SAFEGAS - SISTEMA INTELIGENTE DE DETECÇÃO DE GÁS

Felipe Diniz Lima
Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Cubatão, SP, Brasil

Gabriel Costa Cardoso
Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Cubatão, SP, Brasil

Paulo Victor Nascimento de Lima
Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Cubatão, SP, Brasil

Dr. Arnaldo De Carvalho Júnior
Instituto Federal de São Paulo (IFSP), Cubatão, SP, Brasil

Resumo: Este artigo detalha o desenvolvimento de um sistema de deteção de gás de baixo custo para aplicações em segurança industrial, utilizando a plataforma Arduino. O problema central abordado é a notória instabilidade de sinal de sensores de baixo custo, como o MQ-2, que na prática apresentam leituras espúrias capazes de comprometer a fiabilidade do sistema. A solução proposta consiste em um protótipo completo que integra um alarme visual de quatro estágios, um alerta sonoro e um sistema de ventilação automática acionado por servomotor. O projeto foi validado desde a fase de simulação, que confirmou a lógica de controle, até a montagem física, quando o desafio do ruído de sinal se tornou evidente. A conclusão da pesquisa demonstra que a implementação da Lógica Paraconsistente Anotada (LPA2v) no software do microcontrolador foi a solução eficaz para corrigir as leituras irregulares, garantindo a estabilidade e a confiabilidade do sistema. O resultado é um dispositivo funcional e economicamente viável, capaz de prevenir falsos alarmes e falhas de deteção, validando sua aplicabilidade em ambientes como fábricas e laboratórios.

Palavras-chave: Processamento de sinais. Sistema embarcado. Segurança Industrial. Filtro PLA2v.

Abstract: This paper details the development of a low-cost gas detection system for industrial safety applications using the Arduino platform. The central problem addressed is the notorious signal instability of low-cost sensors, such as the MQ-2, which in practice exhibit spurious readings capable of compromising the system's reliability. The proposed solution consists of a complete prototype that integrates a four-stage visual alarm, an audible alert, and an automatic ventilation system activated by a servomotor. The project was validated from the simulation phase, which confirmed the control logic, to the physical assembly, where the challenge of signal noise became evident. The research conclusion demonstrates that implementing a robust digital filter in the microcontroller's software was the effective solution to mitigate inadequate readings, ensuring the system's stability and reliability. The result is a functional and economically viable device, capable of preventing false alarms and detection failures, validating its applicability in environments such as factories and laboratories.

Keywords: Signal Processing. Embedded System. Industrial Safety. PLA2v Filter.

INTRODUÇÃO

A segurança industrial é uma área de extrema importância, pois a prevenção de acidentes protege vidas e patrimônios (DE CARVALHO JUNIOR, 2023). Entre as diversas ameaças existentes, o acúmulo de gases inflamáveis ou tóxicos representa um perigo silencioso e potencialmente catastrófico. Vazamentos não detectados em tempo hábil podem causar incêndios, explosões e intoxicações, o que justifica a necessidade de sistemas de monitoramento contínuos e altamente confiáveis.

Reconhecendo essa necessidade, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR IEC 60079-29-1, 2008) estabelece diretrizes rigorosas para o desempenho de equipamentos de segurança (LIMA FILHO, 2011), definindo os requisitos essenciais para detectores de gases. O crescente uso de sistemas embarcados e sensores de baixo custo, como o sensor de gás MQ-2 — utilizado na detecção de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e no

monitoramento da qualidade do ar —, tem ganhado destaque devido à sua acessibilidade e aplicabilidade em sistemas de detecção e alerta, conforme demonstrado em estudos anteriores (MAIZA, 2024) e (NUGRAHA, 2024). Contudo, a transição de um projeto em ambiente de simulação para um protótipo físico revela um desafio prático fundamental: a instabilidade do sinal em sensores de baixo custo.

