



ISSN: 2595-1661

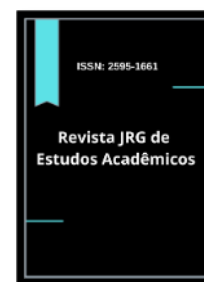
ARTIGO

Listas de conteúdos disponíveis em [Portal de Periódicos CAPES](#)

Revista JRG de Estudos Acadêmicos

Página da revista:

<https://revistajrg.com/index.php/jrg>



Do laboratório à indústria: medição rápida e de baixo custo de emulsões em tempo real

From de laboratory to industry: fast and low-cost real-time measurements of emulsions

DOI: 10.55892/jrg.v8i19.2792

ARK: 57118/JRG.v8i19.2792

Recebido: 07/12/2025 | Aceito: 14/12/2025 | Publicado on-line: 15/12/2025

Rômulo Ferreira dos Santos¹

<https://orcid.org/0009-0001-3588-7583>

<http://lattes.cnpq.br/2400318225577123>

Universidade de Brasília (UnB), DF, Brasil

E-mail: romulo.santos@ieee.org

Paulo Cesar Rodrigues Borges²

<https://orcid.org/0000-0002-7398-7905>

<http://lattes.cnpq.br/4275937790613243>

Centro Universitário IESB, DF, Brasil

E-mail: pcrborges.eng@gmail.com



Resumo

Este trabalho apresenta uma breve descrição do desenvolvimento de um dispositivo optofluídico de baixo custo para caracterização e monitoramento em tempo real de emulsões água-em-óleo. O sistema combina microcanais e sensores ópticos, o que permite medições rápidas, precisas e não invasivas dessas misturas numa escala reduzida de tamanho e de estabilidade, que se observa em microgotas, o que supera as limitações de métodos convencionais baseados em análises *off-line* de microscopia. Simulações computacionais e validações experimentais confirmaram a viabilidade do protótipo, o que demonstra uma correlação satisfatória entre os dados ópticos e os obtidos por microscopia. A proposta oferece potencial aplicação em áreas como controle de qualidade industrial, diagnósticos biomédicos e engenharia de materiais.

Palavras-chave: Microfluídica. Optofluídica. Emulsões. Caracterização Óptica. Medições em Tempo Real.

¹ Doutor em Gestão de Projetos de Tecnologia da Informação pela Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI) e aluno regular do Doutorado Acadêmico em Engenharia Elétrica na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB), DF, Brasil.

² Doutor em Ciência da Informação pela Universidade de Brasília (UnB), professor do mestrado profissional do Centro Universitário IESB, Brasília, DF, Brasil e professor dos cursos de tecnologia do Uniprocessus, Águas Claras, DF, Brasil.

Abstract

This work presents a brief description of the development of a low-cost optofluidic device for the characterization and real-time monitoring of water-in-oil emulsions. The system combines microchannels and optical sensors, allowing for rapid, precise, and non-invasive measurements of these mixtures at a reduced size and stability scale, observed in microdroplets, overcoming the limitations of conventional methods based on off-line microscopy analyses. Computational simulations and experimental validations confirmed the viability of the prototype, demonstrating a satisfactory correlation between optical data and those obtained by microscopy. The proposal offers potential applications in areas such as industrial quality control, biomedical diagnostics, and materials engineering.

Keywords: Microfluidics. Optofluidics. Emulsions. Optical Characterization. Real-Time Measurements.

1. Introdução

O uso de emulsões em processos industriais e científicos tem crescido em relevância nas últimas décadas devido às suas aplicações em áreas como a indústria de alimentos, cosméticos, fármacos e biotecnologia [2], [5], [6].

As emulsões, definidas como misturas de dois ou mais líquidos imiscíveis, frequentemente originam demandas técnicas de controle e manipulação para garantir estabilidade e funcionalidade de seus componentes [7].

A Microfluídica, com sua capacidade de manipular volumes reduzidos de fluidos em canais de dimensões micrométricas, apresenta vantagens em comparação aos métodos convencionais [8]. Entre as vantagens são dignas de nota: 1) A capacidade de controlar o tamanho das gotas e partículas geradas, aspecto fundamental para diversidade de aplicações, como a síntese de nanopartículas e 2) O encapsulamento de fármacos [9].

Por sua vez, a Optofluídica, ao combinar a Microfluídica com dispositivos ópticos, consolida-se como técnica de análise em tempo real de gotas e partículas [10].

A integração de sistemas ópticos em dispositivos microfluídicos possibilita a caracterização das gotas durante a sua formação, estruturação, estabilidade ou degradação [11]. Entre as vantagens da técnica, inclui-se a medição de parâmetros críticos, tais como: tamanho, forma e concentração das partículas [12].

1.1 Caracterização do problema

Para melhor caracterizar a problemática da pesquisa, além do que foi mencionado anteriormente, vale ressaltar que a medição de microgotas em tempo real é um desafio técnico com implicações críticas em biomedicina, química analítica e engenharia de materiais [13]. O controle de gotas em microescala é essencial para o avanço de técnicas de manipulação de fluidos e processos de filtragem [14].

Todavia, os métodos tradicionais não oferecem a precisão necessária para capturar a dinâmica dessas microgotas em movimento, além de limitações quanto à resolução temporal [15].

Uma das dificuldades reside na escala típica das microgotas (em micrômetros, quer dizer, uma unidade de medida da ordem de milionésimo do metro), o que exige técnicas sensíveis e sistemas de alta resolução [16]. A dinâmica das microgotas também depende de viscosidade, tensão superficial e interações com superfícies [17], [83]. É um ambiente experimental que envolve microscopia de alta velocidade, capaz

de capturar imagens em intervalos curtos, ao mesmo tempo que permite observar o movimento das gotas [18], ao mesmo tempo em que sensores ópticos avançados detectam variações sutis na trajetória e comportamento do fenômeno que se desenvolve [19].

No contexto da problemática de pesquisa descrita por Santos [1], no intuito de contornar as dificuldades e desafios apresentados, técnicas como fluorescência e espectroscopia foram utilizadas por propiciar a obtenção de informações sobre a composição química das misturas [20], aliadas à implementação de algoritmos de aprendizado de máquina para ajudar o pesquisador na análise automatizada em tempo real da dinâmica do fenômeno.

Ainda há desafios quanto à padronização e replicabilidade dos resultados [21]. Some-se a isso a variabilidade experimental e a sensibilidade dos sistemas, que dificultam a estabilidade dos resultados [22]. Na indústria, por exemplo, são realizadas análises após o processamento, o que exige planejamento, preparação, filtragem e grandes volumes de amostras [23]. Isso aumenta custos e risco de perdas [24].

O quadro é desafiador, mas a criatividade diante das necessidades derivadas desses óbices sempre prospera, como no caso do emprego de tecnologias acessíveis, como LASER de baixo custo e microprocessadores (Arduíno® na figura 1), pode reduzir custos e disseminar soluções para um mercado consumidor que cresce a cada dia [25]. Essas plataformas de hardware e software de código aberto permitem criar projetos eletrônicos interativos de maneira acessível e fácil.

Mas ainda existem barreiras relacionadas ao custo de equipamentos especializados, o que inclui sua manutenção e suporte técnico [26]. Devido a essa dificuldade, muitas empresas recorrem a procedimentos convencionais que levam horas de processamento [27].

