

Nº 180023

Miniaturização de processos químicos

Mario Ricardo Gongora-Rubio

*Palestra apresentada no
CONGRESSO DE TECNOLOGIA DE
SÃO PAULO, FATEC, 26., 2025,
São Paulo. 56 slides*

A série “Comunicação Técnica” comprehende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

PROIBIDO REPRODUÇÃO

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
S/A - IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Cidade Universitária ou
Caixa Postal 0141 | CEP 01064-970
São Paulo | SP | Brasil | CEP 05508-901
Tel 11 3767 4374/4000 | Fax 11 3767-4099

www.ipt.br



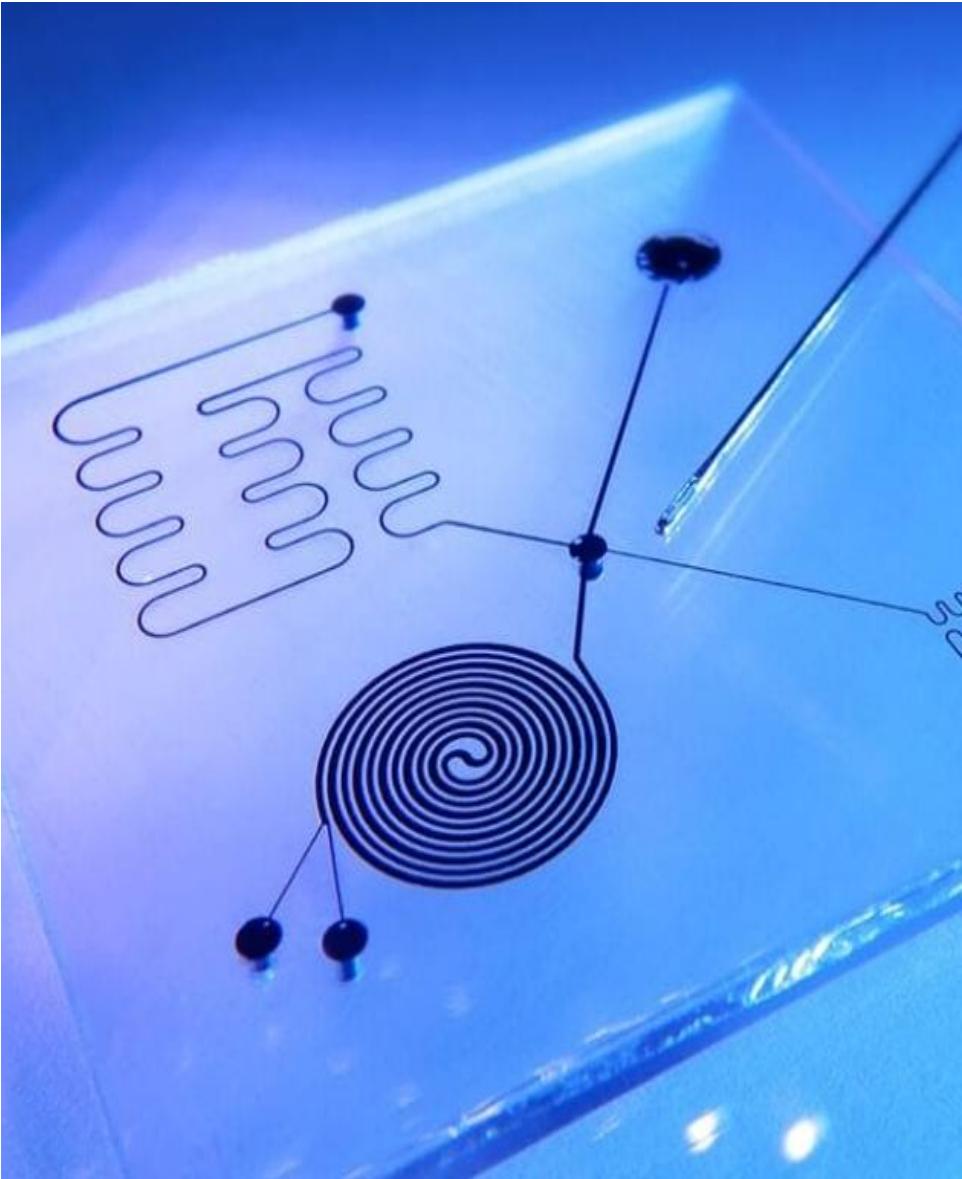
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS



GOVERNO DO ESTADO
SÃO PAULO

Secretaria de Desenvolvimento
Econômico, Ciência, Tecnologia e Inovação

Seu desafio é nosso



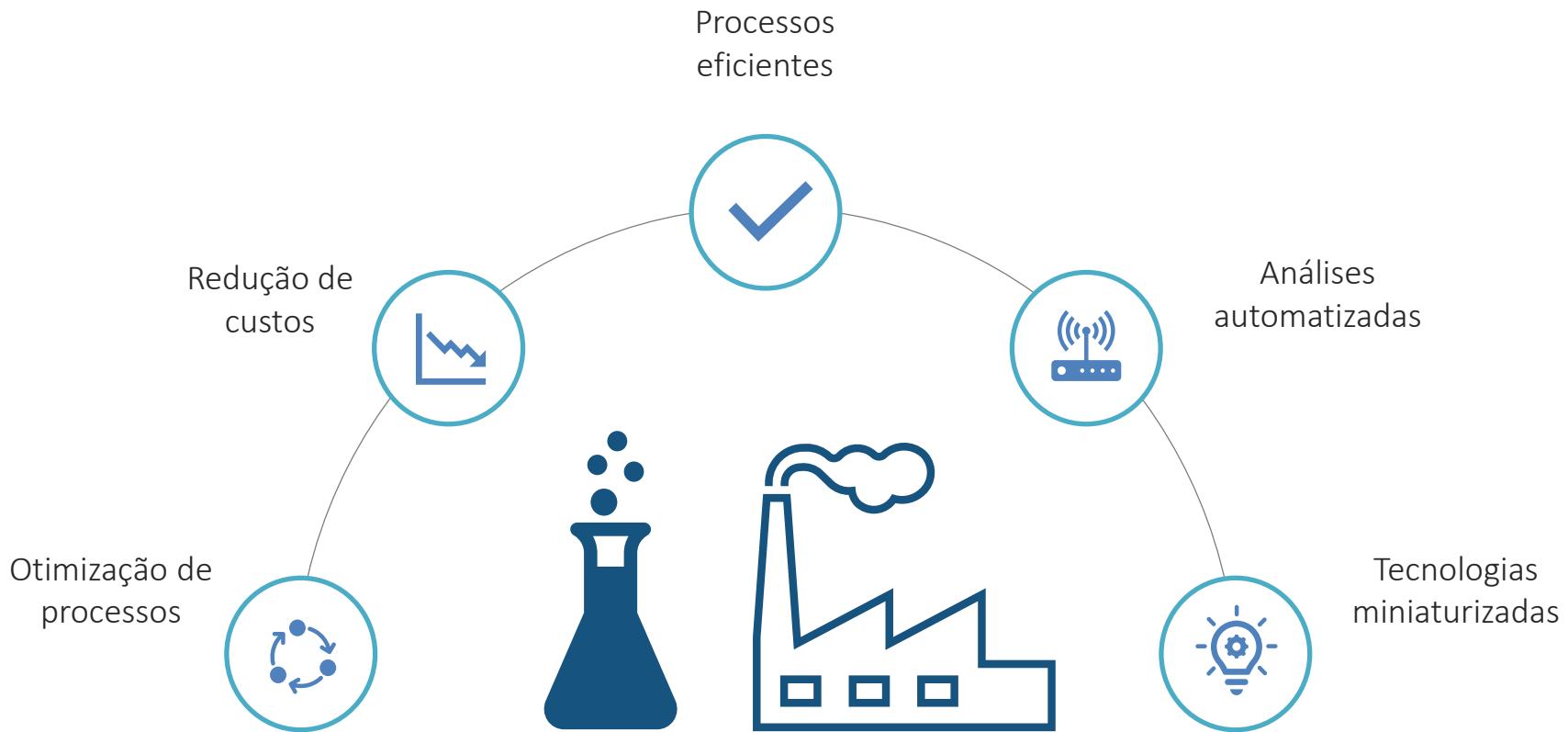
26º Congresso de
Tecnologia

MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS

Oportunidades para as
Indústrias Químicas

Outubro 2025

MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS

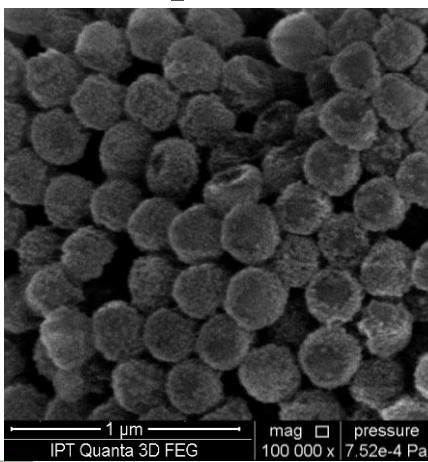
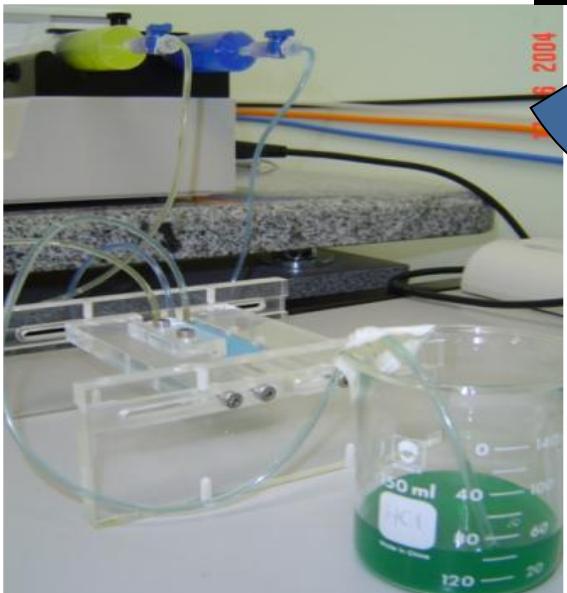


MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS

PROCESSOS DE LABORATÓRIO

Nanopartículas

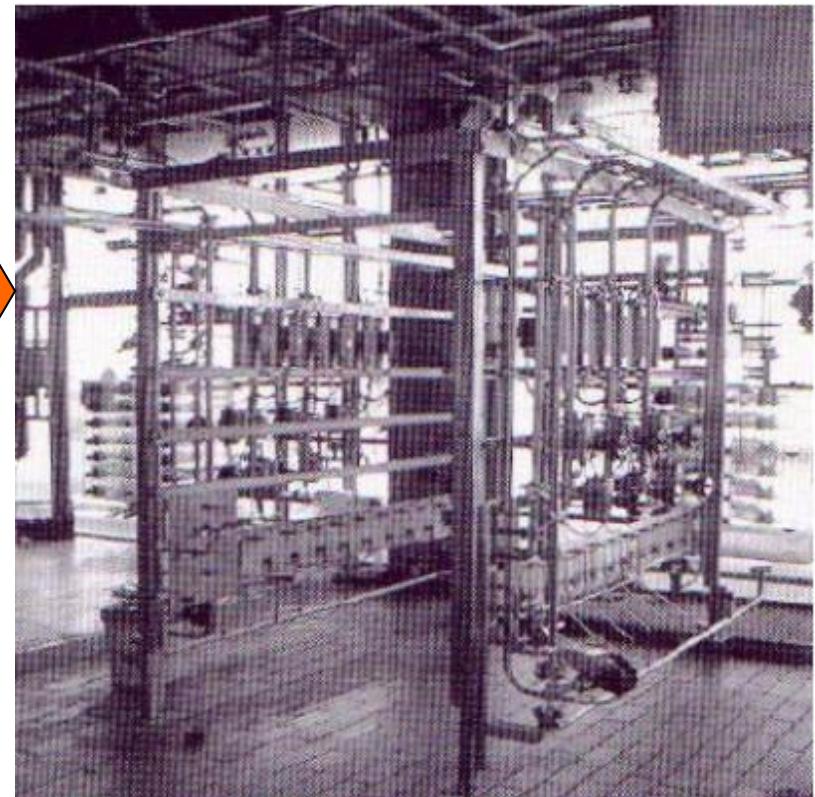
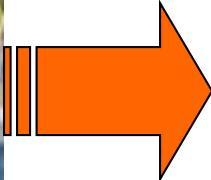
Sistema Miniaturizado



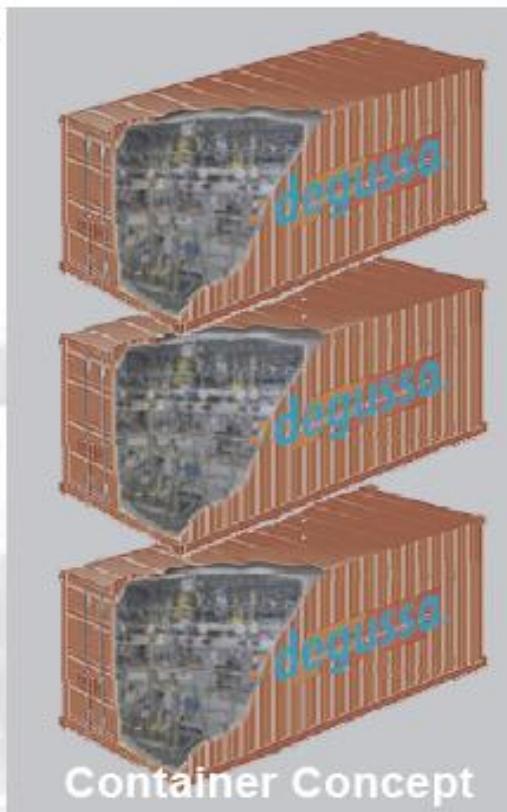
Sistema Convencional



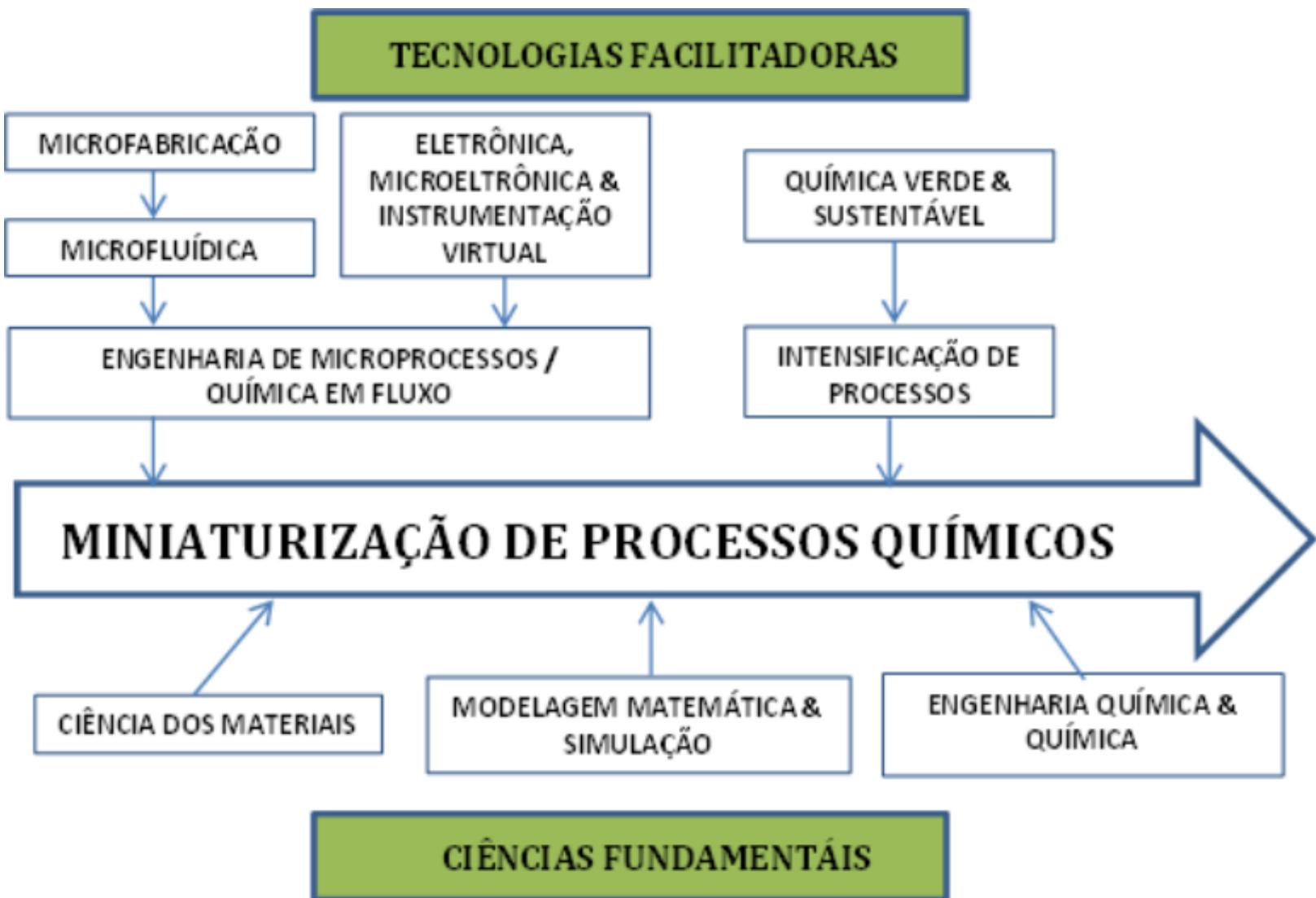
MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS APLICAÇÕES EM PROCESSOS INDUSTRIAIS



MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS CONCEITO MODULAR



ABORDAGEM MULTIDISCIPLINAR PARA MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS



VANTAGENS DA MINIATURIZAÇÃO DE PROCESSOS

A miniaturização de processos químicos permite obter uma série de vantagens sobre os processos convencionais, tais como:

- **Continuidade de processamento:** os processos miniaturizados viabilizam a mudança de processamento em batelada para processamento contínuo, tendo como resultado melhor aproveitamento de insumos e redução de custos de produção.
- **Facilidade de aumento de produção:** Este aumento de produção (numbering-up) é feito pela paralelização de unidades produtivas básicas, evitando uma etapa de testes em escala piloto.
- **Melhoria de processos químicos:** a miniaturização de reatores químicos oferece o controle do ambiente de reação de forma muito precisa, permitindo produção contínua, redução de subprodutos de reação, melhor aproveitamento dos insumos; redução de aditivos, redução de custos de separação, e gasto de energia no processo.
- **Produtos novos ou aprimorados:** a intensificação de processos pela miniaturização possibilita a criação de produtos que não podem ser fabricados de forma segura ou controlada devido a taxas de reação muito elevadas, reações altamente exotérmicas ou reagentes perigosos.
- **Aumento de Segurança:** os processos miniaturizados apresentam características mais seguras, como a redução do volume total de materiais potencialmente perigosos e controle mais preciso de reações muito rápidas ou perigosas.
- **Benefícios Energéticos e Ambientais:** As aplicações de intensificação de processos miniaturizada oferecem oportunidades para economia de energia (no caso dos micromisturadores de 50%) e benefícios ambientais, especialmente em termos de desenvolvimento sustentável.
- **Produtos assépticos:** a fabricação dos sistemas miniaturizados permite o uso de materiais esterilizáveis, diminuindo os riscos de contaminação.
- **Facilidade de manutenção:** devido ao seu caráter modular, a manutenção pode ser realizada pela substituição do módulo com problema, sem a necessidade de parar o processo diminuindo custos de manutenção.
- **Redução de custos de capital:** devido a sua abordagem modular, estes sistemas apresentam uma redução substancial do capital investido em edificações, estruturas de suporte de equipamentos, montagem e instrumentação, já que muitos dos sistemas são intrinsecamente seguros.
- **Tecnologias que permitem integração:** as tecnologias de Microfabricação como a tecnologia de cerâmicas multicamada (LTCC), empregada na produção de microssistemas cerâmicos, permite a integração de microfluídica, sensores, atuadores e eletrônica para realizar funções de controle do processo, diminuindo o custo da instrumentação global do sistema de produção.

QUÍMICA VERDE

A química verde envolve o projeto de produtos e processos químicos que reduzam ou eliminem o uso e a geração de substâncias perigosas, eliminando os processos químicos prejudiciais ao ambiente e substituindo-os por outros menos agressivos, sustentáveis, recicláveis e não persistentes que não agridam o meio ambiente. Existem doze princípios na química verde, conforme descrito em que têm o potencial de se beneficiar com as tecnologias de microporcessos



PRINCÍPIOS DA QUÍMICA VERDE

- 1. Prevenção:** é melhor prevenir o desperdício do que tratar ou limpar após a criação.
- 2. Economia de átomos:** os métodos sintéticos devem ser projetados para maximizar a incorporação de todos os materiais no produto final.
- 3. Sínteses químicas menos perigosas:** Os métodos sintéticos devem ser projetados para usar e gerar substâncias que possuem pouca ou nenhuma toxicidade para os humanos e o meio ambiente.
- 4. Projeto de produtos químicos mais seguros:** Os produtos químicos devem ser projetados para efetuar sua função desejada e ao mesmo tempo minimizar sua toxicidade.
- 5. Solventes e auxiliares mais seguros:** O uso de substâncias auxiliares deve ser evitado, e, quando necessário devem ser inócuas.
- 6. Projeto para eficiência energética:** Os requisitos de energia dos processos químicos devem ser reconhecidos por seus impactos ambientais e econômicos e devem ser minimizados.
- 7. Uso de matérias-primas renováveis:** Uma matéria-prima ou matéria-prima deve ser renovável sempre que técnica e economicamente viável.
- 8. Reduzir derivados:** A derivatização desnecessária deve ser evitada porque tais etapas em geral geram resíduos.
- 9. Catálise:** Os processos catalíticos (tão seletivos quanto possível) são superiores aos reagentes estequiométricos.
- 10. Projeto para degradação:** Os produtos químicos devem ser projetados de modo que ao final do processo, se decomponham em produtos inócuos que não persistem no meio ambiente.
- 11. Análise em tempo real para prevenção da poluição:** monitoramento e controle do processo para minimizar a formação de substâncias perigosas.
- 12. Química inherentemente mais segura para a prevenção de acidentes:** as substâncias utilizadas em um processo químico devem ser escolhidas para minimizar estes problemas.

INTENSIFICAÇÃO DE PROCESSOS

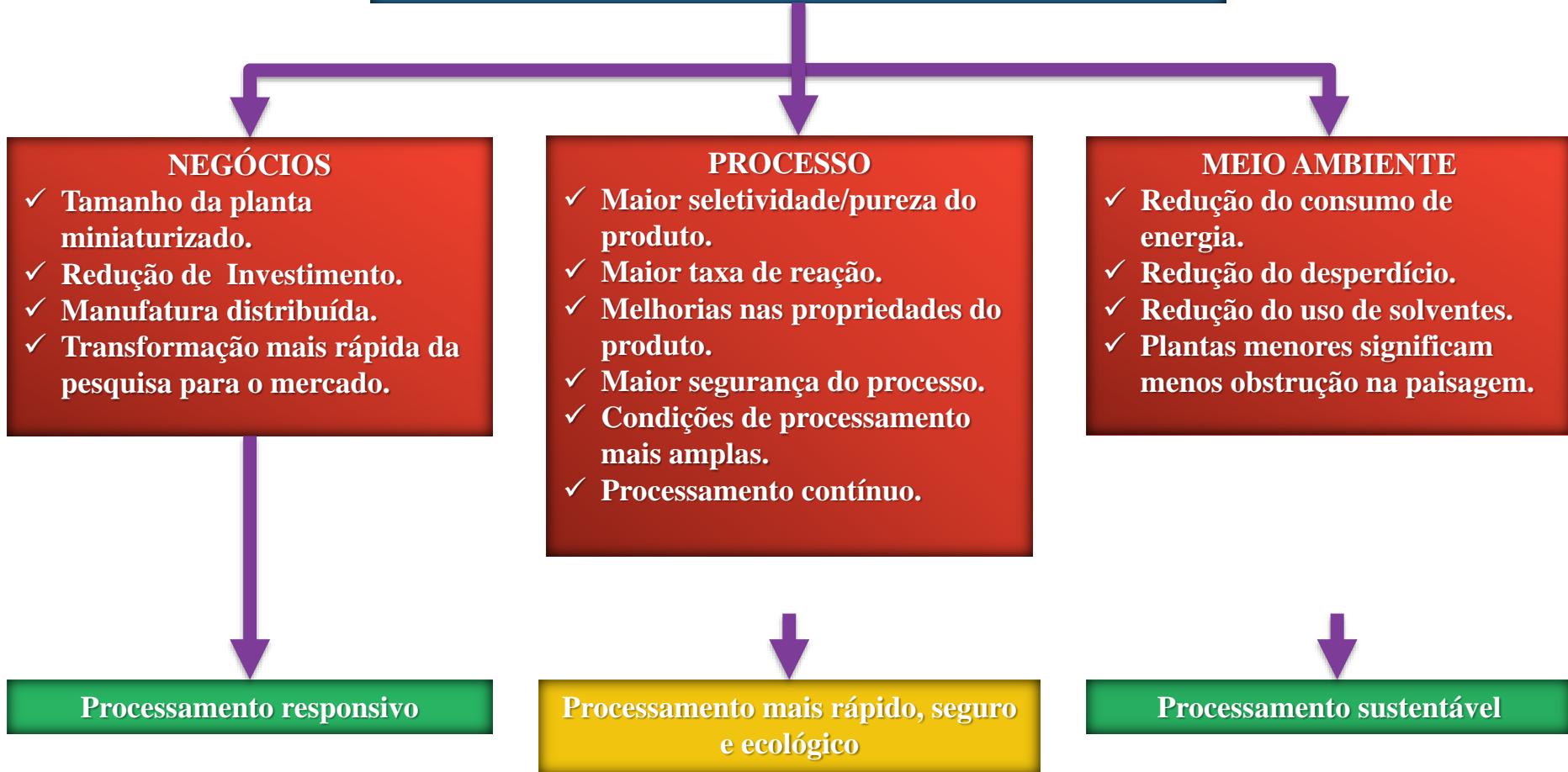
A **Intensificação de Processos** é definida como o desenvolvimento de aparelhos inovadores e técnicas que oferecem melhorias amplas na fabricação e processamento de produtos químicos.

Com seu uso diminui-se substancialmente o volume do equipamento, o consumo de energia, a formação de resíduos e em última instância fornecendo tecnologias mais seguras e sustentáveis a um preço menor. Configuram-se então os quatro princípios orientadores que são chamados de princípios genéricos de intensificação de processos.

- ✓ Maximizar a eficácia dos eventos intra e intermoleculares;
- ✓ Dar a cada molécula a mesma experiência de processamento;
- ✓ Otimizar as forças motrizes e resistências em todas as escalas e maximizar as áreas superficiais específicas onde essas forças ou resistências se aplicam;
- ✓ Maximizar os efeitos sinérgicos de processos parciais.

BENEFÍCIOS DA INTENSIFICAÇÃO DE PROCESSOS

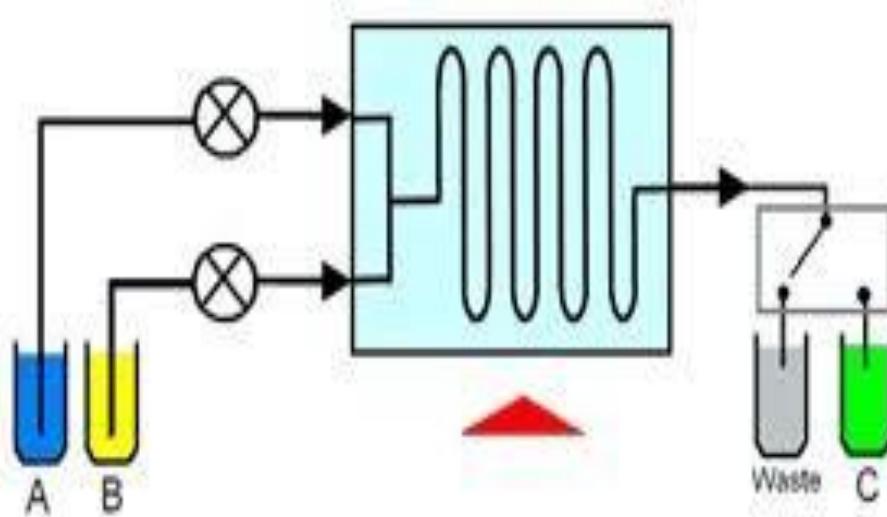
BENEFÍCIOS DA INTENSIFICAÇÃO DE PROCESSOS



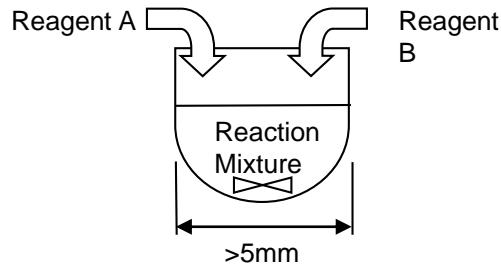
QUÍMICA EM FLUXO

Na química de fluxo, uma reação química é executada em um fluxo contínuo, em vez de em produção em batelada. Em outras palavras, as bombas movem o fluido para dentro de um tubo e, onde os tubos se juntam, os fluidos entram em contato.

Se esses fluidos forem reativos, ocorre uma reação. A química de fluxo é uma técnica bem estabelecida para uso em larga escala na fabricação de grandes quantidades de um determinado material. Frequentemente, microrreatores são usados.



COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS EM BATELADA VS. FLUXO

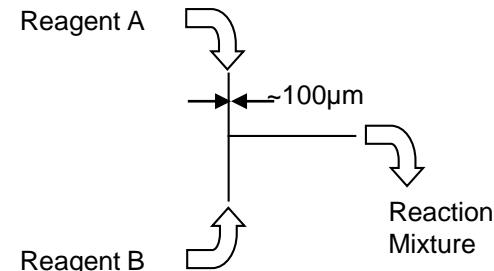


A maneira clássica de fazer química.

- Os reagentes são carregados no reator, misturados e deixados para reagir.
- Os produtos são coletados no final, após a conclusão da reação e processados.

Fatores-chave:

- Concentração
- Mistura
- Temperatura
- Tempo de reação



Nova técnica.

- Fluxos de reagentes são bombeados continuamente para o reator de fluxo.
- Os reagentes se misturam e reagem no reator de fluxo.
- O produto sai do reator como um fluxo contínuo.