Enquanto o ambiente de simulação opera com componentes ideais, gerando sinais limpos e previsíveis, na realidade há a presença de ruído elétrico, flutuações causadas por variações de temperatura e umidade, além de outras interferências que produzem leituras espúrias. Esses “picos” e “vales” anômalos no sinal são inaceitáveis em uma aplicação de segurança, pois podem gerar falsos alarmes — resultando em paralisações desnecessárias — ou, de forma mais grave, falhas na detecção de vazamentos reais. A necessidade de extrair informações úteis de dados contraditórios constitui um desafio central para sistemas inteligentes (DE CARVALHO JUNIOR, 2018). Quando o ruído contamina os sinais dos sensores, torna-se essencial aplicar um filtro capaz de processar adequadamente os dados.

Nesse contexto, algoritmos baseados na Lógica Paraconsistente Anotada com dois valores (PAL2v), como o Filtro PAL2v, oferecem uma solução eficaz. Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo de caso completo, abrangendo desde o projeto até a validação de um protótipo funcional, denominado Sistema Inteligente de Detecção de Gases (SAFEGAS). O estudo demonstra como o processamento adequado de sinais via software pode superar desafios inerentes ao hardware de baixo custo, alinhando-se, assim, às tendências da Indústria 4.0 (DE CARVALHO JUNIOR, 2024).

HARDWARE DO SISTEMA SAFEGAS

Nesta seção, serão apresentados os componentes que compõem o hardware do sistema SAFEGAS e suas principais características. O sistema foi projetado com foco na modularidade e no baixo custo, utilizando componentes eletrônicos amplamente disponíveis no mercado

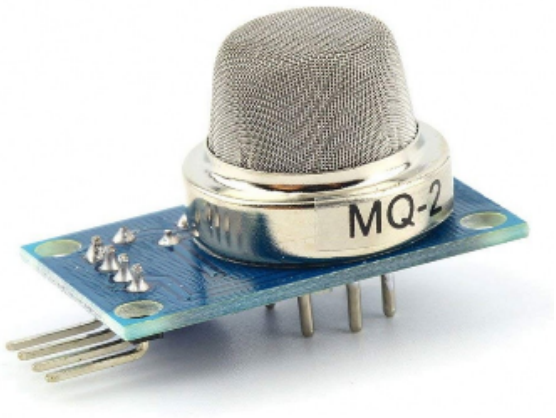
A. Seleção do Microcontrolador

A placa Arduino MEGA é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que constitui o núcleo do sistema. A equipe optou pelo uso do Arduino devido à sua facilidade de programação, ampla documentação, grande suporte da comunidade e, principalmente, por oferecer as interfaces necessárias ao projeto: entradas analógicas para leitura do sensor de gás e saídas digitais para o controle dos LEDs, do *buzzer* e do servomotor.

B. Função e Operação do Sensor de gás

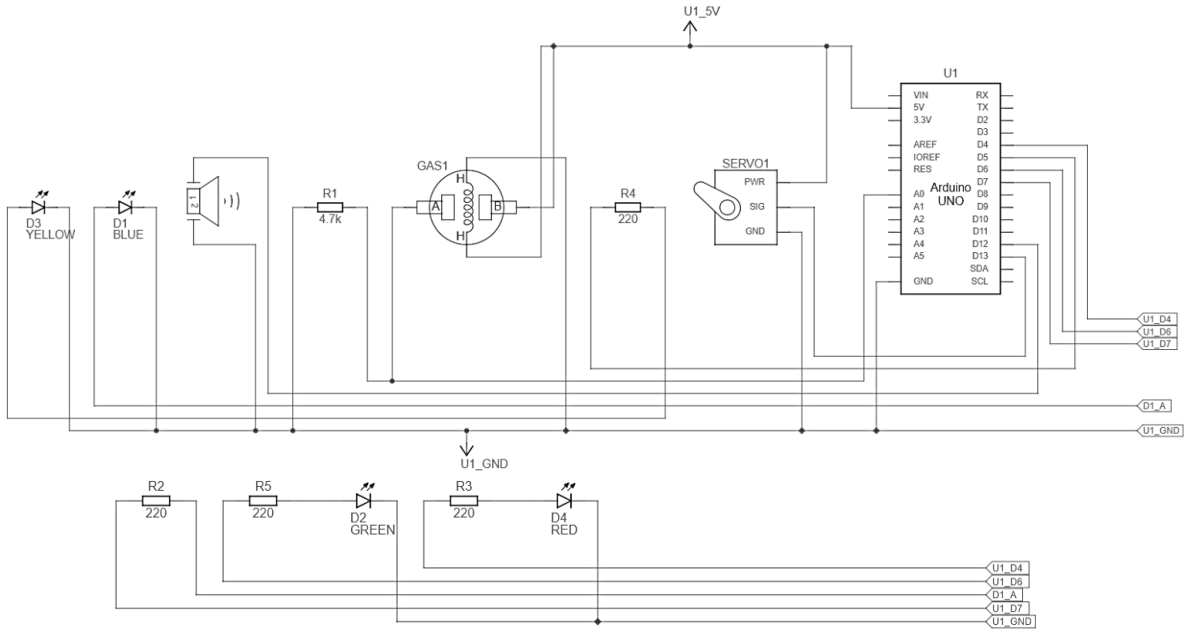
O principal elemento de detecção é o módulo do sensor de gás MQ-2. Esse metal óxido semicondutor (MOS) foi selecionado por sua sensibilidade a uma ampla faixa de gases inflamáveis, incluindo GLP, butano, metano e fumaça, tornando-o ideal para aplicações gerais de segurança. A Figura 1 apresenta o módulo, destacando a malha de aço inoxidável que protege o elemento sensor interno e os quatro pinos de conexão (VCC, GND, A0 e D0).

