike Guilherme Jordan; MENDES JÚNIOR, José Jair Alves; FARINELLI, Murilo Eduardo; STEVAN, Sergio Luiz. A Prototype to Detect the Alcohol Content of Beers Based on an Electronic Nose. **Sensors**, [S.l.], v. 19, n. 11, p. 2646, 11 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s19112646>.

VOSS, Henike Guilherme Jordan; STEVAN, Sergio Luiz; AYUB, Ricardo Antonio. Peach growth cycle monitoring using an electronic nose. **Computers and Electronics in**

Agriculture, [S.l.], v. 163, p. 104858, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104858>.

WANG, Chengxiang; YIN, Longwei; ZHANG, Luyuan; XIANG, Dong; GAO, Rui. Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors. **Sensors**, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 2088–2106, 15 mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s100302088>.

WILKENS, Walter F.; HARTMAN, John D. AN ELECTRONIC ANALOG FOR THE OLFACTORY PROCESSES*†. **Annals of the New York Academy of Sciences**, [S.l.], v. 116, n. 2, p. 608–612, jul. 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1964.tb45092.x>.

WÖRNER, Julius; EIMLER, Jonas; PEIN-HACKELBUSCH, Miriam. Long-term drift behavior in metal oxide gas sensor arrays: a one-year dataset from an electronic nose. **Scientific Data**, [S.l.], v. 12, n. 1, p. 1628, 8 out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05993-8>.

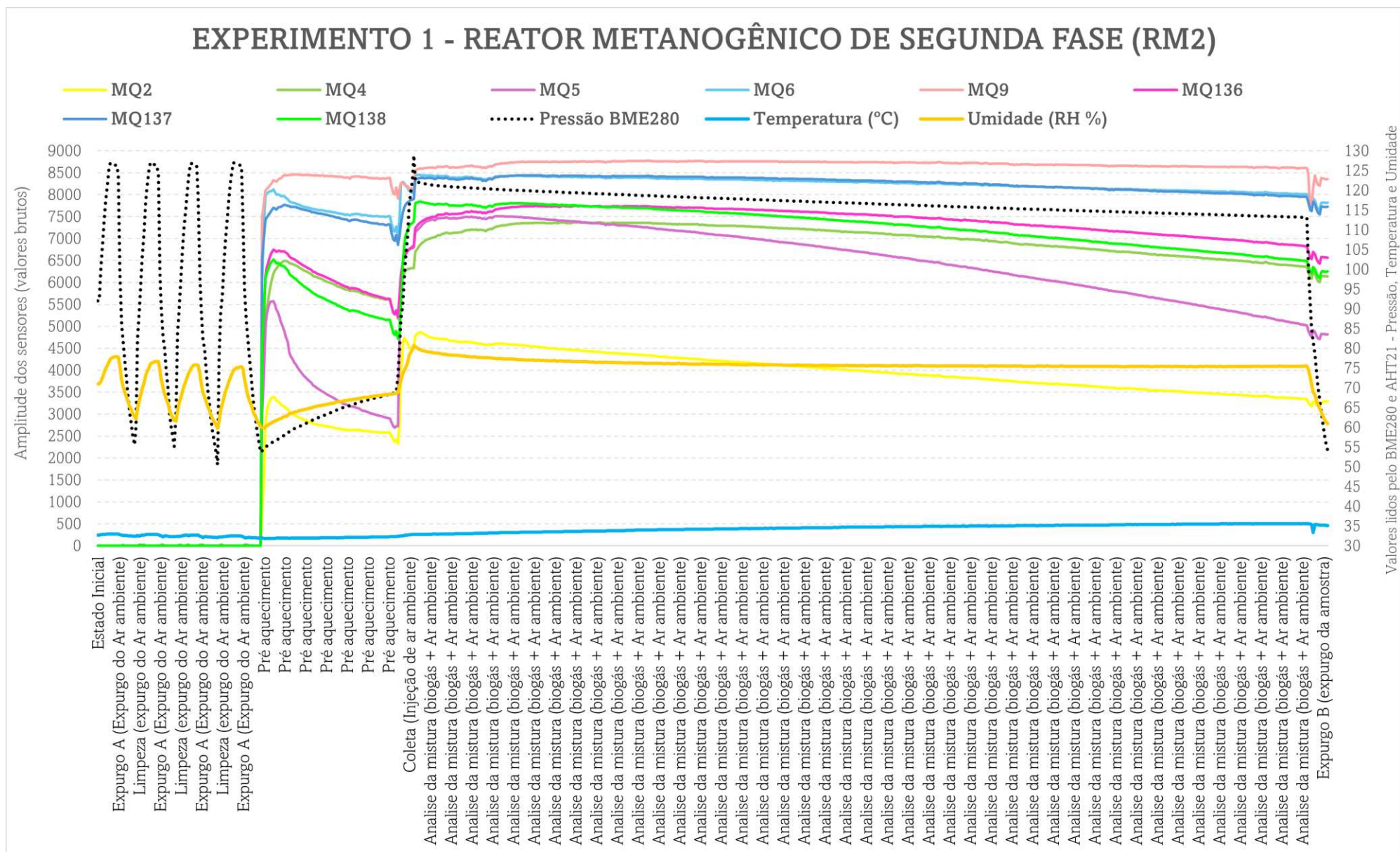
YANG, Shunchang; LIU, Yikan; WU, Na; ZHANG, Yingxiu; SVORONOS, Spyros; PULLAMMANAPPALLIL, Pratap. Low-cost, Arduino-based, portable device for measurement of methane composition in biogas. **Renewable Energy**, [S.l.], v. 138, p. 224–229, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.083>.

ZHANG, Hengrui; LIN, Yuandong; CAO, Shilin; CHENG, Jun-Hu; ZENG, Xin-An. Artificial intelligence boosting multi-dimensional information fusion: Data collection, processing and modeling for food quality and safety assessment. **Trends in Food Science & Technology**, [S.l.], v. 163, p. 105138, set. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105138>.

ZHU, Zexuan; XI, Xiaolin; XU, Xun; CAI, Yonglin. Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, [S.l.], v. 59, p. 453–466, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.015>.

ZUHAER, Abrar; KHANDOKER, Azad; ENAYET, Nafees; PARTHA, Pronab Kumar Paul; AWAL, Md. Abdul. Sustainable aquaculture: An Iot-integrated system for real-time water quality monitoring featuring advanced do and ammonia sensors. **Aquacultural Engineering**, [S.l.], v. 112, p. 102620, jan. 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2025.102620>.

APÊNDICE A - GRÁFICOS DAS RESPOSTAS DOS SENSORES



EXPERIMENTO 2 - REATOR METANOGENÉTICO DE FASE ÚNICA (RM1)

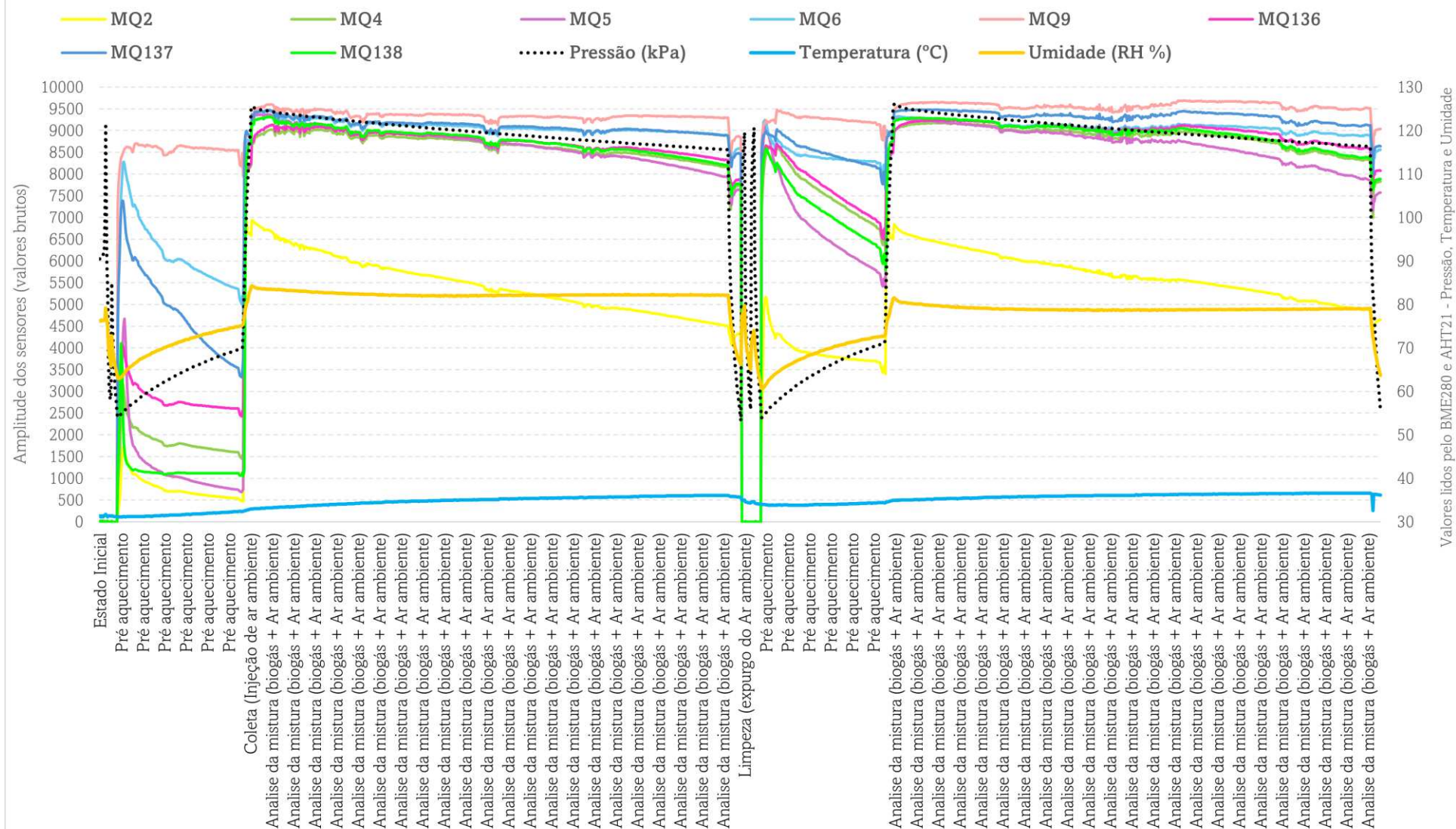
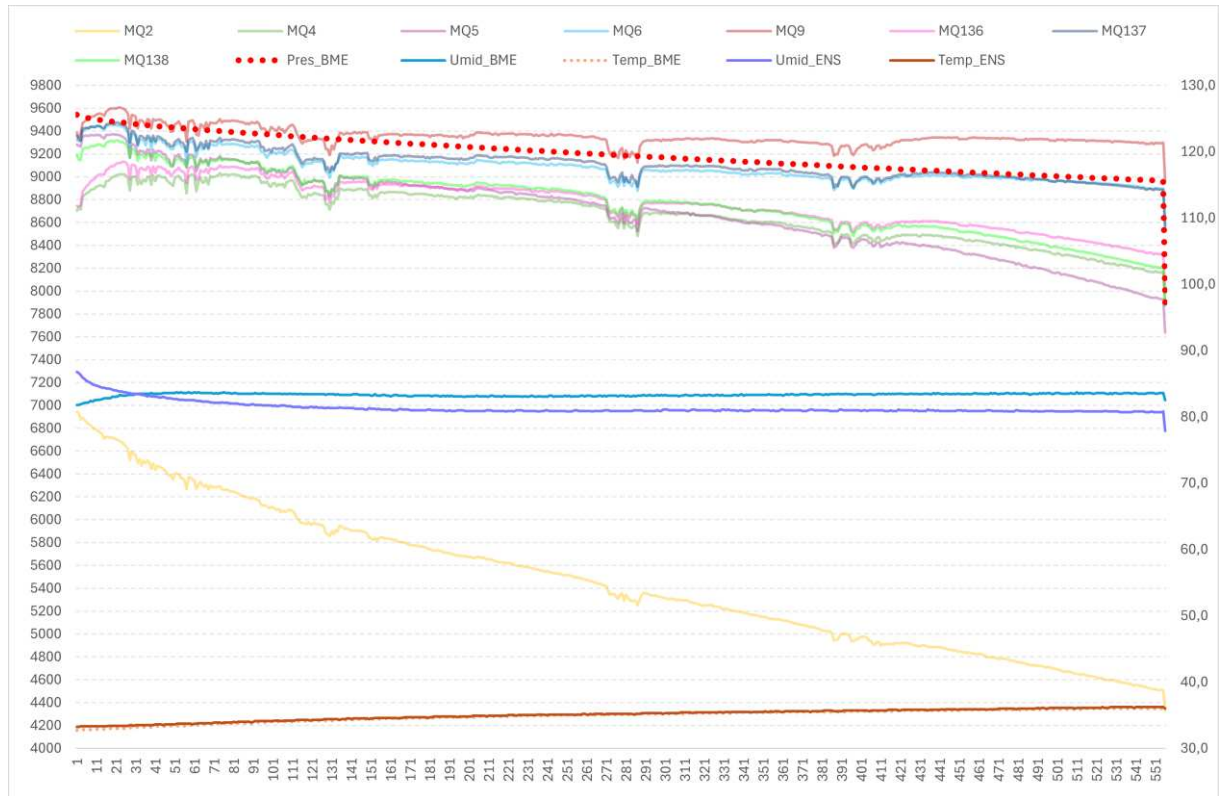
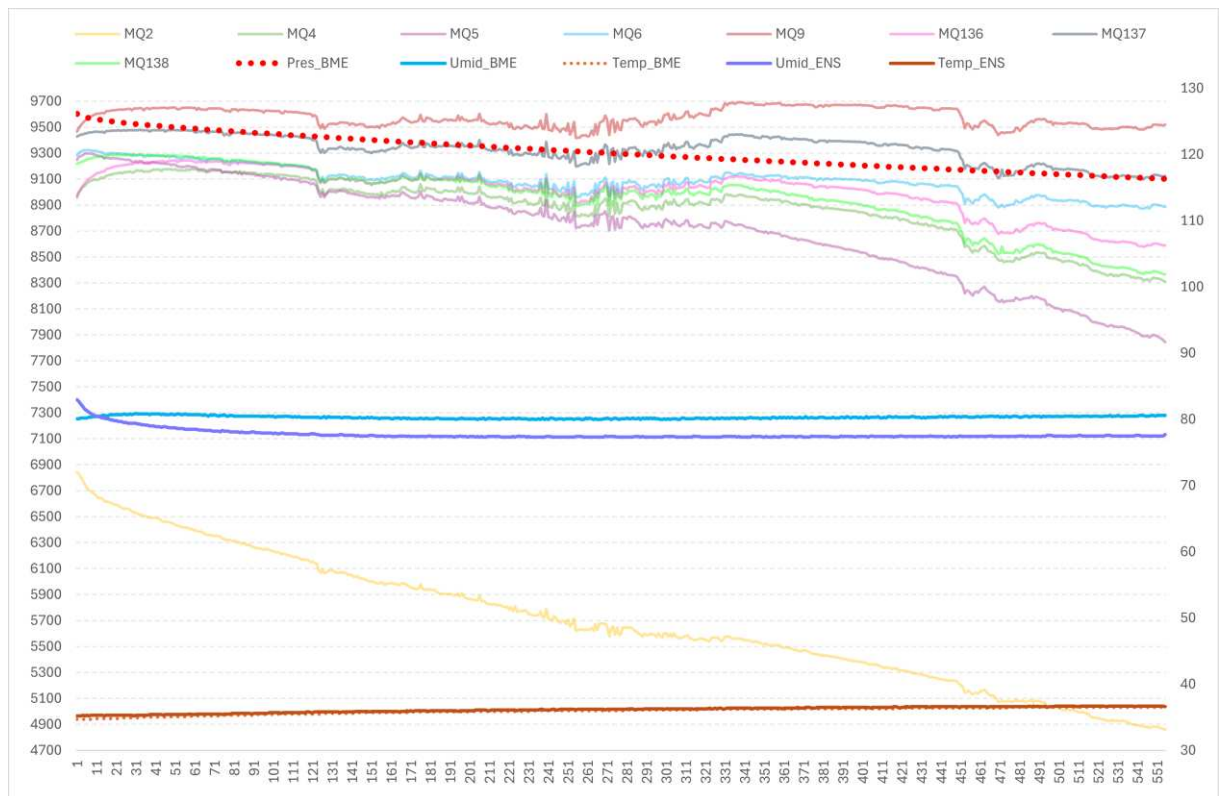


