



RESPOSTA EXPLORATÓRIA DE SENSORES SEMICONDUTORES A ACETONA E ACETATO DE ETILA SOB DIFERENTES CONDIÇÕES DE VENTILAÇÃO

Laura C. Guimarães¹; Lucas S. C. Teixeira¹; Livia T. C. C. Vilela¹; Bianca Ortiz da Silva²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Campus Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Núcleo de Enfrentamento e Estudos de Doenças Infecciosas Emergentes e Reemergentes, Rio de Janeiro, Brasil

e-mail para correspondência: bianca.ortiz@ccsdecania.ufrj.br

Palavras-Chave: segurança química, compostos orgânicos voláteis, exaustão localizada

Introdução

Solventes orgânicos voláteis são empregados rotineiramente em laboratórios de ensino e pesquisa e podem gerar vapores durante a abertura de frascos, a transferência de líquidos e os procedimentos em bancada. A prevenção da exposição ocupacional deve integrar reconhecimento do perigo, caracterização das condições de trabalho e medidas de controle, priorizando-se soluções de proteção coletiva. No Brasil, a NR-1 organiza o gerenciamento de riscos ocupacionais e a NR-9 estabelece requisitos para avaliar e controlar exposições a agentes químicos (BRASIL, 2026a; BRASIL, 2026b).

Circulação, renovação e exaustão localizada do ar são fenômenos distintos. Equipamentos split promovem principalmente recirculação, enquanto a capela busca captar o contaminante próximo à fonte; sua efetividade depende, entre outros fatores, da vazão, da localização da fonte e do padrão de escoamento. Estudos em laboratórios mostram que posição da fonte, insuflação e taxa de renovação modificam a distribuição espacial de contaminantes (LIU; LIU; GAO, 2017). Por isso, uma leitura pontual não representa automaticamente a exposição respiratória nem comprova o desempenho de um equipamento de proteção coletiva.

Matrizes de sensores semicondutores de óxidos metálicos são portáteis e de baixo custo, mas apresentam resposta cruzada, deriva, dependência de temperatura e umidade, tempos de recuperação e diferenças entre unidades. A interpretação adequada considera o conjunto dos canais, e não apenas os de maior alteração (DUTTA et al., 2023; RATH et al., 2023; LI et al., 2024). Sem calibração específica e método de referência, sinais ADC permitem acompanhar variações relativas, mas não quantificar concentração ou verificar limites ocupacionais. A posição do sensor em relação à fonte e ao fluxo de ar também afeta a representatividade da medida (YUN; LICINA, 2023).

Este estudo teve como objetivo caracterizar exploratoriamente as variações de todos os seis canais de uma matriz de sensores durante exposições a 3,0 mL de acetona e acetato de etila, em bquer de 50 mL, sob cinco configurações de circulação ou exaustão do ar em um laboratório didático, explicitando limitações de sequência, posicionamento e qualidade dos registros.



Material e Métodos

Os ensaios foram realizados em 14 de julho de 2026 no Laboratório de Química Orgânica do IFRJ — Campus Duque de Caxias ($6,56 \times 7,30 \times 3,40$ m; aproximadamente 163 m^3). O local possuía ar-condicionado split de teto Carrier XPower Inverter, modelo 42ZQVC36C5, de $36.000 \text{ BTU h}^{-1}$, portas, janelas, ventiladores e capela de exaustão. A temperatura variou de 20 a 23°C e a umidade relativa, de 45 a 54%. Foram utilizados protótipos com ESP32 e canais MQ2, MQ3, MQ4, MQ5, MQ7 e MQ135; os sinais foram registrados em unidades do conversor analógico-digital (ADC; 0–4095).

As condições nominais foram: E1, portas e janelas fechadas, ar-condicionado e capela desligados; E2, portas e janelas fechadas, ar-condicionado a 20°C e velocidade máxima; E3, portas e janelas abertas e ar-condicionado desligado; E4, portas e janelas abertas e ar-condicionado ligado; E5, sensores no interior da capela em funcionamento. A sequência executada foi E1–E2–E4–E3–E5, sem sorteio formal. Em cada condição, a acetona precedeu o acetato de etila; portanto, os solventes também não foram randomizados.

