

Protótipo para o estudo de variáveis termodinâmicas em fases líquidas saturadas, vapores e gases

Prototype for the study of thermodynamic variables in saturated liquid phases, vapors and gases

Milton Baptista Filho^{*1}, Tiago Desteffani Admiral¹, Cassiana Barreto Hygino Machado¹,
Fernanda Campos Vidal¹, Messias Freire Cardoso Baptista², Alexandre Carvalho Leite¹

¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

²Cosmetica Labs Inc., Toronto, Canada.

Recebido em 16 de setembro de 2024. Revisado em 17 de fevereiro de 2025. Aceito em 24 de fevereiro de 2025.

Cada vez mais, temos acesso facilitado a novos modelos de sensores e microcontroladores, muitas vezes com valores relativamente acessíveis. Aliando esses recursos com a utilização de smartphones, propiciamos a concepção de experimentos didáticos melhor direcionados a investigação científica. Nesta direção, este trabalho apresenta o protótipo de uma câmara para o estudo da concentração de dióxido de carbono e álcool, contando também com recurso para monitoramento de pressão e temperatura em tempo real. O artigo apresenta com detalhamento o procedimento para a montagem e os recursos aplicados em sua construção. O produto destaca-se pela operação direta (*Plug and Play*), na interface simples e acessível através do aplicativo educacional *Phyphox*. Conforme são exibidos ao longo deste trabalho, a câmara foi testada quanto ao seu aquecimento, a presença de vapor de água em saturação, álcool na forma de isopropanol e etanol e a produção de dióxido de carbono. Destacam-se entre os principais resultados obtidos pelos testes que os dados obtidos pelos sensores apresentaram precisão superior em relação a alguns trabalhos encontrados na literatura, acrescido à isso percebeu-se uma alta seletividade quanto à medição de CO_2 , até então pouco discutida na literatura.

Palavras-Chave: ESP32, Dióxido de carbono, Álcool, bicabornato de potássio, Saturação de vapor.

With increasing frequency, we have easier access to new models of sensors and microcontrollers, often at relatively affordable prices. By combining these resources with the use of smartphones, we enable the design of educational experiments more effectively directed towards scientific investigation. In this context, this paper presents the prototype of a chamber for the study of carbon dioxide and alcohol concentration, which also includes features for real-time pressure and temperature monitoring. The article provides a detailed account of the assembly procedure and the resources employed in its construction. The product stands out due to its direct operation (*Plug and Play*) and its simple, accessible interface through the educational app *Phyphox*. As demonstrated throughout this work, the chamber was tested for heating, the presence of saturated water vapour, alcohol in the form of isopropanol and ethanol, and carbon dioxide production. Among the key results of the tests, it is worth noting that the sensor data demonstrated superior accuracy compared to some studies found in the literature. Additionally, a high selectivity in CO_2 measurement was observed, a topic that has hitherto been little discussed in the literature.

Keywords: ESP32, Carbon Dioxide, Alcohol, Potassium Bicarbonate, Vapor saturation.

1. Introdução

A proposição de experimentos didáticos autorais e não convencionais vem assumindo papel importante nos complementos deste seguimento no que tange as tecnologias digitais para a sala de aula. Este tipo de iniciativa corrobora com a ampliação de oportunidades que podem ser criadas, por exemplo, a partir de smartphones e sua integração com placas de programação de microcontroladores com sensores diversos [1]. A concepção de aparatos experimentais idealizados quando aliados a possibilidades criadas com a produção de partes em impressão 3D podem abrir campo para a criação de

experimentos didáticos sofisticados, buscando analisar cenários variados da natureza em ambiente de sala de aula [2–4].

A presença do dióxido de carbono como elemento fundamental em diversas reações faz deste gás elemento importante para ilustrar didaticamente a dinâmica de reações químicas. A aferição da concentração de CO_2 tem aplicação recorrente na física, por exemplo no estudo de reações que são utilizadas para impulsionar foguetes didáticos [5, 6]. Porém, medir a concentração desse composto é uma tarefa relativamente complexa, pois grande parte dos sensores de baixo custo, como o MQ-135, MG 811, entre outros, apresentam um baixo grau de seletividade. O protótipo cujo desenvolvimento está descrito neste artigo, conta com um sensor não dispersivo modelo (modelo *MH Z18B*, *Winsen Sensors*), que

*Endereço de correspondência: mfilho@iff.edu.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

apresentou resultados de seletividade e precisão muito superiores aos relatados na literatura [7, 8].

Podemos também destacar que o estudo de líquidos voláteis, como o álcool, tem características relevantes e pode trazer ferramentas importantes para assuntos conectados como o estudo da pressão parcial e o estudo de gases em geral. Complementarmente, o protótipo também pode ser utilizado para monitoramento em tempo real de temperatura e pressão, sendo versátil para utilização em experimentos simples de termodinâmica, para visualização da variação das variáveis de estado de um gás.

Nesta linha de desenvolvimento, a concepção e construção do aparato experimental de verificação, como classifica [9] pode ser inserido no contexto do laboratório didático e da sala de aula. Por se tratar de construção seguindo a ideia do “faça você mesmo” (*DIY – Do It Yourself*) e possibilitando a utilização de aparelho pessoal, no caso do smartphone (*BYOD – Bring Your Own Device*), este tipo de proposta tem custo baixo ou mesmo muito reduzido se comparado a kits didáticos comerciais [10–12]. Muitas escolas sejam da rede pública e privada, de maneira geral, não possuem espaço destinado a laboratório para o ensino de ciências e equipamentos. E, em algumas circunstâncias, há o espaço físico mas os recursos experimentais são insuficientes [13].