Figura 1- Sensor MQ-2



Fonte: RoboCore (2025).

Figura 2 - Diagrama elétrico do sistema de detecção de gás



Fonte: Autores (2025).

Para compreender a origem do ruído e a necessidade de filtragem, é essencial entender o funcionamento do sensor MQ-2. O dispositivo opera com base em princípios eletroquímicos. Seu núcleo contém uma fina camada de dióxido de estanho (SnO_2), um material semicondutor, depositado sobre um tubo cerâmico. Um filamento de aquecimento localizado dentro desse tubo, alimentado com 5 V, eleva a temperatura da camada de SnO_2 até um nível ideal de operação.

Em um ambiente de ar limpo, as moléculas de oxigênio (O_2) são adsorvidas na superfície aquecida do semicondutor, capturando elétrons da banda de condução do SnO_2. Esse processo cria uma barreira de potencial, que aumenta significativamente a resistência elétrica do material. Quando um gás combustível (redutor) entra em contato com o sensor, ocorre uma reação com o oxigênio adsorvido, liberando novamente elétrons para a banda de condução. Isso reduz a barreira de potencial e, consequentemente, a resistência elétrica. A magnitude dessa redução na resistência é diretamente proporcional à concentração do gás presente.

C. Função e Operação do Servomotor

Para demonstrar o controle em um ambiente com determinada concentração de gás, foi construída uma caixa vedada a fim de simular um

ambiente confinado, onde a atmosfera interna é isolada da externa, permitindo maior concentração de gases. Essa caixa possuía apenas uma pequena abertura para a injeção do gás e uma porta controlada por um servomotor. A Figura 3 apresenta o atuador responsável pela ação mecânica do sistema.

Figura 3 - Micro servo motor SG90

Fonte: RoboCore (2025).

Quando o sistema atinge o estágio de “perigo”, ele recebe instruções do software para girar 90°, abrindo a caixa e liberando o gás, simulando uma ação de segurança em uma instalação real, na qual a concentração de gás no ambiente seria dissipada. Para esse teste, foi utilizado um isqueiro contendo uma quantidade segura de butano liquefeito, que se vaporiza quando a válvula do isqueiro é pressionada, permitindo que o sensor MQ-2 detecte a concentração de gás dentro da caixa.