Em cada exposição, 3,0 mL do reagente foram colocados separadamente em um béquer de 50 mL, mantido aberto no ponto de emissão por 3 min e retirado ao final desse intervalo; seguiram-se 3 min sem o béquer para recuperação. Os 3 min imediatamente anteriores constituíram a linha de base. O tempo de evaporação completa não foi medido; 3 min designam apenas a janela de exposição. Na bancada, S2D2 ficou na bancada mais próxima do béquer, a 30 cm de altura; S5F1 ficou a cerca de 1,5 m da fonte e também a 30 cm; S8F1 ficou mais afastado e fora da direção do fluxo do ar-condicionado. Não foram registrados a distância horizontal exata do S2D2, a distância e altura do S8F1, nem as distâncias individuais entre fonte e S4D2, S7F2 e S1F1 dentro da capela. O instrumento usado para dosar a alíquota também não constava no registro primário.

As janelas foram delimitadas pelos horários do caderno de campo, seguindo a ordem real, e as abas ADC individuais foram ordenadas por data e hora. Para cada protótipo, canal e etapa calculou-se a mediana; ΔADC foi a mediana da exposição ou recuperação menos a mediana da linha de base. Todos os canais foram mantidos. Zero foi preservado como leitura registrada; sequências persistentes no piso foram sinalizadas como possível limitação instrumental. Ausência de janela foi marcada como NA, sem imputação, e 4095 foi classificado como saturação. A análise foi descritiva, pois houve uma execução por condição, sem réplicas independentes ou calibração analito-específica.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta todos os canais dos protótipos de bancada na ordem experimental E1–E2–E4–E3. Em S5F1, a maior elevação sem saturação ocorreu no MQ2 durante acetona em E1 (764 para 1.194,5 ADC; $\Delta = +430,5$), seguida do acetato de etila em E3 (733 para 1.052 ADC; $\Delta = +319$). Em S2D2, a acetona em E1 elevou MQ2 em 263 ADC e MQ3 em 149 ADC. As demais combinações incluíram aumentos, reduções e alterações discretas, comportamento compatível com resposta cruzada e com a influência do histórico do sensor; não houve padrão monotônico que permitisse ordenar as configurações de circulação do ar.

Bancada: variação mediana de todos os canais

ΔADC = mediana da exposição – mediana da linha de base

	E1-Ace	E1-AEt	E2-Ace	E2-AEt	E4-Ace	E4-AEt	E3-Ace	E3-AEt
S2D2 / MQ2	263	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z
S2D2 / MQ3	149	17	17	24	-21	15	-4	82,5
S2D2 / MQ4	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z
S2D2 / MQ5	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z
S2D2 / MQ7	8	1	0	2	4	-1	2	1
S2D2 / MQ135	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z
S5F1 / MQ2	430,5	115	61	32	84	-41	-57	319
S5F1 / MQ3	38	20	8	4	-6	-1	-5,5	49
S5F1 / MQ4	47,5	13	-45	0Z	-10	0Z	-5	26,5
S5F1 / MQ5	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z
S5F1 / MQ7	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z
S5F1 / MQ135	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z	0Z

S8F1: mediana ADC absoluta; linha de base indisponível

	MQ2	MQ3	MQ4	MQ5	MQ7	MQ135
S8F1 / E1-Ace	807	1347	1585	1913	1120	1235

Azul: redução | branco: estabilidade | vermelho: aumento | †: saturação | Z: piso zero

Figura 1. Variação mediana de todos os canais de S2D2 e S5F1 na exposição, em ordem experimental; valores absolutos do S8F1 na única exposição coberta. Ace = acetona; AEt = acetato de etila; † = leitura saturada; Z = medianas iguais a zero na linha de base e exposição.

A visualização integral também evidencia canais que seriam ocultados por uma seleção baseada apenas na maior resposta. Nas janelas analisadas, MQ4, MQ5 e MQ135 de S2D2 permaneceram com mediana zero; em S5F1, isso ocorreu em MQ5, MQ7 e MQ135. Esses zeros são valores digitais existentes, não dados ausentes, mas a persistência no piso sugere canal sem resposta útil ou possível problema de conexão/faixa. O S8F1 registrou somente a parte inicial de E1 e encerrou o arquivo às 15h32min21s; faltou linha de base completa e não houve cobertura das exposições posteriores. Por isso, seus seis canais aparecem apenas como valores absolutos da exposição e não foram usados para calcular ΔADC ou inferir gradiente espacial.