Análises rápidas e em tempo real otimizam processos industriais e atendem a crescentes demandas na área de saúde [28].

A caracterização de microgotas em tempo real, mesmo diante de alguns dos desafios e problemas mencionados, prenuncia-se como uma alternativa promissora diante de métodos invasivos, de custo elevado e de baixa resolução [29].

1.2 Contexto e justificativa

Este artigo foi baseado na dissertação de mestrado de Santos [1], que tratou de emulsões do gênero água-em-óleo e óleo-em-água. Tais emulsões são pilares de cadeias de valor intensivas em qualidade para diversos ramos de atividades econômicas e industriais, por exemplo: em alimentos, em cosméticos, em fármacos e em materiais avançados [51], [52], [53].

Controlar a distribuição de tamanhos de gota, as diversas formas de dispersão (*polidispersidade*) e a estabilidade ao longo do ciclo produtivo influencia a textura, aparência, eficácia, segurança e vida de prateleira dos produtos obtidos. No entanto, a prática corrente ainda recorre à microscopia tradicional, *off-line* (desalinhada do processo de produção ou de desenvolvimento contínuo), cara e lenta, uma vez que se baseia na captura de fotos estáticas de processos dinâmicos reais, o que implica perda de dados importantes em etapas de transição desses processos [36], [38].

Foram vários os pontos levantados nesta pesquisa que enfatizam a necessidade de oferecer alternativas de medição de emulsões instantâneas (em tempo real), precisas por meio de sistemas mais precisos e de baixo custo — sistemas de integração óptica e fluída ou optofluídicos — com fundamentos na miniaturização e na automação [30], [35], [36], [37], [38]. Na indústria farmacêutica, por exemplo, esses sistemas são usados na dosagem de medicamentos e análise de reações [31].

Na biotecnologia, na manipulação de células e moléculas [32]. Na indústria química, para análise de misturas e reações [33]. No setor alimentício, para análise de componentes e garantia de qualidade [34].

1.3 Processos tradicionais

Os processos tradicionais aumentam a distância entre as fases de operação e produção da fase de pesquisa e desenvolvimento, fator crítico para a tomada de decisão nos níveis estratégicos e táticos das organizações ou empresas cujos negócios são baseados em testes de emulsões, traduzindo-se por decisões tardias e perdas evitáveis na produção [1], [3].

1.4 Processos optofluídicos

Os processos optofluídicos mitigam ou eliminam esse hiato ao levar a capacidade de medição para dentro do processo, unindo microcanais (microfluídica) e detecção óptica simples (LASER e fotodiodo) [2], [4].

A proposta aqui descrita visa a projetar, fabricar e validar um dispositivo de baixo custo e com possibilidade de ser reproduzido em larga escala, por meio de leitura em tempo real e sem destruir a amostra [1], [4].

De outra forma, o tempo decorrido entre o despacho de amostras da linha de produção ao laboratório para verificar a sua qualidade acarreta um descompasso crítico com a linha de produção, que poderia continuar seu fluxo. Além do atraso, pode ocorrer também a perda da amostra, se for rejeitada [1], [4].

1.5 Motivação: o problema que causa perda de tempo e recursos

A medição tradicional é *off-line*, cara e lenta. Ela não captura a dinâmica real do processo (temperatura que subiu, vazão que oscilou, lote de emulsificante com variação). Diante disso, decisões da direção ou da gerência de operação/produção (O/P) chegam atrasadas: ajusta-se tarde, reprocessa-se, desperdiça-se [1].

Para o gerente de O/P é fundamental conciliar o binômio qualidade e custo. A solução que faltava é o que ora se propõe: um 'painel' simples, em linha com o processo de produção, que fornece dados precisos sobre o ritmo tolerável de gotículas em fluxo pelos microcanais em emulsões [1], [6].

1.6 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa consiste em desenvolver, de forma econômica, um sistema integrado capaz de realizar medições de microgotas em tempo real, combinando técnicas ópticas e microfluídicas [1].

O alcance deste objetivo propiciou as seguintes entregas e achados [1]:

- Projetar e fabricar um dispositivo optofluídico de baixo custo para medição em tempo real de emulsões.
- Modelar microcanais, simular o arranjo óptico e otimizar geometria do sistema.
- Montar e testar o sistema (LASER, fotodiodo, eletrônica e microcontrolador).
- Validar com emulsões água-em-óleo e conferir qualitativamente com a microscopia.
- Discutir limitações, calibração, escalabilidade e integração a processos industriais.

2. Desenvolvimento

Esta seção do artigo foi subdividida em subitens que caracterizam definições operacionais de termos específicos do campo da Microfluídica, Óptica e Emulsões [78], [79], [80], pelo ângulo rigoroso da observação e do experimento, que neste caso redundou em ações mais diretas para obter dados, por intermédio da manipulação de variáveis e do emprego de instrumental de laboratório — de físico-química e de computação [81].

2.1 Fundamentos em Microfluídica, Óptica e Emulsões

A ideia central desta pesquisa, de forma objetiva, é de levar a medição para dentro da linha de produção [13], [18].

De forma geral, a sequência do método começa no microcanal, que faz “o óleo quebrar” a água em gotículas. Um feixe de luz passa por esse canal. Toda vez que uma gota passa, um sensor capta a passagem e gera um sinal. Um microcontrolador transforma esse sinal em dados numéricos que representam: o ritmo de formação, a estabilidade e as tendências, sem que ocorra a perda (destruição) da amostra sob aferição, sem interromper a linha de produção e a custos baixos [97], [101].

A seguir, as características gerais do método integrativo proposto:

- Medição em tempo real (segundos ou minutos).
- Não-invasivo (óptico); instalável em *by-pass*, isto é, quando o fluido não segue o caminho principal de maneira regular.
- Custo de operação baixo.
- Replicável, isto é, pode ser reaplicado em diversas linhas de produção [102], [103].

2.1.1 Microfluídica

É um campo interdisciplinar que integra conceitos de engenharia, física, química e biologia e envolve o estudo e a manipulação de fluidos em canais com dimensões na ordem de micrômetros [31], [32], [39], [41].

Os sistemas desenvolvidos e implementados para esses experimentos são chamados de Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) [40], produzidos com padrões de rigor e precisão microscópicas para integrar funções mecânicas e eletrônicas em estruturas miniaturizadas de semicondutores (chips). Esses sistemas desempenham múltiplas funções, como em medição de aceleração, pressão, temperatura e movimento. É possível enumerar algumas características destes MEMS para a Microfluídica:

- Escala reduzida: na utilização econômica (sem desperdícios) para reagentes [42].
- Alta razão superfície-volume (S/V): referente às forças superficiais dominantes para materiais minúsculos (micro ou nanométricos) [43], em que a maior razão S/V aumenta o poder reagente do material à proporção que ele aumenta de tamanho, o que propicia a troca eficiente nas interações de calor e massa [44].
- Fluxo laminar: indicador Reynolds baixo: em Microfluídica, significa que o fluxo de um fluido é na sua maior parte **laminar**, ordenado e suave, de tal forma que as forças viscosas superam as forças inerciais, o que provoca uma difusão rápida [45], [46].
- Controle de parâmetros de fluxo, pressão e temperatura [47].