GRÁFICO A – EXPERIMENTO 2 - CICLO 1 – ETAPA ANALISE**GRÁFICO B – EXPERIMENTO 2 - CICLO 2 – ETAPA ANALISE**

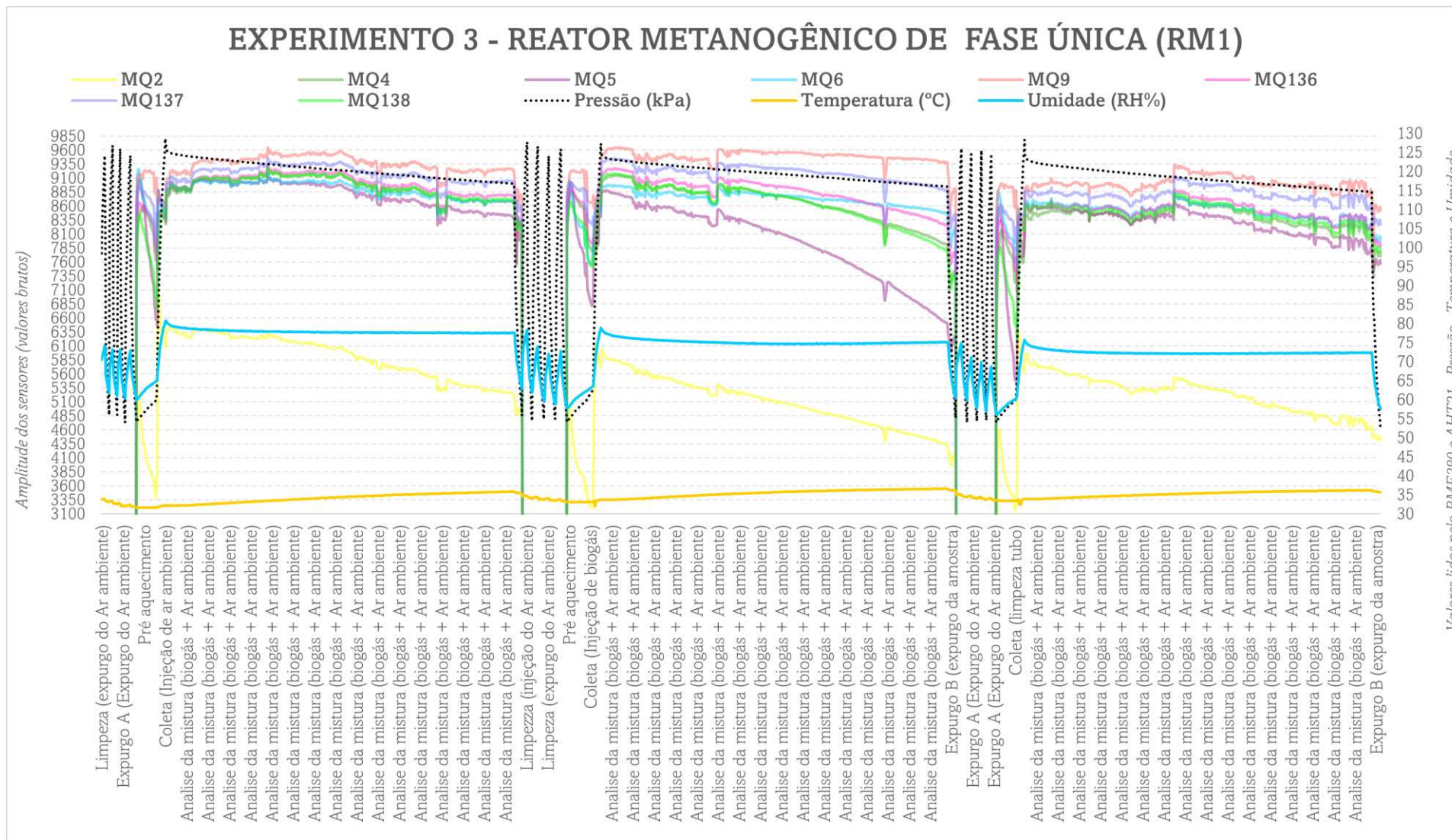


GRÁFICO A – EXPERIMENTO 3 - CICLO 1 – ETAPA ANALISE

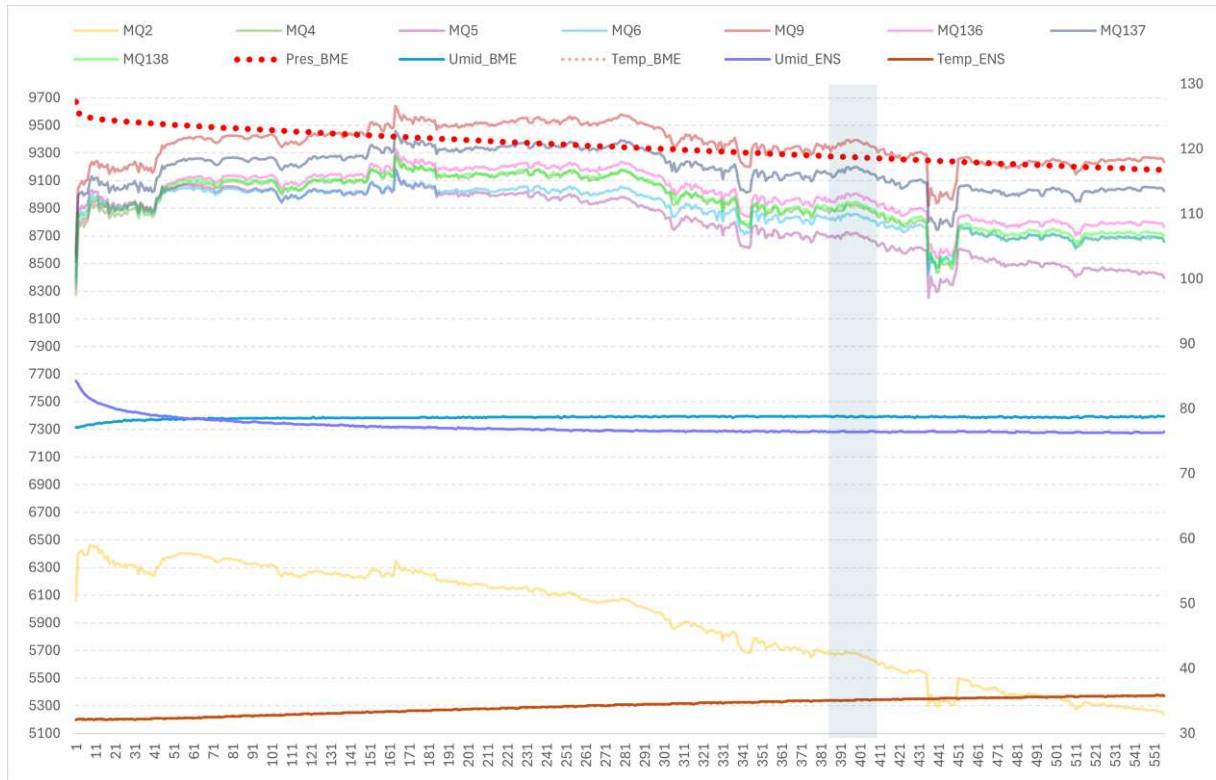


GRÁFICO B – EXPERIMENTO 3 - CICLO 2 – ETAPA ANALISE

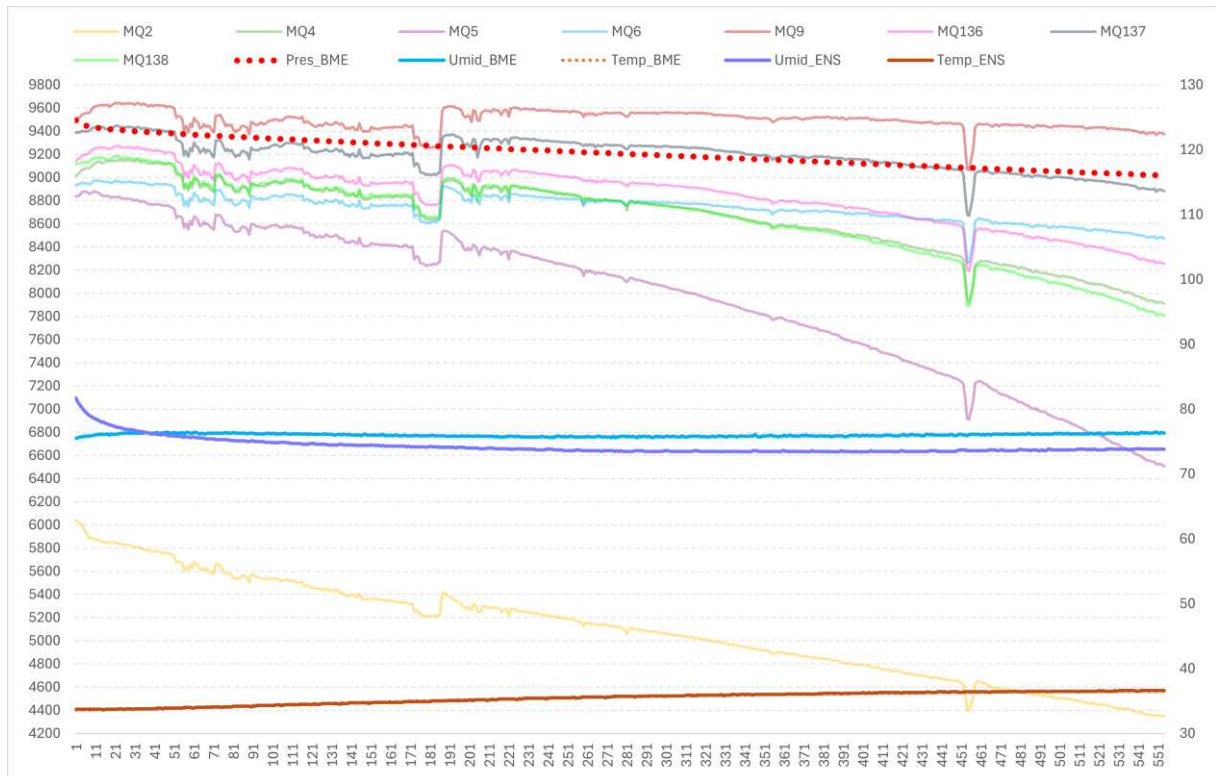


GRÁFICO C – EXPERIMENTO 3 - CICLO 3 – ETAPA ANALISE

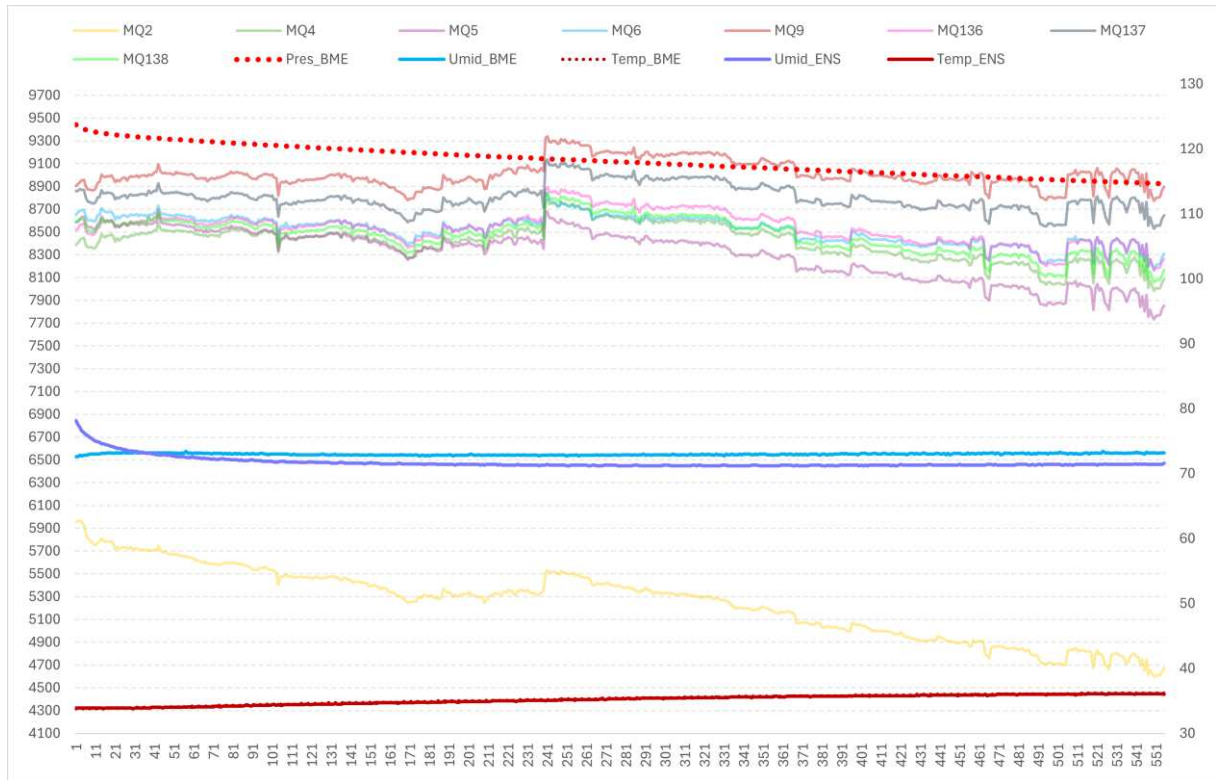
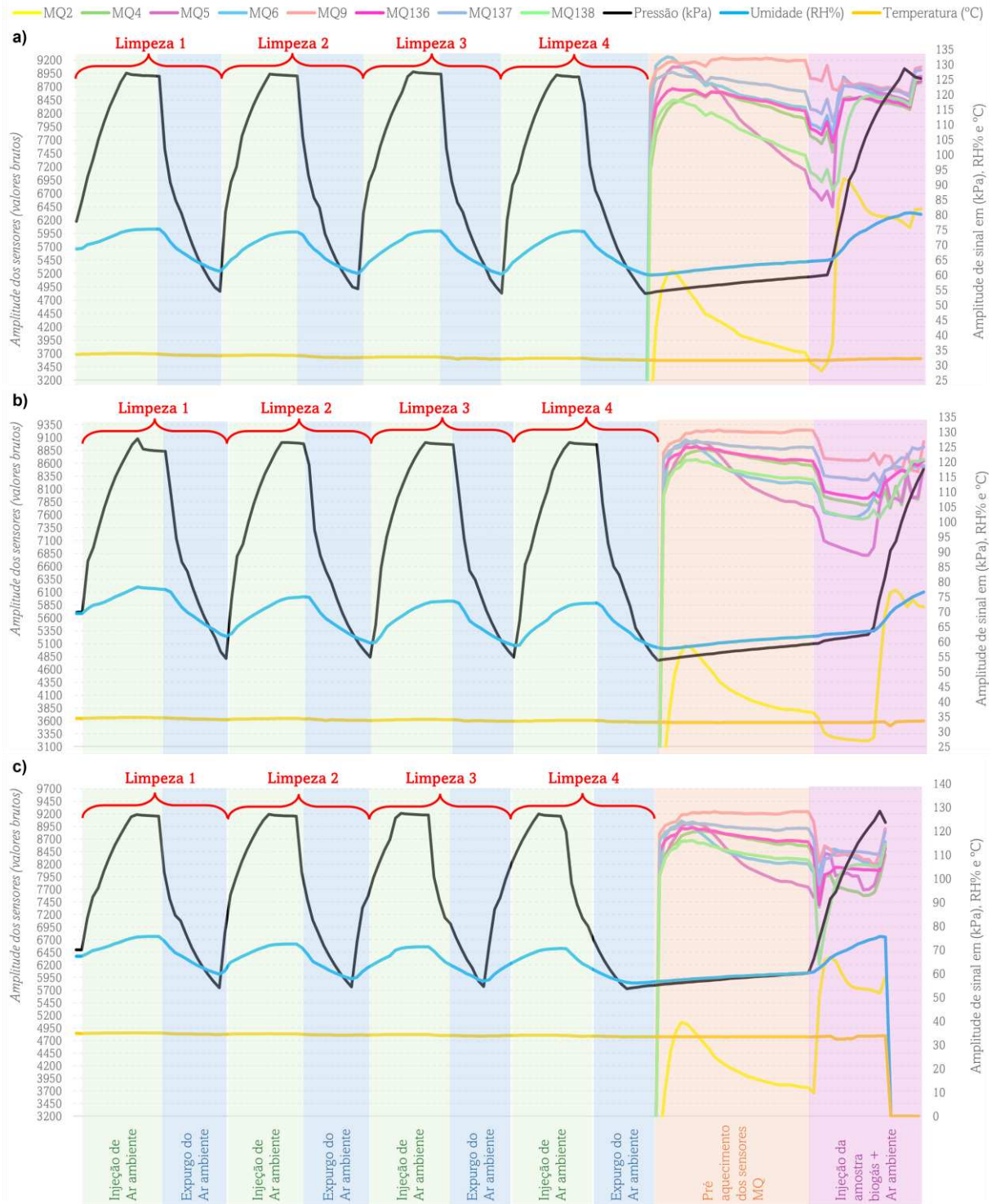


GRÁFICO D – EXPERIMENTO 3 – TODOS OS CICLOS EXECUTADOS NA ETAPA LIMPEZA E PRÉ AQUECMIENTO



APÊNDICE B - LÓGICA DE OPERAÇÃO E-NOSE

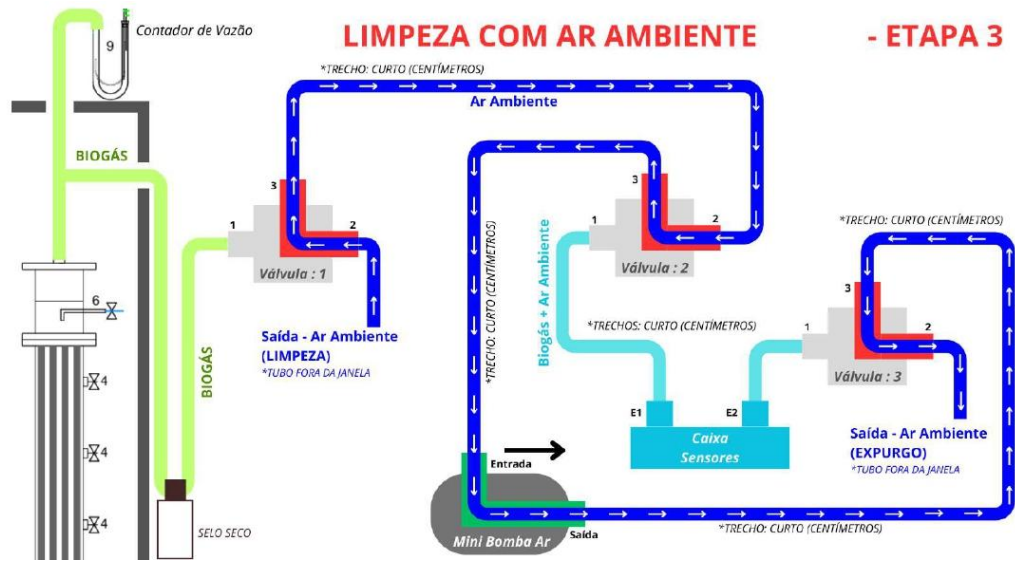
Para ilustrar o estado de atuação de cada um dos atuadores do sistema foi usado uma notação de cor onde verde significa *ligado* e vermelho significa *desligado*

Quadro A- Estados de operação das válvulas, da bomba e do aquecimento ao longo do ciclo de amostragem

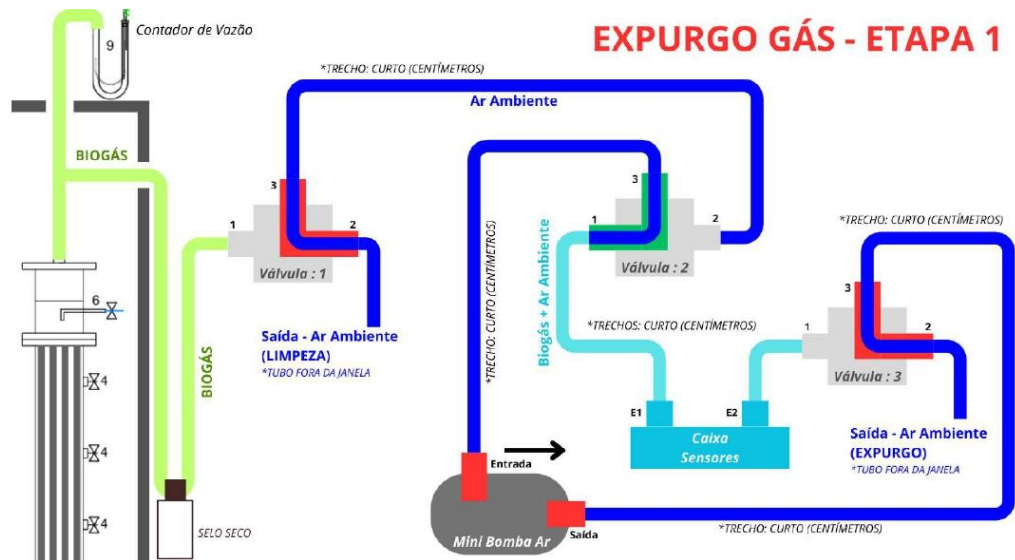
Ciclo de Operação	Válvula 1	Válvula 2	Válvula 3	Bomba	Heater
Estado Inicial					
<i>Etapa 1</i>					
Limpeza (Controle por tempo e pressão)					
<i>Etapa 1</i>					
<i>Etapa 2</i>					
<i>Etapa 3</i>					
Exourgo A (Controle por pressão)					
<i>Etapa 1</i>					
<i>Etapa 2</i>					
Pré-Aquecimento (Controle por tempo)					
<i>Etapa 1</i>					
Coleta (Controle por tempo e pressão)					
<i>Etapa 1 (Coleta de biogás)</i>					
<i>Etapa 2 (Coleta de biogás)</i>					
<i>Etapa 3 (Coleta de biogás)</i>					
<i>Etapa 4 (Diluição ar ambiente)</i>					
<i>Etapa 5 (Diluição ar ambiente)</i>					
Análise (Controle por tempo)					
<i>Etapa 1</i>					
Expurgo B (Controle po pressão)					
<i>Etapa 1</i>					
<i>Etapa 2</i>					

Fonte: Autoria própria (2026)

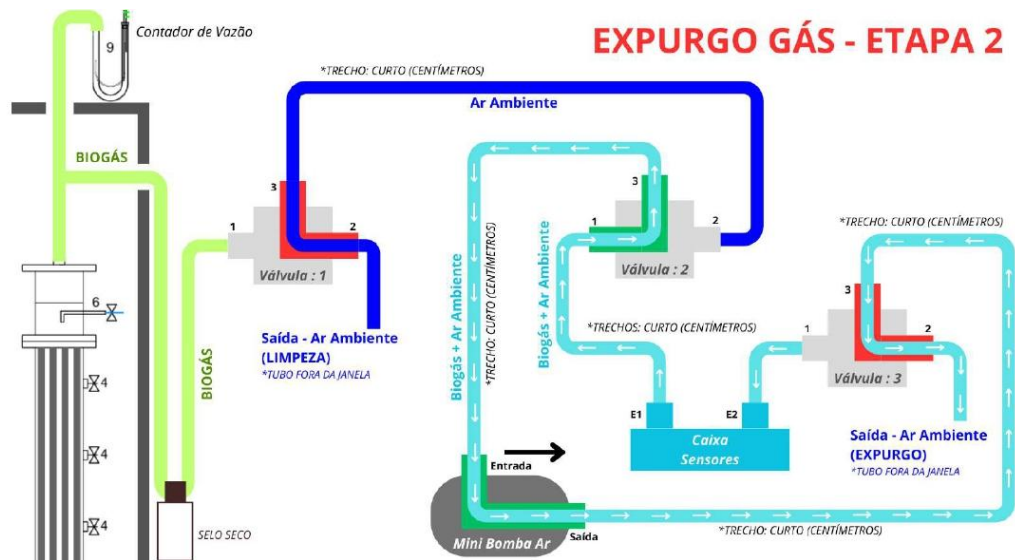
4)