Do ponto de vista normativo, a partir do estabelecido na Base Nacional Comum Curricular [14] ficou destacado entre as suas competências gerais: Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à abordagem própria das ciências, incluindo a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e inventar soluções com base nos conhecimentos das diferentes áreas [14]. Frase suprimida conforme sugerido e parágrafo agrupado Tendo em vista os argumentos já citados, o desenvolvimento de protótipos e equipamentos de custo baixo ou acessível que possam ser utilizados sem demanda especial em infraestrutura, pode ser ingrediente importante para estimular o docente na implementação deste tipo de proposta como atividade didática.

Neste trabalho é apresentado o estado atual de desenvolvimento de uma câmara para o estudo de gases, em especial, dióxido de carbono e vapor de álcool, bem como a pressão e temperatura ambiente. A estrutura mecânica da câmara é baseada em frasco de vidro reciclado e uma tampa desenhada especificamente para o projeto e construída em plástico PET. Como forma de avaliar o funcionamento da câmara e seu potencial uso como atividade didática, ela foi testada em condições diversas, incluindo a evaporação de dois tipos de álcool e a reação envolvendo bicarbonato de sódio em meio ácido para produção de dióxido de carbono.

2. Materiais e Métodos

A integração *Smartphone* e funcionalidades de microcontrolador foi ampliada nos últimos anos a partir

da possibilidade de comunicação via *Bluetooth*, bem como outros protocolos como *MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)* para transmissão de dados via *web*, que tem tido muito destaque em aplicações da Internet das Coisas (IdC) (No termo original em inglês, *IoT – Internet of Things*) [15] e abrem campo para aplicações no desenvolvimento de experimentos didáticos.

O protótipo foi idealizado para realizar medidas em atmosfera estática e saturada de gases provenientes de fontes diversas que podem ser realizadas no âmbito doméstico, em especial. Neste trabalho apresentaremos resultados obtidos provenientes da volatilização de álcool e da produção de dióxido de carbono da reação de bicarbonato de sódio, vinagre e água. A operação da câmara possibilita atividades experimentais de forma imediata, sendo um equipamento que funciona de forma simples (*plug and play*). Ela foi equipada com uma placa de programação de microcontrolador (Fabricante ESP32, <https://www.espressif.com/>, modelo ESP32 S3 Wroom), que recebeu um código em *C++* para transmissão de dados via Bluetooth BLE (modo *Bluetooth Low Energy*) de baixo consumo de energia. Uma interface gráfica ao usuário foi montada a partir do modo edição do aplicativo *Phyphox*. A escolha deste aplicativo considerou a facilidade na instalação, implementação e utilização, bem como a padronização de exibição de dados acessível a outros interessados em replicar o protótipo. Este ambiente web (acessível em <https://phyphox.org/editor/>) permite a configuração de protocolo de comunicação via *Bluetooth* bem como as operações com os dados recebidos e a forma de exibição. O ambiente foi configurado de forma a exibir as quatro medidas realizadas pelos sensores na forma de *display* e gráfica no tempo.

O porta-amostra é composto de um frasco de vidro, reaproveitado (Fig. 1 B2), de 120 ml de volume interno. O porta-amostra é fechado por uma tampa desenvolvida

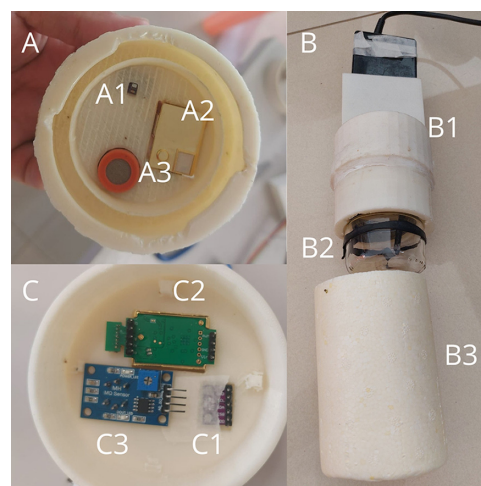


Figura 1: A) Vista da face inferior da tampa que fica em contato com o pote de vidro; B) Vista do conjunto tampa da câmara e frasco de vidro; C) Vista interna da tampa onde ficam os sensores.

para esta finalidade e foi produzida em impressão 3D, em PET. A tampa é o local que aloja os sensores e a placa, e foi desensolvida especificamente para este protótipo tendo sido produzida em plástico PET proveniente de reciclagem a partir de impressão 3D. A opção da produção da parte em plástico PET se deu pelo seu menor custo e por conta deste perfil de impressão 3D ser mais popular em laboratórios Maker em muitas escolas da rede pública. A porosidade do material e sua superfície potencialmente adsorvente é um limitante na sua escolha, que portanto se deu pela razão explicitada acima.

A tampa é montada a partir de duas partes (Fig. 1.B): a parte superior, por onde passam os cabos e onde fica a caixa que protege a placa e a parte inferior que contém o porta-amostra. Os cabos elétricos passam pelo interior da parte superior ligando a placa de programação e os sensores. Eles foram celados com cola de silicone após instalados, buscando a melhor vedação possível para o interior da câmara. O código para configurar a placa pode ser compilado através de conexão por cabo usb (porta serial) através do IDE utilizado para Arduino. Todos os dados para a replicação estão disponíveis através do link: <https://github.com/idmilton/ProjetoCamaraMultiproposito>.