Nesses experimentos, vale enfatizar que regimes de escoamento (gotejamento, transição, jato) surgem do balanço entre a tensão viscosa e a interfacial. A razão de vazões e a viscosidade relativa são essenciais para estabilizar o regime de gotejamento e reduzir a dispersão (“polidispersidade”) [34], [35].

É também digno de registro para esses experimentos e medições que fatores externos como temperatura e surfactante (substância que reduz a tensão superficial

entre a água e o óleo) alteram os limiares entre regimes, o que exige procedimentos de partida e checagens rápidas [36], [37], [38]. [87], [88].

Os sistemas microfluídicos baseiam-se, essencialmente, no princípio da Dinâmica dos Fluídos [48], [49], [50], [51], [52], [53], podendo-se citar diversas aplicações derivadas desta teoria, entre elas:

- Indústria farmacêutica: liberação controlada e desenvolvimento de medicamentos [54], [55].
- Biologia celular e toxicologia: organoides e órgãos-em-chip [56], [57]
- Diagnósticos *point-of-care* [58]
- Indústria química: controle de reações e produção de nanopartículas [59]
- Indústria de alimentos [60]
- Ciências ambientais [61]
- Energia: células a combustível [62]
- Materiais utilizados: PDMS (polidimetilsiloxano), vidro, silício [63], [64]
- Controle geométrico, que garante reprodutibilidade [65]

E cada vez mais surgem novas áreas de aplicação, posto que áreas outrora pouco afetadas pela microeletrônica, computação e suas interações com a microfluídica [66], [67], [68], [69], ultimamente entram na fila de demandas de novos entrantes da indústria e do quarto setor, na busca por novos produtos e serviços. Essa espiral ascendente acaba por também criar necessidades de novos instrumentos e dispositivos ópticos miniaturizados e microfluídicos que entre nessa cadeia produtiva. São aplicações voltadas à detecção de biomarcadores [70], análise celular [71], detecção de poluentes [73], controle instantâneo (em tempo real) de emulsões [74], medição de propriedades ópticas [75], produção de nanopartículas, para falar apenas das que estão em maior proeminência no momento, que trazem vantagens de baixo volume, boa resolução, monitoramento contínuo, miniaturização e adaptabilidade [76], [77].

2.1.2 Óptica aplicada

A interação luz-gota combina refração, reflexão e espalhamento [95], [96]. O objetivo prático é obter um sinal temporal com picos limpos (boa relação sinal-ruído), longe da saturação do detector [103], [104], [105]. Verificações rotineiras de fundo, alinhamento e linearidade fortalecem a confiabilidade sem elevar custos [106], [107], [108].

2.1.3 Emulsões

Neste contexto, são sistemas termodinamicamente instáveis, estabilizados por tensoativos (reduzem a tensão superficial e evitam que gotas se juntem) [82], [84], [85], [86]. Métricas críticas incluem: distribuição de tamanho, coalescência (duas ou mais gotas se juntam para formar uma gota maior), cremosidade e estabilidade ao armazenamento [89], [97], [98].

Em ambientes regulados, medições reprodutíveis e rastreáveis são fundamentais para alcançar a conformidade [99], [100].

3. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza descritiva e exploratória, com abordagem qualitativa, fundamentada na análise e sistematização de procedimentos metodológicos empregados em na dissertação de mestrado de dos Santos [1], de caráter empírico e quantitativo.

Em que pese o trabalho de base tenha utilizado métodos experimentais e técnicas laboratoriais avançadas, por ter levado a termo procedimentos de coleta e análise de dados quantitativos, o presente artigo não se propõe a reproduzir tais experimentos, mas sim a descrever e contextualizar, sob uma perspectiva gerencial e analítica, os métodos e técnicas empregados, ao ressaltar seus fundamentos, aplicações e implicações práticas [1].

Quanto aos procedimentos técnicos, trata-se de uma pesquisa documental e bibliográfica, uma vez que se apoia na análise da dissertação original e em referências teóricas que subsidiam a compreensão dos processos experimentais descritos, sem aprofundar-se nos aspectos operacionais e técnicos dos experimentos [1].

Por conseguinte, o estudo apresenta-se como uma síntese interpretativa de uma pesquisa empírica prévia, com o objetivo de tornar compreensíveis, em linguagem acessível ao campo da gestão de negócios empresariais, os métodos avançados utilizados no contexto laboratorial [1].

3.1 Do CAD (*Computer-Aided Design*) ao Protótipo Replicável

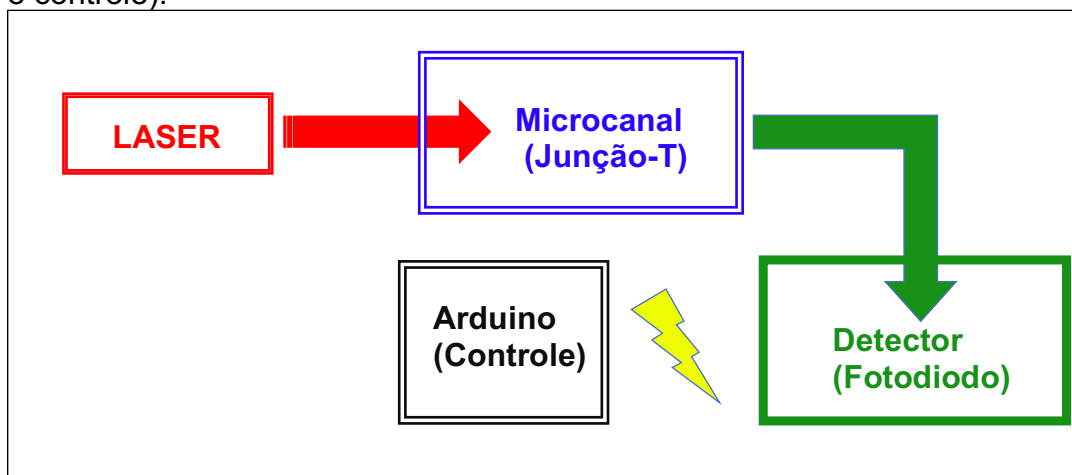
Nesta pesquisa foram empregadas técnicas de modelagem 3D do dispositivo microfluídico e de simulação óptica da zona de detecção do feixe de LASER, que atravessa gotas plenamente formadas [1], [109], [110].

Também foram fabricados moldes por estereolitografia (SLA - *Stereolithography*) e canais em polímeros de silicone (PDMS - polidimetilsiloxano), por meio de litografia suave, técnica acessível e amplamente adotada [109], [110].

Na pesquisa original, Santos [1] levou a termo profunda exploração de técnicas de fabricação de dispositivos microfluídicos por meio de métodos tradicionais, como os fotolitográficos, confrontadas com tecnologias modernas, como os métodos de impressão 3D [1], [72]. Foram estudadas as funcionalidades desses dispositivos, como o encapsulamento dos sistemas microfluídicos, fundamental para garantir a vedação e a integridade estrutural, além da interface com o meio externo, que permite a integração de sensores, dispositivos eletrônicos e outros componentes [72], [73], [74].