D. Sistema de Alarme por Concentração de Gás

Com o princípio de funcionamento do MQ-2 compreendido, desenvolveu-se um subsistema de alarme e atuação projetado para fornecer uma resposta clara e graduada conforme a concentração de gás (em um espaço confinado) e a classificação de risco. O sistema é composto por:

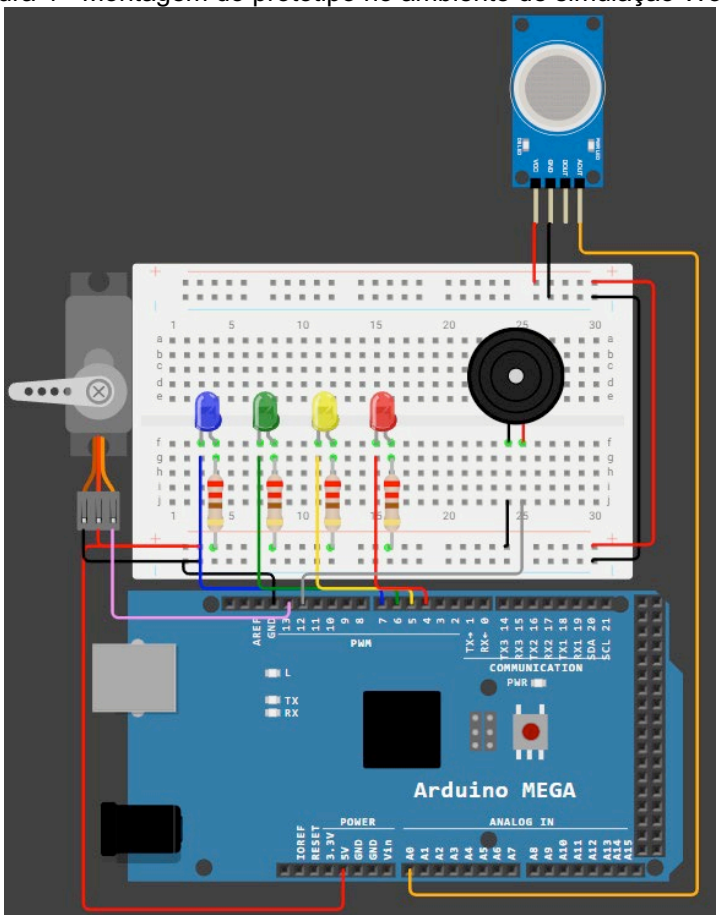
1. **Sinalização Visual**: Quatro LEDs de alto brilho de 5 mm (Azul, Verde, Amarelo e Vermelho) indicam visualmente o estado do sistema, variando de “seguro” a “perigo”;

2. **Alarme Sonoro**: Um buzzer passivo emite um alerta sonoro agudo e intermitente quando o sistema atinge o nível máximo de perigo;
3. **Sistema de Ventilação Automático**: É utilizado um micro servomotor modelo SG90 para simular a abertura de uma veneziana de ventilação.

E. Arquitetura e pinagem

Dessa forma, a equipe inicialmente modelou o sistema SAFEGAS utilizando o diagrama elétrico mostrado na Figura 4, que detalha todas as conexões (pinagens) dos componentes mencionados e serviu como guia para a simulação e posterior montagem física. O diagrama mostra o pino de saída analógica do sensor MQ-2 (GAS1) conectado ao pino A0 do microcontrolador Arduino (U1). Os LEDs, o buzzer e o servomotor (SERVO1) estão conectados a pinos de saída digital, cada um com suas respectivas conexões de alimentação (U1_5V), terra (U1_GND) e resistores limitadores de corrente.