Na capela (Figura 2), os perfis diferiram entre protótipos. Para acetona, S1F1/MQ3 aumentou 1.789 ADC, enquanto S4D2/MQ3 diminuiu 411 ADC. Para acetato de etila, S1F1/MQ2 e MQ7 chegaram a 4095 ADC, com Δ de +3.509,5 e +3.169 ADC, respectivamente. Em S7F2, MQ3 permaneceu saturado e o MQ4 partiu de linha de base saturada na exposição à acetona; assim, reduções posteriores não representam resposta quantitativa comparável. S4D2/MQ5 permaneceu no piso. As marcações de qualidade são parte do resultado e impedem que limites do conversor sejam confundidos com ausência de vapor ou com eficiência da capela.

Capela: variação mediana de todos os canais

ΔADC = mediana da exposição – mediana da linha de base

	Acetona	Acetato de etila
S4D2 / MQ2	-185,5	-21
S4D2 / MQ3	-411	-95
S4D2 / MQ4	-184,5	-21
S4D2 / MQ5	0Z	0Z
S4D2 / MQ7	-397,5	-44
S4D2 / MQ135	-392,5	-45
S7F2 / MQ2	957†	-261
S7F2 / MQ3	0†	0†
S7F2 / MQ4	-3677†	-98†
S7F2 / MQ5	14	-1
S7F2 / MQ7	715	-73
S7F2 / MQ135	412	-90†
S1F1 / MQ2	512†	3509,5†
S1F1 / MQ3	1789†	1568,5
S1F1 / MQ4	79	77
S1F1 / MQ5	49	53
S1F1 / MQ7	0†	3169†
S1F1 / MQ135	144	47

Azul: redução | branco: estabilidade | vermelho: aumento | †: saturação | Z: piso zero

Figura 2. Variação mediana dos seis canais de cada protótipo na exposição do ensaio E5, no interior da capela. † = ao menos uma leitura saturada; Z = medianas iguais a zero na linha de base e exposição. As diferenças não representam concentração.

Não foram encontradas células numéricas vazias nas abas ADC dos seis protótipos selecionados; a indisponibilidade decorreu da ausência de registros em determinadas janelas, especialmente no S8F1. Valores iguais a 4095 foram mantidos e marcados, porque a saturação impede observar aumentos adicionais. Do mesmo modo, zeros não foram substituídos por NA. Essa distinção separa dado no piso, janela sem cobertura e falha instrumental provável. As etiquetas automáticas da planilha não cobrem todas as janelas do caderno de campo e registram, em outros intervalos, nomes de solventes e volumes divergentes; a associação temporal aqui apresentada, portanto, precisa ser conferida com o registro primário antes da submissão.



A interpretação permanece exploratória. A ordem fixa acetona→acetato de etila e a sobreposição parcial entre a recuperação da acetona e a linha de base do segundo solvente permitem efeito residual, memória e deriva. Além disso, não houve réplica independente, velocidade do ar ou vazão da capela, massa evaporada, nem calibração contra método de referência; bancada e capela utilizaram protótipos diferentes. Estudos controlados com sensores MOS combinam randomização, misturas conhecidas e validação analítica para obter seletividade e quantificação (BAUR et al., 2021), enquanto revisões de dispositivos de baixo custo ressaltam calibração e validação como etapas críticas (CHOJER et al., 2020).

Assim, as associações observadas podem refletir simultaneamente solvente, circulação do ar, posição, diferenças entre unidades e estado prévio dos sensores. Os resultados não medem concentração em ppm ou mg m^{-3} , não caracterizam conformidade com a NR-15 e não avaliam a eficiência do equipamento de proteção coletiva. Seu valor está em documentar o comportamento do sistema e orientar um protocolo posterior com posições mensuradas, contrabalanceamento dos solventes, réplicas, tempos de recuperação mais longos, monitoramento de vazão e comparação com técnica de referência.