A placa de controle dispõe de portas digitais que foram usadas para digitalizar o sinal dos módulos barômetro (modelo BMP280, Bosch) (Fig. 1 A1 ou C1), sensor para dióxido de carbono (modelo MH Z18B, Winsen Sensors) (Fig. 1 A2 ou C2) e termômetro (modelo DB18b20 em formato de cápsula TO-92, Analog Devices). As portas utilizadas bem como as bibliotecas necessárias para receber a medida de cada módulo ficam definidas no código compilado na placa. O módulo sensor de álcool (modelo MQ-3, Winsen Sensors) produz um sinal em tensão que é digitalizado através de porta analógica da placa. Na rotina do código, os dados obtidos de cada módulo sensor são organizados em uma *String* de até 16 caracteres que é transmitido via *Bluetooth* (Fig. 2).

2.1. Sensor não dispersivo para medida de Dióxido de Carbono

O sensor para dióxido de carbono utilizado no projeto é um módulo baseado na absorção direta de radiação infravermelha de forma não dispersiva (*NDIR – Non Dispersive Infrared*), tendo entre as aplicações sugeridas pelo fabricante o monitoramento da qualidade do ar [16]. O módulo é equipado com uma membrana que regula por permeabilidade o fluxo de gás em seu interior e utiliza medida de temperatura no interior da câmara para compensação de sinal [16]. Em se tratando de produto comercial, não há informação oficial sobre qual a faixa de emissão da fonte utilizada nem a largura desta faixa. Conforme especificado pelo fabricante, o módulo trabalha na detecção de níveis de dióxido de carbono entre 400 e 5000 ppm, com resolução de 1 ppm [17].

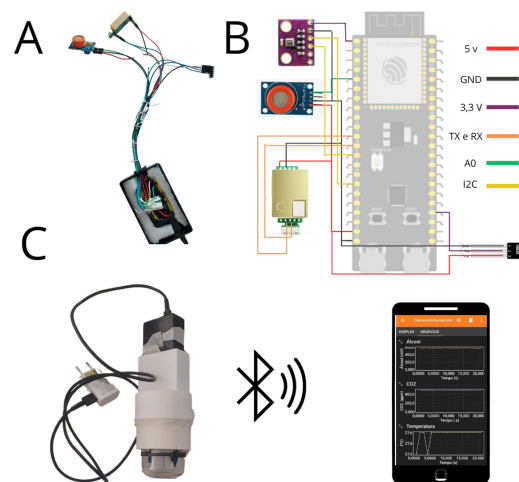


Figura 2: Esquema de montagem e operação da câmara. A) A placa de controle acondicionada em uma caixa plástica com acesso via cabo aos sensores e a fonte; B) Diagrama de ligação dos sensores na placa de controle; C) Esquema exemplificando o funcionamento da câmara e a transmissão de dados para o smartphone.

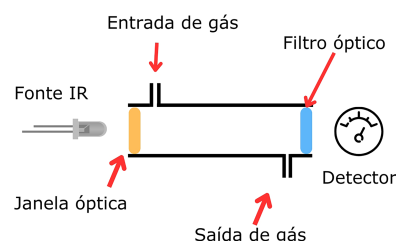


Figura 3: Esquema básico de uma montagem não dispersiva no infravermelho. Adaptado de [17].

A Figura 3 traz o esquema básico para este tipo de montagem. As janelas ópticas são feitas a partir de material de transmitância maior no infravermelho e podem ser dotadas de filme com função de filtro óptico. O uso de filtro é necessário uma vez que a fonte não conta com elemento dispersivo e por conta deste perfil de fonte ter larga abrangência espectral. A água é um interferente típico neste contexto, que pode ter tido o efeito de absorção reduzido pela aplicação de filtro óptico. Este tipo de módulo vem sendo empregado como o monitoramento da qualidade do ar [9, 17].

2.2. Módulo sensor químico-resistivo para medida de álcool

Sensores químico resistivos (também referidos como de interação eletroquímica ou químico resistivos, do inglês, *Chemiresistive*) são estruturas compostas de camada de superfície de óxido metálico depositada. Este tipo de sensor se baseia no aquecimento da superfície e nas mudanças da resistência elétrica observadas mediante oxidação na superfície. Esta classe de sensor tem baixo

custo e vem ganhando espaço nas aplicações que não demandam alta seletividade.

A operação simplificada deste tipo de sensor se alia a versatilidade oriunda da baixa seletividade, permitindo a inserção do mesmo módulo a medidas de moléculas diferentes conforme as possibilidades já destacadas na literatura [18]. A sensibilidade desta classe de sensor pode ser afetada pela composição química bem como a temperatura e umidade de seu ambiente. A umidade ambiente influencia fortemente o desempenho [18] assim como a condensação de vapor na superfície. Este módulo vem sendo apresentado como opção para etilômetros na e no mercado, embora haja uma grande diversidade de aplicações na literatura trazendo para este módulo sensor no estudo de sistemas biológicos na potencial detecção de etileno [19–21].

O módulo utilizado é comercializado pela identificação *MQ-3*. Ele utiliza tensão de 5,0 V e produz sinal analógico desde poucos *miliVolts* acima de zero até cerca de 4500 mV. A placa de controle usada no projeto fornece tensão tanto no nível de 3,3 quanto de 5,0 V. No entanto, suas portas analógicas digitalizam tensão no limite máximo de 3300 mV, o que fez necessária uma queda de tensão no sinal produzido pelo módulo a partir da adição de um resistor de $(100\Omega \pm 5\%)$.