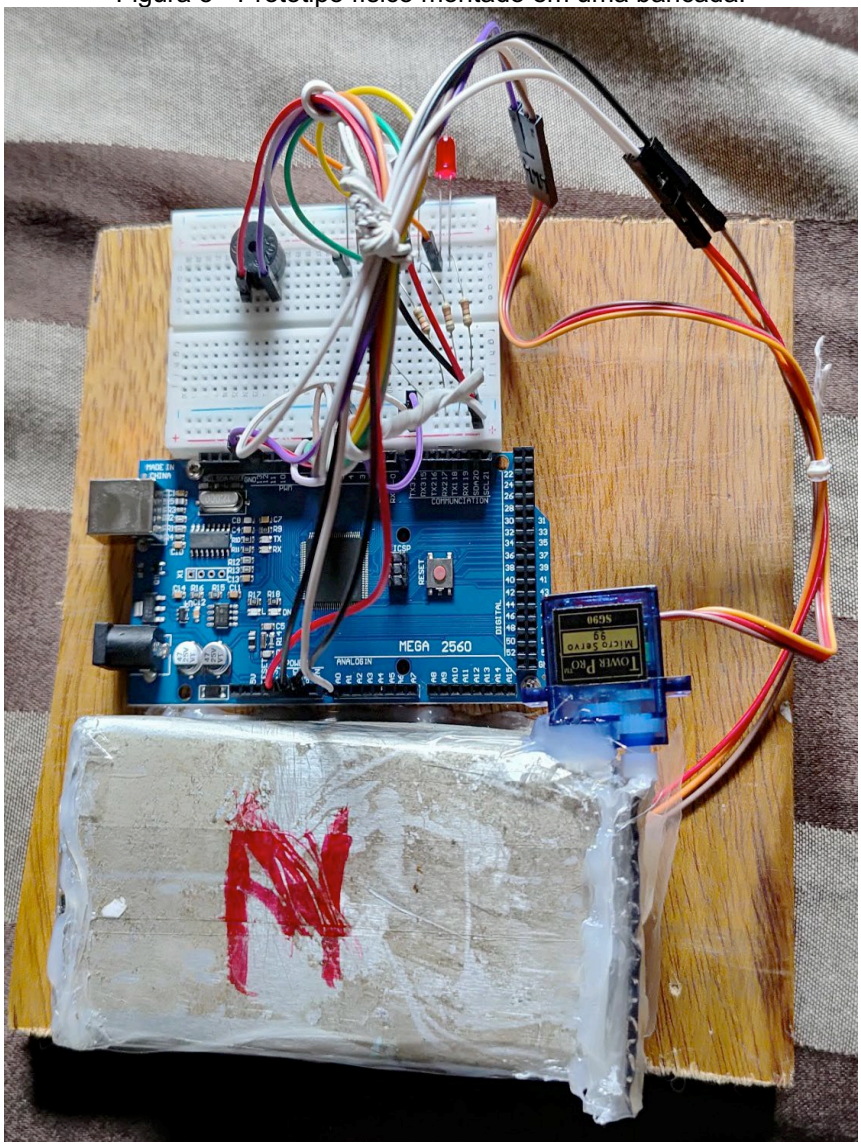
Figura 4 - Montagem do protótipo no ambiente de simulação Wokwi



Fonte: Autores (2025).

Para a validação funcional preliminar, o circuito foi replicado no ambiente de simulação Wokwi, conforme mostrado na Figura 4. A fase de simulação foi essencial para a depuração do código e para a verificação da sequência de acionamento dos alarmes em um ambiente ideal. No simulador, confirmou-se que os LEDs acendiam nos limiares corretos e que tanto o buzzer quanto o servomotor eram acionados na etapa de “perigo”.

Figura 5 - Protótipo físico montado em uma bancada.



Fonte: Autores (2025).

Após a validação virtual, o sistema foi confeccionado fisicamente em bancada. A Figura 5 apresenta a montagem final do protótipo, composta pela

placa Arduino MEGA, uma *protoboard* contendo os LEDs, resistores e o *buzzer*, além do servomotor acoplado a uma caixa vedada.

SOFTWARE DO SISTEMA SAFEGAS

Esta seção apresenta o código a ser embarcado no microcontrolador da plataforma Arduino, aplicando a Lógica Paraconsistente Anotada com dois valores (PAL2v). Também são explicados os principais parâmetros de filtragem de sinal e os ajustes necessários para o funcionamento adequado do sensor MQ-2.

A. Implementação do Filtro PAL2v na Placa

Logo após a montagem e durante os testes do protótipo, foi rapidamente identificado o problema de ruído no sinal proveniente da leitura do sensor de gás, fazendo com que o sistema apresentasse falsos alarmes e comportamento instável. Esse resultado reforçou a necessidade de uma solução via software para o processamento do sinal.

$$y[n] = y[n-1] + a * clip(x[n] - y[n-1], -\epsilon_{max}, \epsilon_{max}) \quad (1)$$

Onde y[n] representa a saída filtrada no instante atual, y[n−1] é a saída filtrada do instante anterior, e x[n] corresponde à entrada normalizada atual. O fator de suavização ou taxa de aprendizado é dado por α, e o limite máximo de erro é representado por ϵ_{max}. Por fim, na equação (1), a função clip (valor, min, max) limita o valor de forma que este não seja menor que min nem maior que max.