Fatores-chave:

- Tempo de residência (vazões)
- Mistura
- Pressão
- Temperatura

COMPARAÇÃO DE PARÂMETROS EM LOTE VS. FLUXO

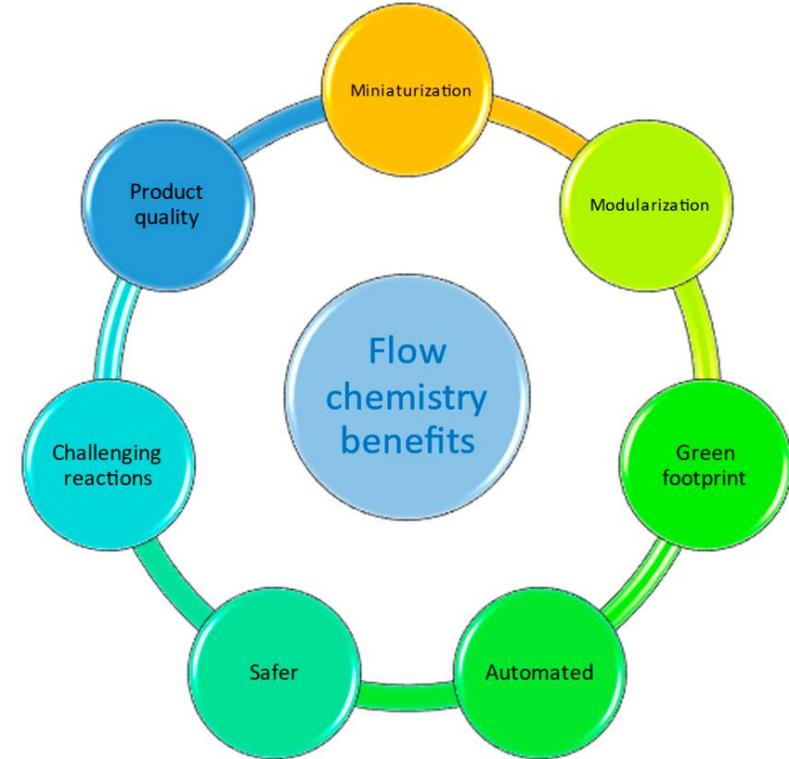
Estequiometria da reação.

- Na produção em batelada é definida pela concentração dos reagentes químicos e sua razão volumétrica.
- Em fluxo, é definida pela concentração dos reagentes e a razão entre suas vazões.

Tempo de residência.

- Na produção em batelada, isso é determinado pelo tempo que um recipiente é mantido a uma determinada temperatura.
- Em fluxo, o tempo de residência volumétrico é usado, dado pela razão entre o volume do reator e a vazão total.

$$\text{Tempo de Residência} = \text{Volume do reator} / \text{Vazão}$$



PRESSÃO

Em um reator em fluxo, a pressão total em qualquer local é composta por dois fatores:

- Contrapressão devida ao fluxo

Isso aumenta com maior vazão, canais mais estreitos ou líquidos mais viscosos

- Contrapressão aplicada intencionalmente

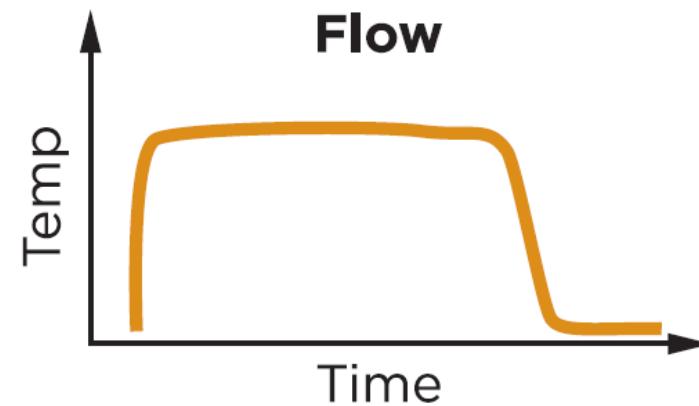
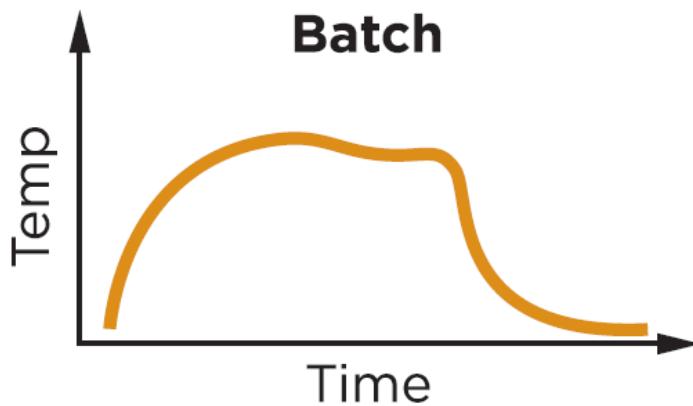
Isso normalmente é aplicado por um regulador de pressão próximo à saída do sistema

TEMPERATURA

Devido à maior relação área de superfície : volume, os reatores de fluxo permitem melhor transferência de calor e, portanto, melhor controle de temperatura.

As reações resfriam ou aquecem extremamente rápido (mais rápido que um micro-ondas).

Ao pressurizar, os reatores de fluxo podem operar em temperaturas acima do ponto de ebulação típico das reações. Isso permite o superaquecimento fácil das reações, por exemplo, de 100 °C a 150 °C acima das temperaturas de refluxo à pressão atmosférica.



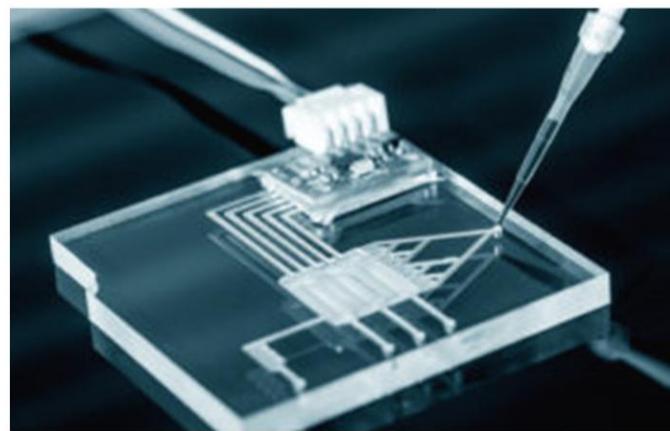
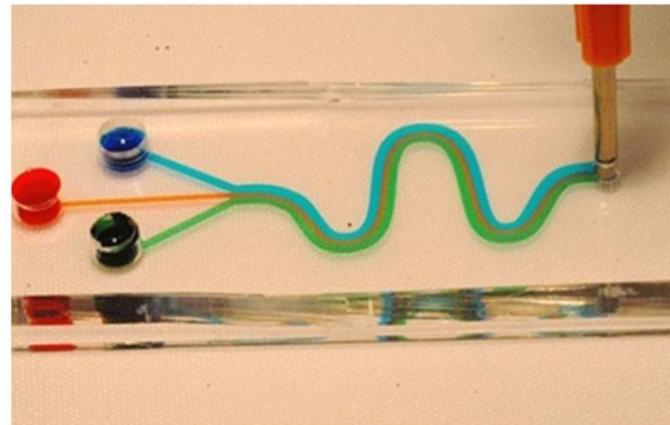
Microfluídica

Sistemas formados por **microcanais**

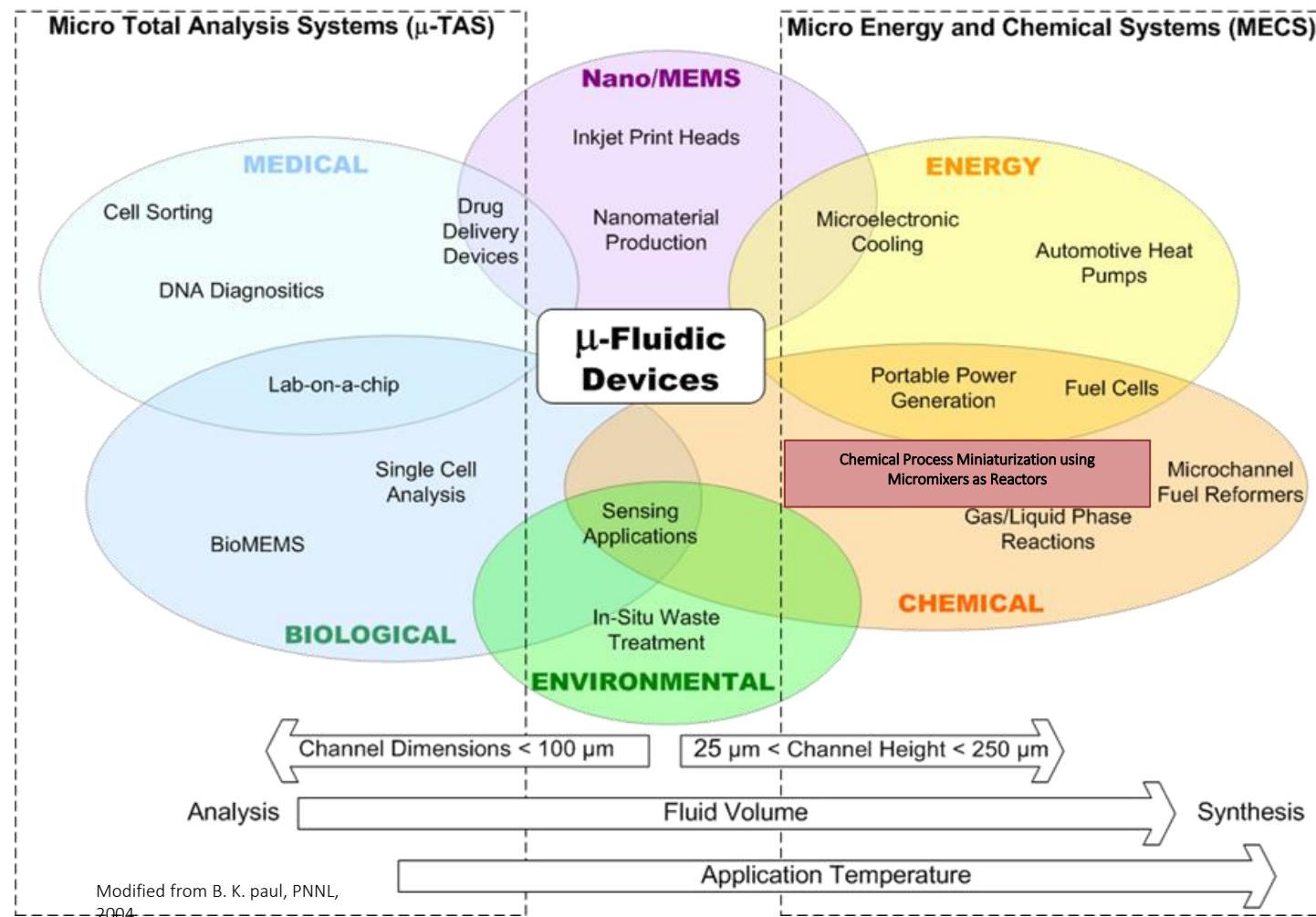
Microambiente controlado e
miniaturizado

Processo contínuo, de fácil operação e
permite análises em tempo real

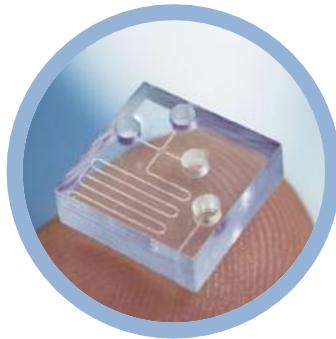
Aplicações em **processos químicos** e
muitas outras áreas



APLICAÇÕES DA MICROFLUÍDICA



APLICAÇÕES USANDO MICROFLUÍDICA



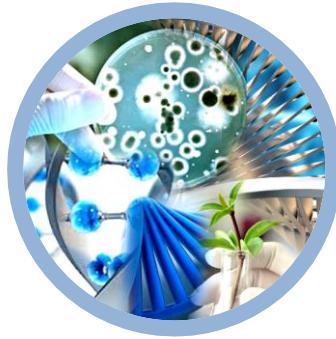
Análises

Lab on a chip
Point-of-care



Química

Processos
Misturas
Sínteses



Biologia

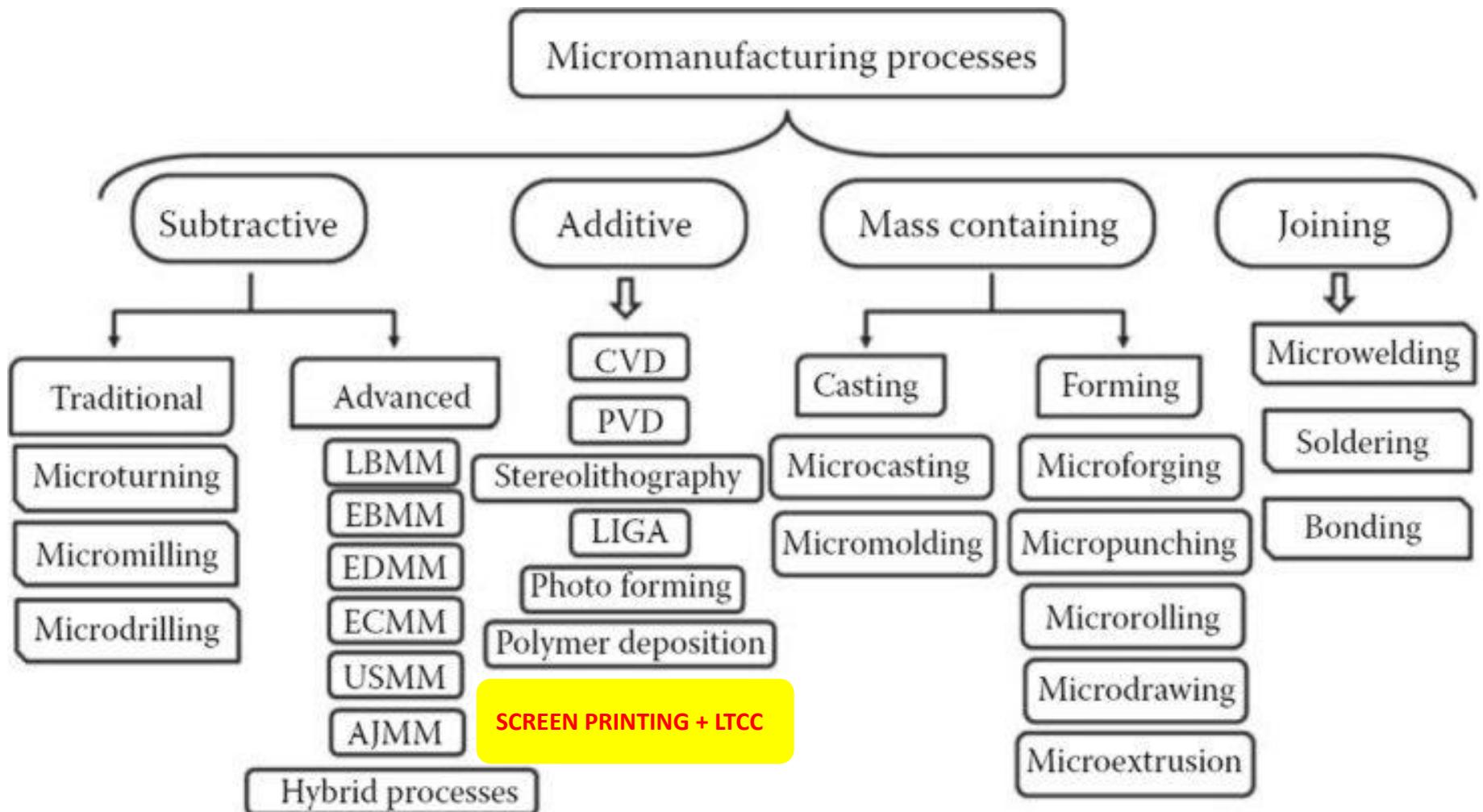
Biologia celular
Genética
Microbiologia



Nanotecnologia

Nanopartículas
Nanocarreadores

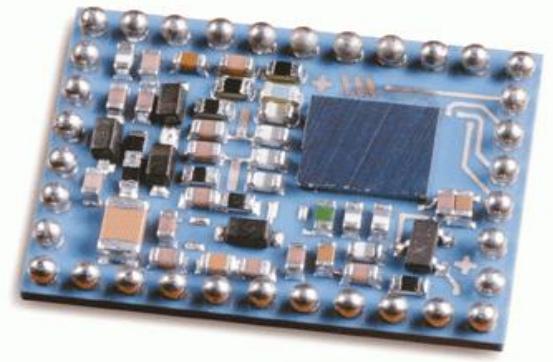
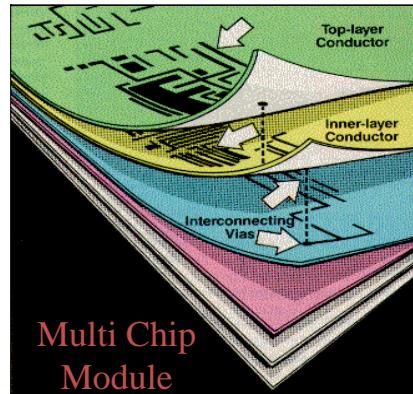
TÉCNICAS DE MICROMANUFATURA



WHAT IS LTCC ?

