

BOLHÔMETRO DIGITAL: NOVO INSTRUMENTO PARA ESTUDO DE PELÍCULAS DE TENSOATIVOS E MEDIDA DE VAZÃO GASOSA

Igor R. Neves¹; André J. R. Simões²; Leonardo R. T. C. Gomes²; Juliana G. de C. Gomes²; Vitor S. Queiroz¹; Anna C. Cordeiro¹; Soraia T. Brandão¹; Iuri M. Pepe²

¹ Universidade Federal da Bahia – UFBA, Instituto de Química, Grupo de Catálise e Polímeros, Rua Barão de Geremoabo s/n, Ondina, Salvador – BA. CEP 40170290.

² Universidade Federal da Bahia – UFBA, Instituto de Física, Laboratório de Propriedades Ópticas, Rua Barão de Geremoabo s/n, Ondina, Salvador – BA. CEP 40170290.

Palavras-Chave: Aparelho, Fluxo, Laboratorial.

Introdução

Bolhômetros são instrumentos destinados à medida de vazão gasosa. Estes equipamentos são constituídos por um recipiente com volume conhecido, geralmente uma vidraria volumétrica, acoplado a um bulbo contendo sabão, dotado de uma entrada lateral de gás (Figura 1).

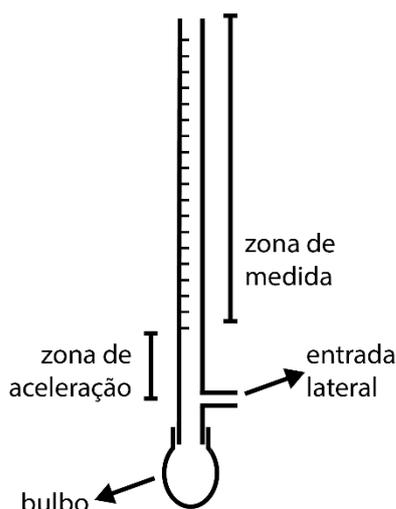


Figura 1. Esquema de bolhômetro analógico.

A medida de vazão feita com esse aparelho baseia-se na aferição do tempo de deslocamento de uma bolha de sabão pelo volume da zona de medida pré-definida, de modo a encontrar a vazão f como determina a Equação 1, em que V_{ass} é o volume da zona de medida e t_{med} o tempo medido.

$$f = V_{ass}/t_{med} \quad (1)$$

No caso dos bolhômetros mais comuns, aqui chamados analógicos, usa-se uma coluna de vidro de volume conhecido com graduação, linhas, e um cronômetro para aferir o tempo. A medida começa, ou finda, pela observação a olho nu da película que compõem o corpo da bolha (menisco), ao tangenciar a linha da vidraria. Nesse trabalho chama-se essa película de bolha.

O uso desse instrumento de medida é bastante antigo em aplicações de baixa vazão e sua precisão, potencialmente, garante erros menores que 2 % dessa vazão (Lashkari; Kruczek,

2008), já tendo sido usados para calibrar flowmeters digitais (Waaben; Stokke; Brinkløv, 1978) e sendo um método bem conhecido desde 1934 (Barr, 1934).

Lashkari e Kruczek (2008) propuseram monitorar o deslocamento com o auxílio de pares LED-fotodiodo como indicadores de passagem, uma vez que a maior fonte de incerteza na medida de vazão por bolhômetros seja decorrente dos erros aleatórios inerentes ao disparo ou parada do cronômetro (Levy, 1964). O aparelho proposto por Lashkari e Kruczek, por outro lado, que visa a medida de microvazões, não tem caráter de instrumento único, sendo bem mais uma adaptação realizada com um flowmeter comercial e um conjunto de sensores.

Já Fursenko e Odintsov (2022) trabalharam utilizando a bolha como o meio condutor que fecha um circuito de detecção e determina o início ou o final da contagem do tempo. Estes autores estudaram faixas de vazão similares às faixas investigadas no trabalho ora apresentado. O instrumento desenvolvido por estes autores, entretanto, parece requerer ainda o interfaceamento por computador pessoal (PC) para determinação da vazão por aquisição de dados, o que o torna um aparato dependente.

Ademais, ainda que não tema da pesquisa, o uso do bolhometro enquanto instrumento é ainda relevante em diferentes campos. A exemplo para medida de fluxo através de sistemas de teste de membranas seletivas (Wang et al., 2024) e para calibração de vazão através de um sistema para conferência de risco à saúde do ar (Khalili; Farahani, 2024). Esses empregos exigem então determinada precisão e suscitam a necessidade de automatizar e tornar portátil o aparelho.