O filtro é implementado na função “applyLPA2v”, que é chamada dentro da função principal loop () para processar cada nova leitura do sensor. A seguir, apresenta-se a função do filtro LPA2v extraída do código.

```
// Function to apply third-order paraconsistent logic in cascade (LPA2v)
float applyLPA2v(float reading, float prevValue, float learningRate, float maxError) {

 float error = reading - prevValue;
```

```
        // If the error is too large, smooth more
        if (abs(error) > maxError){
            // If the error is too large, the reading is smoothed more aggressively
            reading = prevValue + (error > 0 ? maxError : - maxError); // Limit the variation to maxError
        }
        float newReading = prevValue + learningRate * (reading - prevValue);

        if (newReading > 1.0) newReading = 1.0;
        if (newReading < 0.0) newReading = 0.0;
        return newReading;
        }
```

Para o sistema de detecção de gases, foi projetado um filtro paraconsistente de terceira ordem (composto por três camadas sequenciais de LPA2v), em que cada camada ajusta o grau de certeza gerado pela anterior, com um fator de aprendizado $\alpha = 0{,}1$. Esse mecanismo de realimentação suaviza as flutuações rápidas no sinal, ao mesmo tempo em que promove uma convergência progressiva em direção à evidência predominante (verdadeira ou falsa). Essa estrutura em cascata melhora a rejeição de ruídos e aprimora a separação entre os estados “seguro” e “vazamento detectado”.

B. Valor de Medição Normalizado

Nos primeiros segundos após a energização, o sensor MQ-2 apresenta leituras transitoriamente elevadas de concentração, causadas pelo aquecimento do elemento sensível. Para evitar que esse pico inicial acione falsos alarmes, é realizada uma normalização dos valores, na qual as leituras são convertidas com base na equação (2):

$$\hat{S} = \frac{S - S_{MIN}}{S_{MAX} - S_{MIN}} \tag{2}$$

Onde Ŝ representa o valor de medição normalizado, e S_{MAX} e S_{MIN} são os valores obtidos durante a calibração do sensor. Após a normalização, o grau de evidência favorável (μ) recebe o valor de Ŝ, enquanto o grau de evidência desfavorável (λ) recebe o valor de 1 – Ŝ. Conforme mencionado anteriormente, esses valores são então enviados ao filtro paraconsistente.

Após o processamento em cascata, o valor resultante ($\hat{S}_{FILTRADO}$) é convertido novamente para a escala original, permitindo que o *buzzer* seja acionado apenas quando o limite de segurança calibrado for excedido.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A validação da efetividade do sistema completo exigiu a realização de testes com o protótipo físico, registrando simultaneamente as leituras brutas e filtradas. As tabelas a seguir apresentam um trecho dos dados coletados, ilustrando o comportamento do sistema em situações críticas.

Tabela 1 – Comparação das Leituras MQ-2 sem o Filtro PLA2v.

Tempo	Leitura Normal	Condição	Status do sistema
T_1	3,0	Ar limpo	Azul (seguro)
$\boldsymbol{T_2}$	**83,0**	**Pico de ruído**	**Vermelho (alerta falso)**
T_3	6,0	Ar limpo	Azul (seguro)
T_4	50,0	Presença de gás	Amarelo (atenção)
$\boldsymbol{T_5}$	**-6,0**	**Vale do ruído**	**Azul (falha de alerta)**
T_6	51,0	Presença de gás	Amarelo (atenção)

Fonte: Autores (2025).

Tabela 2 – Comparação das Leituras MQ-2 com o Filtro PLA2v.

Tempo	Leitura Filtrada	Condição	Status do sistema
T_1	3,5	Ar limpo	Azul (seguro)
$\boldsymbol{T_2}$	**6,2**	**Pico de ruído**	**Azul (seguro)**
T_3	5,8	Ar limpo	Azul (seguro)
T_4	48,7	Presença de gás	Amarelo (atenção)
$\boldsymbol{T_5}$	**47,1**	**Vale do ruído**	**Amarelo (atenção)**
T_6	49,2	Presença de gás	Amarelo (atenção)

Fonte: Autores (2025).