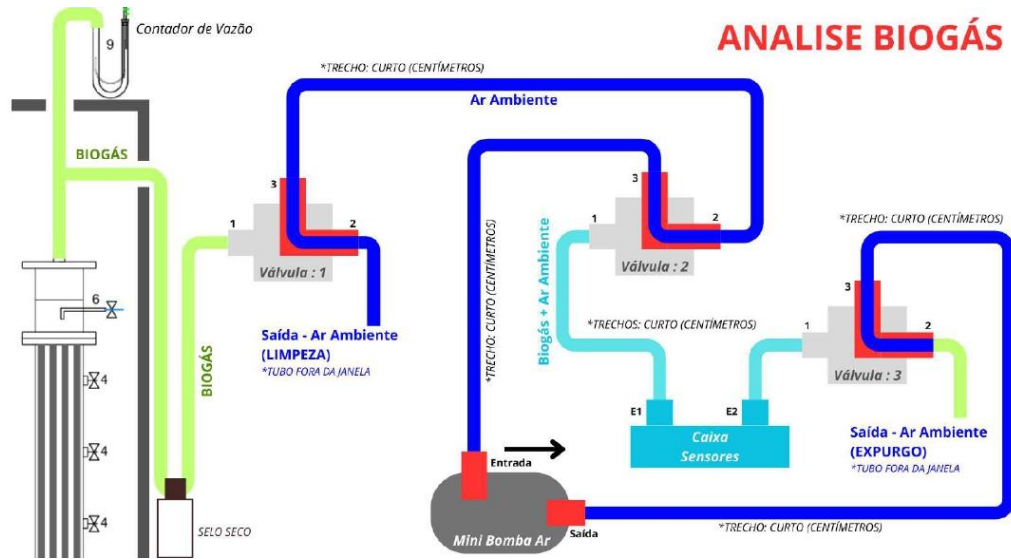
5)



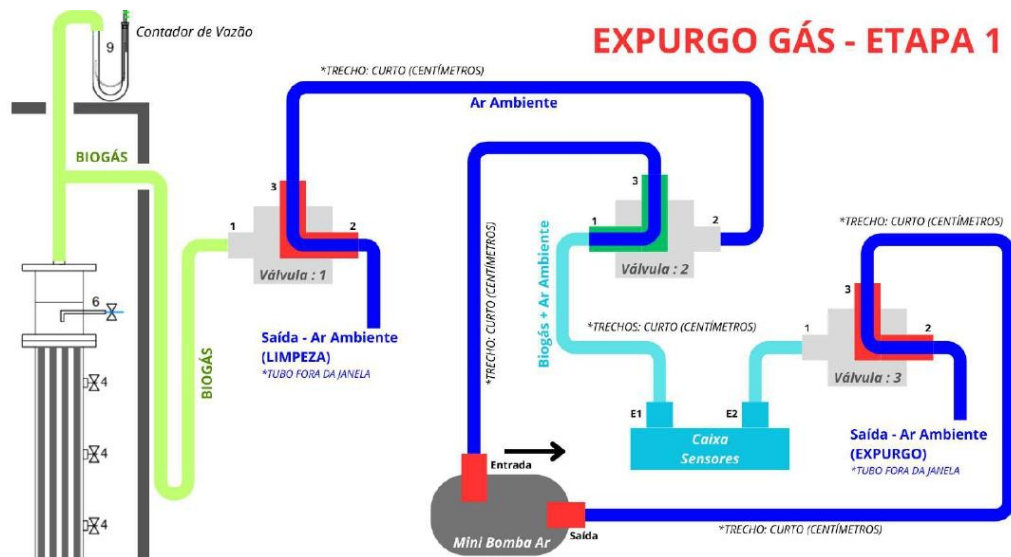
6)



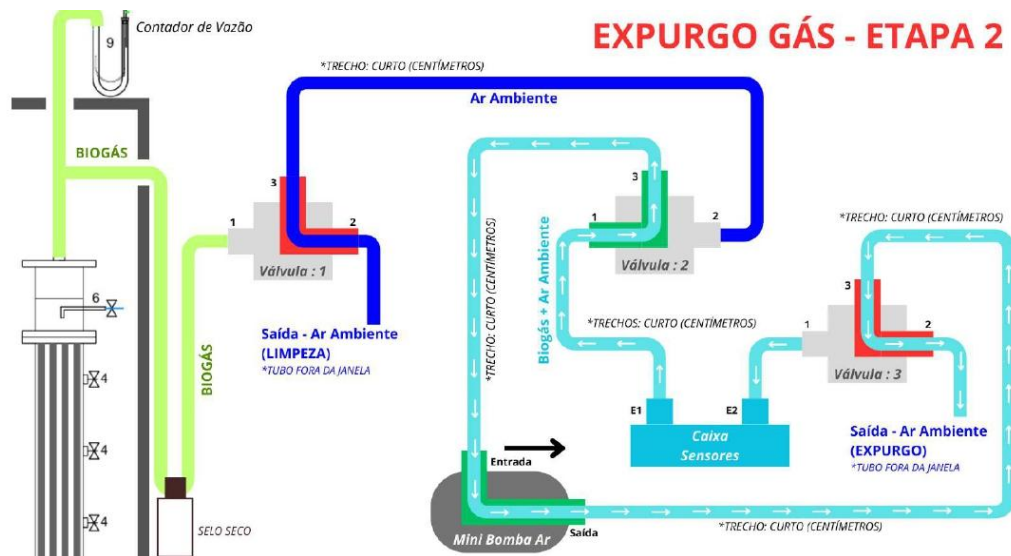
13)



14)

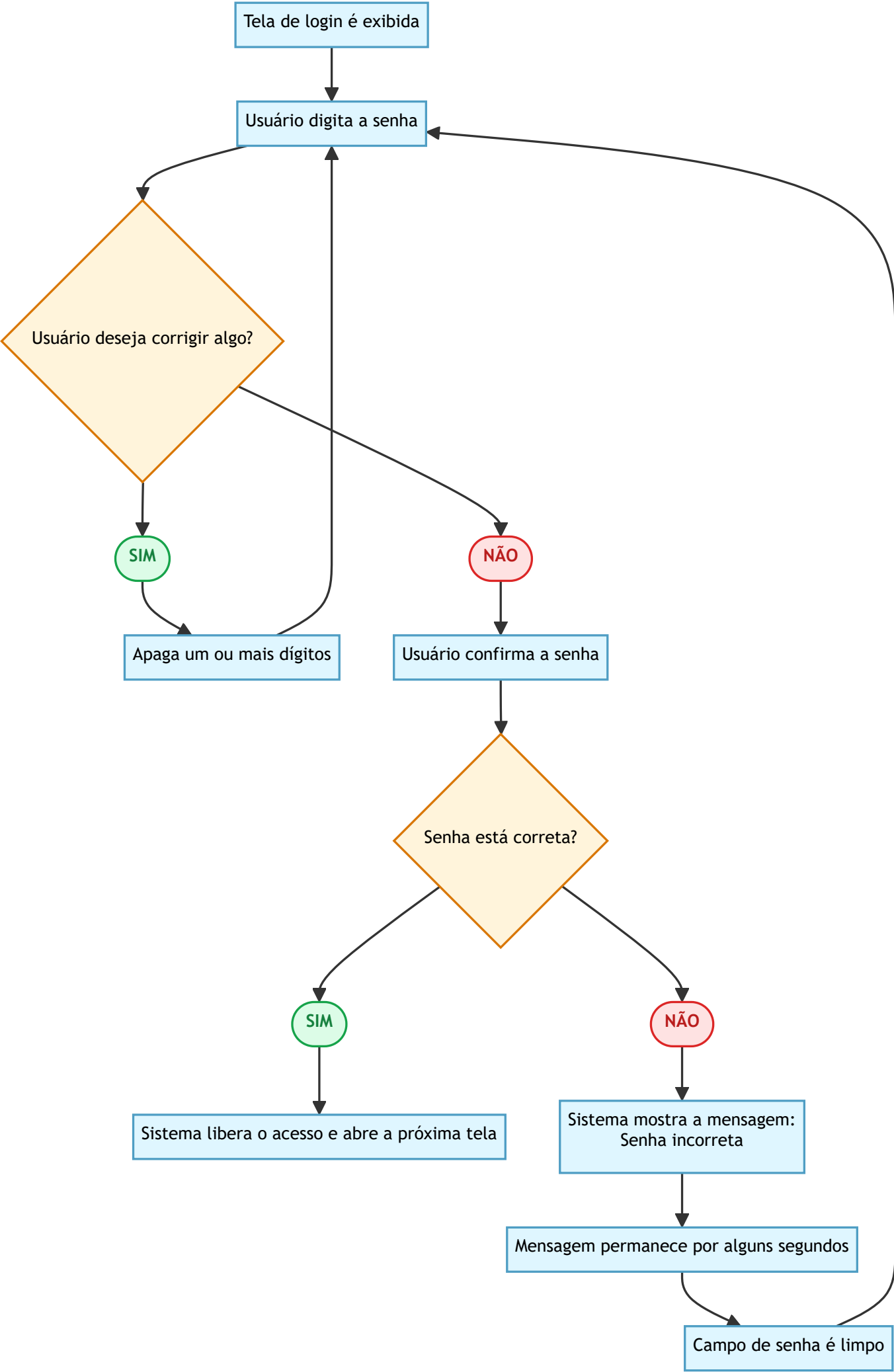


15)