O uso de circuitos e microcontroladores, nesse contexto, permite não somente melhorar as condições de medida de vazão de bolhômetros, mas também readaptá-los para análise de películas lamelares de tensoativos.

Material e Métodos

Neste trabalho, o bolhometro desenvolvido usa LEDs, fotodiodos e microcontrolador de forma análoga ao trabalho de Lashkari e Kruczek (2008), mas com elementos de minimização de instrumentação usando apenas dois partes de LED-fotodiodo e não necessitando outras conexões, além da alimentação pela rede elétrica. Ele é aplicável a medidas de vazão na faixa de 15 a 150 mL/min. Essa portabilidade e independência capacita este instrumento a ser utilizado como aparelho móvel, em medidas de vazão em diferentes posições de um mesmo laboratório, aplicações em campo ou, aliado a um computador de aquisição, ser usado na bancada para estudo de sinais de intensidade luminosa redirecionada por uma estrutura lamelar.

A estrutura física do instrumento foi pensada em termos de manufatura aditiva auxiliada por computador, que oferece determinadas vantagens principalmente em tempo de prototipação e manufatura na produção de instrumentos analíticos (Capel et al., 2018). Assim, além de uma vidraria laboratorial comum, uma seringa de 10 mL, a estrutura física do instrumento consiste em uma impressão 3D de 3 partes em ABS: corpo, tampa e visor montados em um suporte universal com auxílio de mufa e anel. Na parte anterior do corpo fica presa a placa de circuito que controla o aparelho e na tampa fica inserido o conector para a fonte de alimentação. Tampa

e corpo são mantidos juntos por parafusos. Uma foto do instrumento está disponível na Figura 2.

Na estrutura do corpo, LEDs emissores e fotodiodos foram dispostos em frente um ao outro de modo que a intensidade luminosa pudesse ser devidamente adquirida pelo microcontrolador. Essa intensidade é adquirida de modo que ao ligar o aparelho ou apertar o botão *reset*, o valor de intensidade dos LED em frente a cada um dos emissores é registrado como I_0 . Assim, a cada 20 ms aquisita-se a intensidade luminosa relativa I/I_0 , como sendo a razão da intensidade naquele momento e a intensidade luminosa inicial. Este processo de aquisição é realizado por um *firmware* executado por um *Raspberry Pi Pico* e escrito em *micropython*, instrumento considerado adequado para medidas analíticas (Sariyer; Edwards; Needs, 2023).

O sistema monitora esse valor para indicar a passagem da bolha em frente ao fotodiodo, que possibilita o uso do aparelho como medido de vazão. Ademais, o valor pode ser monitorado em arquivos log acoplando o sistema a um computador por transmissão serial de modo a estudar o comportamento da intensidade luminosa que chega ao sensor.

Dessa forma é possível analisar o perfil de comportamento de diversos tensoativos frente a diferentes luzes por meio da troca do LED. Nesse trabalho, utilizou-se LEDs vermelhos e detergente neutro em proporção 3:1 para estudar o comportamento da intensidade frente a diferentes faixas de vazão.



Figura 2. Bolhômetro digital montado.

Ademais, um bolhômetro analógico pré-calibrado foi utilizado para confrontar e calibrar os valores do bolhômetro digital. Dado uma bolha arbitrária e um tempo $t_{cron.}$ que a bolha leva para percorrer 10 mL, têm-se que a vazão $f_{cron.}$:

$$f_{cron.} = 10 / t_{cron.} \quad (2)$$

Resultados e Discussão

Foram aquiridos os dados de intensidade relativa I/I_0 e, com isso, foi possível estabelecer um sinal característico de passagem de bolha de sabão em movimento de deriva no interior de vidraria sob fluxo de nitrogênio. O sinal aquirido pelos sensores apresenta três regiões facilmente distinguíveis: (i) uma crista inicial, (ii) um vale e (iii) uma crista final (Figuras 3 e 4).

Esse tipo de comportamento foi observado por Lashkari e Kruczek (2008) e parece estar associado a regiões de reflexão que precedem e sucedem uma região de absorção ou dispersão de luz.