2.3. Módulo Barômetro e Termômetro

O módulo Barômetro (modelo BMP 280, Bosch Sensortec, <https://www.bosch-sensortec.com>) foi empregado tanto para o monitoramento da pressão ambiente quanto na medida das variações de pressão internas à câmara fechada, numa função de manômetro [22].

Este módulo opera com medida de temperatura para compensação dinâmica das medidas de pressão e se baseia em sensor piezoresistivo que atua no intervalo de 30 a 110 kPa, com resolução de $\pm 12 Pa$. É um módulo de uso frequente em medidas que demandam baixo consumo de energia e mobilidade [23]. Este módulo é muito popular, já tendo muitos relatos de uso na literatura [7, 23–25].

Nas medidas de temperatura da câmara foi utilizado um termômetro digital (modelo DB18b20 em formato de cápsula TO-92, Analog Devices, <https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html>) que pode operar entre -55 e $125^\circ C$, com resolução de $0,1^\circ C$ e erro máximo de $0,5^\circ C$.

3. Resultados e Discussão

3.1. Aquecimento da câmara vazia e com água destilada

Em busca de uma caracterização da operação do protótipo, os sinais dos sensores da câmara foram observados em condições variadas. Os dados obtidos pelos sensores foram produzidos a cada 30 segundos. A primeira condição aplicada consistiu na medida dos sensores estando a

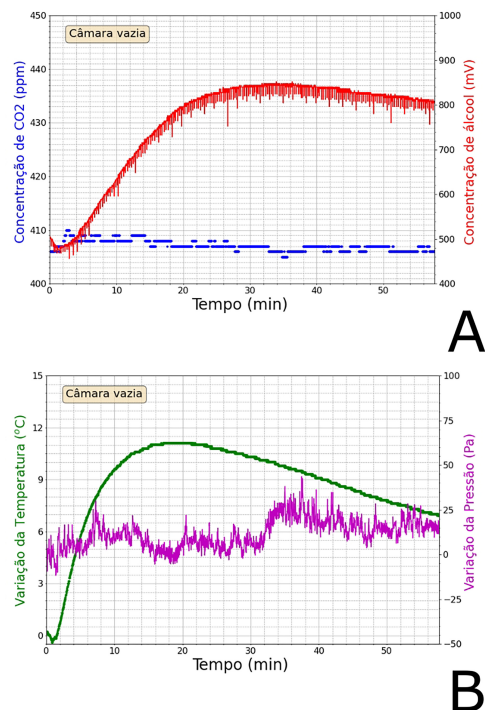


Figura 4: Teste da retenção de calor para o isolamento da câmara.

câmara fechada e vazia (Fig. 4). Antes do início do teste o porta-amostra foi mantido no local da realização da medida em equilíbrio térmico com o ambiente. A seguir uma pequena toalha de microfibras foi umedecida com água a $69^\circ C$ e essa toalha foi colocada na parte interna de um recipiente de isopor usado para isolar termicamente latas de 350ml (Fig. 1 B3). Imediatamente a câmara foi inserida na parte interna do conjunto toalha + isopor.

Este teste buscou observar a capacidade de retenção de calor pelo conjunto da câmara. O calor trocado com a toalha aquecida levou a uma variação da temperatura de $11,0^\circ C$ medido internamente ao porta-amostra, mostrada na Fig. 4. A temperatura máxima atingida permaneceu por 4 minutos e tendo levado 10 minutos para que a temperatura diminuísse $1,1^\circ C$, aproximadamente 10% do valor máximo atingido.

Na segunda condição, onde uma massa de água foi inserida no porta-amostra o sinal observado para o módulo sensor de álcool apresentou diferenças se comparada a câmara tendo apenas ar ambiente tanto aberta quanto fechada. Estes sinais foram obtidos das Fig. 4.A, Fig. 4.B, Fig. 5.A e Fig. 5.B. O valor médio do sinal de base com a câmara aberta ao longo dos primeiros cem pontos foi determinado em $486 \pm 8 mV$ e o sinal de referência (câmara fechada) estabilizou-se e $807 \pm 8 mV$. Na condição da câmara com amostra de 1,0 g de água, o sinal de base registrado (câmara aberta) foi $846 \pm 6 mV$ e o sinal de referência (câmara fechada) $1079 \pm 7 mV$.

A comparação entre as variações de temperatura nas duas condições possibilitaram uma estimativa do valor da capacidade térmica da câmara. A partir da

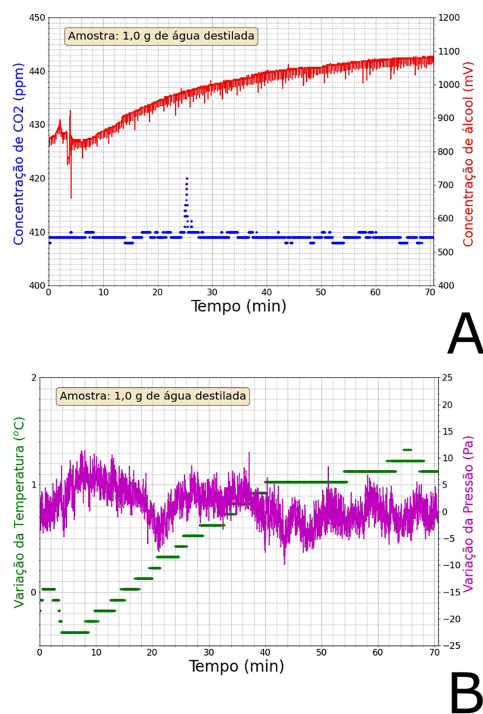


Figura 5: Teste de saturação de vapor de água.