No arranjo para a detecção (figura 1), utilizou-se LASER visível, fotodiodo e condicionamento simples de sinal. A aquisição foi efetuada por microcontrolador.

Figura 1. Esquema conceitual do dispositivo optofluidico (junção-T, LASER, detector e controle).



Fonte: elaborada pelos autores

As emulsões preparadas com óleo de girassol, água e com um emulsificante para reduzir a viscosidade, o PGPR (polirricinoleato de poliglicerol). Estas emulsões foram injetadas em diferentes vazões para se examinar os regimes gerados, basicamente expressas pelas seguintes variáveis e indicadores:

- Variáveis de controle: vazão das fases, temperatura e concentração de emulsificante.
- Variáveis de resposta: frequência de eventos (Hz), distribuição de intervalos e amplitude relativa do sinal.
- Qualidade de dados: filtro passa-baixa, verificação de saturação e repetitividade de séries.

3.2 Processamento de sinal, Indicadores e Calibração

O sinal óptico é tratado como uma série temporal de eventos [13], [18]. O processo sequencial de passos (*pipeline*) inclui pré-processamento (filtro e normalização), detecção de picos (limiar com histerese), extração de indicadores e, quando necessário, calibração contra uma amostra curta de referência por microscopia. Essa calibração permite associar a amplitude do pico a um diâmetro relativo, com incerteza controlada [97], [103].

Os indicadores e sinalizadores são enumerados a seguir:

- Indicadores-chave: frequência, coeficiente de variação dos intervalos, índice de estabilidade.
- Alarmes: limites alto/baixo e tendências; registro em historiador para auditoria.
- Relato operacional: *dashboards* com indicadores de desempenho (KPI — *Key Performance Indicators*) para aferir a qualidade e a produção.

4. Resultados e Discussões

Os ensaios demonstraram consistência na detecção de gotas e respostas coerentes às variações de fluxo e formulação (componentes e proporção da mistura). A comparação qualitativa com microscopia indicou uma boa aderência do método para lidar com o caso estudado, sem necessidade de retirada e destruição de amostra —tabela 1. O custo de insumos e a simplicidade do arranjo favorecem a replicação em laboratórios de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e linhas-piloto de produção [1], [90], [91], [92], [93], [94].

4.1 Comparação dos Métodos

Ao longo da pesquisa já foram descritas as várias características do método proposto, confrontado, eventualmente, com o tradicional. Para coligi-las e tornar mais didática a comparação entre os métodos, a tabela 1 foi elaborada [1].

Tabela 1: Comparação entre os Métodos Tradicional e Optofluídico

Microscopia (tradicional)	Optofluídico (proposto)
Amostragem <i>off-line</i> ; destrutiva	Medição em linha; não invasiva
Custo por análise elevado	Custo marginal baixo; medição contínua
Tempo lento de resposta	Tempo de resposta rápido (segundos-minutos)
Baixa representatividade do processo	Acompanha a dinâmica real.
Integração difícil ao chão de fábrica	Integração e automação viáveis (<i>gateway</i> e <i>dashboard</i>)

Fonte: elaborada pelos autores.

4.2 Análise Custo-Benefício

Neste tópico, de forma sucinta, podem ser enumerados os seguintes aspectos, no que concerne ao binômio custo-benefício, ao se interpretar os resultados obtidos na pesquisa original [1]:

- A substituição parcial de análises *off-line* por medição em linha reduz horas de laboratório, descartes por desvio tardio e consumo energético de reprocesso.
- Ganhos intangíveis incluem menor variabilidade de lote, maior satisfação do cliente e conformidade regulatória suportada por evidências.
- O *payback* tende a ocorrer pela redução de custo pela perda de qualidade e pela previsibilidade operacional.

4.3 Aplicações e Minicase

São inúmeras e diversificadas as utilizações, práticas e empregos dos resultados desta pesquisa e de outras derivadas dela, particularmente no âmbito industrial (setor secundário), bem como em serviços de alta tecnologia baseados em gestão do conhecimento, desenvolvimento e inovação tecnológica (setor quaternário), entre eles [1]:

- Alimentos: maioneses e chocolates com textura mais estável e menor devolução por lote fora.
- Cosméticos: loções e cremes menos sujeitos a separação após mudanças de insumo.
- Fármacos: suporte a emulsões múltiplas com perfis de liberação reprodutíveis.
- Materiais: compósitos com propriedades mecânicas e ópticas mais consistentes.
- Indicadores operacionais: rejeições, tempo de ciclo, retrabalho, consumo de energia.
- Indicadores de qualidade: polidispersidade aparente, estabilidade temporal, variação entre lotes.
- Indicadores ambientais, sociais e de governança (ESG): redução de perdas e descarte; menor pegada energética.

4.4 Limitações e Trabalhos Futuros

As limitações enfrentadas nesta pesquisa foram a seguir enumeradas por tópicos, que também encerram em si potenciais temas ou agendas de trabalhos futuros [1]:

- Necessidade de expandir a matriz experimental (viscosidade, temperatura, surfactantes) e fortalecer a calibração para cenários de ruído elevado [87], [88].
- Infundir rigor aos procedimentos da calibração dos componentes de medição do sistema, de modo a também estender esses procedimentos para diferentes famílias de produtos.
- Pesquisar o desenvolvimento de modelos de *Machine Learning* (ML), para diversificar os métodos de classificação automática de regimes de fluxo e de detecção de anomalias.
- Desenvolver módulos *plug-and-play* setoriais e versões portáteis, isto é, módulos especializados para as grandes áreas de aplicação industrial e de serviços já apresentadas e em versões de menor tamanho, que facilitem o seu transporte em trânsito (não só em laboratório).
- Levantar requisitos regulatórios apropriados às grandes áreas de aplicação já apresentadas.

5. Conclusão

O sistema desenvolvido por Santos [1] demonstrou eficiência na detecção óptica e caracterização das microgotas formadas em emulsões água-em-óleo.

Os experimentos realizados confirmaram que o dispositivo é capaz de operar em tempo real, o que permite a análise contínua da formação das gotículas, sua estabilidade e variações no tamanho ao longo do escoamento.

Ao traduzir métricas técnicas em indicadores, cria-se uma linguagem comum entre engenharia, administração e reguladores, o que proporciona, na pesquisa, mais celeridade, tanto na convergência interdisciplinar como na interação multidisciplinar, e a consequente tomada de decisão mais segura e ao mesmo tempo diligente para os profissionais ou usuários finais dos setores terciário e quaternário, que se beneficiarem dos resultados do projeto piloto.

Por intermédio do sensor, todos os atores de pesquisa multidisciplinar ou interdisciplinar podem interagir diante dos mesmos dados: a equipe de engenharia ajusta, a de qualidade valida, a de compras negocia com fatos e a de *compliance* audita com menos fricção, quer dizer, proporcionar uma experiência mais fluida e satisfatória para todos os envolvidos, do operador ao usuário.

A experiência conduzida com sistemas optofluídicos e microcanais evidencia não apenas avanços tecnológicos no domínio experimental, mas também abre um leque de possibilidades na sua continuação em pesquisas futuras.

É razoável antever impactos positivos dessa pesquisa no âmbito industrial, a integração de sensores, *gateways*, bancos de dados e painéis de indicadores de desempenho, dentro de uma arquitetura mínima capaz de assegurar a sistematização de parâmetros, rastreabilidade por meio de trilhas de auditoria e políticas consistentes de retenção e *backup* de dados.