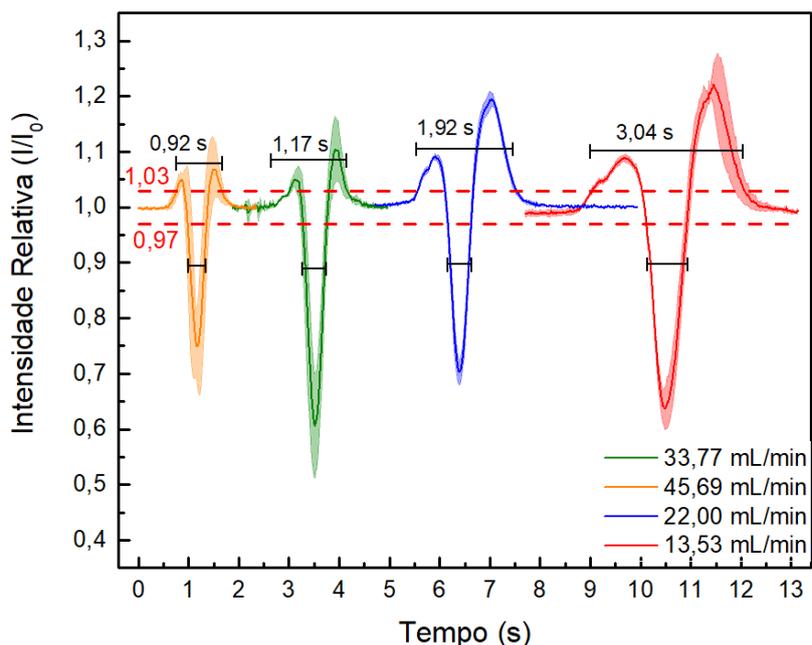


Figura 3. Teste de assinatura de bolha em diferentes vazões de N_2 5.0 no sensor inferior (10 a 50 mL/min). A área sombreada indica o desvio padrão associado aos pontos da curva.

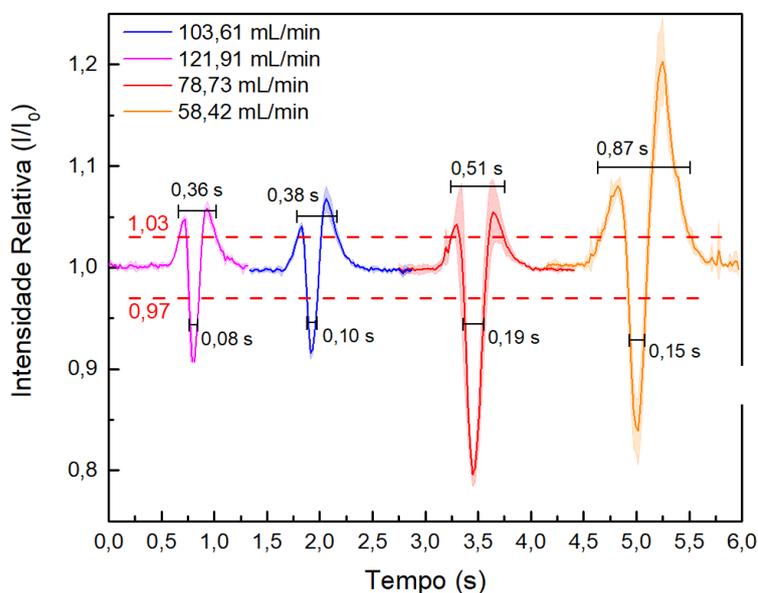


Figura 4. Teste de assinatura de bolha em diferentes vazões de N₂ 5.0 no sensor inferior (50 a 120 mL/min). A área sombreada indica o desvio padrão associado aos pontos da curva.

Isto é, a geometria da bolha à medida que se aproxima do sensor funciona como um elemento de convergência de feixes luminosos e, em seguida, como elemento divergente, conforme a bolha trafega na frente do detector, voltando a se comportar como elemento convergente, no final da bolha. A superfície do filme que forma a bolha, ao entrar no feixe, primeiro desvia parte da luz na direção do detector provocando um aumento no sinal. Apenas após alguns milímetros de avanço, os raios que passam pelo corpo da bolha são absorvidos, ou desviados o suficiente para não mais alcançar o sensor. Isso cria a zona de mínimo na coleção dos fótons.

Os tempos de permanência associados podem ser utilizados em conjunto com medidas de altura associada ao volume à grossura da lamela de tensoativo (Lashkari; Kruczek, 2008) podendo ser assim utilizado para entender a formação e estabilização destas em sistemas com tensão superficial suficiente para permitir a formação dessas películas.