A tecnologia LTCC (Cerâmicas Co-sinterizadas em Baixa Temperatura) foi originalmente desenvolvida pela Hughes e DuPont para sistemas militares, utilizando materiais compósitos vitrocerâmicos e tecnologia de filme espesso.

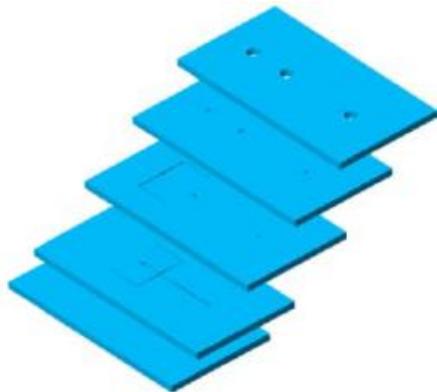
A tecnologia LTCC pode ser definida como uma forma de produzir circuitos multicamadas com o auxílio de fitas individuais, nas quais são aplicadas pastas condutoras, dielétricas e/ou resistivas. Essas folhas individuais precisam ser laminadas juntas e queimadas em uma única etapa.



- Atualmente, o LTCC é uma tecnologia de microssistemas que integra microeletrônica, microfluídica, micro-ondas e sensores em um único pacote.

Abordagem multicamadas:

Permite projetos de canais complexos por meio do empilhamento e integração de múltiplas estruturas de camadas



LTCC

*Low temperature
cofired ceramics*

Custos Menores

Facil
Prototipagem

Estabilidade e
compatibilidade

Feito sob
medida

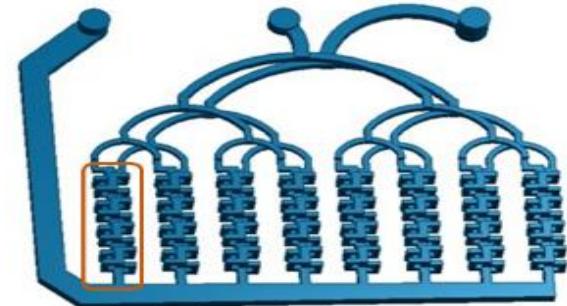
Baixa
Rugosidade

Boa Integração
com outros
filmes e
dispositivos

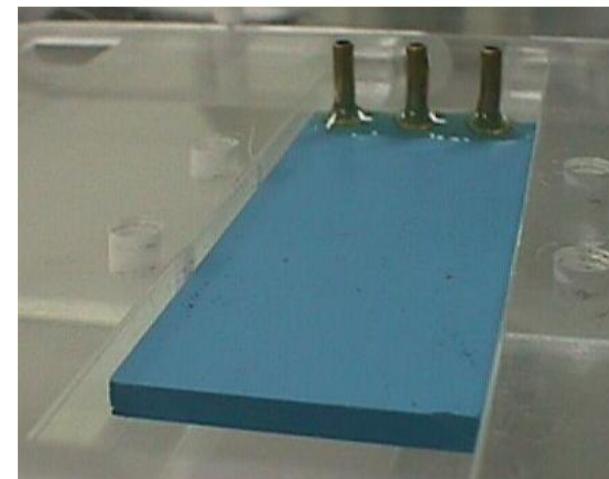
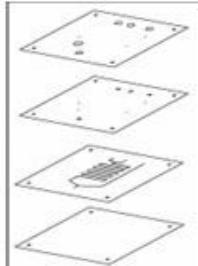
Não requer Sala
Limpaa

LTCC PROCESS AT IPT-LMI

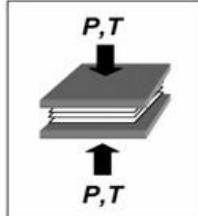
Microusinagem
(Laser)



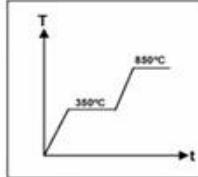
Deposição de Filme Espesso
(Serigrafia)



Laminação



Sinterização



Encapsulamento



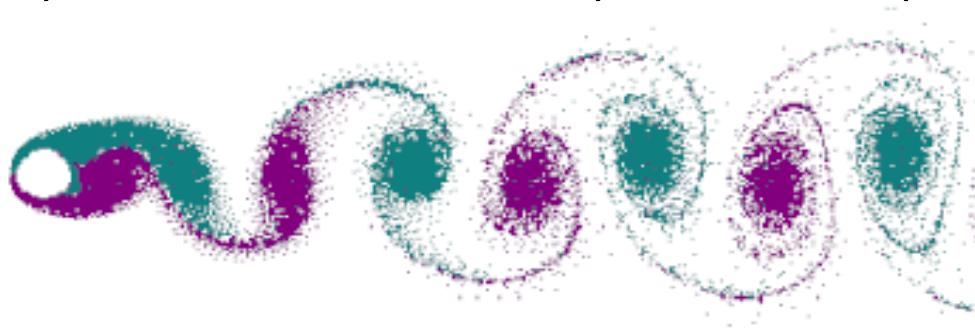
Dispositivo de micromistura LTCC e sua
geometria paralelizada interna



FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

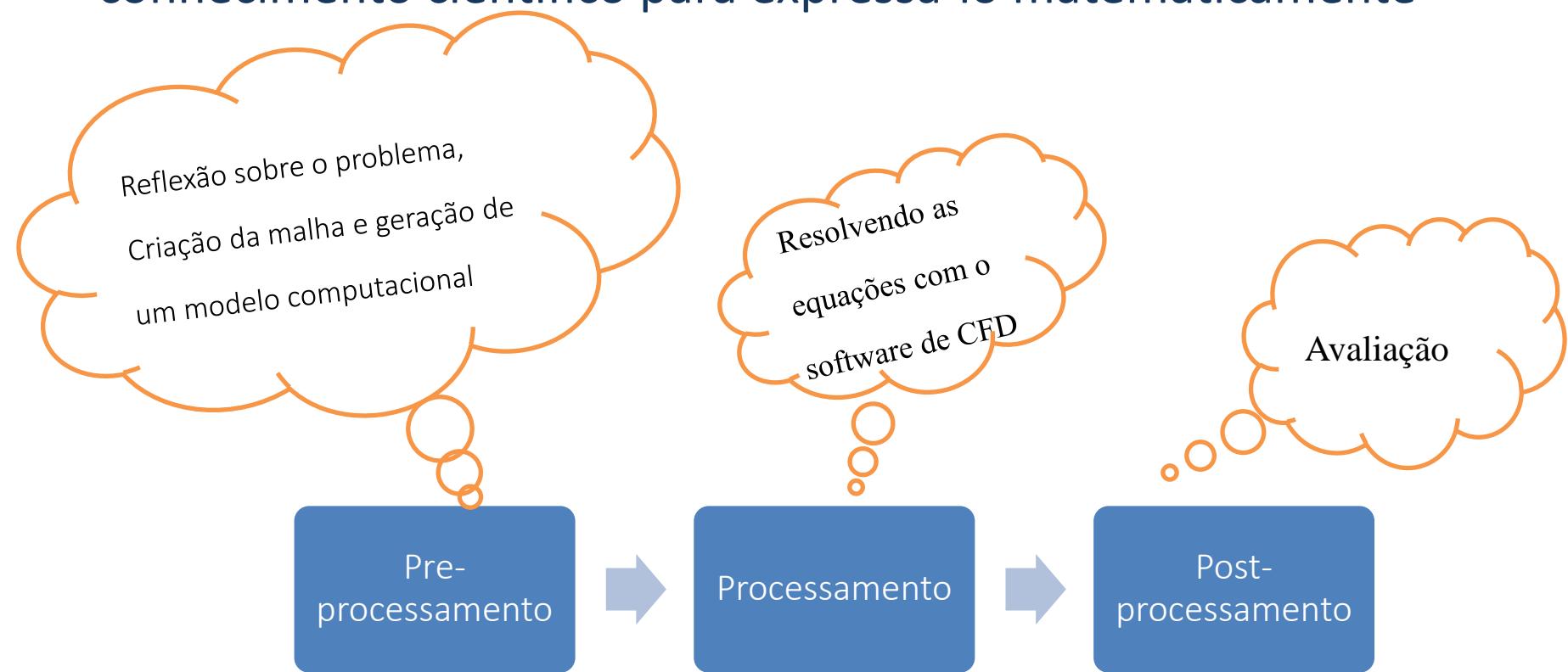
Benefícios

- Proporciona uma melhor compreensão e mais profunda do que está acontecendo em um determinado processo ou sistema.
- Menos tempo e custo envolvidos em testes de laboratório.
- Pode responder a muitas perguntas hipotéticas em um curto espaço de tempo.
- Reduz problemas de escalonamento.
- É particularmente útil na simulação de condições em que não é possível realizar medições detalhadas, como altas temperaturas ou ambientes perigosos.
- Por ser uma ferramenta proativa de análise e projeto, pode destacar a causa raiz, e não apenas o efeito, ao avaliar problemas na planta.

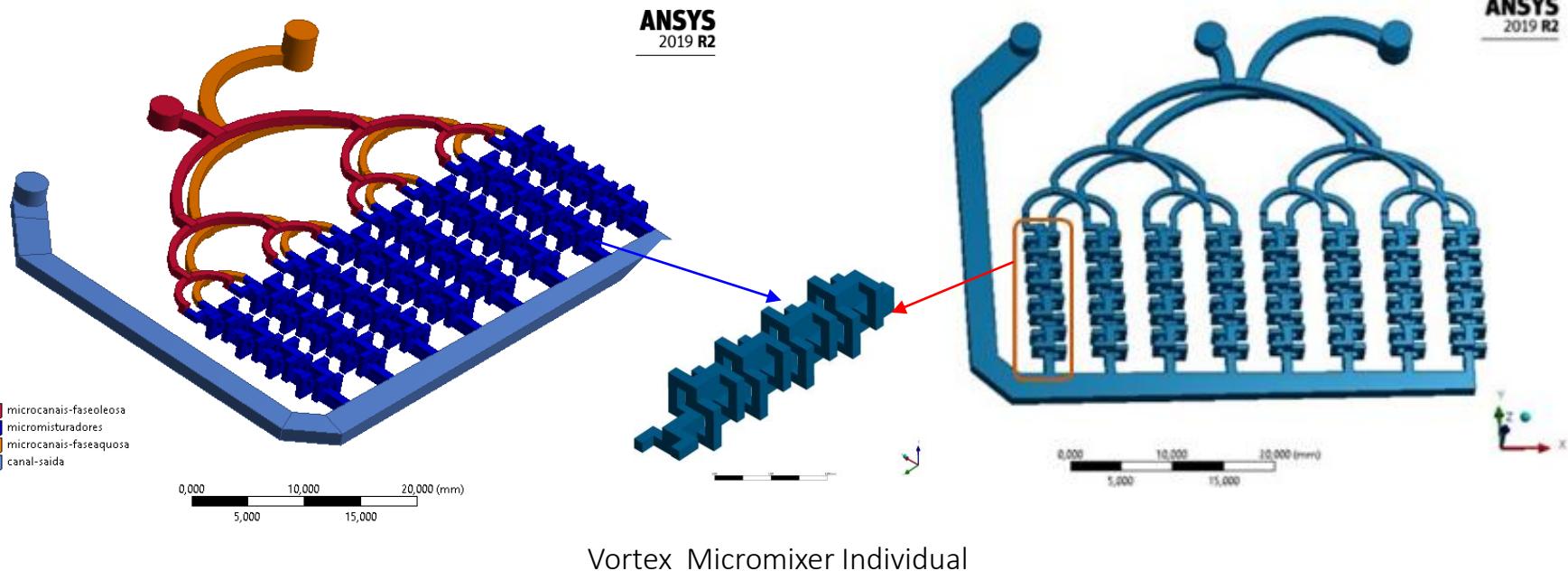


COMO FUNCIONA A FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

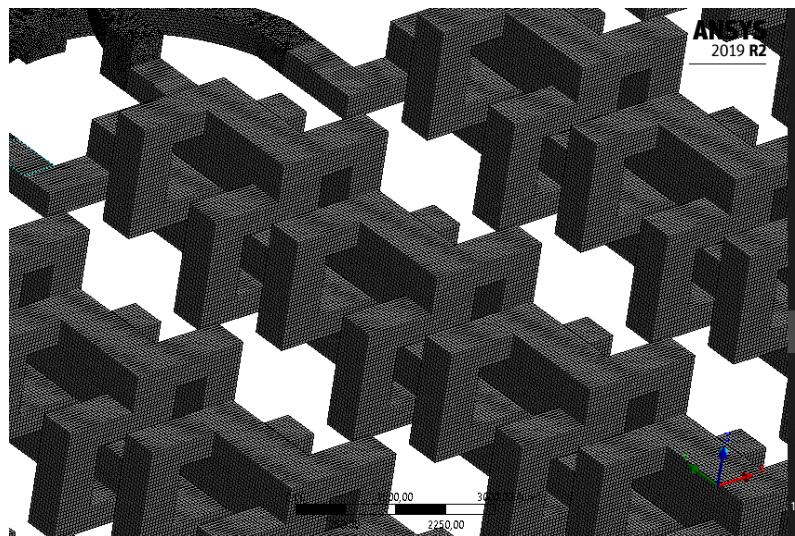
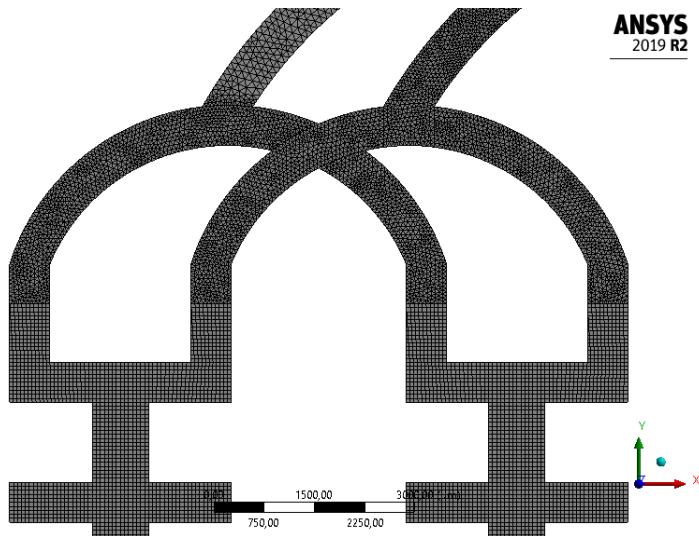
Deve-se ter conhecimento para formular o problema e usar o conhecimento científico para expressá-lo matematicamente