Tal estrutura reforça a interoperabilidade com sistemas de execução da produção (*Manufacturing Execution Systems* – MES), sistemas de gestão empresarial (ERP) e fluxos de qualidade, ao mesmo tempo em que consolida mecanismos de segurança, baseados em perfis de acesso e segregação de funções.

Sob a perspectiva da gestão e da economia organizacional, essa infraestrutura tecnológica contribui para a redução de custos associados à não-

conformidade, para o aumento da previsibilidade operacional e para o suporte a modelos contratuais baseados em indicadores de desempenho (*performance-based contracts*).

No campo de *compliance*, a disponibilidade de registros contínuos favorece auditorias mais breves e menos intrusivas, o que amplia a confiabilidade dos processos avaliativos.

Finalmente, em termos de políticas públicas, a adoção de tais sistemas oferece uma base técnica para a elaboração de guias de boas práticas, programas de qualificação tecnológica — especialmente voltados a pequenas e médias empresas — e iniciativas de fiscalização orientadas por dados.

Em síntese, os resultados apontam que o uso de sistemas optofluídicos e microcanais transcende a esfera laboratorial e se consolida como fator relevante de competitividade industrial e de inovação institucional, ao mesmo tempo em que promove uma articulação mais consistente entre ciência aplicada, gestão produtiva e governança (pública ou privada).

Referências

- [1] SANTOS, Rômulo Ferreira dos. **Integração de sistemas óptico e microfluídico para caracterização e monitoramento em tempo real de emulsões de água em óleo**. 2025. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2025.
- [2] HOSSAIN K.M.Z.; DEEMING, L; EDLER, K.J. Recent progress in Pickering emulsions stabilised by bioderived particles. **RSC Adv**, v. 11, n. 62, 2021. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9044626/> Acesso em: 17/11/2025.
- [3] ZIA, A. et al. Advances and Opportunities of Oil-in-Oil Emulsions. **ACS Appl Mater Interfaces**, v. 12, n. 35, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.0c07993> Acesso em: 17/11/2025.
- [4] RAWAS-QALAJI, M. et al. Microfluidics in drug delivery: review of methods and applications. **Pharm Dev Technol**, v. 28, n. 1, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36592376/> Acesso em: 17/11/2025.
- [5] ROSTAMABADI, H. et al. Electrospraying as a novel process for the synthesis of particles/nanoparticles loaded with poorly water-soluble bioactive molecules. **Adv Colloid Interface Sci**, v. 290, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868621000257?via%3Dihub> Acesso em: 17/11/2025.
- [6] ZUO, Y., et al. Light Manipulation in Inhomogeneous Liquid Flow and Its Application in Biochemical Sensing. **Micromachines (Basel)**, v. 9, n. 4, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30424097/> Acesso em: 16/11/2025.
- [7] MARZE, S.; NGUYEN, H.T.; MARQUIS, M. Manipulating and studying triglyceride droplets in microfluidic devices. **Biochimie**, v. 169, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300908419303815> Acesso em: 17/11/2025.
- [8] JONÁŠ, A. et al. Optically Transportable Optofluidic Microlasers with Liquid Crystal Cavities Tuned by the Electric Field. **ACS Appl Mater Interfaces**, v. 13, n. 43, 2021. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.1c11936> Acesso em: 17/11/2025.
- [9] LI, S. et al. Controllable Formation and Real-Time Characterization of Single Microdroplets Using Optical Tweezers. **Micromachines (Basel)**, v. 13, n. 10, 2022.

- Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/10/1693> Acesso em: 17/11/2025.
- [10] SONG, S.; LE-CLECH, P.; SHEN, Y. Microscale fluid and particle dynamics in filtration processes in water treatment: A review. **Water Res**, v. 233, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135423001811> Acesso em: 17/11/2025.
- [11] ROSATI, R. et al. Effective detection of spatio-temporal carrier dynamics by carrier capture. **Journal of Physics: Condensed Matter**, v. 31, n. 28, 2019. Disponível em: <https://cris.uni-muenster.de/portal/en/publication/73799683> Acesso em: 17/11/2025.
- [12] ZHANG, Tianlong et al. Focusing of sub-micrometer particles in microfluidic devices. **Lab on a chip**, v. 20, n. 1, 2020. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/lc/c9lc00785g> Acesso em: 17/11/2025.
- [13] KUMAR, S. et al. Self- organized spreading of droplets to fluid toroids. **Journal Colloid Interface Sci**, v. 578, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979720307621> Acesso em: 17/11/2025.
- [14] CORNELIS, B. et al. Fast and robust Fourier domain-based classification for on-chip lens-free flow cytometry. **Opt. Express**, v. 26, n. 11, 2018. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-26-11-14329> Acesso em: 17/11/2025.
- [15] KHONINA S. N.; KAZANSKIY, N. L.; BUTT, M. A. Optical Fibre-Based Sensors-An Assessment of Current Innovations. **Biosensors (Basel)**, v. 13, n. 9, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29877473/> Acesso em: 18/11/2025.
- [16] BHAT S.; BLUNCK, R. Characterising ion channel structure and dynamics using fluorescence spectroscopy techniques. **Biochem Soc Trans**, v. 50, n. 5, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36282004/> Acesso em: 18/11/2025.
- [17] MARIANO, V. et al. Brain Stroke Classification via Machine Learning Algorithms Trained with a Linearized Scattering Operator. **Diagnostics (Basel)**, v. 13, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4418/13/1/23> Acesso em: 18/11/2025.
- [18] DASGUPTA, I. et al. Tiny Organs, Big Impact: How Microfluidic Organ-on-Chip Technology Is Revolutionizing Mucosal Tissues and Vasculature. **Bioengineering (Basel)**, v. 11, n. 5, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2306-5354/11/5/476> Acesso em: 18/11/2025.
- [19] IQBAL M. J. et al. Biosensing chips for cancer diagnosis and treatment: a new wave towards clinical innovation. **Cancer Cell Int**, v. 22, n. 354, 2022. Disponível em: <https://cancerci.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12935-022-02777-7> Acesso em: 18/11/2025.
- [20] Müller M, Fisch P, Molnar M, et al. Development and thorough characterization of the processing steps of an ink for 3D printing for bone tissue engineering. **Mater Sci Eng C Mater Biol Appl**, v. 108, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493119319216> Acesso em: 18/11/2025.
- [21] LI, Z. et al. Accelerated Log-Regularized Convolutional Transform Learning and Its Convergence Guarantee. **IEEE Trans Cybern**, v. 52, n. 10, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9407335> Acesso em: 18/11/2025.
- [22] BURATTO, W. G. et al. A Review of Automation and Sensors: Parameter Control of Thermal Treatments for Electrical Power Generation. **Sensors (Basel)**, v. 24, n. 3, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/3/967> Acesso em: 18/11/2025.