Os tempos $t_{\text{crista-a-crista}}$ estão relacionados ao tempo que a bolha leva para percorrer a região de iluminada por cada um dos LEDs, sendo $t_{\text{crista-a-crista}}$ definido como tempo que o sinal leva para passar 4 vezes por $1,03 I/I_0$. Da Equação 1 espera-se que esses intervalos sejam inversamente proporcionais à vazão. A relação linear entre os dados pode ser evidenciada pela correlação entre f e $1/t_{\text{crista-a-crista}}$ (Figura 5).

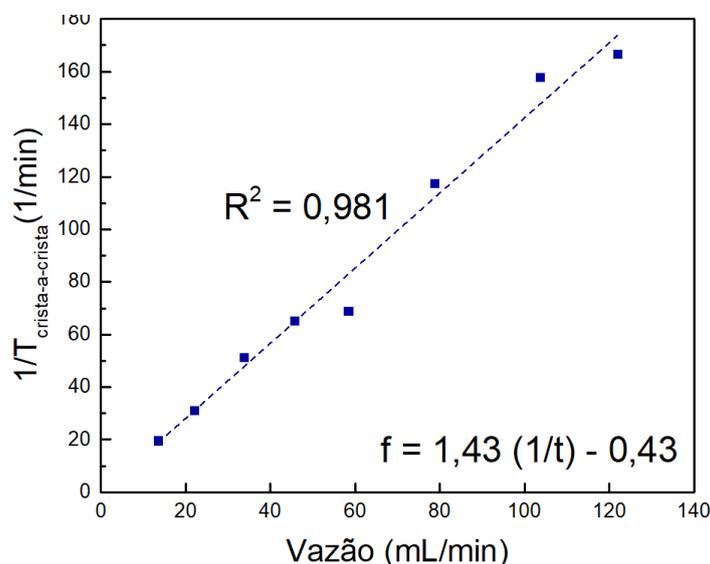


Figura 5. Gráfico de correlação entre vazão e tempo de (a) crista-a-crista.

Ainda da Equação 1, é possível encontrar um volume associado $V_{\text{ass}} = 1,43 \text{ mL}$ (1430 mm^3), a partir dos dados de correlação entre $1/t_{\text{crista-a-crista}}$ e vazão. Ademais, conhecendo o diâmetro interno da vidraria ($9,59 \pm 0,01 \text{ mm}$) é também possível determinar a altura da região visada pelo sensor, uma vez que $V_{\text{ass}} = h \cdot \pi \cdot r^2$, em que r é o raio da vidraria, $4,80 \text{ mm}$, e h é a altura da região em que os valores do sensor são afetados pela bolha. Nesse caso a região visada é de cerca de $19,7 \text{ mm}$, considerada simétrica em relação ao centro do fotodiodo.

Essa altura h permite inferir que os sensores são independentes entre si se seus centros distam de mais de 20 mm, impossibilitando *crosstalk* entre eles. Isso permite utilizar o instrumento como medidor de vazão e também, no interesse de estudar películas de tensoativos, considerar a medida de cada um dos sensores como réplicas verdadeiras.

Ademais, esse comportamento permitiu utilizar do valor de intensidade relativa para determinar a passagem de bolhas frente ao sensor. Desse modo, o tempo digital t_{dig} monitorado pelo controlador, foi tomado entre a passagem da bolha pela região do primeiro e segundo sensor. Assim, a vazão é dada por:

$$f_{\text{dig}} = V_{\text{ass}}/t_{\text{dig}} \quad (3)$$

Desse modo, as equações 2 e 3 implicam que:

$$t_{\text{cron}} = (10/V_{\text{ass}}) t_{\text{dig}} \quad (4)$$

De modo que para uma mesma vazão, se realizados medidas em ambos os instrumentos, digital e analógico, deve se observar uma relação linear que permite calcular o valor associado ao volume do bolhometro digital. Utilizando assim de 6 medidas realizadas por um bolhometro analógico e 6 medidas realizadas por um bolhometro digital seguidamente sob mesma vazão controlada por uma válvula agulha *upstream* pode se construir o gráfico da Figura 6.

Do ajuste numérico dos resultados experimentais o valor do volume associado fiduciário do bolhometro deveria ser de $5,99 \pm 0,11$ mL, valor utilizado como volume de calibração do instrumento e transposto para o *firmware* do equipamento foi o de 5,99 mL.