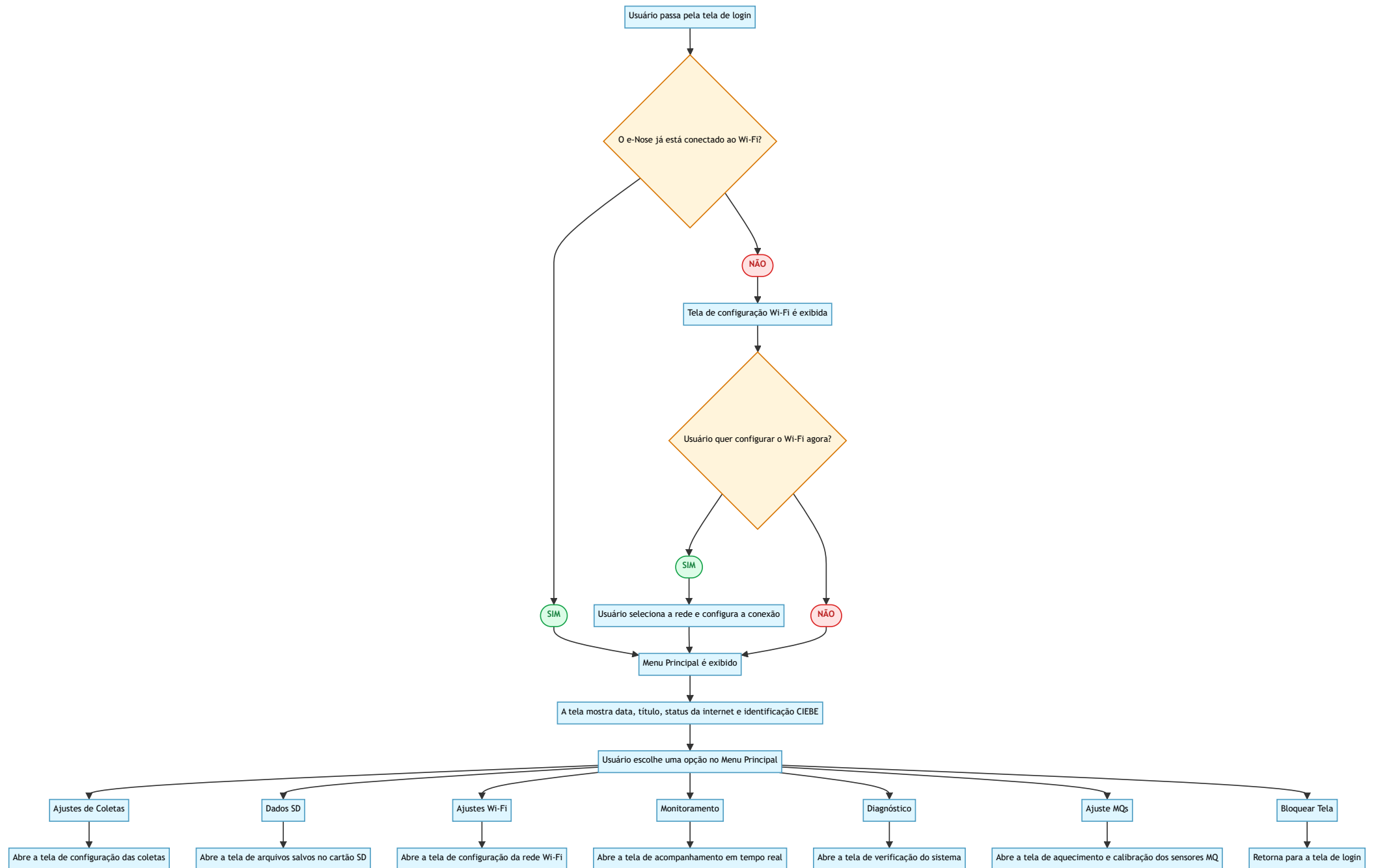


APÊNDICE C - DIAGRAMA MERMAID DE TODAS AS TELAS

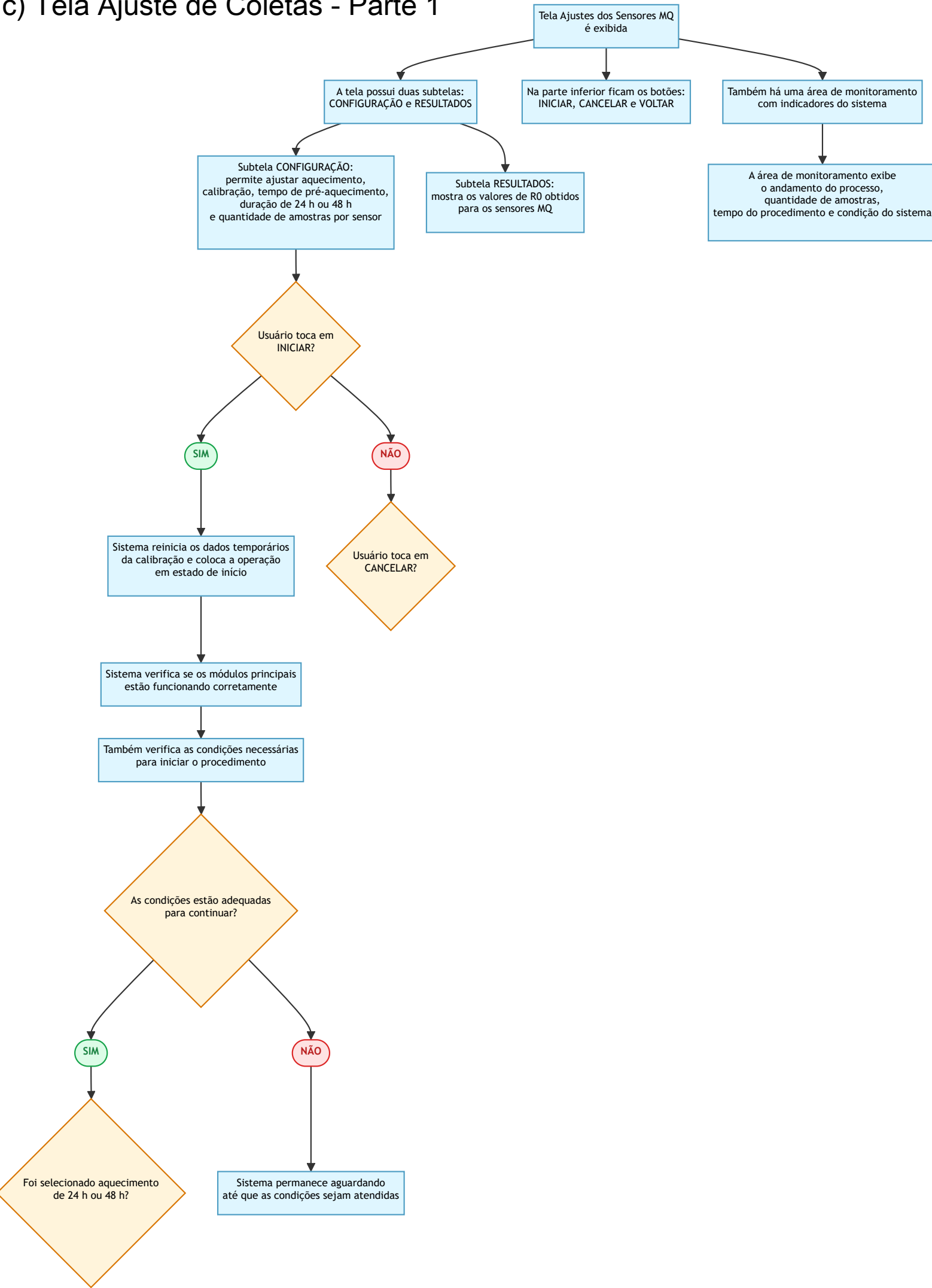
a) Tela de Login



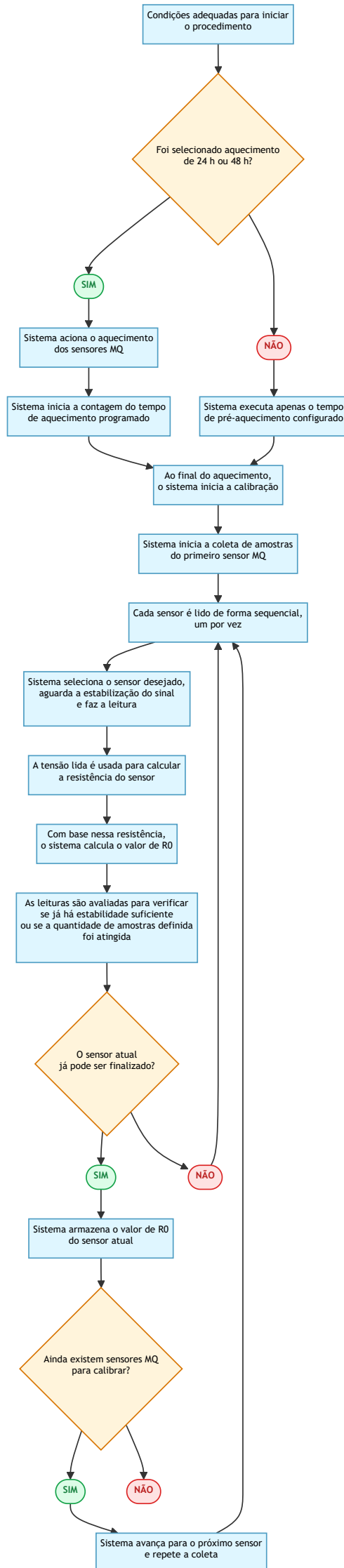
b) Tela Menu Principal



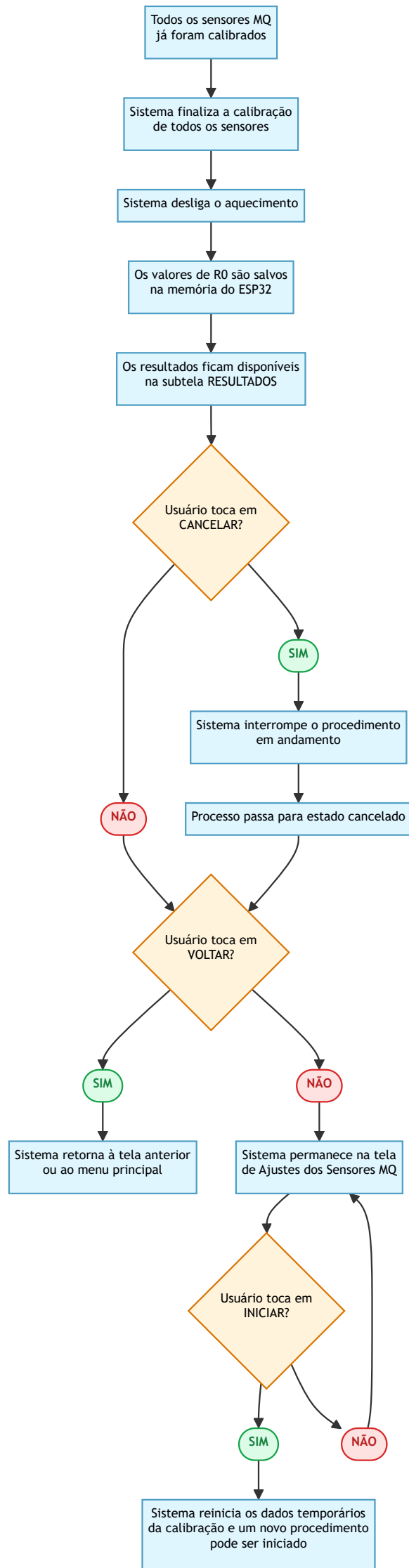
c) Tela Ajuste de Coletas - Parte 1



c) Tela Ajuste de Coletas - Parte 2

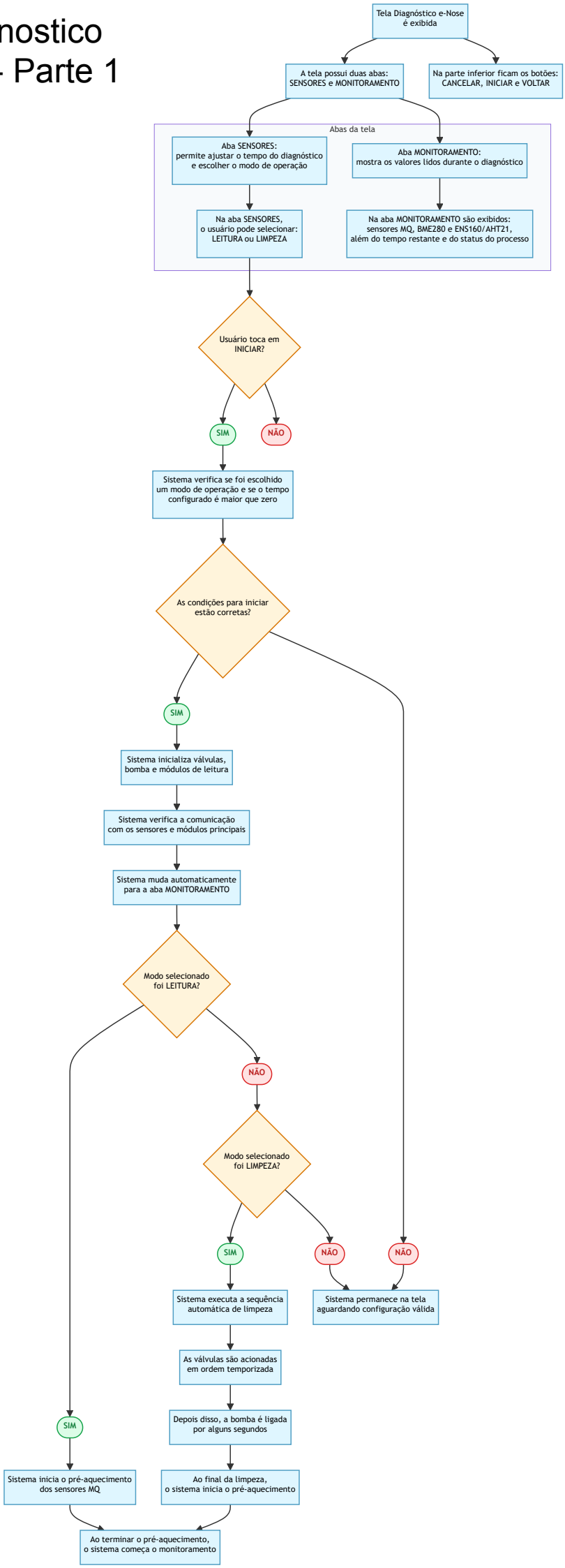


c) Tela Ajuste de Coletas - Parte 3

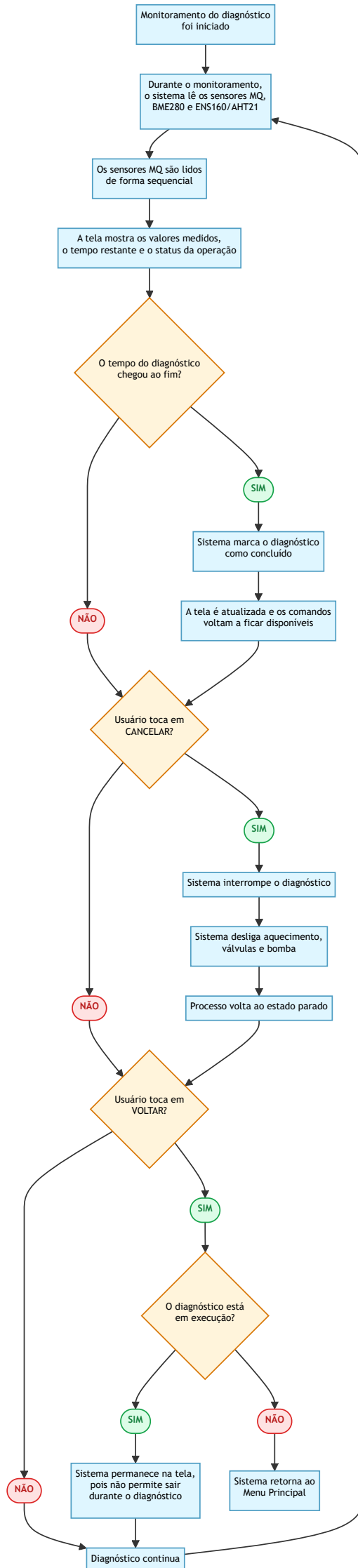


d) Tela de Diagnóstico

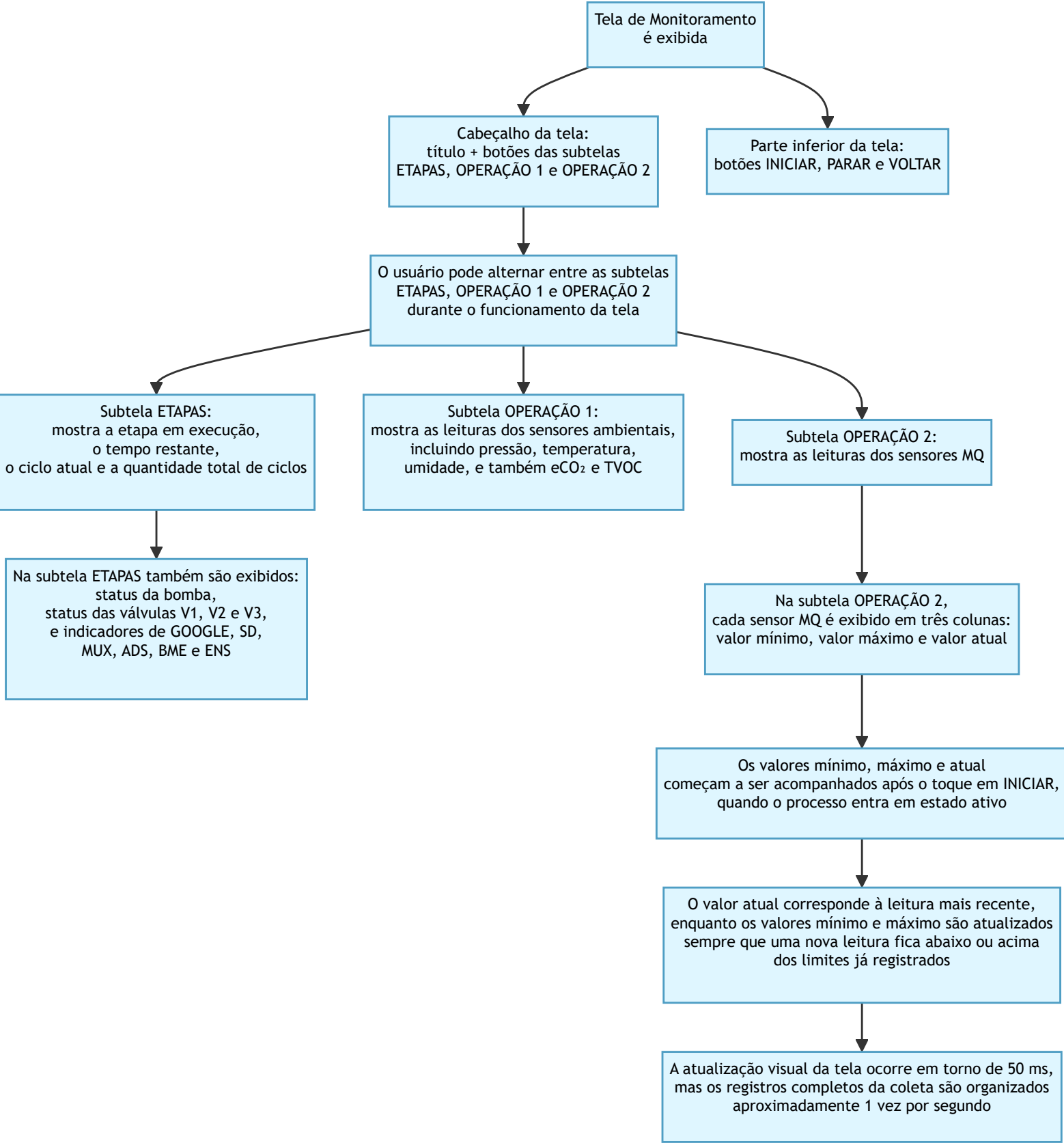
Sensores MQ - Parte 1



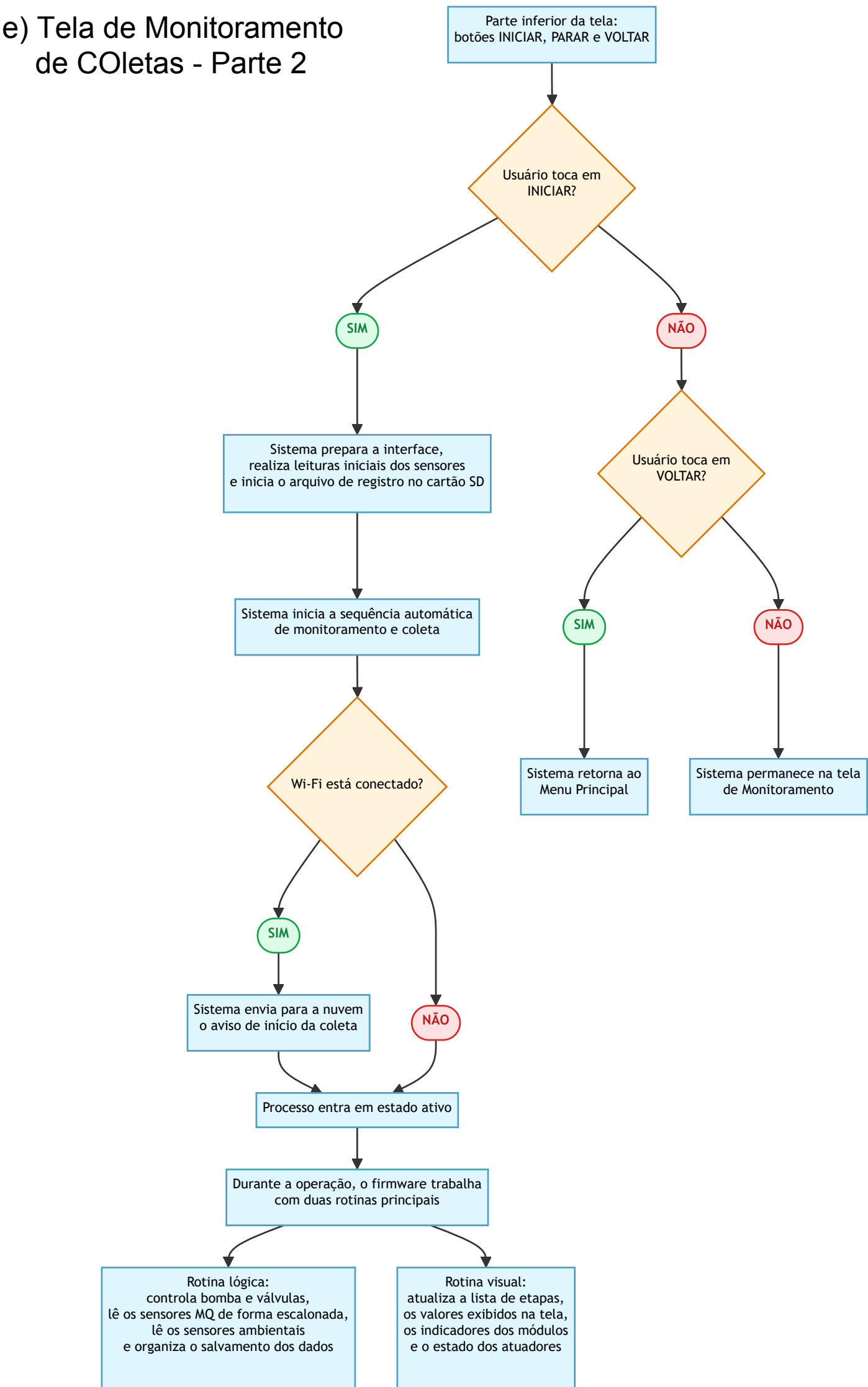
d) Tela de Diagnóstico Sensores MQ - Parte 2



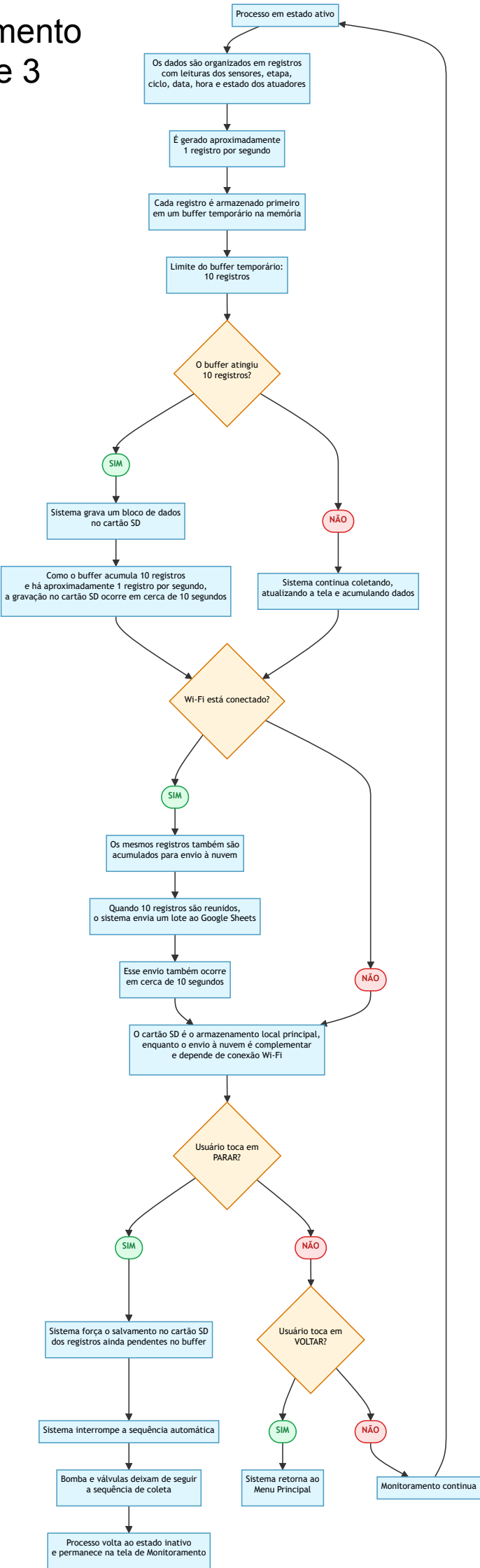
e) Tela de Monitoramento
de COletas - Parte 1



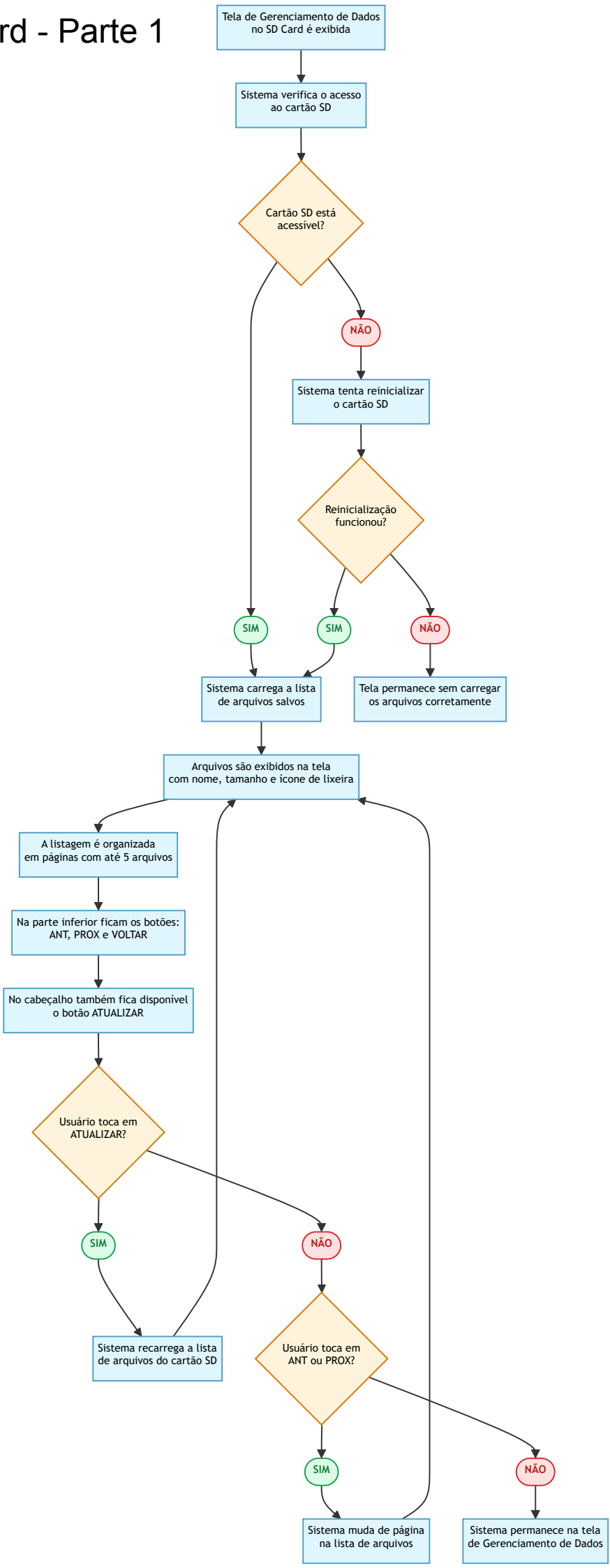
e) Tela de Monitoramento de COletas - Parte 2



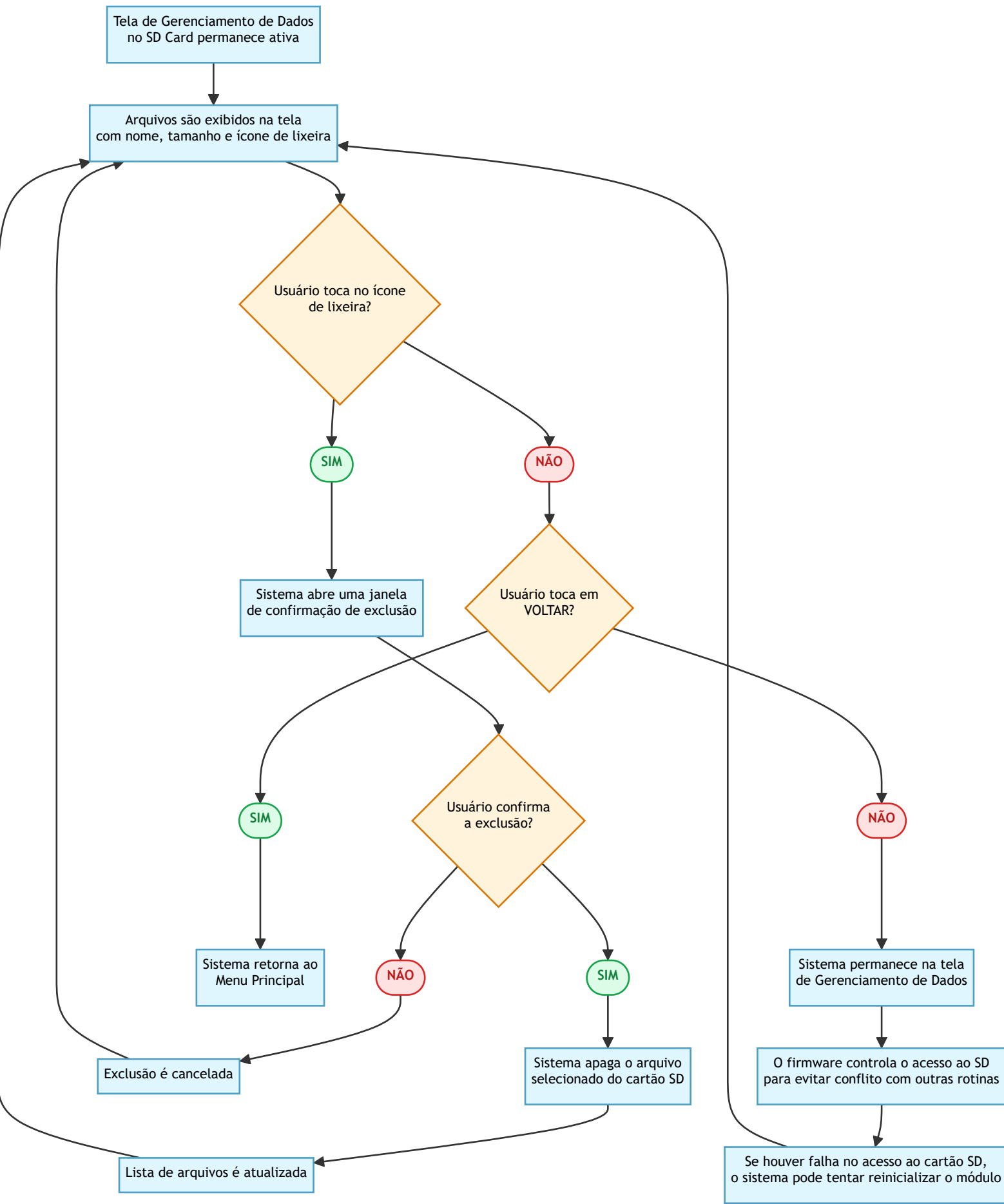
e) Tela de Monitoramento de COletas - Parte 3