- [23] HETTIARACHCHI, K. et al. Microscale Purification with Direct Charged Aerosol Detector Quantitation Using Selective Online One- or Two-Dimensional Liquid Chromatography. **Anal Chem**, v. 94, n. 23, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.analchem.2c00750> Acesso em: 18/11/2025.
- [24] PAIË, P. et al. Microfluidic Based Optical Microscopes on Chip. **Cytometry A**, v. 93, n. 10, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30211977/> Acesso em: 18/11/2025.
- [25] PAGÁN, N. M. Et al. Physicochemical Characterization of Asphaltenes Using Microfluidic Analysis. **Chem Rev**, v. 122, n. 7, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.1c00897> Acesso em 18/11/2025.
- [26] KOTSANOPOULOS, K. V.; ARVANITOYANNIS, I. S. The Role of Auditing, Food Safety, and Food Quality Standards in the Food Industry: A Review. **Compr Rev Food Sci Food Saf**, v. 16, n. 5, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33371608/> Acesso em 18/11/2025.
- [27] CHUNG, J. et al. Fast and continuous microorganism detection using aptamer-conjugated fluorescent nanoparticles on an optofluidic platform. **Biosens Bioelectron**, v. 67, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566314006277> Acesso em 18/11/2025.
- [28] ZHAO, X. Tunable optofluidic microbubble lens. **Opt Express**, v. 30, n. 5, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35299575/> Acesso em 18/11/2025.
- [29] ABDULLAEV, S. S. et al. Integrating of analytical techniques with enzyme-mimicking nanomaterials for the fabrication of microfluidic systems for biomedical analysis. **Talanta**, v. 273, 2024. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0039914024002753> Disponível em: Acesso em 18/11/2025.
- [30] MARIUTA, D. et al. et al. Optofluidic Formaldehyde Sensing: Towards On-Chip Integration. **Micromachines (Basel)**, v. 11, n. 7, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/11/7/673> Acesso em 18/11/2025.
- [31] RACKUS, D. G.; RIEDEL-KRUSE, I. H.; PAMME, N. Learning on a chip: Microfluidics for formal and informal science education. **Biomicrofluidics**, v. 13, n. 4, 2019. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6697029/> Acesso em 18/11/2025.
- [32] QIU, Z; PIYAWATTANAMETHA, W. MEMS Actuators for Optical Microendoscopy. **Micromachines (Basel)**, v. 10, n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/10/2/85> Acesso em 18/11/2025.
- [33] TRINH, T. N. D. et al. Droplet-Based Microfluidics: Applications in Pharmaceuticals. **Pharmaceuticals (Basel)**, v. 16, n. 7, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37513850/> Acesso em 18/11/2025.
- [34] LIU, C. et al. External-field-induced directional droplet transport: A review. **Adv Colloid Interface Sci**, v. 295, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868621001433> Acesso em 18/11/2025.
- [35] BURNSIDE, S. B. et al. Simulations of surface acoustic wave interactions on a sessile droplet using a three-dimensional multiphase lattice Boltzmann model. **Phys Rev E**, v. 104, n. 4, 2021. Disponível em: <https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.104.045301> Acesso em 18/11/2025.
- [36] COLUCCIO, M. L. et al. Microfluidic platforms for cell cultures and investigations, **Microelectronic Engineering**, v. 208, 2019. Disponível em:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016793171930019X> Acesso em 18/11/2025.
- [37] MOMENIAZANDARIANI, Shima. Chemical synthesis with microfluidics – a review. **Elveflow**, [s.d.]. Disponível em: <https://elveflow.com/microfluidic-reviews/chemical-synthesis-with-microfluidics-review/> Acesso em 18/11/2025.
- [38] SCHAAF, C.; RÜHLE, F.; STARK, H. A flowing pair of particles in inertial microfluidics. **Soft Matter**, 2019. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/sm/c8sm02476f> Acesso em 18/11/2025.
- [39] ORBAY, S.; SANYAL, A. Molecularly Imprinted Polymeric Particles Created Using Droplet-Based Microfluidics: Preparation and Applications. **Micromachines (Basel)**, v. 14, n. 4, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/4/763>. Acesso em 18/11/2025.
- [40] GURKAN, U. A. et al. Next generation microfluidics: fulfilling the promise of lab-on-a-chip technologies. **Lab Chip**, v. 24, n. 7, 2024. Disponível em: <https://encurtador.com.br/gHIF> Acesso em 18/11/2025.
- [41] KAVVAS, M. L.; ERCAN, A. Generalizations of incompressible and compressible Navier-Stokes equations to fractional time and multi-fractional space. **Sci Rep**, v. 12, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-20911-3> Acesso em 18/11/2025.
- [42] JIANG, J. et al. Adhesion of Microdroplets on Water-Repellent Surfaces toward the Prevention of Surface Fouling and Pathogen Spreading by Respiratory Droplets. **ACS Appl Mater Interfaces**, v. 9, n. 7, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-022-20911-3> Acesso em 18/11/2025.
- [43] SOTOUDEGAN, M. S. Et al. Paper-based passive pumps to generate controllable whole blood flow through microfluidic devices. **Lab Chip**, v. 19, n. 22, 2019. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/lc/c9lc00822e> Acesso em 18/11/2025.
- [44] DE LOS SANTOS-RAMIREZ, J. M. et al. Enabling the characterization of the nonlinear electrokinetic properties of particles using low voltage. **Analyst**, v. 149, n. 14, 2024. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/an/d4an00538d> Acesso em 18/11/2025.
- [45] FERNÁNDEZ-MATEO, R. et al. Concentration-polarization electroosmosis for particle fractionation. **Lab Chip**, v. 24, n. 11, 2024. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/lc/d4lc00081a> Acesso em 18/11/2025.
- [46] LI, T. et al. Fabrication of Patterned Magnetic Particles in Microchannels and Their Application in Micromixers. **Biosensors (Basel)**, v. 14, n. 9, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-6374/14/9/408> Acesso em 18/11/2025.
- [47] HAN, Y. et al. Modern microelectronics and microfluidics on microneedles. **Analyst**, v. 148, n. 19, 2023. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/an/d3an01045g> Acesso em 18/11/2025.
- [48] PARSLEY, N. C.; SMYTHERS, A. L.; Hicks, L. M. Implementation of Microfluidics for Antimicrobial Susceptibility Assays: Issues and Optimization Requirements. **Front Cell Infect Microbiol**, v. 10, 2020. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33042872/> Acesso em 18/11/2025.