consideração de que a água que umedeceu a tolha que foi utilizada em ambas as condições recebeu o mesmo tempo de aquecimento através do forno microondas, assumimos que em ambas as condições a mesma quantidade de calor foi transferida e que as variações de temperatura nas condições 1 e 2, foi determinada em $\Delta T_1 = 1,2^{\circ}C$ e $\Delta T_2 = 11,0^{\circ}C$, respectivamente. Desta forma, assumindo a capacidade térmica específica da água igual a $1,0 \text{ Cal/ g}^{\circ}C$ [26], definimos:

$$C \cdot \Delta T_1 = C \cdot \Delta T_2 + m \cdot c \cdot \Delta T_2 \quad (1)$$

De forma que a Capacidade Térmica da câmara (C) ficou definida pela expressão:

$$C = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T_2}{\Delta T_1 - \Delta T_2} \quad (2)$$

O erro associação à determinação do valor de C (Eq. 2), foi obtido através propagação de erros, derivando independentemente cada uma das variáveis da função que são valores medidos no experimento[27]:

$$\delta_C = C \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\Delta T_1}}{\Delta T_1 - \Delta T_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\Delta T_2}}{\Delta T_2(\Delta T_1 - \Delta T_2)}\right)^2} \quad (3)$$

A aplicando os valores da massa de água, $1,0 \text{ g}$ ($\delta_m = 0,05 \text{ g}$), $\Delta T_1 = 11^{\circ}C$ ($\delta_{\Delta T_1} = 0,5^{\circ}C$) e $\Delta T_2 = 1,2^{\circ}C$ ($\delta_{\Delta T_2} = 0,5^{\circ}C$), a Capacidade Térmica da câmara foi determinada em $1,14 \pm 0,01 \text{ Cal/ g}^{\circ}C$.

3.2. Saturação de vapor de álcool isopropílico e etílico

A evaporação à temperatura ambiente de dois tipos de álcool, isopropílico e etílico, foi estudado nesta etapa. Em momentos distintos, uma amostra de $1,0 \text{ g}$ de cada tipo de álcool estando em equilíbrio térmico com o ambiente foi coletada e inserida no porta-amostra, que foi fechado e os valores dos sensores registrados. Os dados obtidos são apresentados na Fig. 6. O sinal para os dois tipos de álcool foi monitorado por mais de vinte minutos após ter sido atingida a saturação. Os valores extraídos foram apurados a partir de uma média de cem pontos e são apresentados na Tabela 1. Ambas as amostras apresentaram um aumento súbito de pressão entre os tempos 1 e 4 minutos desde o início das medidas compatível com suas volatilidades.

Na Tabela 1 a primeira coluna representa o sinal inicial, no instante em que a substância foi introduzida no porta amostras, enquanto a segunda coluna representa o valor de sinal para a saturação. Podemos observar na Tabela 1 que o sinal de partida do álcool etílico é ligeiramente maior em relação ao álcool isopropílico,

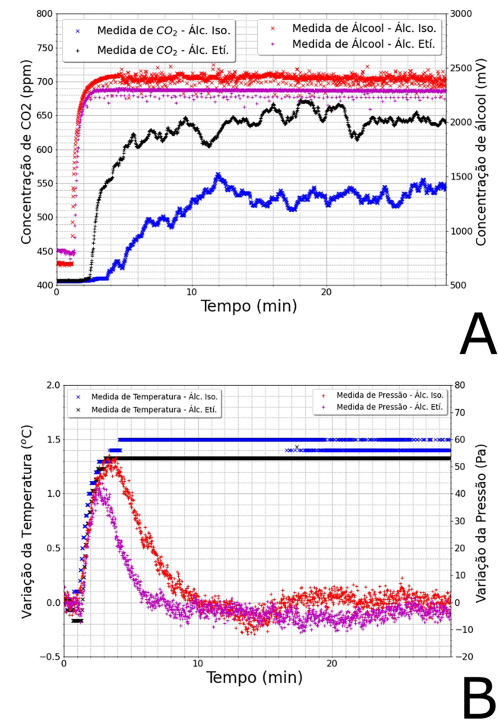


Figura 6: Amostras de Álcool Isopropílico 99% e Etílico 92,6% foram analisadas pela câmara. A) Medidas de Dióxido de Carbono e B) Medidas de Temperatura e Pressão.

Tabela 1: Sinal do medidor de álcool, inicial e saturado das amostras de Álcool Isopropílico e Etílico.

Amostra	Inicial	Saturado
Álcool Isopropílico	$701 \pm 6 \text{ mV}$	$2368 \pm 39 \text{ mV}$
Álcool Etílico	$815 \pm 10 \text{ mV}$	$2291 \pm 26 \text{ mV}$

isso se deve ao fato de que o álcool etílico apresenta maior volatilidade em relação ao isopropílico [28] como já relatado na literatura, indicando um funcionamento coerente com o esperado.