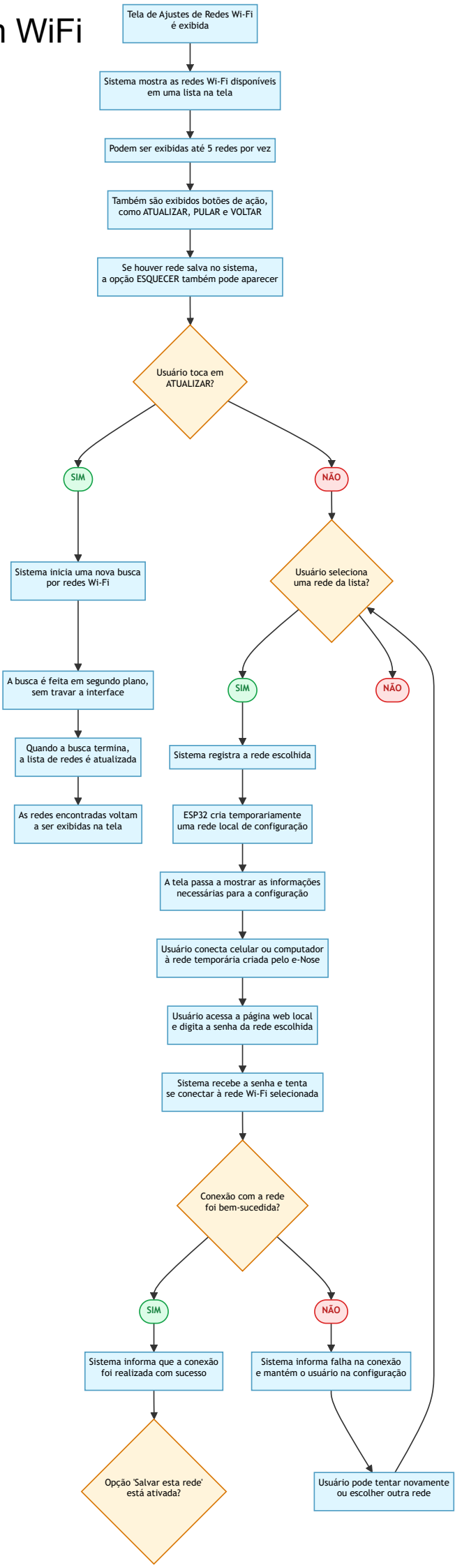
f) Dados SD Card - Parte 1



f) Dados SD Card - Parte 2

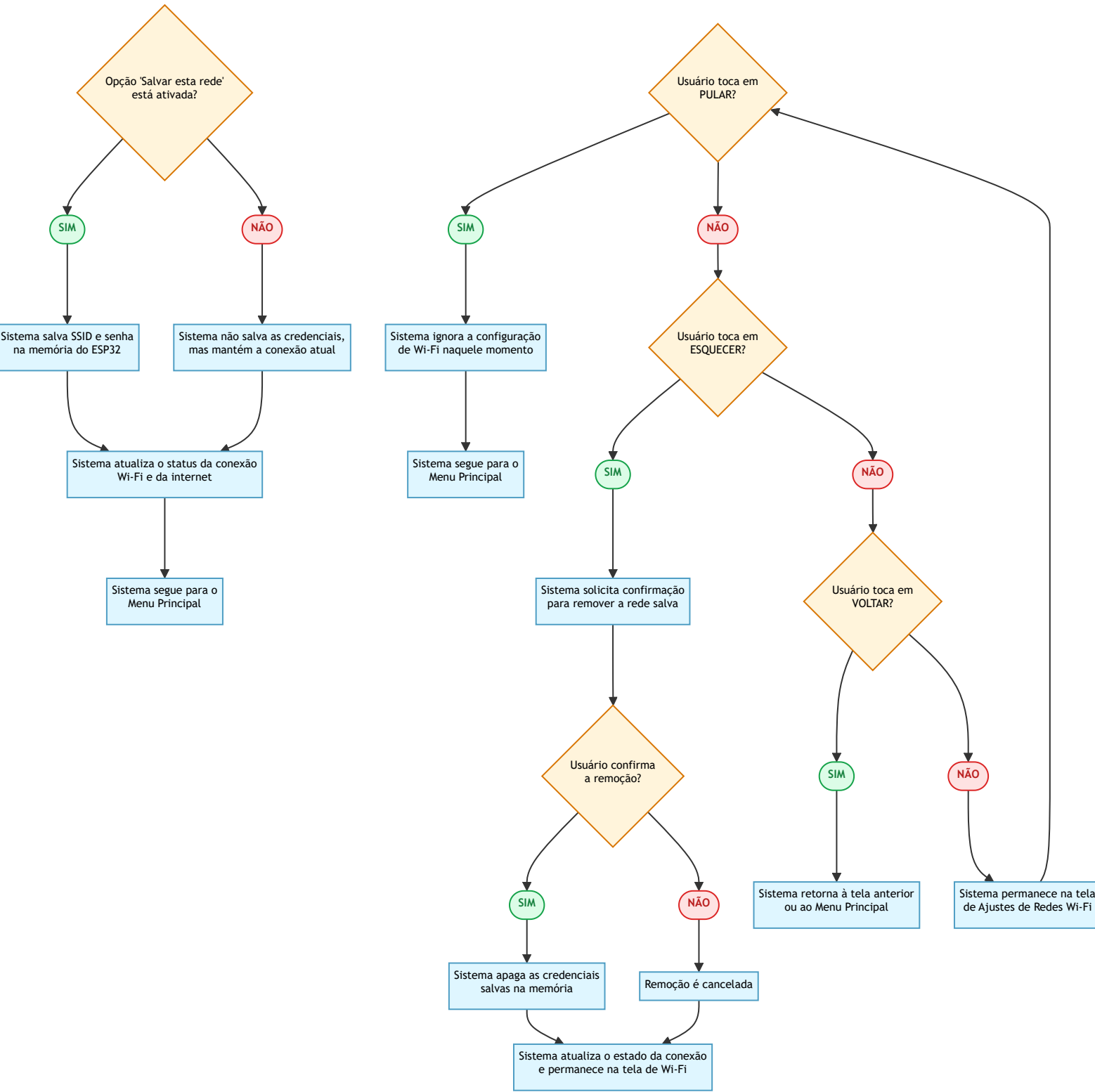


g) Tela Conexão com WiFi
Parte 1

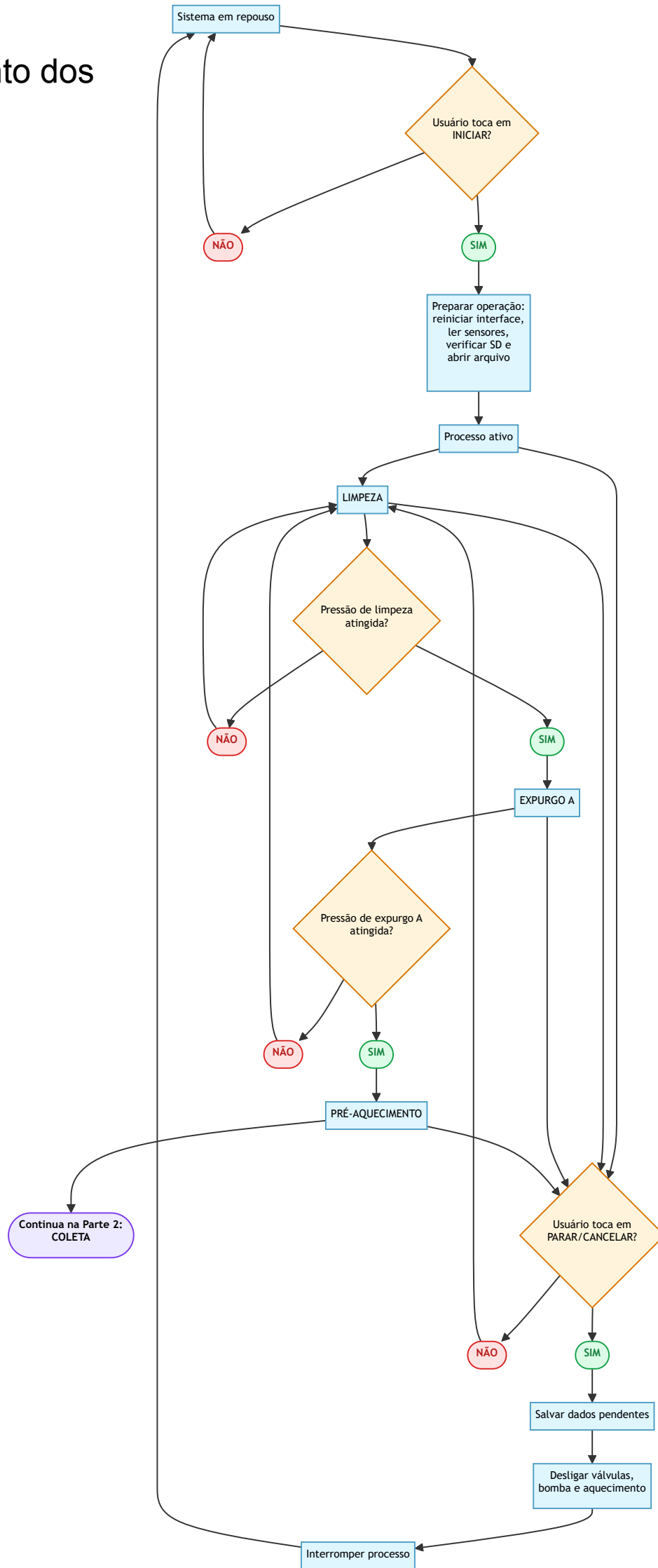


g) Tela Conexão com WiFi

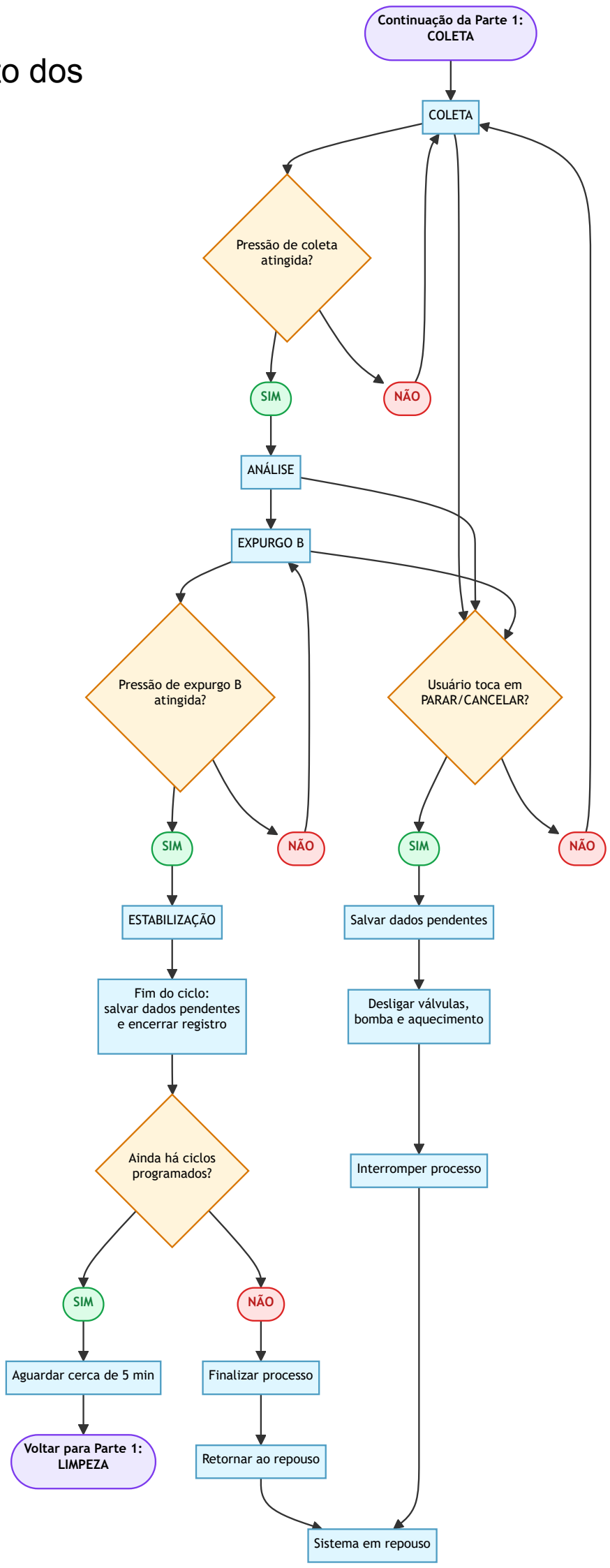
Parte 2



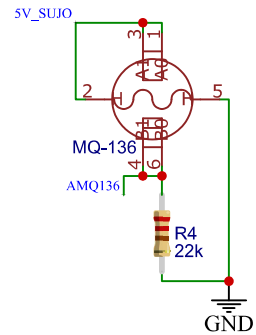
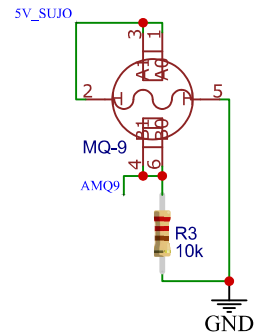
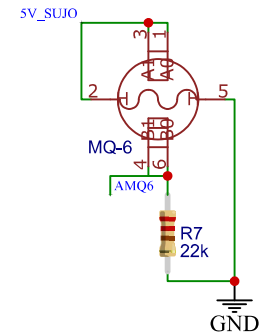
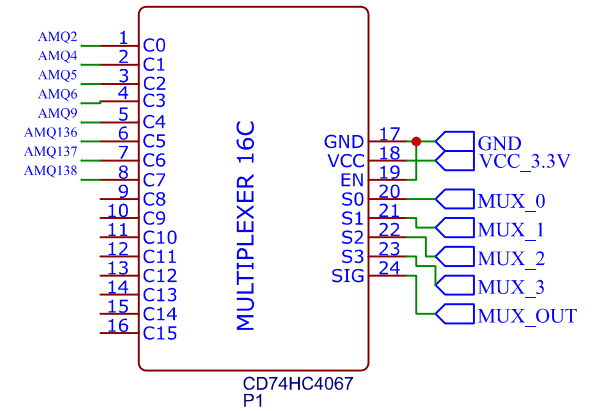
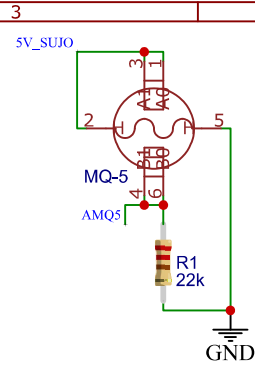
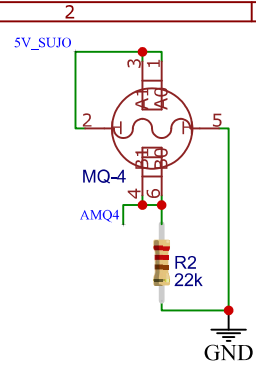
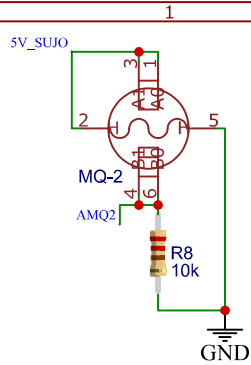
h) Lógica de acionamento dos atuadores Parte 1



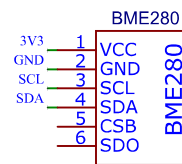
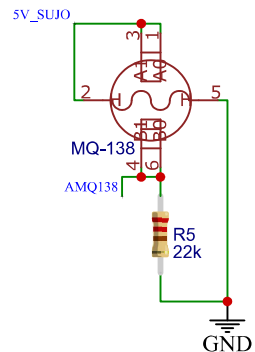
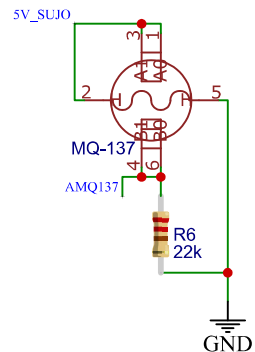
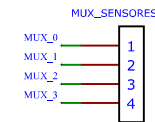
h) Lógica de acionamento dos atuadores
Parte 2



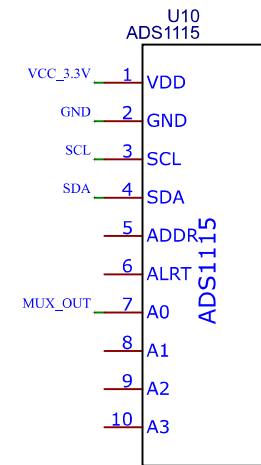
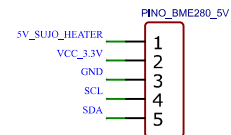
APÊNDICE D - ESQUEMÁTICO COMPLETO DO E-NOSE