- [49] ZHEN, W.; JIANG, X. Synthesizing Living Tissues with Microfluidics. **Acc Chem Res**, v. 51, n. 12, 2018. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30456942/> Acesso em 18/11/2025.
- [50] VAN LOO, B. et al. Mass production of lumenogenic human embryoid bodies and functional cardiospheres using in-air-generated microcapsules. **Nat Commun**, v. 14, n. 1, 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-42297-0> Acesso em 18/11/2025.
- [51] VLADISALJEVIĆ, G. T. Droplet Microfluidics for High-Throughput Screening and Directed Evolution of Biomolecules. **Micromachines (Basel)**, v. 15, n. 8, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/8/971> Acesso em 18/11/2025.
- [52] WANG, X. et al. Microfluidics-based strategies for molecular diagnostics of infectious diseases. **Mil Med Res**, v. 9, n. 1, 2022. Disponível em: <https://mmrjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40779-022-00374-3> Acesso em 18/11/2025.
- [53] SIDDIQUI, S. A. et al. Implementing fermentation technology for comprehensive valorisation of seafood processing by-products: A critical review on recovering valuable nutrients and enhancing utilisation. **Crit Rev Food Sci Nutr**, v. 65, n. 5, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2023.2286623> Acesso em 18/11/2025.
- [54] YAN, C. et al. Microencapsulation for Food Applications: A Review. **ACS Appl Bio Mater**, v. 5, n. 12, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsabm.2c00673> Acesso em 18/11/2025.
- [55] FILIPPIDOU M. K.; CHATZANDROULIS, S. Microfluidic Devices for Heavy Metal Ions Detection: A Review. **Micromachines (Basel)**, v. 14, n. 8, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/8/1520> Acesso em 18/11/2025.
- [56] GUPTA, P.; TOKSHA B.; RAHAMAN, M. A. Critical Review on Hydrogen Based Fuel Cell Technology and Applications. **Chem Rec**, v. 24, n. 1, 2023 Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/tcr.202300295> Acesso em 18/11/2025.
- [57] ZHAI, K. The changing landscape of semiconductor manufacturing: why the health sector should care. **Front Health Serv**, v. 3, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10292744/> Acesso em 18/11/2025.
- [58] DONG, Y. et al. Formation of Droplets of Shear-Thinning Non-Newtonian Fluids in Asymmetrical Parallelized Microchannels. **Langmuir**, v. 39, n. 6, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.2c02736> Acesso em 18/11/2025.
- [59] PATTANAYAK, P. et al. Microfluidic chips: recent advances, critical strategies in design, applications and future perspectives. **Microfluid Nanofluidics**, v. 25, n. 12, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34720789/> Acesso em 18/11/2025.
- [60] LIU, D. et al. Single-cell droplet microfluidics for biomedical applications. **Analyst**, v. 147, n. 11, 2022. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/an/d1an02321g> Acesso em 18/11/2025.
- [61] OZCELIK, D. et al. Optofluidic bioanalysis: fundamentals and applications. **Nanophotonics**, v. 6, n. 4, 2017. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29201591/> Acesso em 18/11/2025.
- [62] LIAO, J. et al. Mirrored transformation optics. **Opt Lett**, v. 49, n. 4, 2024. Disponível em: <https://opg.optica.org/viewmedia.cfm?r=1&rwjcode=ol&uri=ol-49-4-907&html=true> Acesso em 18/11/2025.

- [63] ZIEBEHL, A. et al. Parametric multiphysics study of focus-variable silicone lenses. **Appl Opt**, v. 62, n. 30, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38038081/> Acesso em 18/11/2025.
- [64] KANG, M. et al. A Molecular-Switch-Embedded Organic Photodiode for Capturing Images against Strong Backlight. **Adv Mater**, v. 34, n. 17, 2022. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202200526> Acesso em 18/11/2025.
- [65] LIANG, L. et al. Label-free single-cell analysis in microdroplets using a light-scattering-based optofluidic chip. **Biosens Bioelectron**, v. 253, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956566324001532> Acesso em 18/11/2025.
- [66] AVCI, M. B.; YASAR, S. D.; CETIN, A. E. An optofluidic platform for cell-counting applications. **Anal Methods**, v. 15, n. 18, 2023. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ay/d3ay00344b> Acesso em 18/11/2025.
- [67] VILLARREAL-LUCIO, D. S. et al. Molecularly imprinted polymers for environmental adsorption applications. **Environ Sci Pollut Res Int**, v. 29, n. 60, 2022 Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-24025-1> Acesso em 18/11/2025.
- [68] WANG, Z. et al. Coacervate Microdroplets as Synthetic Protocells for Cell Mimicking and Signaling Communications. **Small Methods**, v. 7, n. 12, 2023. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/smt.202300042> Acesso em 18/11/2025.
- [69] ABEDI, S. et al. Microfluidic production of size-tunable hexadecane-in-water emulsions: Effect of droplet size on destabilization of two-dimensional emulsions due to partial coalescence. **Journal Colloid Interface Sci**, v. 533, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979718309652> Acesso em 18/11/2025.
- [70] NAGLIČ, P. et al. Optical properties of PlatSil SiliGlass tissue-mimicking phantoms. **Biomed Opt Express**, v. 11, n. 8, 2020 Disponível em: Acesso em 18/11/2025.
- [71] HUANG, K. et al. Designing Next Generation of Persistent Luminescence: Recent Advances in Uniform Persistent Luminescence Nanoparticles. **Adv Mater**, v. 34, n. 14, 2022. Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202107962> Acesso em 19/11/2025.
- [72] CHEN, R. et al. Patterning an Erosion-Free Polymeric Semiconductor Channel for Reliable All-Photolithography Organic Electronics. **Journal Phys Chem Lett**, v. 13, n. 33, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpclett.2c01982> Acesso em 19/11/2025.
- [73] JANE, F. et al. Embedding of Ultrathin Chips in Highly Flexible, Photosensitive Solder Mask Resist. **Micromachines (Basel)**, v. 12, n. 8, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/12/8/856> Acesso em 19/11/2025.
- [74] SHAHBAZ, M.; BUTT M. A.; PIRAMIDOWICZ, R. Breakthrough in Silicon Photonics Technology in Telecommunications, Biosensing, and Gas Sensing. **Micromachines (Basel)**, v. 14, n. 8, 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37630173/> Acesso em 19/11/2025.
- [75] XU, Z. et al. An investigation of methods to enhance adhesion of conductive layer and dielectric substrate for additive manufacturing of electronics. **Sci Rep**, v. 14, n. 1, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-61327-5> Acesso em 20/11/2025.