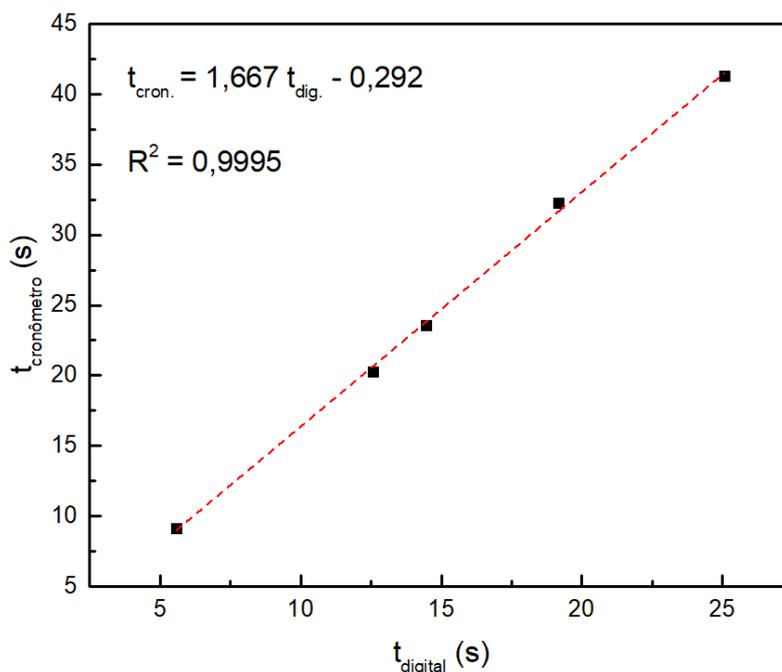


Figura 6. Gráfico de curva de calibração de equipamento.

A estabilidade do equipamento foi testada com o volume calibrado já embarcado no mesmo e utilizando-se de testes em que, sob mesma vazão gasosa, esta foi medida no bolhometro analógico e digital. Os testes foram realizados para diferentes gases a fim de

garantir a generalidade do equipamento. Na Figura 7 pode se observar os valores medidos e o erro relativo entre eles.

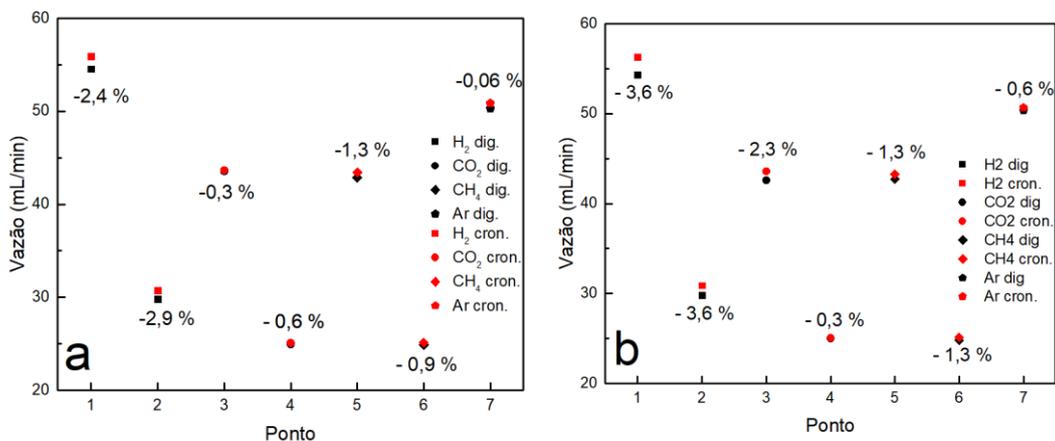


Figura 7. Testes de vazão em bolhômetro digital (preto) e analógico (vermelho) para a média de 5 medidas (a) ou duas medidas arbitrárias (b) com erro relativo entre medidas expresso.

Da Figura 7 pode se observar que as medidas figurando nessa plotagem estão associadas à erro relativo negativo, indicando uma tendência. Este erro sistemático pode estar associado, tanto ao operador do bolhômetro analógico, quanto ao aparelho, dificultando a diferenciação. Apesar da dificuldade em diferenciar a fonte de erro, um erro sistemático médio foi estimado e tem valor de - 1,2 % da vazão tomada.