DOMÍNIO DE CÁLCULO DO MICROMIXADOR DE VÓRTICE INTERNO PARALELIZADO



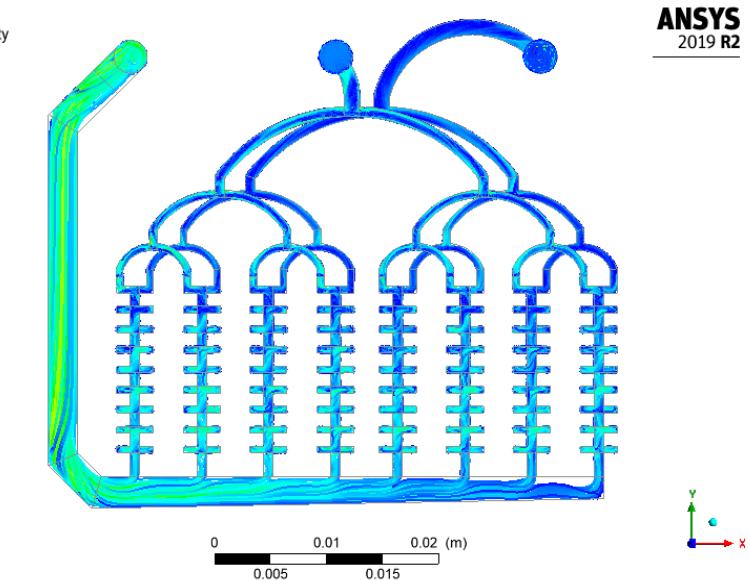
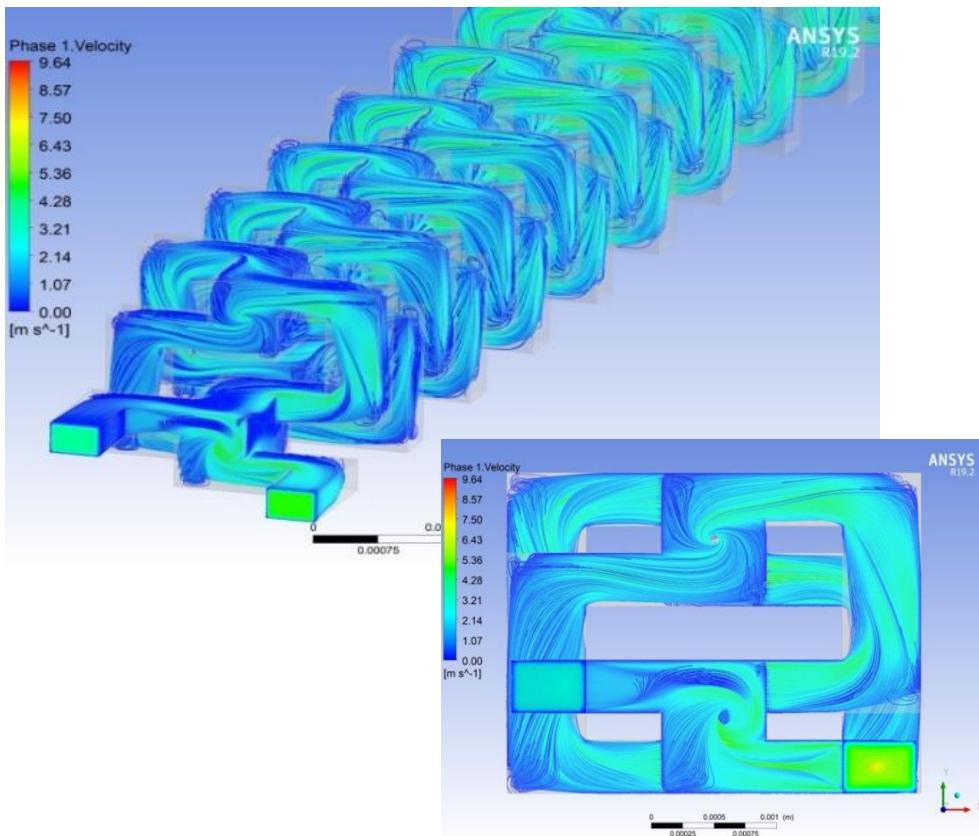
DISCRETIZAÇÃO GEOMÉTRICA: DETALHES DOS CONJUNTOS FORMADORES DE VÓRTICES E MALHAS HEXAÉDRICAS E TETRAÉDRICAS GERADAS



Tamanho médio dos elementos: aprox. 60 a 200 µm.

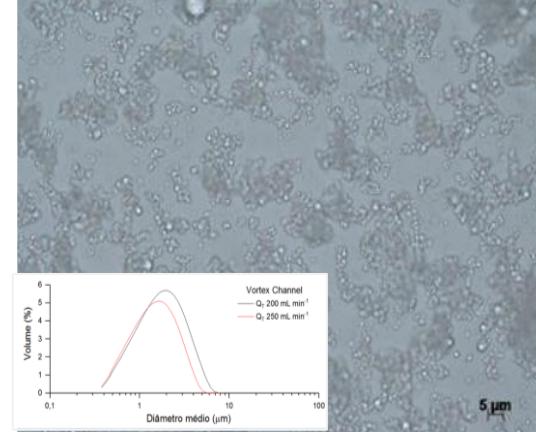
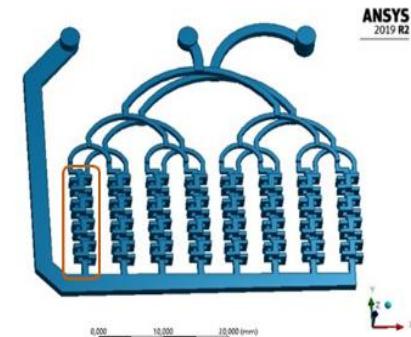
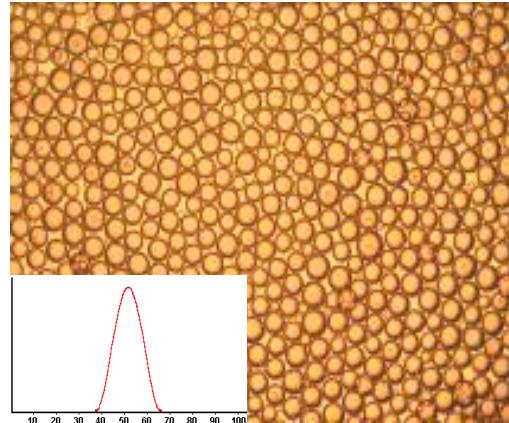
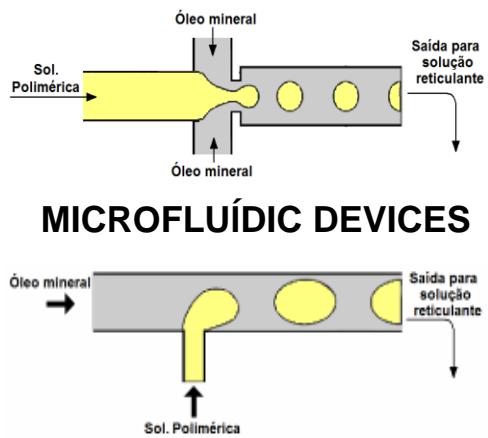
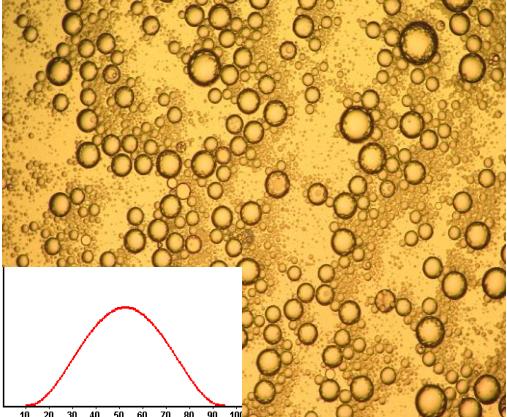
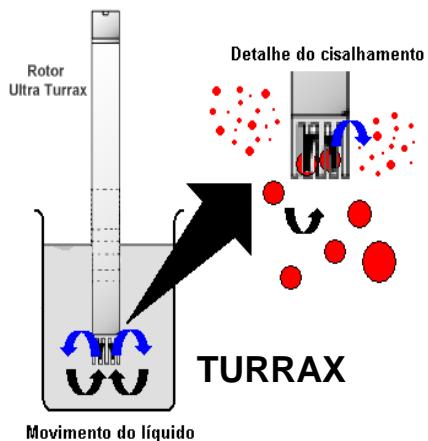
O número de volumes de malha foi de aproximadamente 3.900.000. Valor médio de assimetria: 0,3 e valores de desvio padrão: 0,11.

RESULTADOS DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) LINHAS DE CORRENTE COLORIDAS PELA MAGNITUDE DA VELOCIDADE

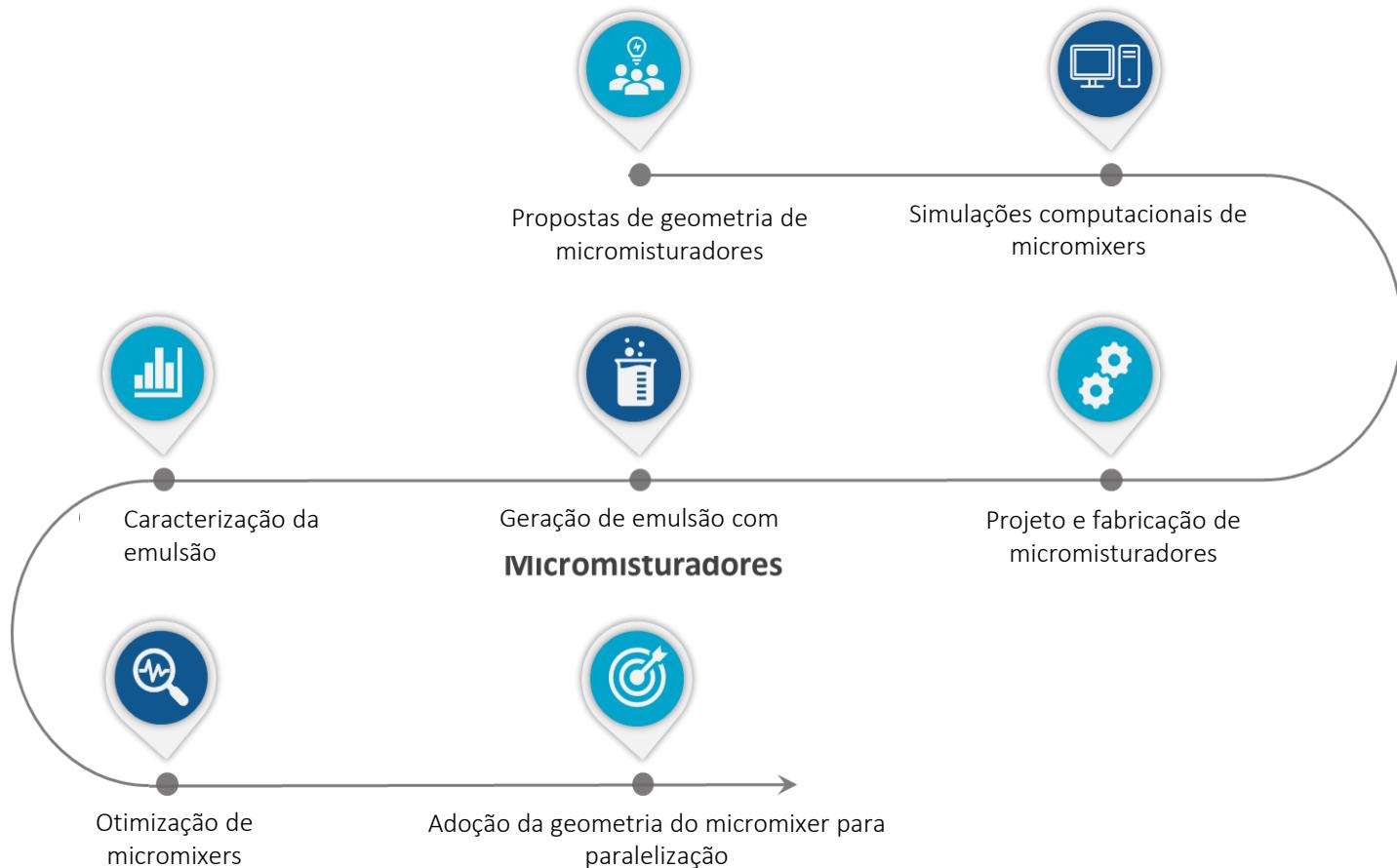


Vazão total: 1.25 L.min⁻¹

EMULSÕES SIMPLES USANDO DISPOSITIVOS MICROFLUÍDICOS



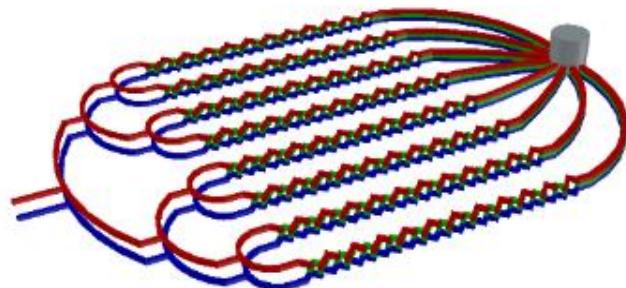
AVALIAÇÃO DE MICROMIXADORES INDIVIDUAIS



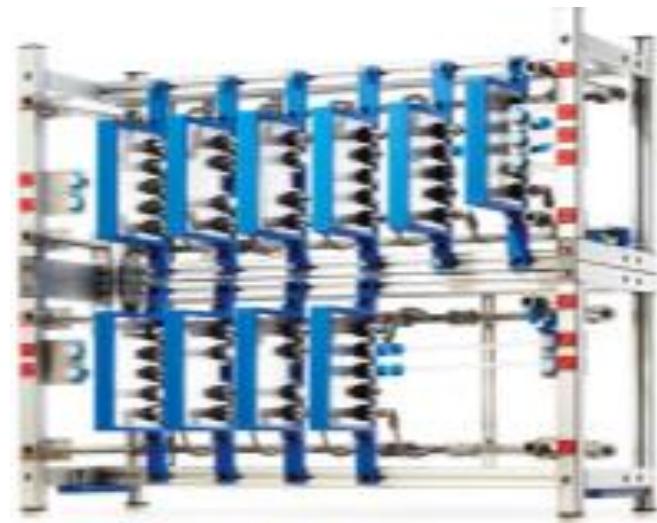
PARALELIZAÇÃO INTERNA E EXTERNA

A paralelização interna se configura como o arranjo, de várias operações unitárias, em paralelo dentro de um microdispositivo.

A paralelização externa é a configuração paralela de vários microdispositivos.