- [76] JINDAL, V; SUGUNAKAR, V; GHOSH, S. Setup for photolithography on microscopic flakes of 2D materials by combining simple-geometry mask projection with writing. **Rev Sci Instrum**, v. 93, n. 2, 2022. Disponível em: <https://encurtador.com.br/pjWx> Acesso em 20/11/2025.
- [77] MÁRTIL DE LA PLAZA, Ignacio. **Microelectrónica: la historia de la mayor revolución silenciosa del siglo XX**. Madrid: Universidad Complutense, Ediciones Complutense, 2018. 179p.
- [78] KOSHELEV, A. et al. High refractive index Fresnel lens on a fiber fabricated by nanoimprint lithography for immersion applications. **Opt Lett**, v. 41, n. 15, 2016. Disponível em: <https://opg.optica.org/ol/abstract.cfm?uri=ol-41-15-3423> Acesso em 21/11/2025.
- [79] NIKON BUSINESS. **Immersion lithography technology supports leading-edge semiconductor production**. [s.l.]: Nikon, [s.d.]. Disponível em: <https://www.nikon.com/business/semi/technology/story04.html> Acesso em 21/11/2025.
- [80] ZHAO, R. et al. Machine learning in electron beam lithography to boost photoresist formulation design for high-resolution patterning. **Nanoscale**, v. 16, n. 8, 2024. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/nr/d3nr04819e> Acesso em 21/11/2025
- [81] BAEK, D. et al. **Nanotechnology for Bioapplications**. In: Lithography Technology for Micro- and Nanofabrication. Singapore: Springer, 2021. p. 217-233.
- [82] CHIRCOV, C; GRUMEZESCU, A. M. Microelectromechanical Systems (MEMS) for Biomedical Applications. **Micromachines (Basel)**, v. 13, n. 2, 2022. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35208289/> Acesso em 21/11/2025.
- [83] SCIBERRAS, T. et al. Thermo-Mechanical Fluid- Structure Interaction Numerical Modelling and Experimental Validation of MEMS Electrothermal Actuators for Aqueous Biomedical Applications. **Micromachines (Basel)**, v. 14, n. 6, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/6/1264> Acesso em 21/11/2025.
- [84] BHUSHAN, Bharat. **Encyclopedia of Nanotechnology**, v. 1. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2012. 2.868p.
- [85] PARK, S. Y. et al. Patterning Quantum Dots via Photolithography: A Review. **Adv Mater**, v. 35, n. 41, Disponível em: <https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202300546> Acesso em 21/11/2025.
- [86] SMALLWOOD, D. C. et al. Methods for latent image simulations in photolithography with a polychromatic light attenuation equation for fabricating VIAs in 2.5D and 3D advanced packaging architectures. **Microsyst Nanoeng**, v. 7, n. 39, 2021. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34567753/> Acesso em 21/11/2025.
- [87] ZHANG, S. et al. Chemically Amplified Molecular Glass Photoresist Regulated by 2-Aminoanthracene Additive for Electron Beam Lithography and Extreme Ultraviolet Lithography. **ACS Omega**, v. 8, n. 30, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c07711> Acesso em 21/11/2025.
- [88] LU, H. et al. Characterisation of engineered defects in extreme ultraviolet mirror substrates using lab-scale extreme ultraviolet reflection ptychography. **Ultramicroscopy**, v. 249, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304399123000372> Acesso em 21/11/2025.
- [89] SERRANO, D. R. et al. 3D Printing Technologies in Personalized Medicine, Nanomedicines, and Biopharmaceuticals. **Pharmaceutics**, v. 15, n. 2, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1999-4923/15/2/313> Acesso em 21/11/2025.

- [90] SIOMA, M. 3D printed electronics with nanomaterials. **Nanoscale**, v. 15, n. 12, 2023; Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/nr/d2nr06771d> Acesso em 21/11/2025.
- [91] Madhu NR, Erfani H, Jadoun S, Amir M, Thiagarajan Y, Chauhan NPS. Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: a review. **International Journal Adv Manuf Technol**, v. 122, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-022-10048-y> Acesso em 21/11/2025.
- [92] LUO, C. et al. Bonding widths of Deposited Polymer Strands in Additive Manufacturing. **Materials (Basel)**, v. 14, n. 4, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/4/871> Acesso em 21/11/2025.
- [93] SIRBUBALO, M. et al. 3D Printing — A “Touch-Button” Approach to Manufacture Microneedles for Transdermal Drug Delivery. **Pharmaceutics**, v. 13, n. 7, 2021; Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13070924> Acesso em 21/11/2025.
- [94] ZHANG, P. et al. Development of multiple structured extended-release tablets via hot melt extrusion and dual-nozzle fused deposition modeling 3D printing. **International Journal Pharm**, v. 653, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037851732400139X> Acesso em 21/11/2025.
- [95] PRZEKOP, R. E. et al. Liquid for Fused Deposition Modeling Technique (L-FDM)—A Revolution in Application Chemicals to 3D Printing Technology: Color and Elements. **Applied Sciences**, v. 13, n. 13, 2023; Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13137393> Acesso em 21/11/2025.
- [96] DEMIR, E.; DUYGUN, İ. K.; BEDELOĞLU, A. The Mechanical Properties of 3D-Printed Polylactic Acid/Polyethylene Terephthalate Glycol Multi-Material Structures Manufactured by Material Extrusion. **3D Print Addit Manuf**, v. 11, n. 1, 2024. Disponível em: Acesso em 21/11/2025.
- [97] CHO, Y. et al. Monodisperse Micro-Droplet Generation in Microfluidic Channel with Asymmetric Cross-Sectional Shape. **Micromachines (Basel)**, v. 14, n. 1, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/1/223> Acesso em 21/11/2025.
- [98] NTONE, E. et. al. The emulsifying ability of oleosomes and their interfacial molecules. **Colloids Surfaces B: Biointerfaces**, v. 229, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927776523003545> Acesso em 21/11/2025.
- [99] SHARMA, T. et al. Investigating the Vapor-Phase Adsorption of Aroma Molecules on the Water-Vapor Interface using Molecular Dynamics Simulations. **Langmuir**, v. 39, n. 49, 2023. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.3c02531> Acesso em 21/11/2025.
- [100] LI, Y. et al. A Pickering emulsion stabilized by Chitosan-g- Poly(N-vinylcaprolactam) microgels: Interface formation, stability and stimuli-responsiveness. **Carbohydr Polym**, v. 332, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861724001747> Acesso em 21/11/2025.
- [101] JIANG, T. et al. Effective colloidal emulsion droplet regulation in flow- focusing glass capillary microfluidic device *via* collection tube variation. **RSC Adv**, v. 14, n. 5, 2024. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d3ra08561a> Acesso em 21/11/2025.
- [102] PETRUZZELLIS, I. et al. Lab-on-Chip Systems for Cell Sorting: Main Features and Advantages of Inertial Focusing in Spiral Microchannels. **Micromachines (Basel)**, v.

- 15, n. 9, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/15/9/1135> Acesso em 21/11/2025.
- [103] HENGOJU, S. et al. Advantages of optical fibers for facile and enhanced detection in droplet microfluidics. **Biosens Bioelectron**, v. 200, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566321009477> Acesso em 21/11/2025.
- [104] SCHIANTI, J. N. et al. Real Time Water-In-Oil Emulsion Size Measurement in Optofluidic Channels. **Sensors (Basel)**, v. 22, n. 13, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/13/4999> Acesso em 21/11/2025.
- [105] VILA-PLANAS, J. et al. Cell analysis using a multiple internal reflection photonic lab-on-a-chip. **Nature Protocols**, v. 6, 2011. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nprot.2011.383> Acesso em 21/11/2025.
- [106] SUN, X. et al. Small All-Range Lidar for Asteroid and Comet Core Missions. **Sensors (Basel)**, v. 21, n. 9, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/3081> Acesso em 21/11/2025.
- [107] DANNHAUSER, D. et al. Optical signature of erythrocytes by light scattering in microfluidic flows. **Lab Chip**, v. 15, n. 16, 2015. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/lc/c5lc00525f> Acesso em 21/11/2025.
- [108] SONG, J. et al. Droplet Navigation by Photothermal Pumping in an Optofluidic System. **Langmuir**, v.38, n. 37, 2022. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.langmuir.2c02108> Acesso em 21/11/2025.
- [109] WEI, B. et al. Monolithic 3D phase profile formation in glass for spatial and temporal control of optical waves. **Opt Express**, v. 30, n. 14, 2022. Disponível em: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-30-14-24822> Acesso em 21/11/2025.
- [110] GHAZNAVI, A.; XU, J.; Hara, S. A. A Non-Sacrificial 3D Printing Process for Fabricating Integrated Micro/Mesoscale Molds. **Micromachines (Basel)**, v. 14, n. 7, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/7/1363> Acesso em 21/11/2025.