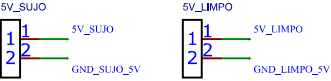
PINO MUX4067



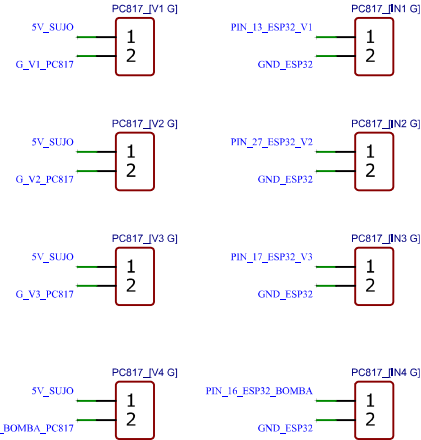
PINO BME280



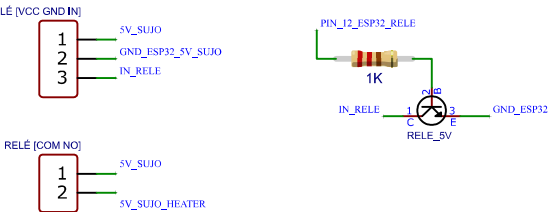
MÓDULOS ALIMENTAÇÃO



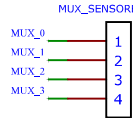
MÓDULO PC817



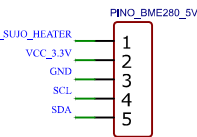
ACIONAMENTO RELÉ 5V



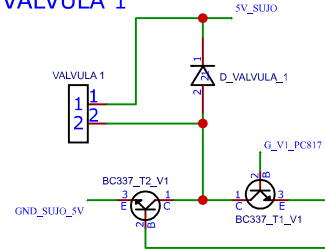
PINO MUX4067



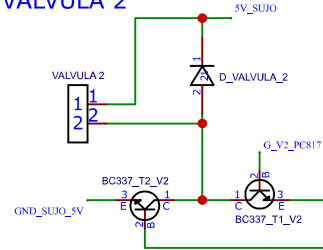
PINO BME280



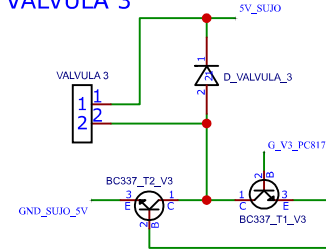
VALVULA 1



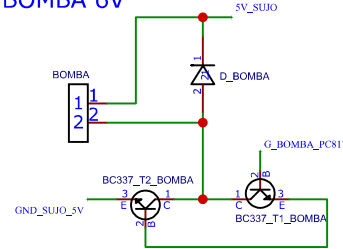
VALVULA 2



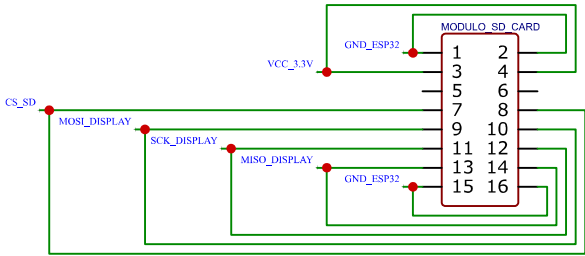
VALVULA 3



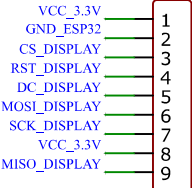
BOMBA 6V



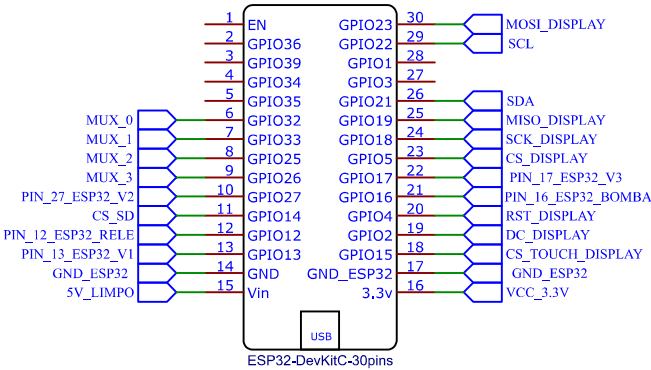
MODULO SD_CARD



DISPLAY



DISPLAY_TOUCH



ANEXO A - DATASHEET DOS SENSORES MOS (LINHA MQ)

TECHNICAL DATA

MQ-2 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope
Stable and long life

Fast response and High sensitivity
Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of LPG, i-butane, propane, methane ,alcohol, Hydrogen, smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R _L	Load resistance	can adjust	
R _H	Heater resistance	33 Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

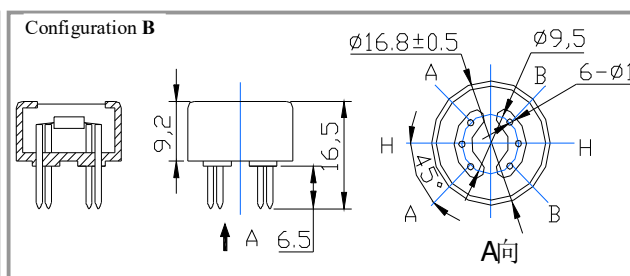
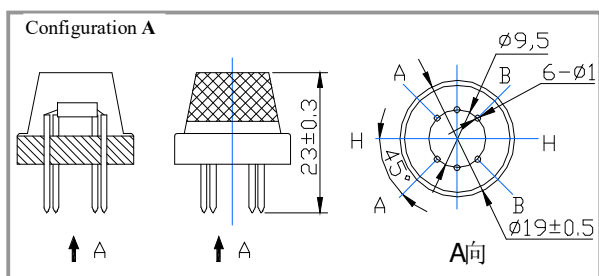
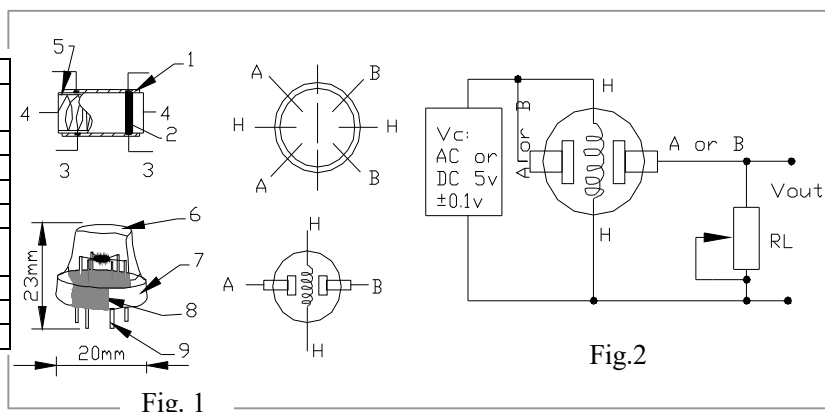
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-20℃-50℃	
Tas	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
Rs	Sensing Resistance	3K Ω -30K Ω (1000ppm iso-butane)	Detecting concentration scope: 200ppm-5000ppm LPG and propane 300ppm-5000ppm butane 5000ppm-20000ppm methane 300ppm-5000ppm H ₂ 100ppm-2000ppm Alcohol
α (3000/1000) isobutane	Concentration Slope rate	≤0.6	
Standard Detecting Condition	Temp: 20℃ ±2℃ Vc:5V±0.1 Humidity: 65%±5% Vh: 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

	Parts	Materials
1	Gas sensing layer	SnO ₂
2	Electrode	Au
3	Electrode line	Pt
4	Heater coil	Ni-Cr alloy
5	Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6	Anti-explosion net-work	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7	Clamp ring	Copper plating Ni
8	Resin base	Bakelite
9	Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-2 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a

TECHNICAL DATA

MQ-6 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to LPG, iso-butane, propane
- * Small sensitivity to alcohol, smoke.
- * Fast response . * Stable and long life * Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of LPG, iso-butane, propane, LNG, avoid the noise of alcohol and cooking fumes and cigarette smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	20K Ω	
R _H	Heater resistance	33 Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 750mw	

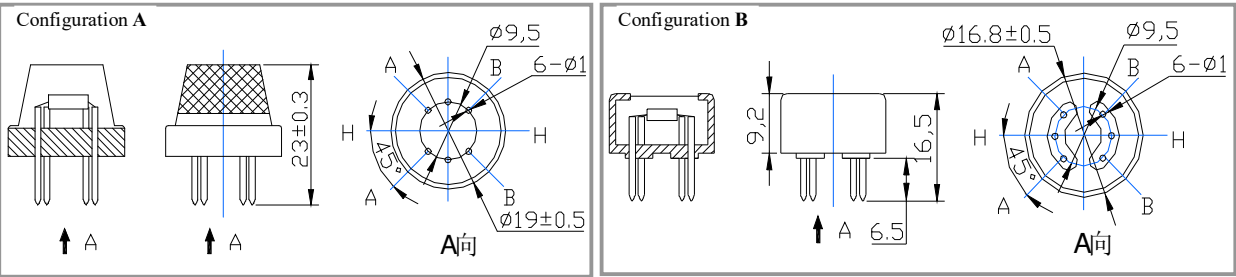
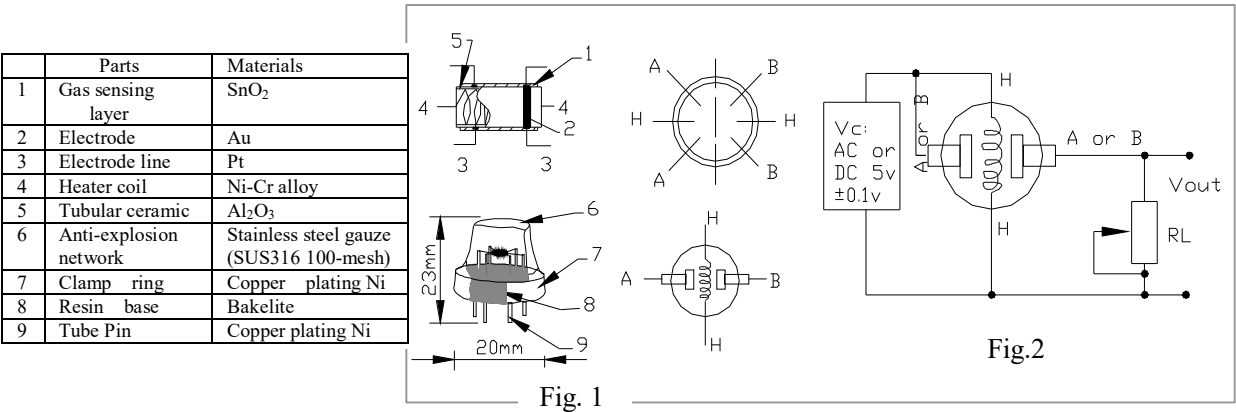
B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-10℃-50℃	
Tas	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
Rs	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (1000ppm LPG)	Detecting concentration scope: 200-10000ppm LPG , iso-butane, propane, LNG
α (1000ppm/4000ppm LPG)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20℃ ± 2℃ Humidity: 65%±5%	Vc:5V±0.1 Vh: 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Strucyure and configuration, basic measuring circuit



crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-2 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

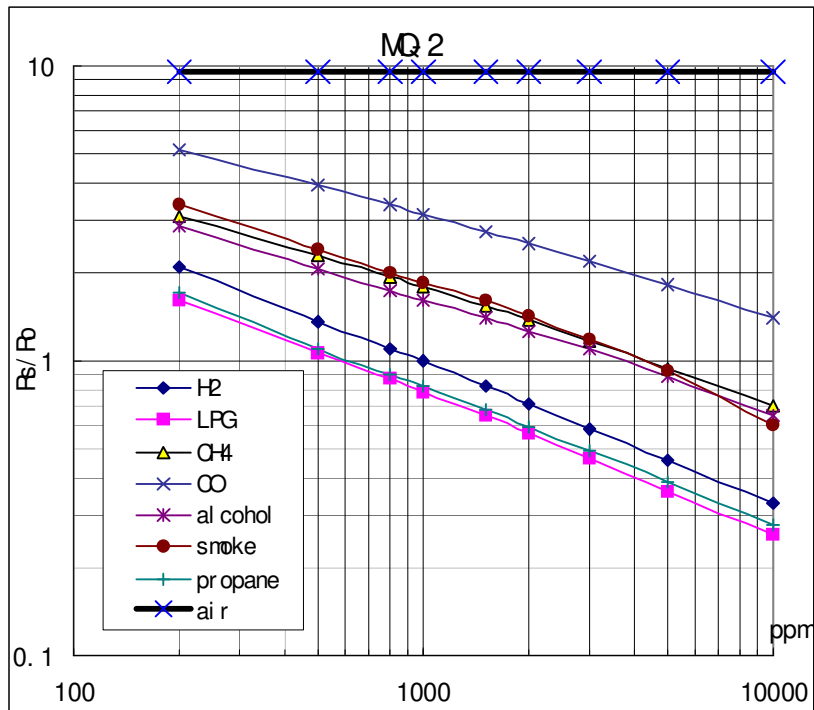


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-2

Fig.3 shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-2 for several gases.

in their: Temp: 20°C、
Humidity: 65%、
O₂ concentration 21%
RL=5k Ω

R₀: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in the clean air.

R_s: sensor resistance at various concentrations of gases.

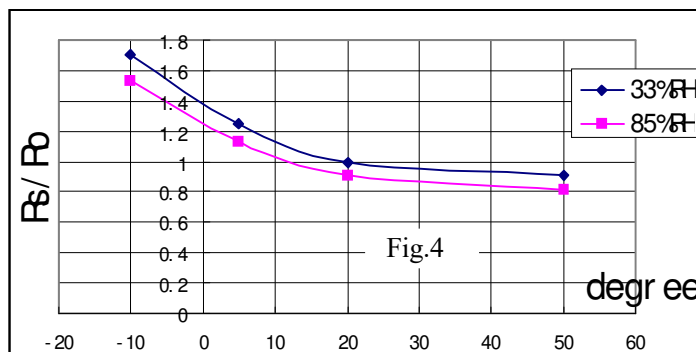


Fig.4 shows the typical dependence of the MQ-2 on temperature and humidity.

R₀: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in air at 33%RH and 20 degree.

R_s: sensor resistance at 1000ppm of H₂ at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-2 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 1000ppm liquified petroleum gas<LPG>, or 1000ppm iso-butane<i-C₄H₁₀> concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 K Ω (5K Ω to 47 K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

TECHNICAL DATA

MQ-4 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to CH₄, Natural gas.
- * Small sensitivity to alcohol, smoke.
- * Fast response . * Stable and long life * Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of CH₄, Natural gas, LNG, avoid the noise of alcohol and cooking fumes and cigarette smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	20K Ω	
R _H	Heater resistance	33 Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 750mw	

B. Environment condition

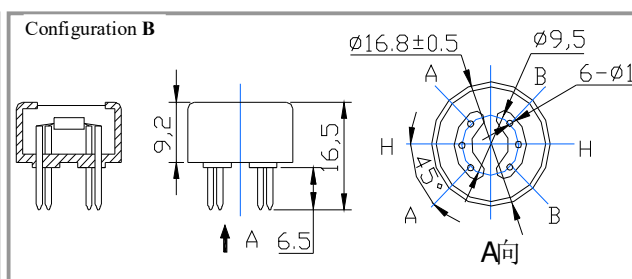
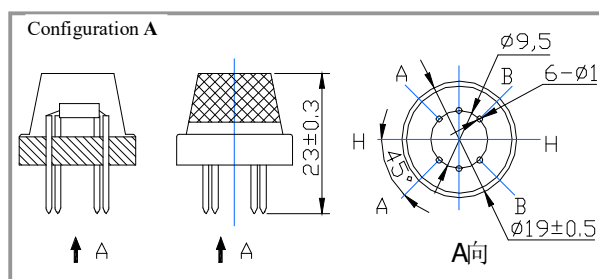
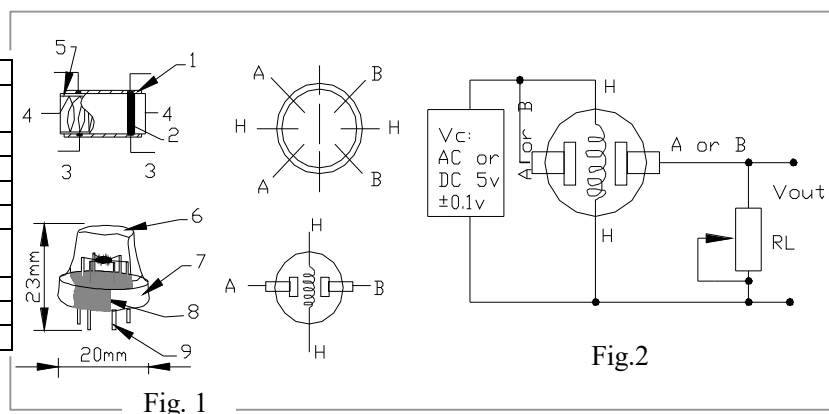
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10℃-50℃	
T _{as}	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remark 2
Rs	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (1000ppm CH ₄)	Detecting concentration scope: 200-10000ppm CH ₄ , natural gas
α (1000ppm/ 5000ppm CH ₄)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20℃ ± 2℃ Humidity: 65%±5%	Vc:5V±0.1 Vh: 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Strucyure and configuration, basic measuring circuit

Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO ₂
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6 Anti-explosion gauze network (SUS316 100-mesh)	
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-4 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-4 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

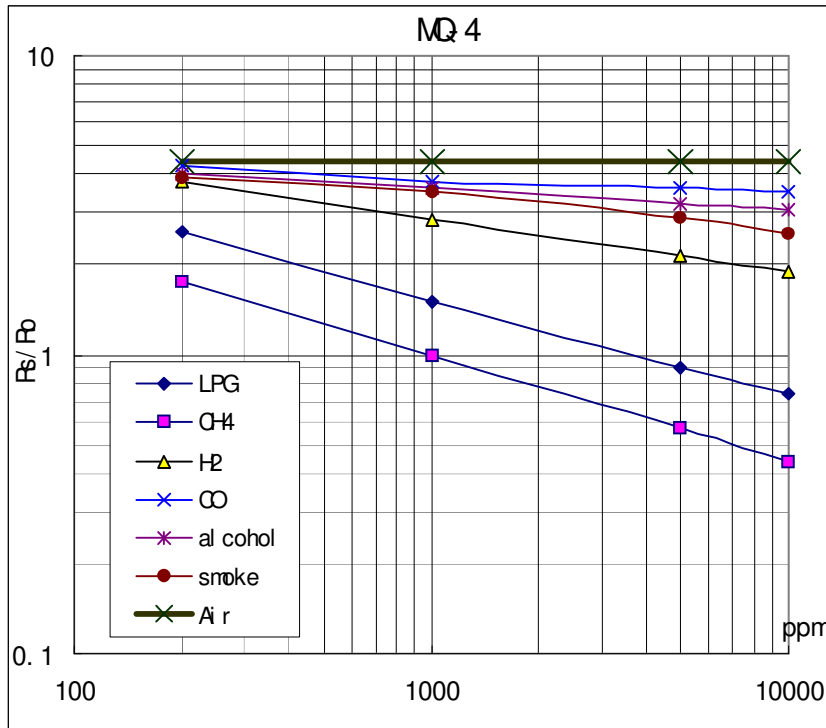


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-4

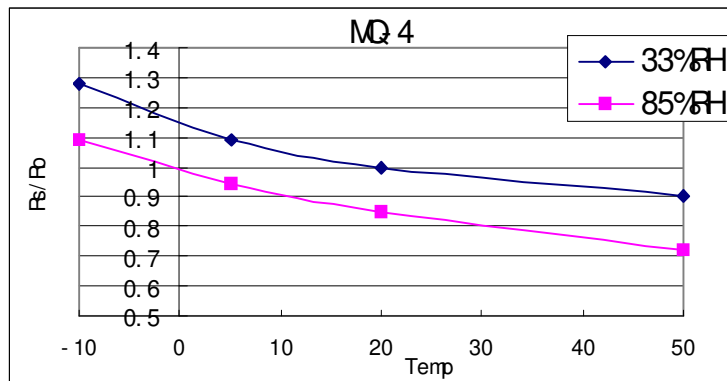


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-4 on temperature and humidity.
 R_0 : sensor resistance at 1000ppm of CH_4 in air at 33%RH and 20 degree.
 R_s : sensor resistance at 1000ppm of CH_4 in air at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-4 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 5000ppm of CH_4 concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 20K Ω (10K Ω to 47K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

TECHNICAL DATA

MQ-5 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to LPG, natural gas , town gas
- * Small sensitivity to alcohol, smoke.
- * Fast response . * Stable and long life * Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of LPG, natural gas , town gas, avoid the noise of alcohol and cooking fumes and cigarette smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
P _L	Load resistance	20K Ω	
R _H	Heater resistance	31 ± 10%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