Essa medida indica que a atmosfera em que está imersa esse tipo de película não impacta o sinal a ponto de que a medida de vazão desejada seja também impactada, de modo que o sistema pode facilitar o estudo de não somente diferentes tensoativos, mas em diferentes vazões e atmosferas.

Além disso, nota-se que a dimensão dos erros entre as medidas para os gases habita uma mesma ordem de grandeza e em todos os casos, para as médias, são inferiores a 3%, valor de confiança proposto pela calibração. Entretanto, no caso de uma medida feita ao acaso, o maior valor para esse erro foi de 3,6 % sugerindo que, por maior prudência, para uma medida única o erro associado pode ser considerado de 5%.

Conclusões

O trabalho presente desenvolveu como objetivado um instrumento e se o calibrou de modo a provar que sua precisão é adequada para seu uso como instrumento laboratorial utilizando de eletrônica robusta e impressão 3D. Foi ainda possível criar um sistema que mantém a intensidade do LED estável pela regulação de corrente, notado pela variação média inferior a 2% que se observou na ausência de bolhas em visada do par LED-fotodiodo nos testes de longa duração. Desse modo, detectou-se a interferência de uma película de água sobre o caminho ótico de um feixe de LED.

O aparelho após e durante a calibração não apresentou dificuldades em medir vazões compatíveis entre as películas ideais, uma bolha bem formada e de superfície lustrosa atravessando o tubo. Ademais, também apresentou pouca tendência a apresentar valores anômalos devido à película deformada ou bolhas duplas, artefatos de difícil medição em bolhômetros analógicos devido à não formação de películas que sirvam como indicadores visuais para início e final da medida no cronômetro.

Foi também possível usar este aparelho para estudar o perfil de sinais de película atravessando um feixe de luz que sugere outros estudos a investigá-lo frente a mudanças do tensoativo e atmosfera.

O aparelho aqui presente é também flexível em geometria e pode ser adaptado de modo a estreitar o tempo de residência da bolha sobre o sensor garantindo mais precisão ou aumentar o tempo de residência permitindo medida de maiores vazões ou menores vazões com mesmo sistema eletrônico.

Agradecimentos

Ao CAPES, Petrobrás, CNPq e FAPESB pelo fomento à pesquisa oferecido sem o qual não seria possível realizá-la.

Referências

- BARR, G. Two designs of flow-meter, and a method of calibration. **Journal of scientific instruments**, vol. 11, no. 10, p. 321–324, 1934.
- CAPEL, A. J.; RIMINGTON, R. P.; LEWIS, M. P.; CHRISTIE, S. D. R. 3D printing for chemical, pharmaceutical and biological applications. **Nature Reviews Chemistry**, vol. 2, no. 12, p. 422–436, 2018.
- FURSENKO, R. V.; ODINTSOV, E. S. A novel concept of automatic soap flowmeter with bubble detection by closing an electrical circuit. **Flow measurement and instrumentation: FMI**, vol. 85, no. 102165, p. 102165, 2022.
- KHALILI, M.; FARAHANI, M. K. Health risk assessment of chemical compounds in an industrial painting workshop, Tehran, Iran. **Aerosol science and engineering**, 2024.
- LASHKARI, S.; KRUCZEK, B. Development of a fully automated soap flowmeter for micro flow measurements. **Flow measurement and instrumentation: FMI**, vol. 19, no. 6, p. 397–403, 2008.
- LEVY, A. The accuracy of the bubble meter method for gas flow measurements. **Journal of scientific instruments**, vol. 41, no. 7, p. 449–453, 1964.
- SARIYER, R. M.; EDWARDS, A. D.; NEEDS, S. H. Open hardware for microfluidics: Exploiting Raspberry Pi singleboard computer and camera systems for customisable laboratory instrumentation. **Biosensors**, vol. 13, no. 10, p. 948, 2023.
- WAABEN, J.; STOKKE, D. B.; BRINKLØV, M. M. Accuracy of gas flowmeters determined by the bubble meter method. **British journal of anaesthesia**, vol. 50, no. 12, p. 1251–1256, 1978.
- WANG, L.; WANG, K.; ZHAO, G.; WANG, Y.; LI, Z.; TONG, F.; LEI, L.; XU, Z. Ultrasensitive carbon hollow fiber membrane for H₂ extraction from blended natural gas. **Chemical engineering science**, no. 120717, p. 120717, 2024.