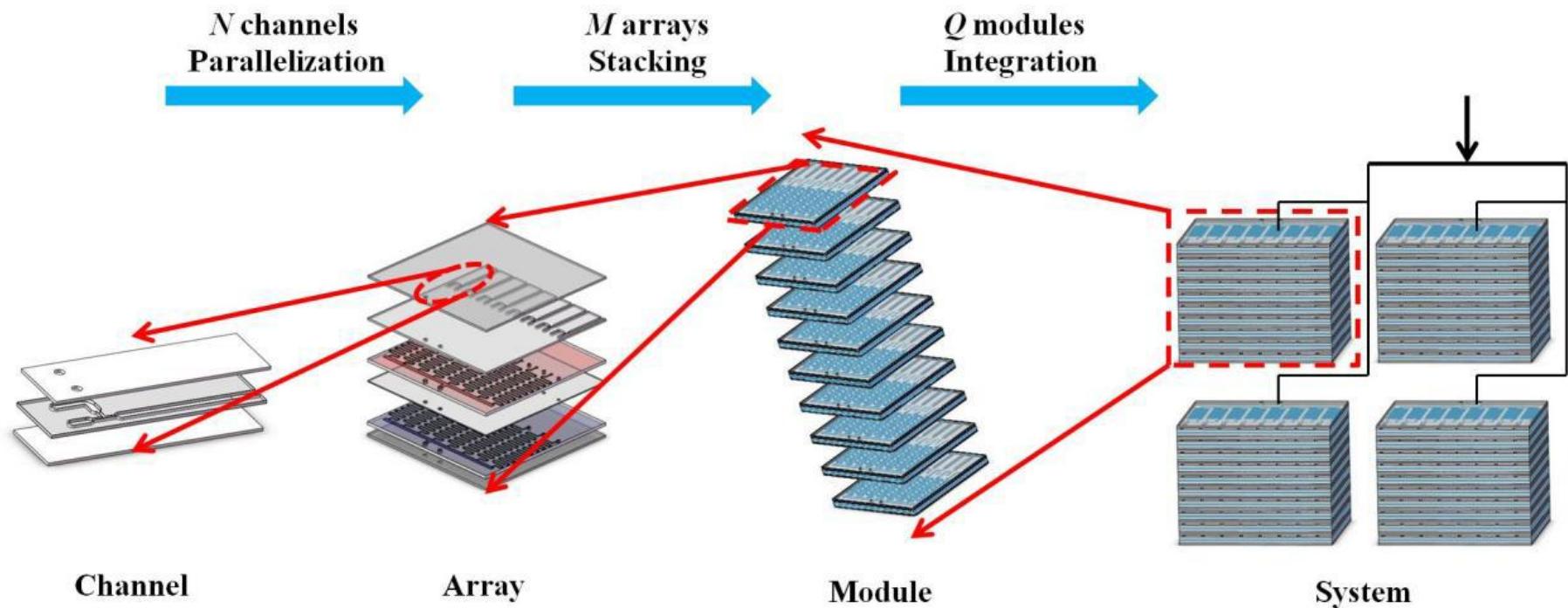


Interna



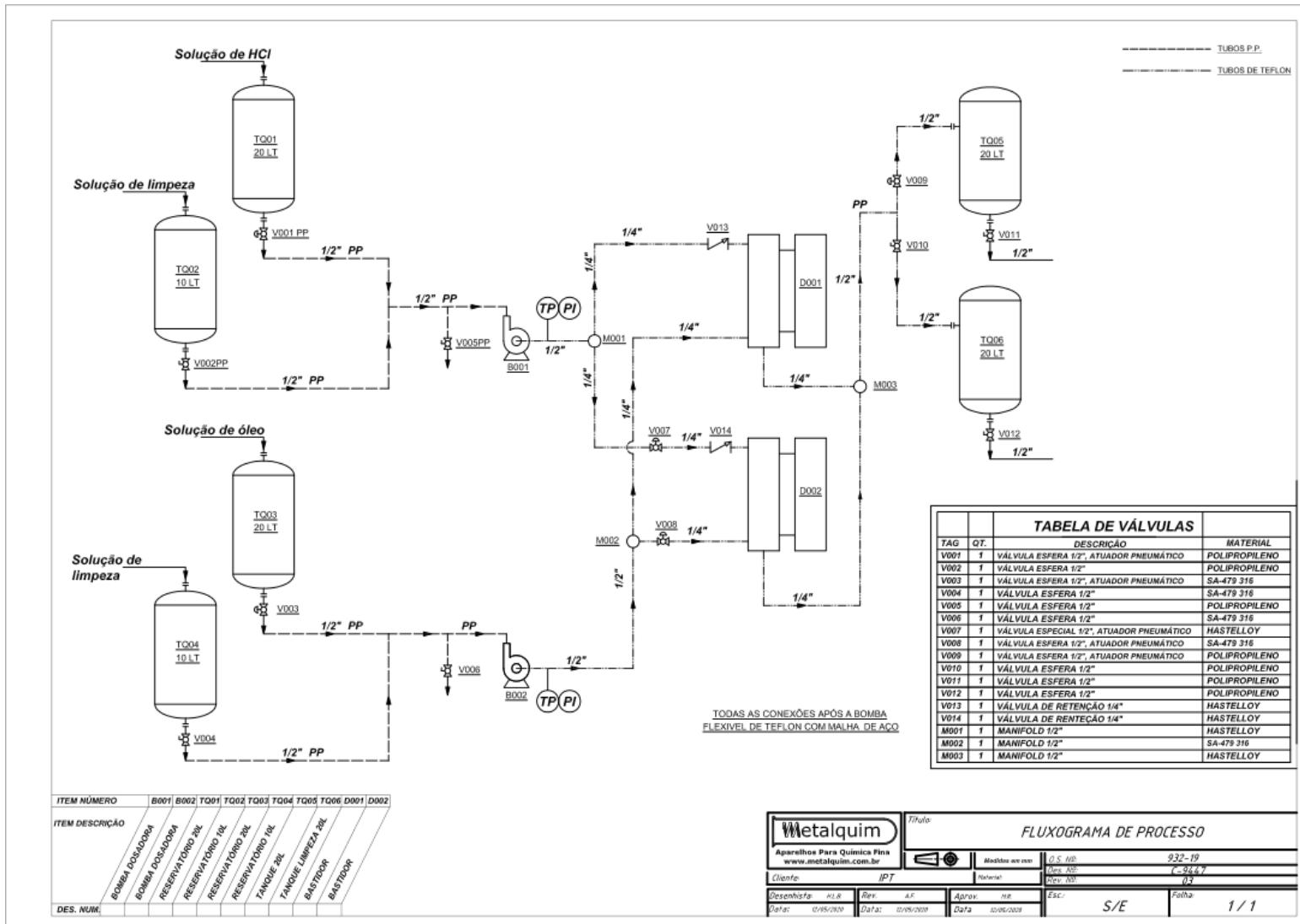
Externa

AUMENTO DE PRODUÇÃO DE PROCESSOS QUÍMICOS MINIATURIZADOS



Source:
(DOI):[10.1016/j.cej.2017.06.028](https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.028)

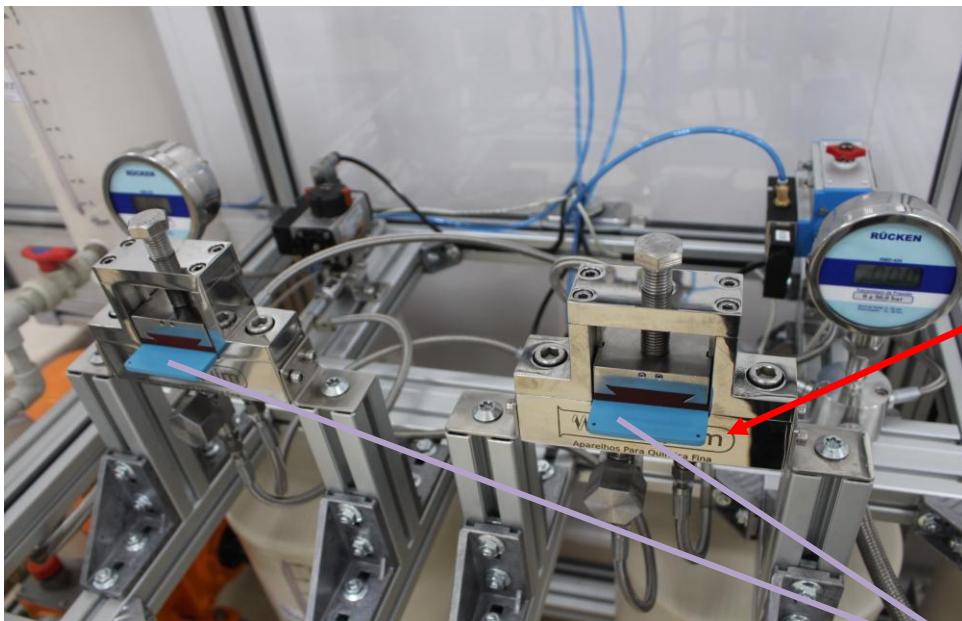
PROJETO DO APARATO EXPERIMENTAL EM ESCALA DE MODELO DE PRODUÇÃO: DIAGRAMA DE FLUXO DO PROCESSO