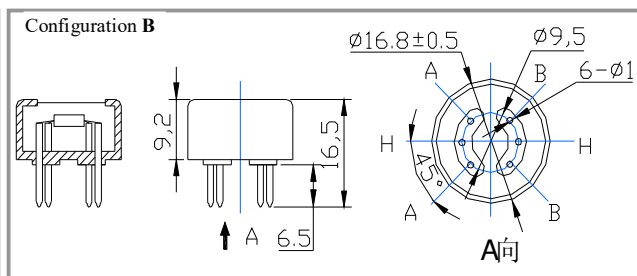
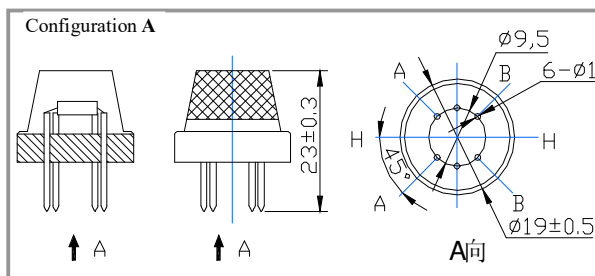
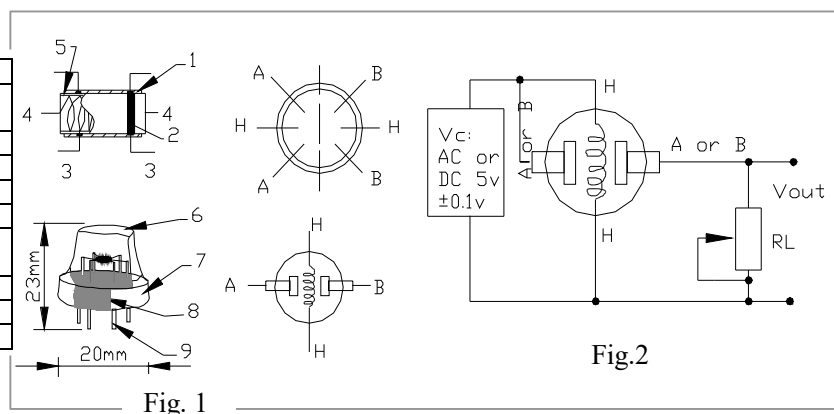
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-10℃-50℃	
Tas	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
Rs	Sensing Resistance	10K Ω - 60K Ω (5000ppm methane)	Detecting concentration scope: 200-10000ppm LPG,LNG Natural gas, iso-butane, propane Town gas
α (5000ppm/1000 ppm CH ₄)	Concentration slope rate	≤0.6	
Standard detecting condition	Temp: 20℃ ± 2℃ Humidity: 65%±5%	Vc:5V±0.1 Vh: 5V±0.1	
Preheat time	Over 24 hour		

D. Strucyure and configuration, basic measuring circuit

	Parts	Materials
1	Gas sensing layer	SnO ₂
2	Electrode	Au
3	Electrode line	Pt
4	Heater coil	Ni-Cr alloy
5	Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6	Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7	Clamp ring	Copper plating Ni
8	Resin base	Bakelite
9	Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-5 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by

micro Al_2O_3 ceramic tube, **Tin Dioxide** (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-5 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-5

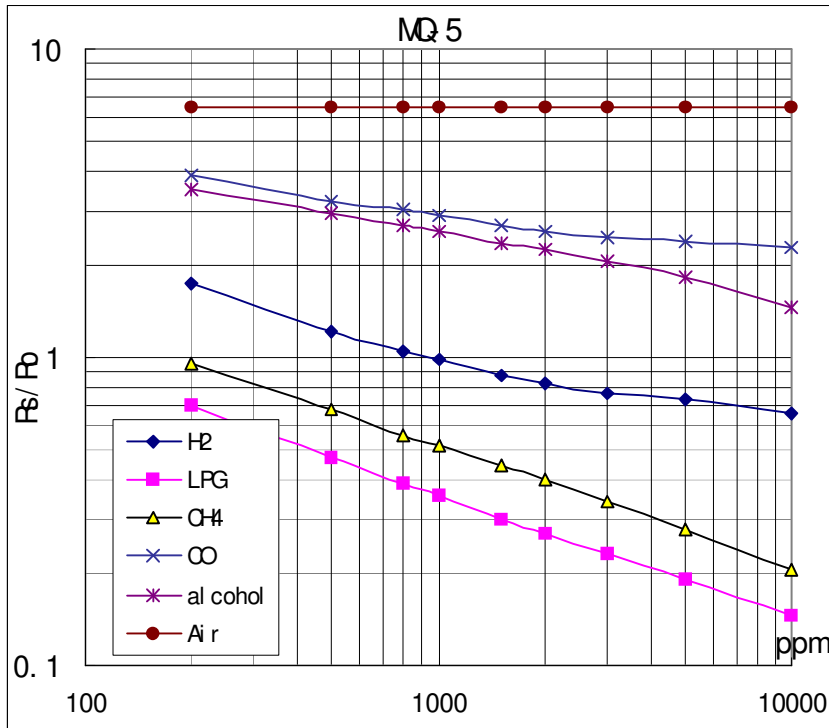


Fig.3 shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-5 for several gases.

in their: Temp: 20°C,
Humidity: 65%,
O₂ concentration 21%,
RL=20k Ω

R₀: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in the clean air.

R_s: sensor resistance at various concentrations of gases.

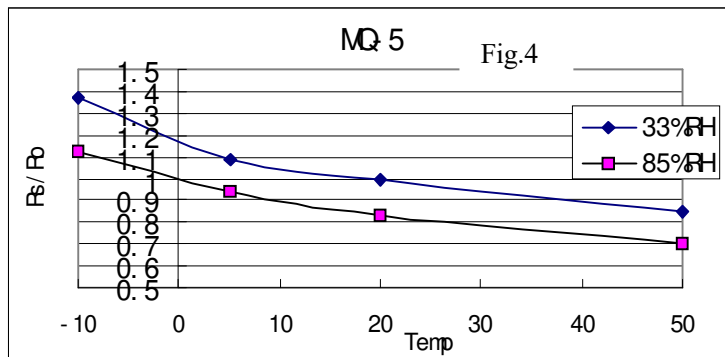


Fig.4 shows the typical dependence of the MQ-5 on temperature and humidity.

R₀: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in air at 33%RH and 20 degree.

R_s: sensor resistance at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-5 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 1000ppm H₂ or LPG concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about 20 K Ω (10K Ω to 47K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

Structure and configuration of MQ-6 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-6 have 6 pin, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-6

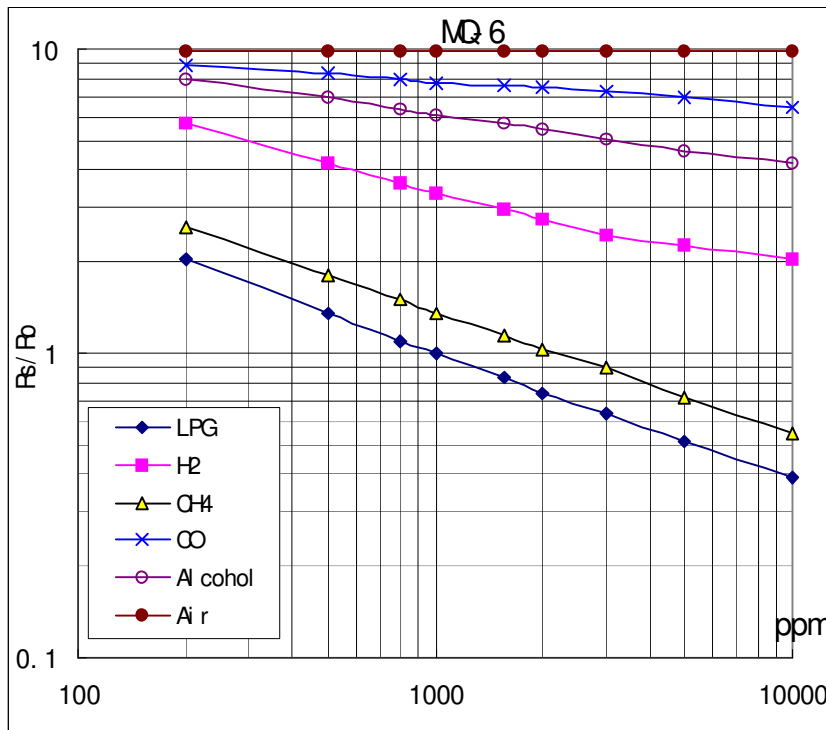


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-6 for several gases.

in their: Temp: 20°C,
Humidity: 65%,
 O_2 concentration 21%,
 $R_L = 20\text{k}\Omega$

R_0 : sensor resistance at 1000ppm of LPG in the clean air.

R_s : sensor resistance at various concentrations of gases.

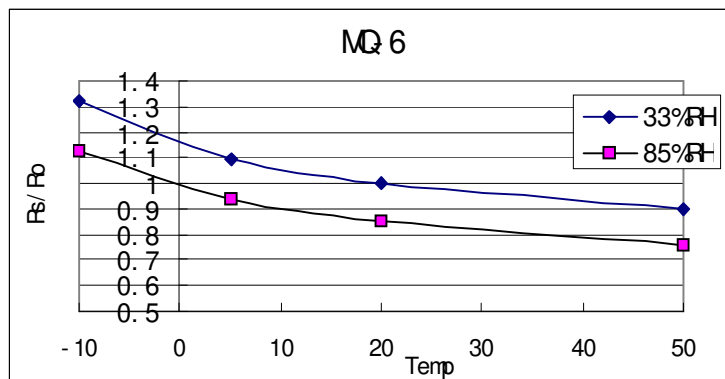


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-6 on temperature and humidity.

R_0 : sensor resistance at 1000ppm of LPG in air at 33%RH and 20 degree.

R_s : sensor resistance at 1000ppm of LPG in air at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-6 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 1000ppm of LPG concentration in air and use value of Load resistance (R_L) about $20\text{k}\Omega$ ($10\text{k}\Omega$ to $47\text{k}\Omega$).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

TECHNICAL DATA MQ-9 GAS SENSOR

FEATURES

- * High sensitivity to carbon monoxide and CH₄, LPG.
- * Stable and long life

APPLICATION

They are used in gas detecting equipment for carbon monoxide and CH₄, LPG in house and industry or car.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	technical condition	Remark
V _c	circuit voltage	5V±0.1	AC or DC
V _H (H)	Heating voltage (high)	5V±0.1	AC or DC
V _H (L)	Heating voltage (low)	1.4V±0.1	AC or DC
R _L	Load resistance	Can adjust	
R _H	Heating resistance	33Ω ± 5%	Room temperature
T _H (H)	Heating time (high)	60 ± 1 seconds	
T _H (L)	Heating time (low)	90 ± 1 seconds	
P _s	Heating consumption	Less than 340mw	

b. Environment conditions

Symbol	Parameters	Technical conditions	Remark
T _{ao}	Using temperature	-20℃ - 50℃	
T _{as}	Storage temperature	-20℃ - 50℃	Advice using scope
RH	Relative humidity	Less than 95%RH	
O ₂	Oxygen concentration	21%(stand condition) the oxygen concentration can affect the sensitivity characteristic	Minimum value is over 2%

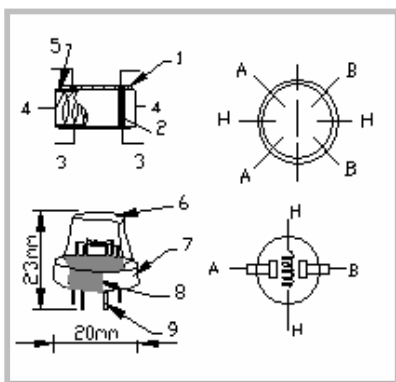
c. Sensitivity characteristic

symbol	Parameters	Technical parameters	Remark
R _s	Surface resistance Of sensitive body	2-20k	In 100ppm Carbon Monoxide
a (300/100ppm)	Concentration slope rate	Less than 0.5	R _s (300ppm)/R _s (100ppm)
Standard working condition	Temperature -20℃ ± 2℃ relative humidity 65%±5% FL: 10KΩ ± 5% V _c : 5V±0.1V V _H 5V±0.1V V _H 1.4V±0.1V		
Preheat time	No less than 48 hours	Detecting range: 20ppm-2000ppm carbon monoxide 500ppm-10000ppm CH ₄ 500ppm-10000ppm LPG	

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Structure and configuration of MQ-9 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-9 have

6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.



Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO ₂
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6 Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni

Fig.1

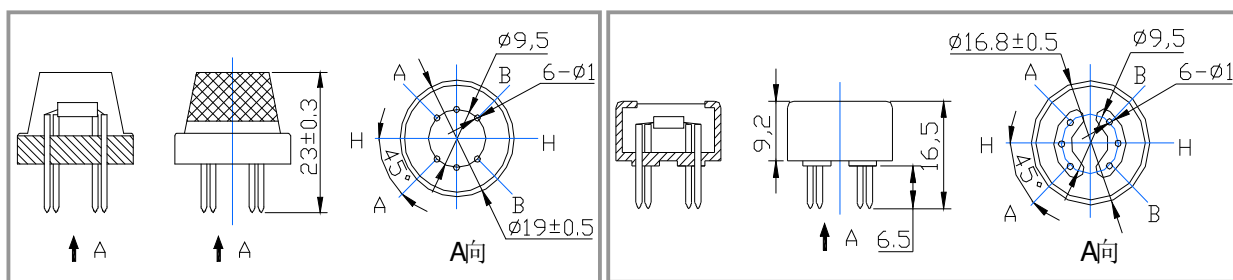


Fig.2

Heating voltage 1.4v (Low) 90s

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

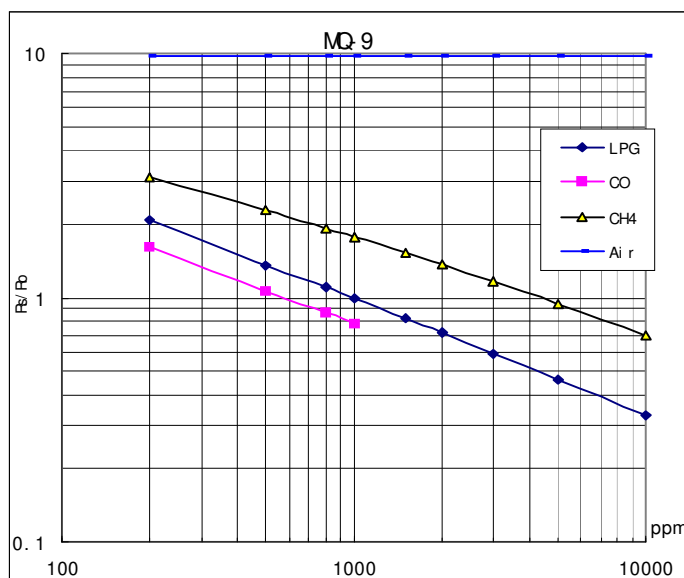


Fig.3 sensitivity characteristics of the MQ-9

Standard circuit:

As shown in Fig 2, standard measuring circuit of MQ-9 sensitive components consists of 2 parts. one is heating circuit having time control function (the high voltage and the low voltage work circularly). The second is the signal output circuit, it can accurately respond changes of surface resistance of the sensor.

Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-9 for several gases.

in their: Temp: 20℃、

Humidity: 65%、

O₂ concentration 21%

RL=10k Ω

Ro: sensor resistance at 1000ppm

LPG in the clean air.

Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

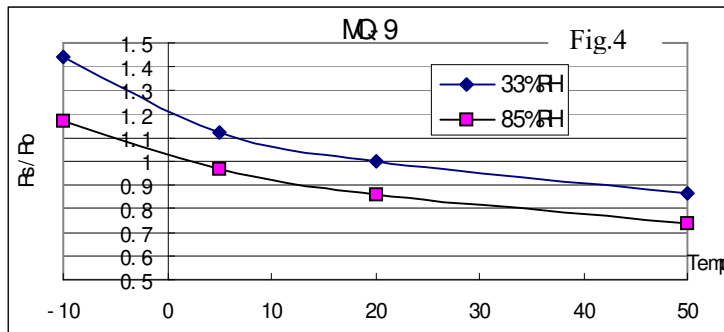


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-9 on temperature and humidity.

R₀: sensor resistance at 1000ppm LPG in air at 33%RH and 20degree.

R_s: sensor resistance at 1000ppm LPG at different temperatures and humidities.

OPERATION PRINCIPLE

. The surface resistance of the sensor R_s is obtained through effected voltage signal output of the load resistance R_L which series-wound. The relationship between them is described:

$$R_s \backslash R_L = (V_c - V_{RL}) / V_{RL}$$

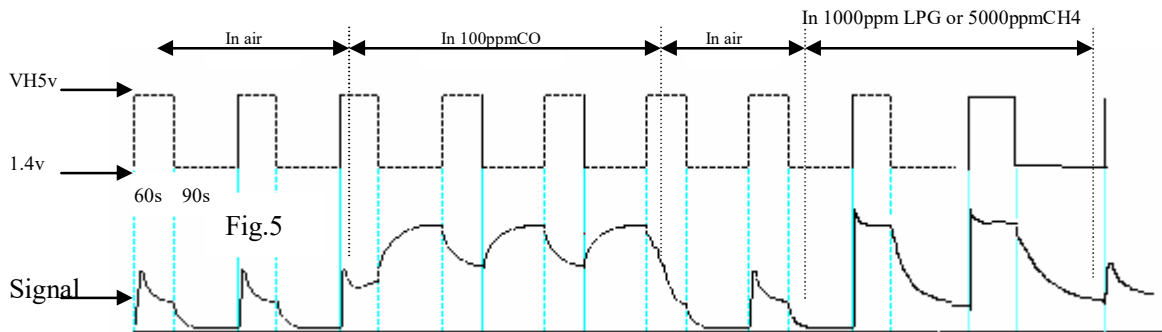


Fig. 5 shows alterable situation of R_L signal output measured by using Fig. 2 circuit output signal when the sensor is shifted from clean air to carbon monoxide (CO) or CH₄, output signal measurement is made within one or two complete heating period (2.5 minute from high voltage to low voltage).

Sensitive layer of MQ-9 gas sensitive components is made of SnO₂ with stability, So, it has excellent long term stability. Its service life can reach 5 years under using condition.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-9 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 200ppm and 5000ppm CH₄ or 1000ppm LPG concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 K Ω (10K Ω to 47 K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

The sensitivity adjusting program:

- Connect the sensor to the application circuit.
- Turn on the power, keep time of preheating through electricity is over 48 hours.
- Adjust the load resistance R_L until you get a signal value which is respond to a certain carbon monoxide concentration at the end point of 90 seconds.
- Adjust the another load resistance R_L until you get a signal value which is respond to a CH₄ or LPG concentration at the end point of 60 seconds .

Notification**1 Following conditions must be prohibited****1.1 Exposed to organic silicon steam**

Organic silicon steam cause sensors invalid, sensors must be avoid exposing to silicon bond, fixture, silicon latex, putty or plastic contain silicon environment

1.2 High Corrosive gas

If the sensors exposed to high concentration corrosive gas (such as H_2S , SO_x , Cl_2 , HCl etc), it will not only result in corrosion of sensors structure, also it cause sincere sensitivity attenuation.

1.3 Alkali, Alkali metals salt, halogen pollution

The sensors performance will be changed badly if sensors be sprayed polluted by alkali metals salt especially brine, or be exposed to halogen such as fluorin.

1.4 Touch water

Sensitivity of the sensors will be reduced when splattered or dipped in water.

1.5 Freezing

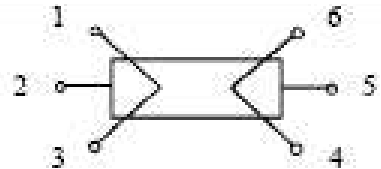
Do avoid icing on sensor's surface, otherwise sensor would lose sensitivity.

1.6 Applied voltage higher

Applied voltage on sensor should not be higher than stipulated value, otherwise it cause down-line or heater damaged, and bring on sensors' sensitivity characteristic changed badly.

1.7 Voltage on wrong pins

For 6 pins sensor, if apply voltage on 1、3 pins or 4、6 pins, it will make lead broken, and without signal when apply on 2、4 pins

**2 Following conditions must be avoided****2.1 Water Condensation**

Indoor conditions, slight water condensation will effect sensors performance lightly. However, if water condensation on sensors surface and keep a certain period, sensor' sensitivity will be decreased.

2.2 Used in high gas concentration

No matter the sensor is electrified or not, if long time placed in high gas concentration, it will affect sensors characteristic.

2.3 Long time storage

The sensors resistance produce reversible drift if it's stored for long time without electrify, this drift is related with storage conditions. Sensors should be stored in airproof without silicon gel bag with clean air. For the sensors with long time storage but no electrify, they need long aging time for stbility before using.

2.4 Long time exposed to adverse environment

No matter the sensors electrified or not, if exposed to adverse environment for long time, such as high humidity, high temperature, or high pollution etc, it will effect the sensors performance badly.

2.5 Vibration

Continual vibration will result in sensors down-lead response then repture. In transportation or assembling line, pneumatic screwdriver/ultrasonic welding machine can lead this vibration.

2.6 Concussion

If sensors meet strong concussion, it may lead its lead wire disconnected.

2.7 Usage

For sensor, handmade welding is optimal way. If use wave crest welding should meet the following conditions:

2.7.1 Soldering flux: Rosin soldering flux contains least chlorine

2.7.2 Speed: 1-2 Meter/ Minute

2.7.3 Warm-up temperature: $100 \pm 20^\circ C$

2.7.4 Welding temperature: $250 \pm 10^\circ C$

2.7.5 1 time pass wave crest welding machine

If disobey the above using terms, sensors sensitivity will be reduced.