A resposta do sensor para a presença das amostras apresentou valor superior para o álcool isopropílico o que é esperado por conta da substância ter 99% de concentração. Dada a volatilidade de ambas as amostras (Ponto de ebulição do Isopropanol $82,3^{\circ}\text{C}$; Ponto de ebulição do Etanol $78,25^{\circ}\text{C}$), o aumento súbito de pressão entre os tempos 1 e 10 minutos foi seguido de um retorno à pressão inicial por conta da saturação devido ao equilíbrio alçado entre as fases líquidas e de vapor de ambas as substâncias, uma vez que ao término da análise restava uma fração considerável na fase líquida. A temperatura para ambas as amostras se estabilizou ao término da análise, como esperado, após ter sofrido variações de temperatura de $1,5^{\circ}\text{C}$ e $1,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, para o álcool isopropílico e álcool etílico.

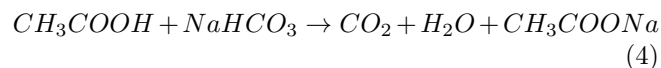
Um sinal referente a uma concentração constante de dióxido de carbono foi exibido para ambas amostras a partir do décimo minuto. Este valor de concentração observado para ambas amostras no sensor de dióxido de carbono provavelmente deve-se à absorção destas moléculas na região de emissão da fonte infravermelha utilizada, que é desconhecida uma vez fabricante do módulo não informa quais os comprimentos de onda são cobertos. Já tendo sido estabelecido o fato de que o módulo não sofre influência de saturação de vapor de água na câmara, os resultados permitem concluir ou que a região de cobertura do espectro da fonte situa-se em um vazio para a água, ou a janela de filtro utilizada para redução de comprimento de onda de alta absorção pela água não restringe comprimento de onda de alta absorção para o grupo do álcool.

É importante considerar que absorção de álcool se deu na condição extrema de máxima concentração em comparação com os níveis de dióxido de carbono típicos de operação do sensor entre 400 e 5000 ppm, o que permite especular a hipótese de uma relação do coeficiente de absorção dióxido de carbono na região de mais de 1500 vezes maior que para o álcool isopropílico e etílico e que este tipo de módulo é comercializado para análise da qualidade do ar onde o álcool tipicamente não é uma molécula esperada em alta concentração.

3.3. Estudo das variáveis de estado de gases em fase estacionária

Nesta etapa, como aplicação, foi proposta a reação de bicarbonato em solução aquosa ácida a partir de vinagre. Esta reação é bastante utilizada em atividades didáticas variadas assim como já foi analisada em trabalhos publicados neste periódico nos trabalhos de Fonseca *et al.* [5] e de Lapolli *et al.* [6], no estudo da dinâmica desta reação como combustível em foguetes. Na análise que se segue, a partir da equação 4 foi aplicada uma

massa de ácido proporcionalmente maior àquela definida na proporção estequiométrica. O vinagre (ou fermentado acético) é um produto derivado da fermentação acética de algum álcool. Por norma nacional, o vinagre apresenta no mínimo 4% de ácido acético, devendo apresentar valores no produto comercial entre 4% e 6% e até $1\% \frac{\%v}{v}$ a 20°C de álcool residual [29], o que precisa ser considerado na determinação de massa de ácido em cada grama de vinagre.



A partir das proporções em massa estabelecidas pela equação 4, a massa de cada reagente foi definida. A reação foi ajustada para que fosse produzida uma quantidade de dióxido de carbono na escala de cobertura do sensor. Desta forma, foi feita uma diluição do sal em água destilada na proporção de 1,0 g de bicarbonato de sódio para cada 300 mL de água. O estudo se deu em amostras: (1) 1,0 g de vinagre integral, (2) 2,0 g da solução aquosa de bicarbonato de sódio e (3), a mistura de 1,0 g de vinagre a 2,0 g da solução aquosa de bicarbonato de sódio. A massa de bicarbonato de sódio adotada é menor que aquela necessária para fazer reagir todo ácido acético conforme o balanço da equação 4) [5]. Na proporção estequiométrica estabelecida, a massa de dióxido de carbono teórica produzida foi de 187 mg de dióxido de carbono. Esta massa em termos de concentração no volume interno da câmara poderia produzir mais de 150000 ppm de dióxido de carbono.

Os resultados das três amostras foram agrupados em duas Figuras: Fig. 7, contendo os dados de temperatura e pressão e Fig. 8, contendo os dados de concentração de dióxido de carbono e álcool. Todas as amostras foram inseridas estando em equilíbrio térmico com o ambiente previamente.

É relevante destacar que o sensor para álcool opera com aquecimento e por mais sutil que possa aquecer,

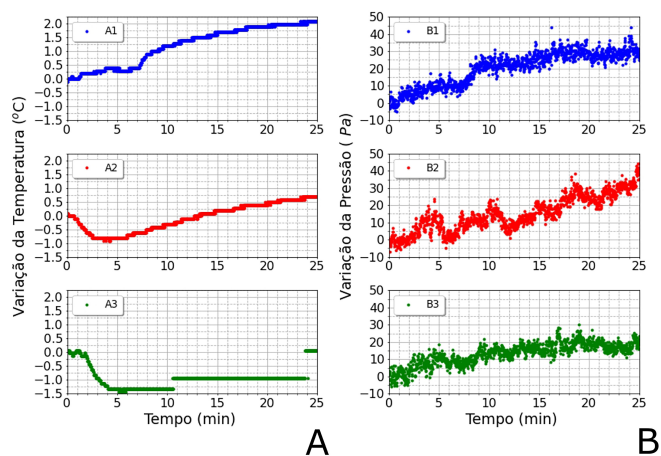


Figura 7: Os gráficos A1, A2 e A3 exibem as variações de temperatura assim como os gráficos B1, B2 e B3 exibem as variações de pressão para as três condições analisadas.