APARATO EXPERIMENTAL PARA ESCALA DE MODELO DE PRODUÇÃO



PARALELIZAÇÃO EXTERNA DE MICROMISTURADORES

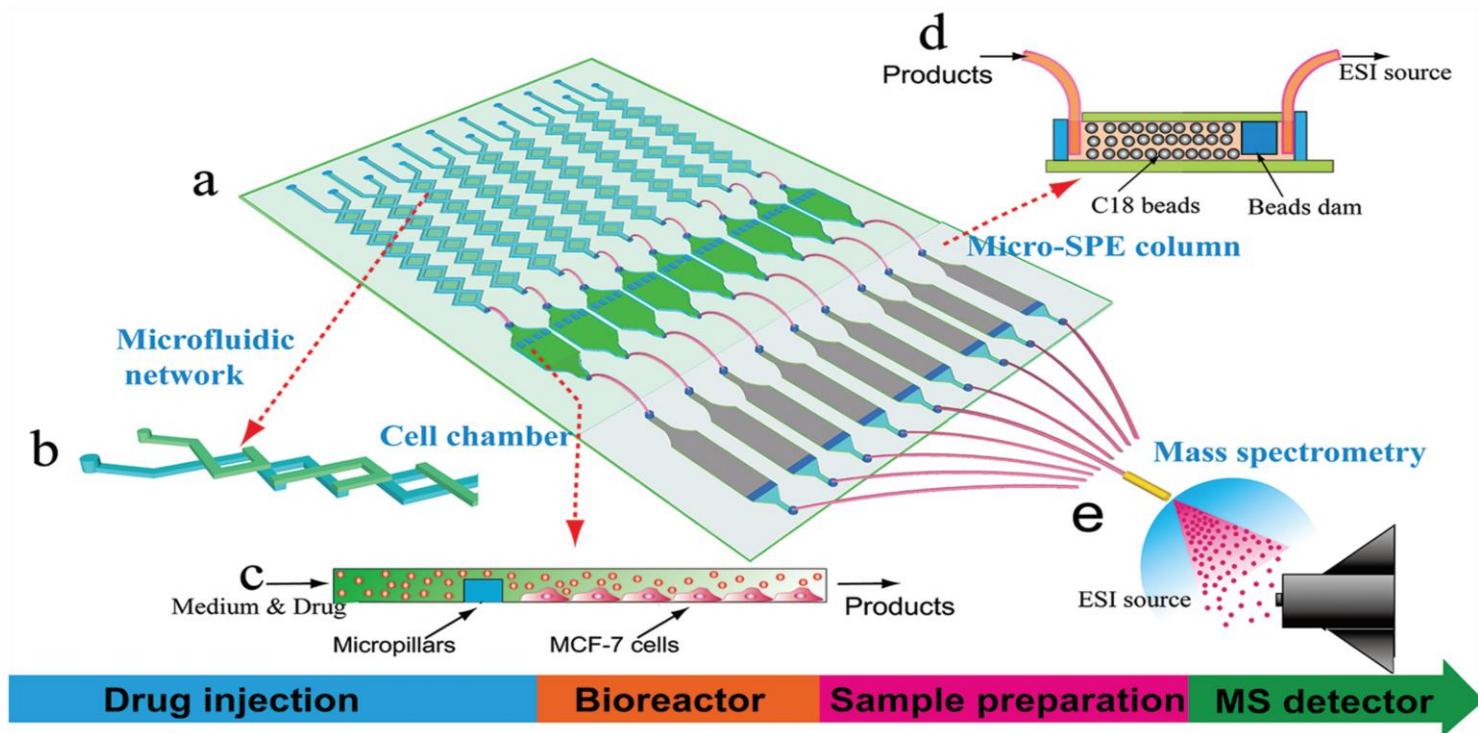


O suporte do rack fixa e conecta o micromixer ao sistema integrado

Micromisturadores paralelizados LTCC

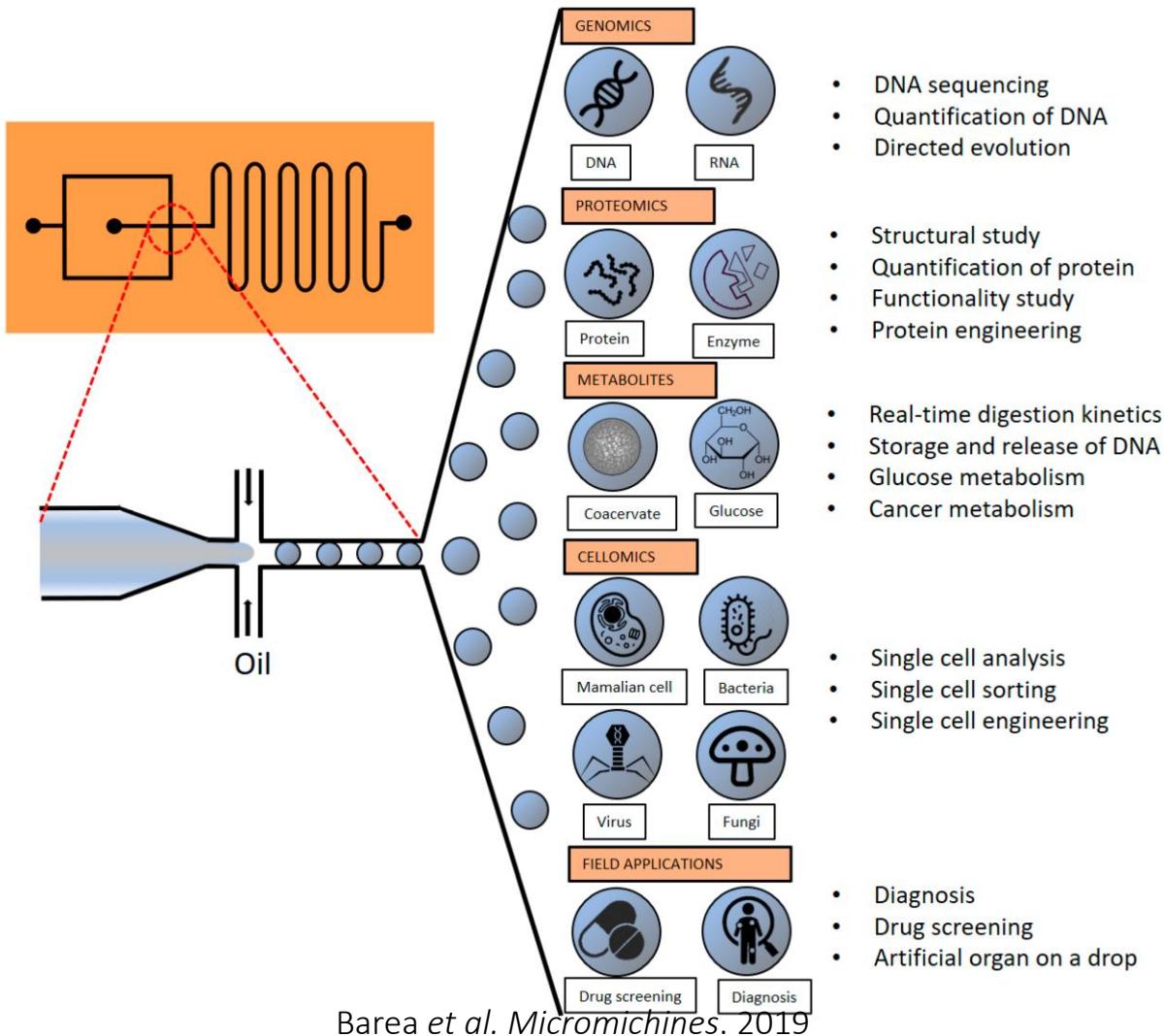


MICROFLUÍDICA EM APLICAÇÕES BIOLÓGICAS

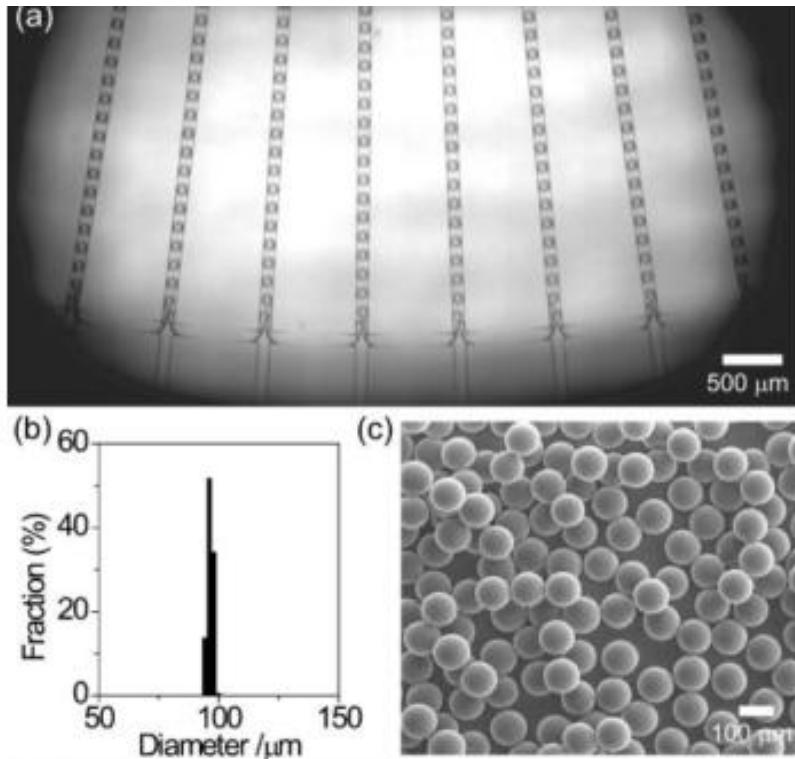


Chen et al. *Chem Eng Proc.* 2019

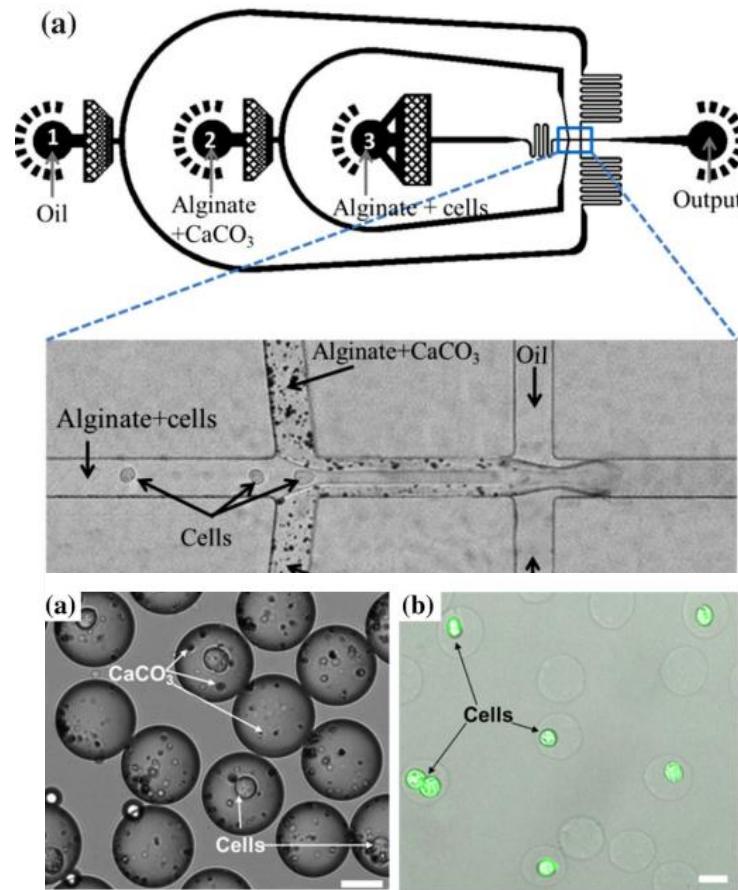
MICROFLUÍDICA DE GOTAS



ENCAPSULAÇÃO CELULAR EM MICROPARTÍCULAS

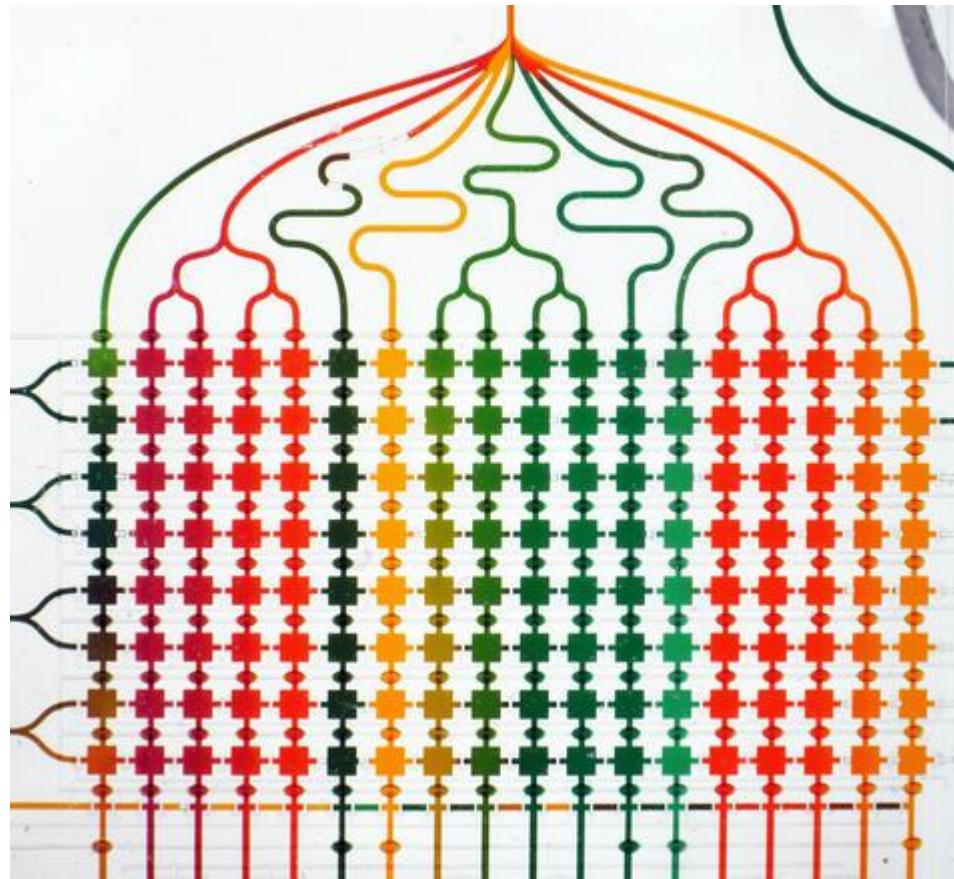


Nisisako & Torii. *Lab on a chip*. 2008



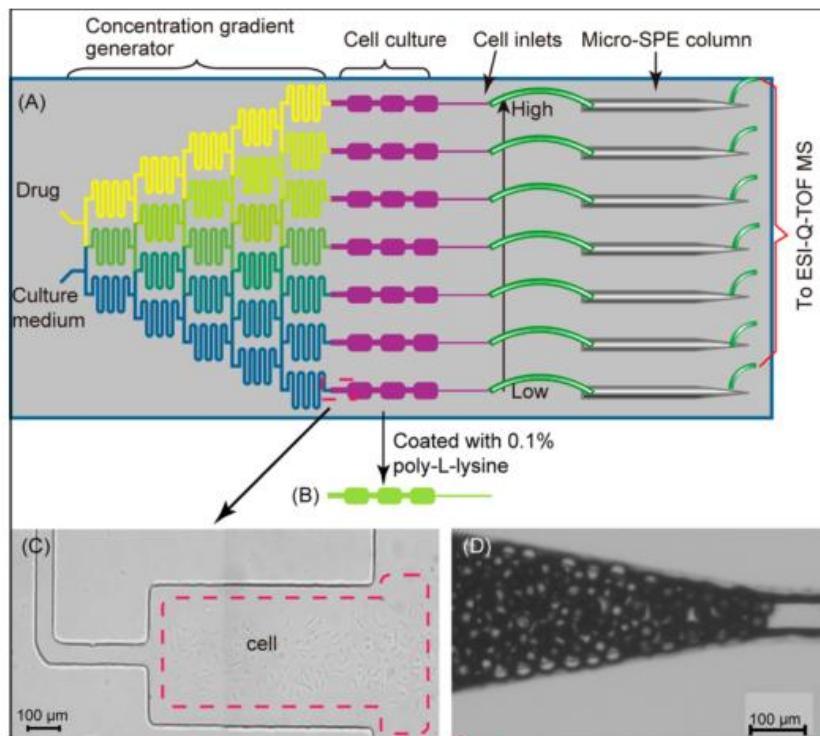
Akbari & Pirbodaghi. *Microf and Nanof*. 2013

MICROFLUÍDICA PARA GERAÇÃO DE GRADIENTES

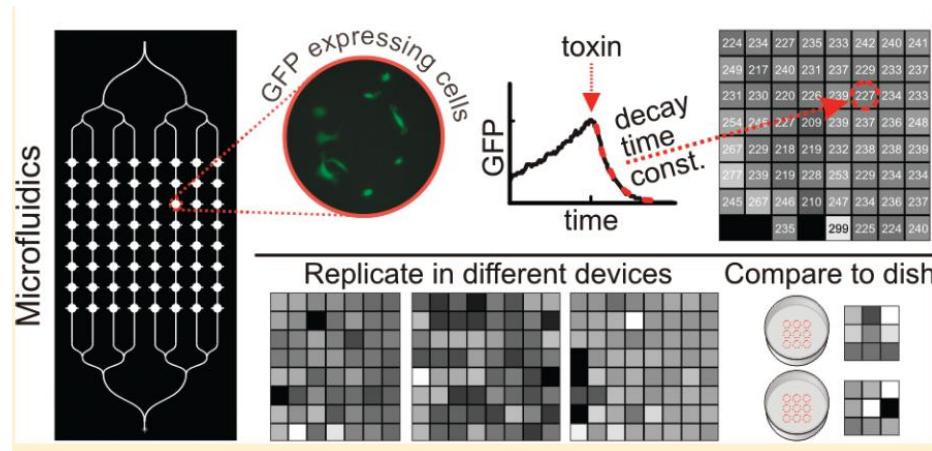


G. Cooksey. Nist

TRIAGEM E TESTES DE NOVOS ATIVOS FARMACEUTICOS



Gao. et al. Anal. Chem. 2012.



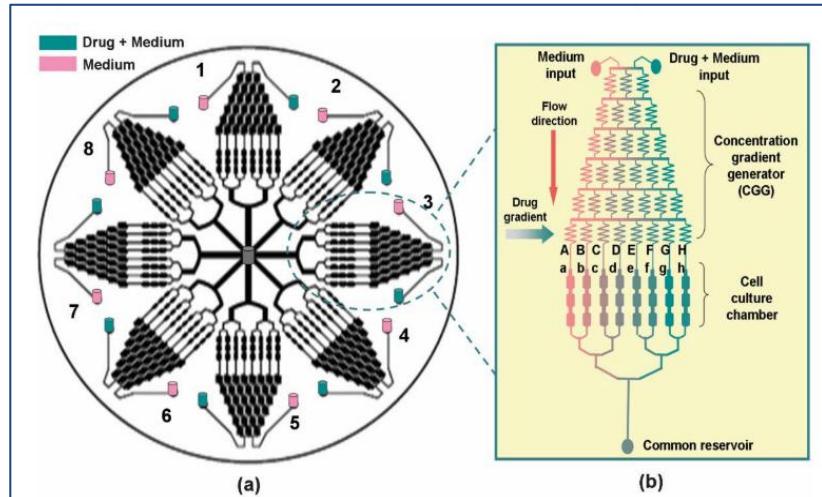
Ensaios de **toxicidade e citotoxicidade**

Avaliação de respostas em **tempo real**

Técnicas convencionais



Ferramentas microfluídicas



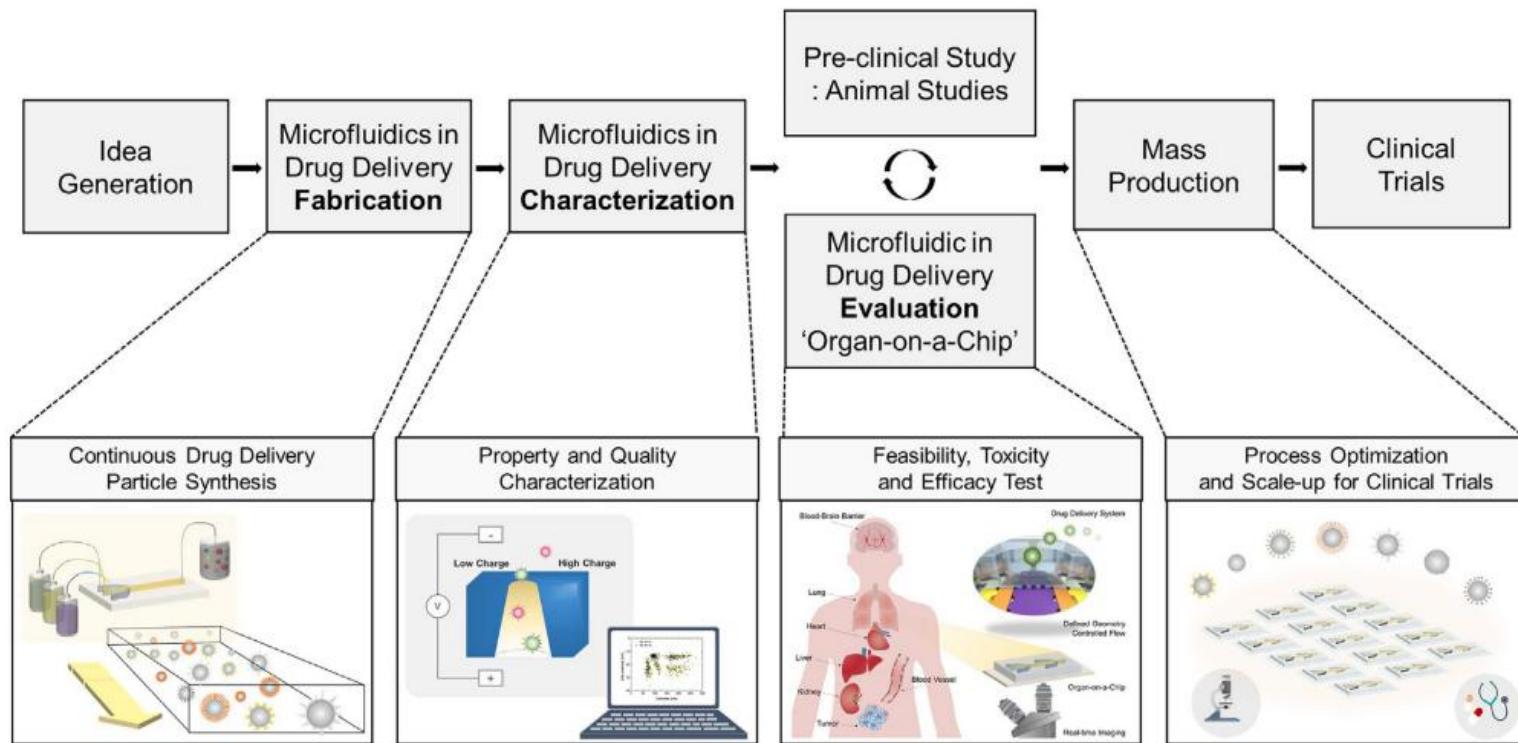
Ye, N. et al. *Lab on a chip*. 2007.