Quadro de qualidade dos dados

Protótipo	Cobertura	Piso/zero	Saturação (4095)
S2D2	E1–E4 completos	MQ4, MQ5 e MQ135 no piso nas janelas	Não observada
S5F1	E1–E4 completos	MQ5, MQ7 e MQ135 no piso nas janelas	Não observada
S8F1	Somente início de E1; término 15h32min21s	Sem linha de base completa; valores repetidos	Não observada
S4D2	E5 completo	MQ5 no piso	Não observada
S7F2	E5 completo	Zeros pontuais	MQ3; MQ4 na linha de base; pontos em MQ2/MQ135
S1F1	E5 completo	Zeros em MQ4/MQ5/MQ135	MQ2 e MQ7; ponto em MQ3

Quadro 1. Cobertura e principais indicadores de qualidade dos protótipos incluídos. Piso/zero persistente e saturação foram mantidos nos gráficos; nenhuma dessas situações foi convertida em dado ausente.

Conclusões

A avaliação exploratória mostrou que os seis canais apresentaram perfis distintos entre protótipos, solventes e configurações ambientais. A apresentação integral revelou tanto variações de sinal quanto limitações que seriam mascaradas pela escolha apenas dos canais de maior alteração: pisos persistentes em zero, saturações em 4095 e cobertura incompleta do S8F1. Esses achados reforçam que posição, direção do fluxo e qualidade instrumental precisam ser documentadas conjuntamente.

Como houve uma única sequência, ordem fixa dos solventes, possibilidade de recuperação incompleta, protótipos diferentes entre bancada e capela e ausência de calibração e medição de vazão, não é possível atribuir causalidade à ventilação, quantificar concentrações, julgar conformidade ocupacional ou estimar a eficiência da capela. Os sensores foram úteis para registrar variações relativas. Estudos futuros devem randomizar ou contrabalancear condições e solventes, repetir cada combinação, medir todas as distâncias e fluxos, assegurar estabilização e recuperação, e validar os sinais com método analítico de referência.

Agradecimentos

Ao IFRJ, à UFRJ, ao CNPq e à FAPERJ pelo apoio institucional, científico e financeiro que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.



Referências

BAUR, T.; AMANN, J.; SCHULTEALBERT, C.; SCHÜTZE, A. Field study of metal oxide semiconductor gas sensors in temperature cycled operation for selective VOC monitoring in indoor air. *Atmosphere*, v. 12, n. 5, art. 647, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12050647>.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 1 (NR-1): disposições gerais e gerenciamento de riscos ocupacionais. Brasília, DF: MTE, 2026a. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-1>. Acesso em: 16 set. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 9 (NR-9): avaliação e controle das exposições ocupacionais a agentes físicos, químicos e biológicos. Brasília, DF: MTE, 2026b. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-9-nr-9>. Acesso em: 16 set. 2026.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora nº 15 (NR-15): atividades e operações insalubres. Brasília, DF: MTE, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/norma-regulamentadora-no-15-nr-15>. Acesso em: 16 set. 2026.

CHOJER, H. et al. Development of low-cost indoor air quality monitoring devices: recent advancements. *Science of the Total Environment*, v. 727, art. 138385, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138385>.

DUTTA, T.; NOUSHIN, T.; TABASSUM, S.; MISHRA, S. K. Road map of semiconductor metal-oxide-based sensors: a review. *Sensors*, v. 23, n. 15, art. 6849, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23156849>.

LI, Y. et al. Electronic nose for the detection and discrimination of volatile organic compounds: application, challenges, and perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 180, art. 117958, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117958>.

LIU, W.; LIU, D.; GAO, N. CFD study on gaseous pollutant transmission characteristics under different ventilation strategies in a typical chemical laboratory. *Building and Environment*, v. 126, p. 238–251, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.09.033>.

RATH, R. J.; FARAJIKHAH, S.; OVEISSI, F.; DEHGHANI, F.; NAFICY, S. Chemiresistive sensor arrays for gas/volatile organic compounds monitoring: a review. *Advanced Engineering Materials*, v. 25, n. 3, art. 2200830, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202200830>.

YUN, S.; LICINA, D. Optimal sensor placement for personal inhalation exposure detection in static and dynamic office environments. *Building and Environment*, v. 241, art. 110459, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110459>.