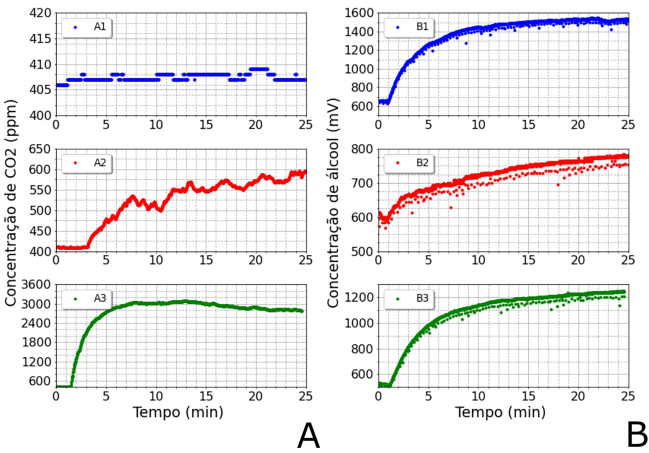


Figura 8: Os gráficos A1, A2 e A3 exibem a concentração de CO_2 assim como os gráficos B1, B2 e B3 exibem a concentração de álcool para as três condições analisadas.

estando a câmara fechada durante as medidas e tendo seu isolamento térmico funcional, promoverá o aquecimento da atmosfera interna de forma constante. A solução aquosa de bicarbonato de sódio foi produzida logo antes de ser inserida no porta-amostra. De fato, tanto na medida do vinagre puro, quanto na aplicação da solução aquosa de bicarbonato com e sem vinagre nas proporções aplicadas não se esperaria uma produção de calor significativa.

Sobre a pressão da câmara, para as três amostras observou-se uma saturação na variação da pressão de 30 Pa as duas primeiras amostras, tendo a amostra (3) saturado com uma variação de 20 Pa. A partir do princípio de *Le Chatelier*, um aumento de pressão em reação saturada pode engejar balanço de equilíbrio, o que estabilizou a produção de dióxido de carbono na amostra (3).

Para a concentração de dióxido de carbono as três amostras mostraram correlação esperada, ou seja, influência nula do vinagre, apesar da possibilidade de 1 % de álcool e uma produção menor para a amostra (2), já que a acidez da água destilada tipicamente está no nível de neutralidade (conforme especificado pelo fornecedor). Os valores médios obtidos no último minuto de medida foi sumarizado na Tabela 2. A respeito dos valores de concentração de álcool observou-se valores superiores nas amostras (1) e (3), o que está relacionado à presença

Tabela 2: Valores médios e o erro da medida de dióxido de carbono, álcool, temperatura e pressão para as três amostras.

Medida	(1)	(2)	(3)
$CO_2 \pm \delta$ (ppm)	408 ± 0.4	591 ± 7	2806 ± 11
$\Delta t \pm \delta$ (mV)	1537 ± 14	791 ± 8	1240 ± 17
Temp. $\pm \delta$ ($^{\circ}C$)	2.2 ± 0.1	0.9 ± 0.1	0.06 ± 0.1
Pressão $\pm \delta$ (Pa)	543 ± 5	39 ± 4	20 ± 2

do álcool do vinagre utilizado nestas amostras e o do sinal de fundo que a água produz na medida deste sensor.

Por normativa da Embrapa [29], o vinagre é um produto de origem natural, fruto da fermentação acética de composto alcóólico, admitindo um percentual de até 1 % de álcool, de forma que o álcool presente nas amostras (1) e (3) foi proveniente do conteúdo do vinagre.

4. Considerações Finais

Pelos resultados obtidos nos testes foi possível confirmar diversas características do protótipo, como por exemplo, a repetibilidade das medidas e sua eficiência em isolamento térmico durante os ensaios experimentais. Além da determinação de respostas adequadas dos sinais dos diversos sensores, conforme esperado no âmbito da teoria. Como resultado do estudo de dois casos: líquidos voláteis e uma reação química para a produção de dióxido de carbono, percebeu-se a influência significativa da presença de vapor de água sobre o sinal do sensor de álcool, o que foi levado em consideração durante a análise dos resultados, adicionalmente nenhum efeito foi sido observado sobre a medida da concentração de dióxido de carbono.

Como características adicionais, percebeu-se que o protótipo, uma vez montado e em funcionamento, apresenta facilidade para ser utilizado em uma sala de aula comum, sem necessidade de adaptações ou espaço físico específico para sua utilização. Os dados, enviados de forma *wireless* para o celular, podem ser utilizados facilmente durante um experimento envolvendo conhecimentos de áreas diversas, como química e biologia, demonstrando a evolução de concentração de CO_2 em tempo real.

Cabe ressaltar que o protótipo também apresenta potencial para ser utilizada com facilidade para experimentos envolvendo transformações gasosas, uma vez que é eficiente em monitorar variáveis de estado (pressão e temperatura) do gás contido na câmara. Utilizando apenas o ar dentro da câmara é possível, por exemplo, verificar as variáveis de estado para um aquecimento isovolumétrico com facilidade.

O sensor para dióxido de carbono apresentou sensibilidade à concentrações de álcool, o que foi um achado não relatado nas especificações fornecidas pelo fabricante do módulo [16]. Esta sensibilidade pode estar relacionada à absorção óptica de ambas amostras de álcool na região de emissão da fonte do sensor. Considerando a alta concentração de álcool na condição que aferiu a sensibilidade, estima-se um coeficiente de absorção de ambos os tipos de álcool baixo, para afetar significamente as medidas de CO_2 produzidas em fermentação alcóolica, por exemplo, reação bioquímica que também produz álcool etílico.