Ao comparar a Tabela 1 (sinal não filtrado) com a Tabela 2 (sinal com filtro), observa-se claramente o papel crucial do filtro nas leituras sob determinadas condições. Por exemplo, no instante T2, ocorre um pico de ruído que eleva a leitura bruta do sensor para 83,0 (um falso alerta), que, no caso não filtrado, acionaria o alarme. Por outro lado, com a aplicação do filtro PAL2v, a leitura do sistema é atenuada, mantendo o estado “seguro”.

De forma oposta, no instante T5, uma queda anômala do sinal para −6,0 poderia desativar o alerta de “Atenção”, mas o filtro manteve a saída estável, garantindo a continuidade do alerta.

A Tabela 2 apresenta uma melhor escalabilidade de resposta em comparação à Tabela 1, demonstrando a eficácia do filtro PAL2v de terceira ordem implementado no sistema SAFEGAS.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do sistema de detecção de gases demonstrou a viabilidade de uma solução industrial de baixo custo, baseada na plataforma Arduino MEGA e no sensor de gás MQ-2. O principal desafio encontrado foi a instabilidade do sinal, uma limitação comum em sensores de baixo custo que compromete a confiabilidade das medições. Esse problema foi superado por meio da implementação de um filtro digital baseado no algoritmo PLA2v no software embarcado. O filtro mostrou-se eficaz em atenuar leituras espúrias, evitando alarmes falsos e garantindo maior segurança operacional.

A análise dos resultados experimentais confirma que a inteligência algorítmica exerce um papel mais decisivo do que a qualidade do hardware na confiabilidade do sistema, validando uma arquitetura em que software e hardware atuam de forma sinérgica.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCI) dedicada, visando maior robustez mecânica e imunidade a ruídos, além da realização de calibrações mais rigorosas do sensor. Adicionalmente, a integração de tecnologias de comunicação sem fio, como Wi-Fi ou LoRaWAN, para emissão de alertas remotos, bem como a inclusão de uma interface de exibição local para visualização das informações in loco, permitirá ampliar o controle e a usabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DE CARVALHO JUNIOR, A. et al. A Paraconsistent Artificial Neural Cell of Learning by Contradiction Extraction (PANCLCTX) with Application Examples. In: Abe, J.M. (eds) Advances in Applied Logics. Intelligent Systems Reference Library, v. 243. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-35759-6_5, 2023.

LIMA FILHO, D. L. Projetos de Instalações Elétricas Prediais (Estude e use Instalações elétricas). ISBN 9788571944176. São Paulo: Érica, Ed. 12, p. 272, 2011.

MAIZA, F. et al. Design of LPG Leakage Detection Device using MQ-2 Sensor Equipped with Hazard Warning System. Journal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering), v. 11, n. 2, p. 143-150, 2024.

NUGRAHA, R. F. et al. Smart Air Quality Guardian: Pengawasan Polusi Udara Berbasis ESP32 dengan Sensor Gas MQ-2 dan MQ-135. Journal Komputer dan Elektro Sains, v. 2, n. 2, p. 1-7, 2024.

DE CARVALHO JUNIOR, A. Aplicações Estado da Arte da Lógica Paraconsistente Anotada Evidencial eт na Indústria 4.0 e Internet das Coisas. Revista Acadêmica-Ensino de Ciências e Tecnologias, IFSP – Campus Cubatão, v. 2, p. 38-57, 2018.

ABNT NBR IEC 60079-29-1. Atmosferas Explosivas — Parte 29-1: Detectores de Gás — Requisitos de Desempenho de Detectores para Gases Inflamáveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

DE CARVALHO JUNIOR, A.; JUSTO, J. F.; DE OLIVEIRA, A. M.; DA SILVA FILHO, J. I. A Comprehensive Review on Paraconsistent Annotated Evidential Logic: Algorithms, Applications, and Perspectives, Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 127, part B, 107342, ISSN 0952-1976. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107342, 2024.