TECHNICAL DATA

MQ-136 GAS SENSOR

FEATURES

Fast response and High sensitivity

Stable and long life

Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of H_2S .

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V_c	Circuit voltage	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
V_H	Heating voltage	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
R_L	Load resistance	can adjust	
R_H	Heater resistance	$31f, \pm 5\%$	Room Tem
P_H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T_{ao}	Using Tem	$-10j -45j$	
T_{as}	Storage Tem	$-20j -70j$	
R_H	Related humidity	less than 95%Rh	
O_2	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Ramark 2
Rs	Sensing Resistance	30K <i>f</i> , -200K <i>f</i> , (10ppm H ₂ S)	Detecting concentration scope 1-100ppm H ₂ S
<i>f</i> (20/5) H ₂ S	Concentration Slope rate	i 0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20i i 2j Vc:5V± 0.1 Humidity: 65%± 5% Vh: 5V± 0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

	Parts	Materials
1	Gas sensing layer	SnO_2
2	Electrode	Au
3	Electrode line	Pt
4	Heater coil	Ni-Cr alloy
5	Tubular ceramic	Al_2O_3
6	Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7	Clamp ring	Copper plating Ni
8	Resin base	Bakelite
9	Tube Pin	Copper plating Ni

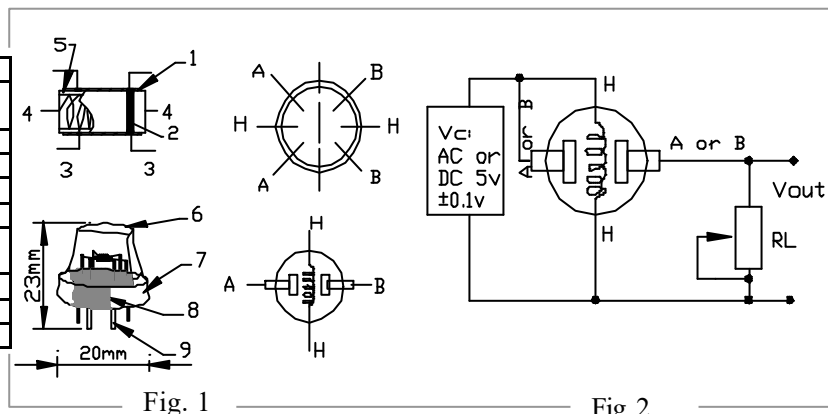
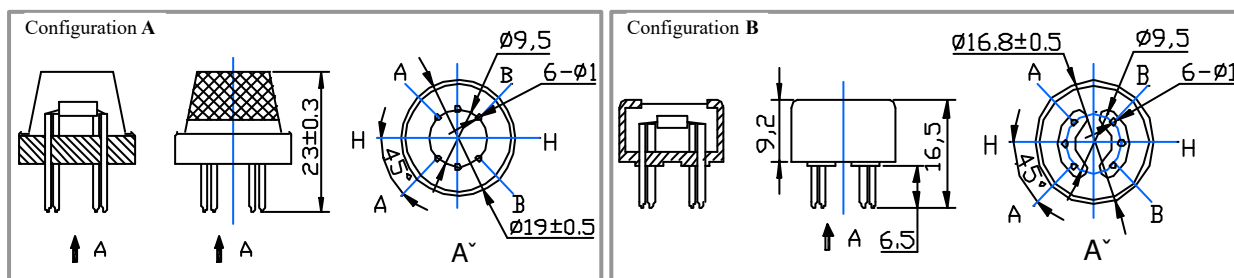


Fig. 1

Fig. 2



Structure and configuration of MQ-136 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al_2O_3 ceramic tube, Tin Dioxide (SnO_2) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of

sensitive components. The enveloped MQ-136 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

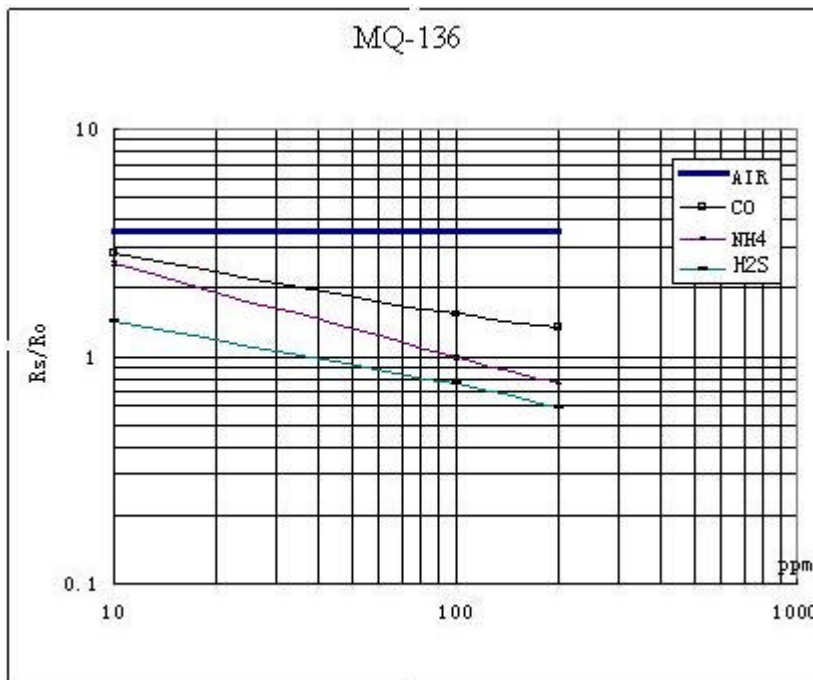


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-136 for several gases.

in their: Temp: 20 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C

Humidity: 65% $\pm$ 1%

O₂ concentration 21%

RL=20kf,

Ro: sensor resistance at 10ppm of H₂S in the clean air.

Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

Fig.3 sensitivity characteristics of the MQ-136

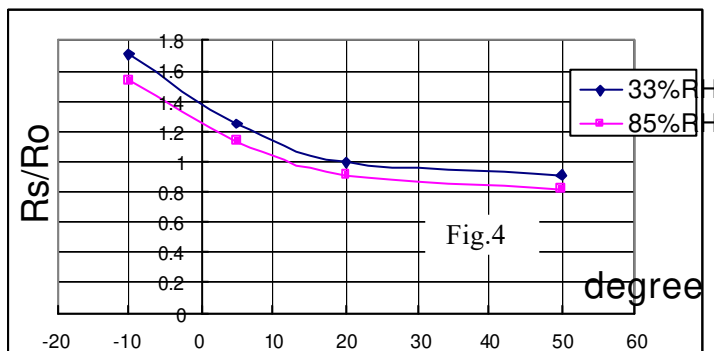


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-136 on temperature and humidity.

Ro: sensor resistance at 10ppm of H₂S at 33%RH and 20 degree.

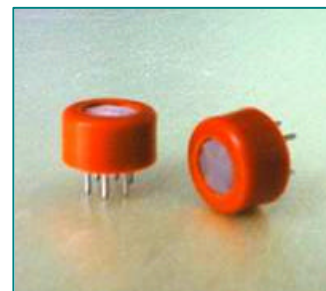
Rs: sensor resistance at 10ppm of H₂S

at different temperatures and humidity.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-136 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 10ppm H₂S concentration in air and use value of Load resistance that (R_L) about 20 Kf, (10Kf, to 47 Kf,).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



TECHNICAL DATA

MQ-137 GAS SENSOR

FEATURES

Fast response and High sensitivity

Stable and long life

Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/factory, are suitable for detecting of NH_3 .

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V_c	Circuit voltage	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
V_H	Heating voltage	$5V \pm 0.1$	AC OR DC
R_L	Load resistance	can adjust	
R_H	Heater resistance	$31f, \pm 5\%$	Room Tem
P_H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T_{ao}	Using Tem	$-10^\circ\text{C} \sim -45^\circ\text{C}$	
T_{as}	Storage Tem	$-20^\circ\text{C} \sim -70^\circ\text{C}$	
R_H	Related humidity	less than 95%Rh	
O_2	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
Ro	Sensing Resistance	900K <i>f</i> , -4900K <i>f</i> , (in air)	Detecting concentration scope“ 5-200ppm NH ₃
<i>f</i> (20/10) NH ₃	Concentration Slope rate	i 0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20i i 2i Vc:5V± 0.1 Humidity: 65%± 5% Vh: 5V± 0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO_2
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al_2O_3
6 Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni

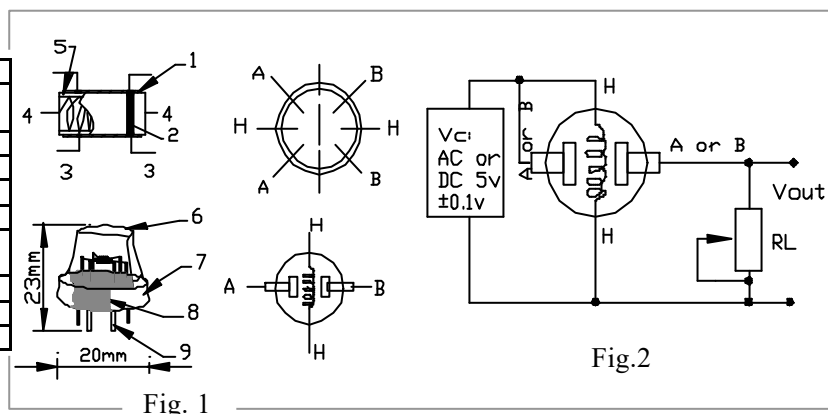
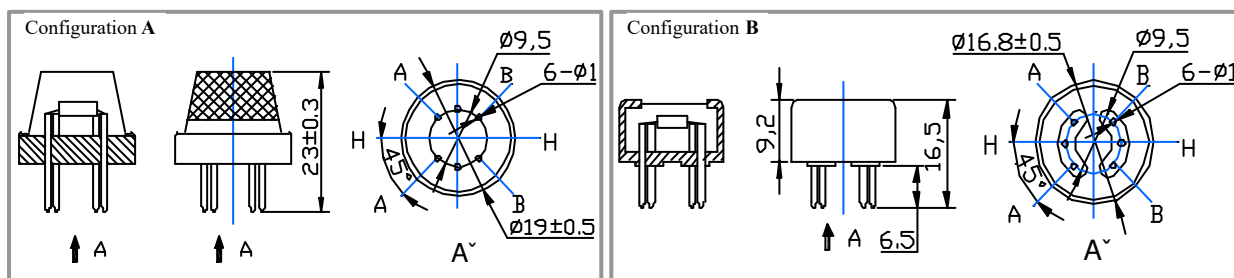


Fig. 1

Fig.2



Structure and configuration of MQ-137 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro ceramic tube, sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The

enveloped MQ-137 have 6 pins, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

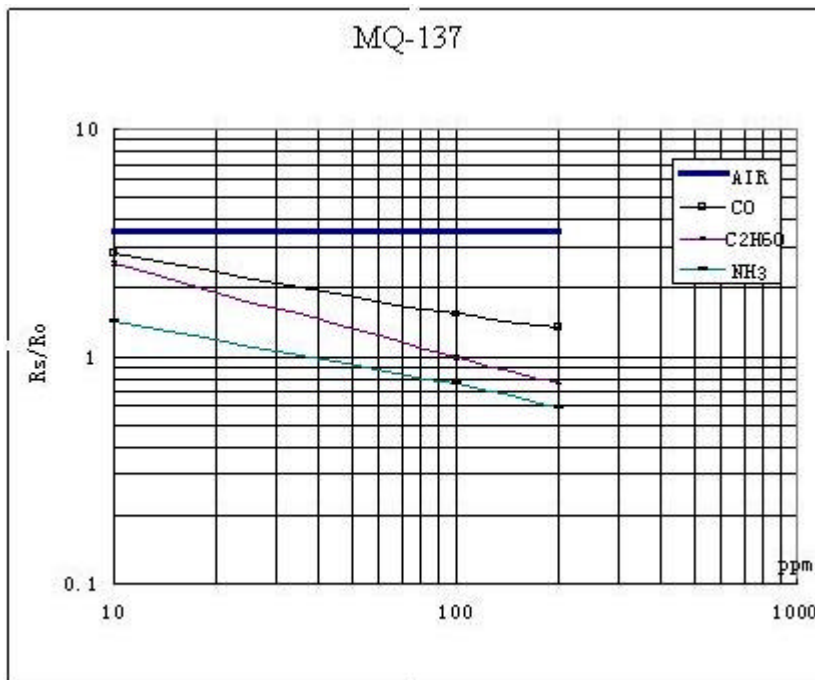


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-137 for several gases.

in their: Temp: 20 $\pm$ 1 $^{\circ}$ C
Humidity: 65% $\pm$ 1%
O₂ concentration 21%
RL=47kf,
Ro: sensor resistance in the clean air.
Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

Fig.3 sensitivity characteristics of the MQ-137

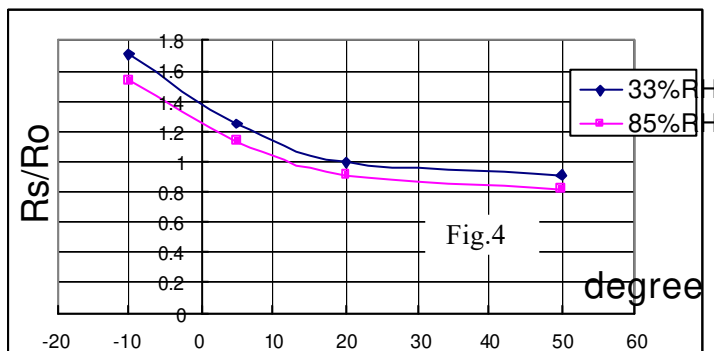


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-137 on temperature and humidity.

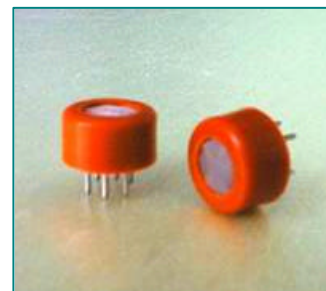
Ro: sensor resistance at 10ppm of NH₃ at 33%RH and 20 degree.

Rs: sensor resistance at 20ppm of NH₃ at different temperatures and humidity.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-137 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 10ppm NH₃ concentration in air and use value of Load resistance that (R_L) about 47 Kf, (10Kf, to 100Kf,).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



TECHNICAL DATA**MQ-138 GAS SENSOR****FEATURES**

Wide detecting scope
Stable and long life

Fast response and High sensitivity
Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in Breath alcohol detector, solvent detectors ,Air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of n-Hexane, Benzene, NH₃, alcohol, ,smoke, CO ,etc.

SPECIFICATIONS**A. Standard work condition**

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R _L	Load resistance	can adjust	
R _H	Heater resistance	31 Ω ± 3 Ω	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 850mw	

B. Environment condition

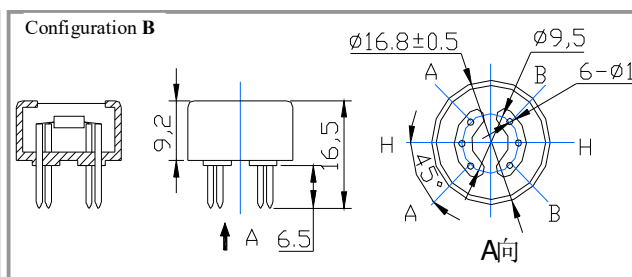
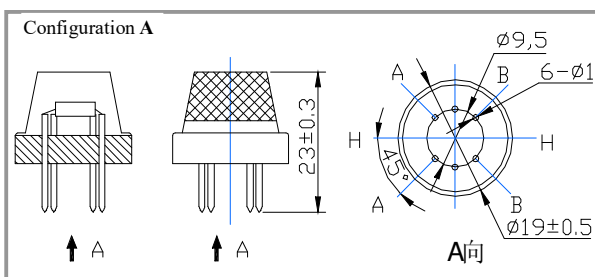
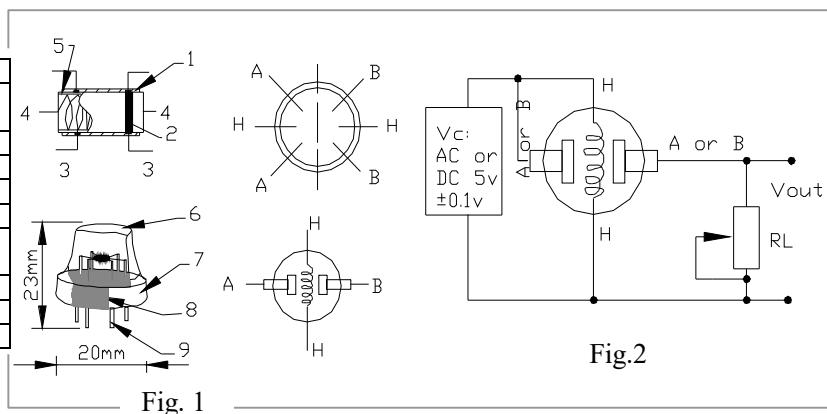
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10℃-45℃	
T _{as}	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
Rs	Sensing Resistance	20K Ω -200K Ω (1000ppm Benzene)	Detecting concentration scope: 10ppm-1000ppm Benzene 10ppm-1000ppm Alcohol 10ppm-3000ppm NH ₃
α (200/50) NH ₃	Concentration Slope rate	≤0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20℃ ±2℃ Vc:5V±0.1 Humidity: 65%±5% Vh: 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hours		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

	Parts	Materials
1	Gas sensing layer	SnO ₂
2	Electrode	Au
3	Electrode line	Pt
4	Heater coil	Ni-Cr alloy
5	Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6	Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7	Clamp ring	Copper plating Ni
8	Resin base	Bakelite
9	Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-138 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and

heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-138 have 6 pin, 4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-138

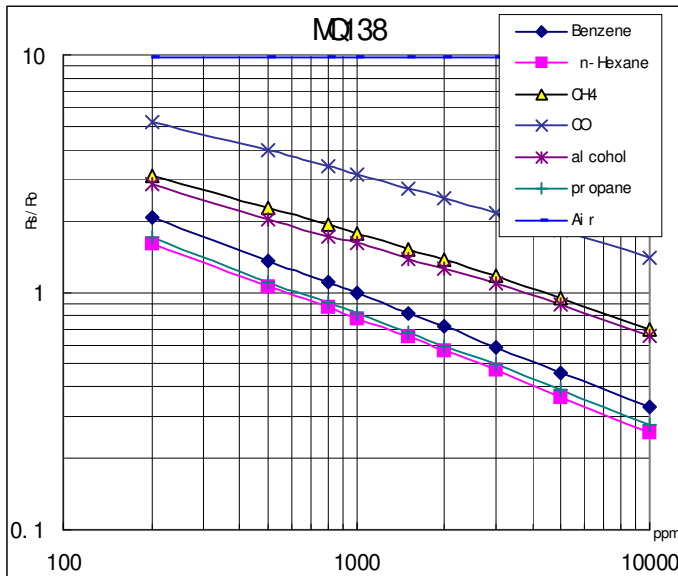


Fig.3 shows the typical sensitivity characteristics of

the MQ-138 for several gases.

in their: Temp: 20°C,

Humidity: 65%,

O₂ concentration 21%

RL=20kΩ

R₀: sensor resistance at 1000ppm of Benzene in the clean air.

R_s: sensor resistance at various concentrations of gases.

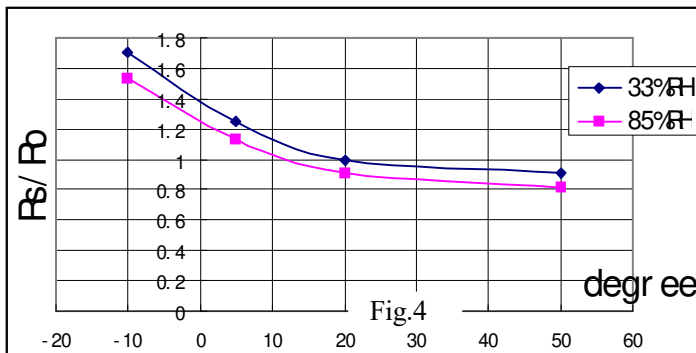


Fig.4 shows the typical dependence of the MQ-138 on temperature and humidity.

R₀: sensor resistance at 1000ppm of Benzene in air

at 33%RH and 20 degree.

R_s: sensor resistance at 1000ppm of Benzene at different temperatures and humidity

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-138 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 100ppm Benzene or Alcohol concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 47 KΩ (20KΩ to 100 KΩ).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