As medidas de temperatura apresentaram consistência com o padrão de pressão apresentado em cada condição. Com destaque para o monitoramento da etapa de estabilização da pressão parcial dos líquidos voláteis

estudados. Por fim, a reação de bicarbonato de sódio em solução aquosa ácida apresentou os padrões de produção de gás esperados, mesmo após diversos testes, confirmando a viabilidade do protótipo para essa finalidade. O equipamento se insere como possibilidade de estudos diversos para o estudo da dinâmica de gases, sistemas químicos e biológicos, como a fermentação alcoólica e a fotossíntese.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Programa de Bolsas de Iniciação Tecnológica do Instituto Federal Fluminense e do Programa Mais Ciência da Secretaria de Educação, Ciência e Tecnologia da Prefeitura Municipal de Campos dos Goytacazes.

Referências

- [1] D. Dorsel, S. Staacks, M. Loch e A. Puschs, *MNU Journal* **76**, 36 (2023).
- [2] S. Staacks, S. Huetz, H. Heinke e C. Stampfer, *Physics Education* **53**, 045009 (2018).
- [3] S. Staacks, D. Dorsel, S. Hütz, F. Stallmach, T. Splith, H. Heinke e C. Stampfer, *European Journal of Physics* **43**, 055702 (2022).
- [4] S. Becker, P. Klein, A. Gößling e J. Kuhn, *Learning and Instruction* **69**, 101350 (2020).
- [5] M.V.S. Fonseca, I.M.L. Rodrigues e M.B.S. Fonseca, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e3504 (2018).
- [6] E.L. Lapolli e S.E. Coelho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20190352 (2020).
- [7] T. Araújo, L. Silva e A. Moreira, *IoT* **2**, 286 (2020).
- [8] J.P. Sá, M.C.M. Alvim-Ferraz, F.G. Martins e S.I.V. Sousa, *Environmental Technology & Innovation* **28**, 102551 (2022).
- [9] M.S.T. Araújo e M.L.V.S. Abib, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 176 (2003).
- [10] B. Bruininks e L.B.F. Juurlink, *Journal of Chemical Education* **99**, 2168 (2022).
- [11] E.R. Halversone e E.K. Sheridan, *Harvard Educational Review* **84**, 495 (2014).
- [12] A. Kaps e F. Stallmach, *Physics Education* **57**, 045038 (2022).
- [13] T.Y.I. Andrade e M.B. Costa, *Quím. Nova Esc.* **38**, 208 (2016).
- [14] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, *Base Nacional Comum Curricular*, disponível em: <http://download.basenacionalcomum.mec.gov.br/>, acessado em 17/02/2025.
- [15] W. Zhuang, H. Cao, Z. Zhang, J. Zhang, X. Zhao e Y. Zhang, *Physics Education* **58**, 055013 (2023).
- [16] *Manual do usuário do módulo sensor MH Z18B, Winsen Sensors*, disponível em: <https://www.winsen-sensor.com/d/files/manual/mh-z19b.pdf>, acessado em 17/02/2025.
- [17] D. Trieu-Vuong, C. In-Young, S. Youn-Suk e K. JoChun, *Sensors and Actuators B: Chemical* **231**, 529 (2016).
- [18] M. Krivec, G. McGunnigle, A. Abram, D. Maier, R. Waldner, J.M. Gostner, F. Überall e R. Leitner, *Sensors* **15**, 28088 (2015).
- [19] Y.R. Carrillo-Amado, M.A. Califa-Urquiza e J.A.R. Ramón-Valencia, *Respuestas* **25**, 70 (2020).
- [20] J.A. Cavalcante, G.I. Gadotti, A.H.M. Silva, A.S. Araújo, R.C.M. Monteiro e D.M. Moraes, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola E Ambiental* **26**, 374 (2022).
- [21] M. Adamek, J. Mlcek, N. Skowronkova, M. Zvonkova, M. Jasso, A. Adamkova, J. Skacel, I. Buresova, R. Sebestikova, M. Cernekova e M. Buckova, *Sensors* **23**, 6817, 2023.
- [22] M. Baptista Filho e L.C. Pinto Filho, *A Física na Escola* **22**, 230103 (2024).
- [23] A.K. Hollanda, D. Oktavia, S. Nugaraha, T. Suhendra e S. Refly, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* **1148**, 012008 (2020).
- [24] T.L. Narayana, C. Venkateshb, A. Kiran, J.C. Babu, A. Kumar, A.B. Khan, A. Almusharraf e M.T. Quasim, *Heliyon* **10**, e28195 (2024).
- [25] A. Saxena, N. Pandey, S. Bisariya e A. Raghav, em: *International Conference on Sustainable Emerging Innovations in Engineering and Technology (ICSEIET)*, Ghaziabad (2023).
- [26] M. Alonso e E.J. Finn, *Física: Curso Completo* (Edgard Blücher, São Paulo, 1992), 2 ed.
- [27] S. Slama, *Experimental Physics Compact for Scientists* (Springer-Verlag GmbH, Berlin, 2023), 1 ed.
- [28] M.B. Xavier, M.M.R. Ferreira e J.A.S. Quaresma, *Emerging Infectious Diseases* **12**, 526 (2006).
- [29] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, *Documentos – 36: Elaboração de vinagre*, disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/538944/1/Doc36.pdf>, acessado em 17/02/2025.