Ensaios numa única plataforma microfluídica

Respostas celulares em diferentes concentrações de um ativo

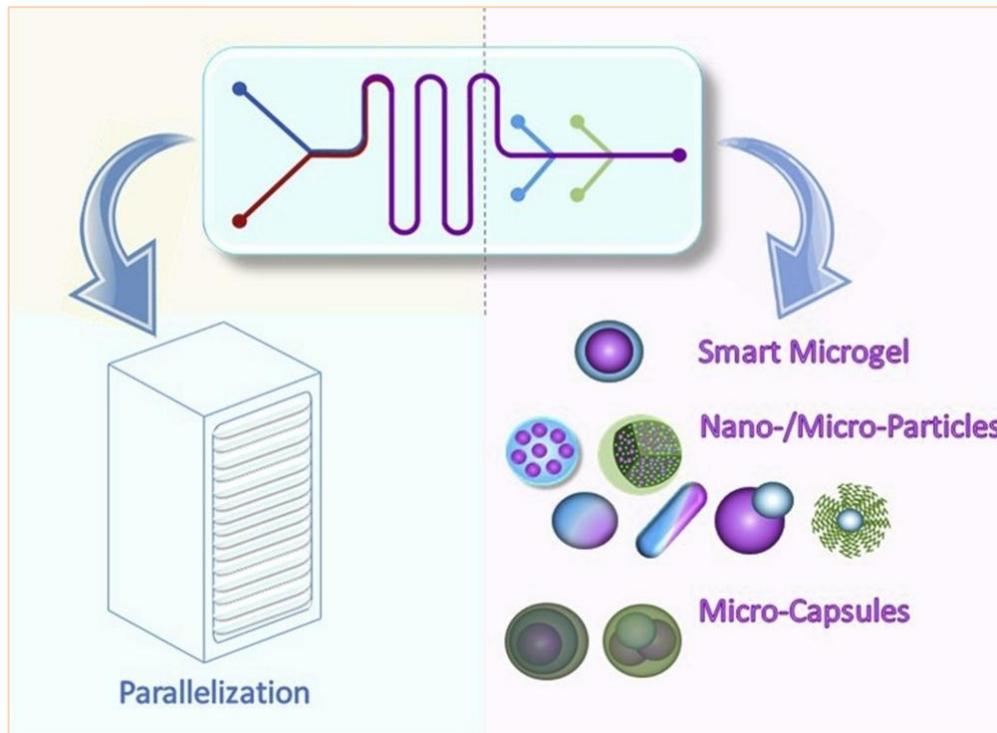
Redução de tempo e custo operacional

MICROFLUÍDICA NO DESENVOLVIMENTO DE NOVOS ATIVOS

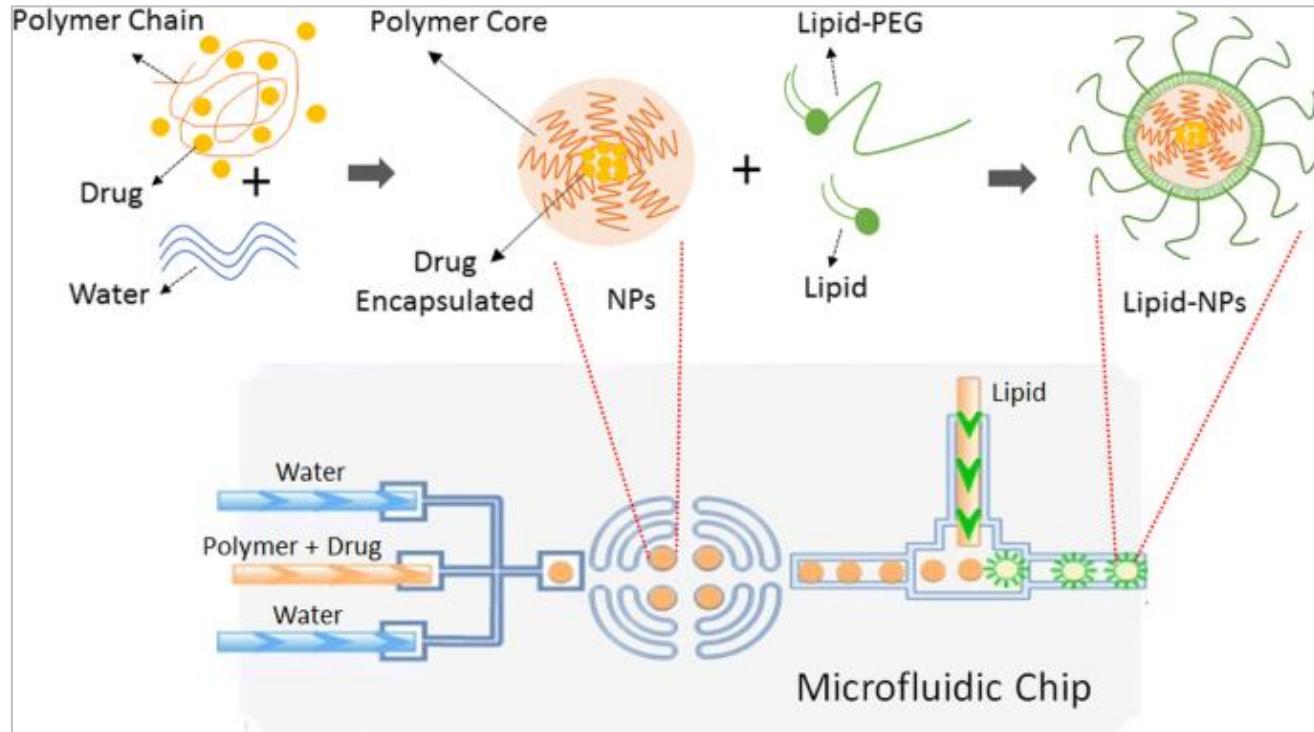


Ahn, J. et al. *Advanced Drug Delivery Reviews*. 2018

MICROFLUÍDICA: SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS



Shallan & Priest. *Chem Eng Proc.* 2019



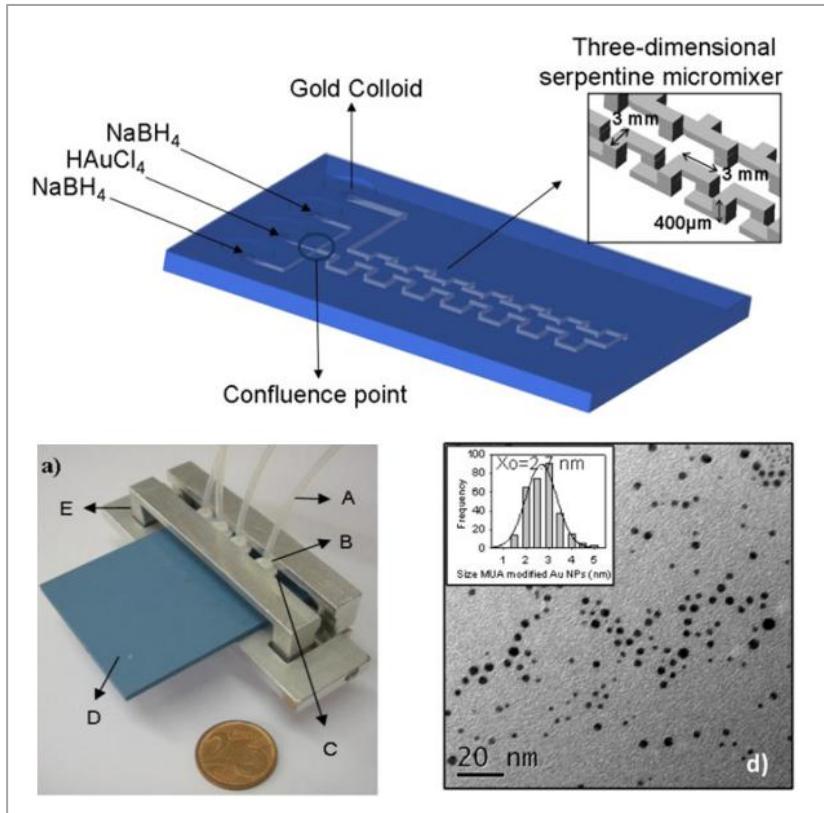
Zhu, et al. *Pharmaceutic Research*. 2020

Síntese de nanopartículas monodispersas

Microambiente controlado e eficiência de mistura

Diferentes estratégias de microrreatores

SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS



Pedro *et al.* *Nanotechnology*. 2010

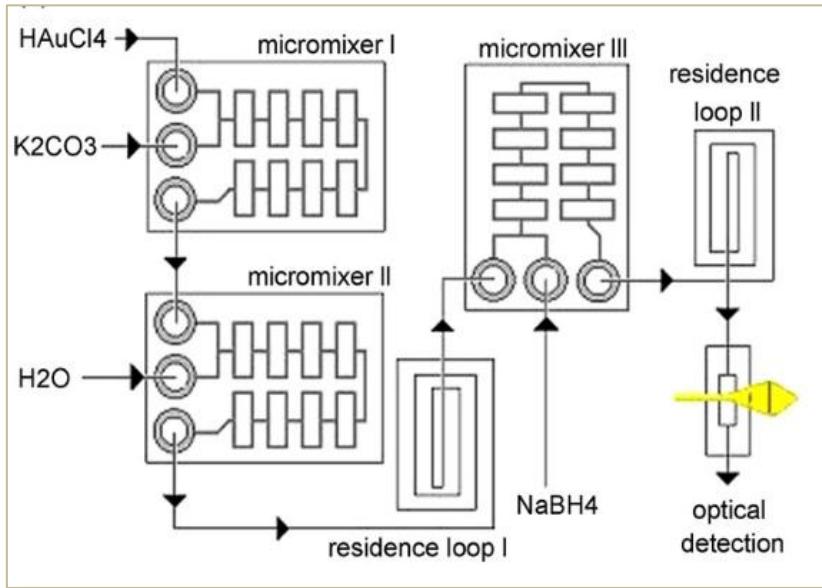
Microrreatores como micromisturadores

Eficiente transferência de massa e calor

Reações em condições controladas

Condições para explorar e desenvolver novas rotas de síntese de nanopartículas

MICRORREATORES PARA NANOPARTÍCULAS METÁLICAS



Wagner *et al.* *Chem Engin J.* 2008

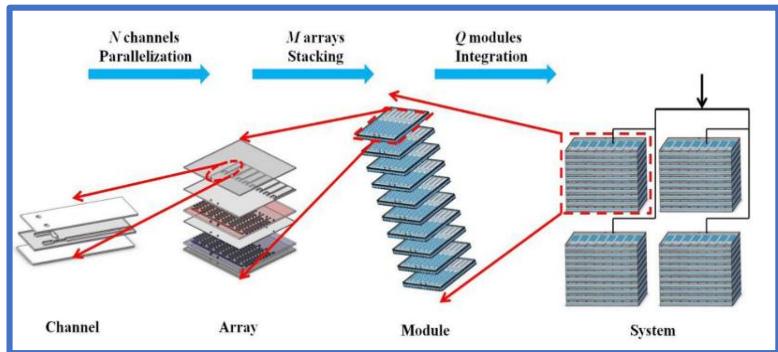
Diferentes etapas de um processo numa única plataforma microfluídica

Microrreatores modulares para processo em fluxo contínuo

Métodos para análise em tempo real

Possibilidade de aumento de escala de produção

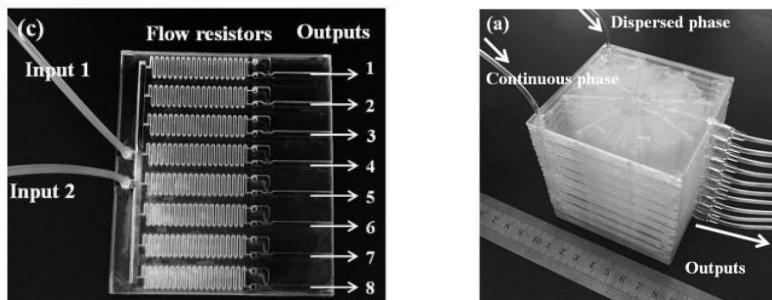
Estratégia de aumento de produção



Microrreatores industriais



Corning



Han *et al.* Chem Eng J. 2017

Plantas modulares e reduzidas

Alta eficiência e reproduzibilidade

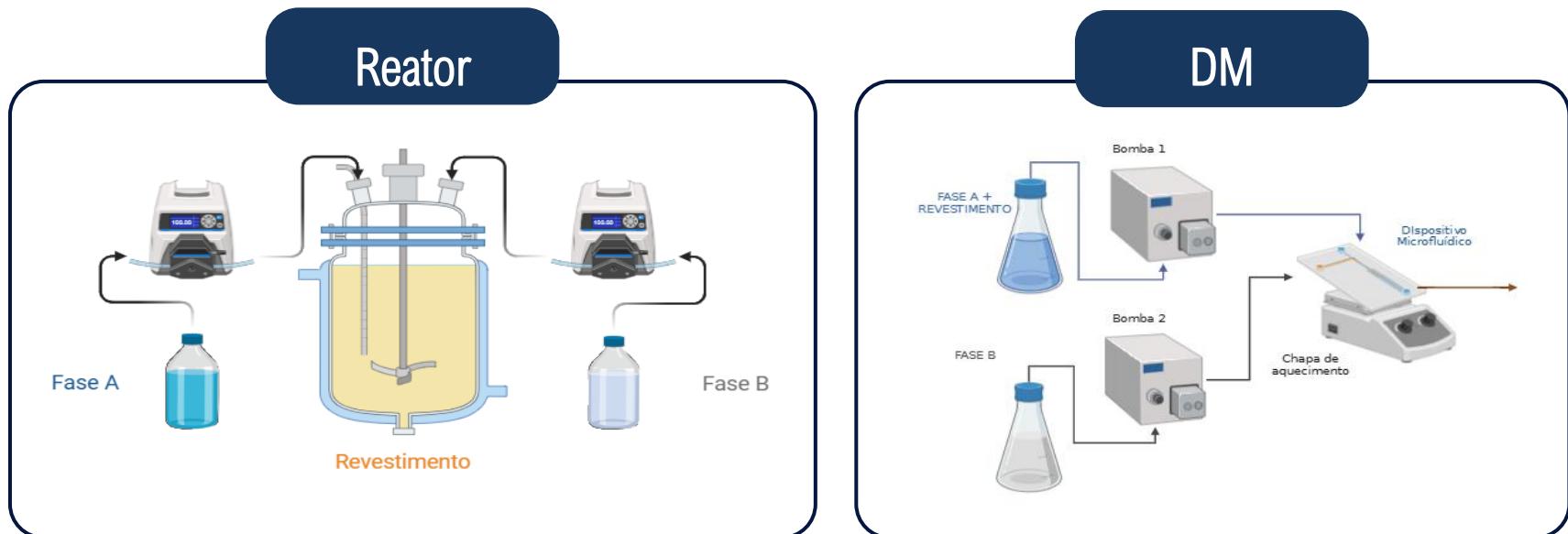
Capacidade de atingir produção em escala industrial

SÍNTESE DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

Caso de Sucesso:

Produção de nanoestruturas a base de cobre metálicas.

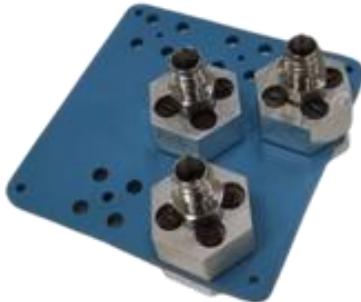
Parceria do IPT-Bionanomanufatura com a CECIL e ABLUO surgiu para transformar o cobre em nanopartículas com propriedades aprimoradas, aplicadas em diversos setores, como medicamentos, suplementos, embalagens, cosméticos, ração animal e revestimentos



DISPOSITIVOS

A partir de 2018 vem sendo realizadas pesquisas conjuntas para obter um produto industrializável usando a miniaturização de processos químicos

2018 – 2020
FASE I



Sistema sextavado

2022 – 2023
FASE II



Sistema sextavado +
janela de experimento

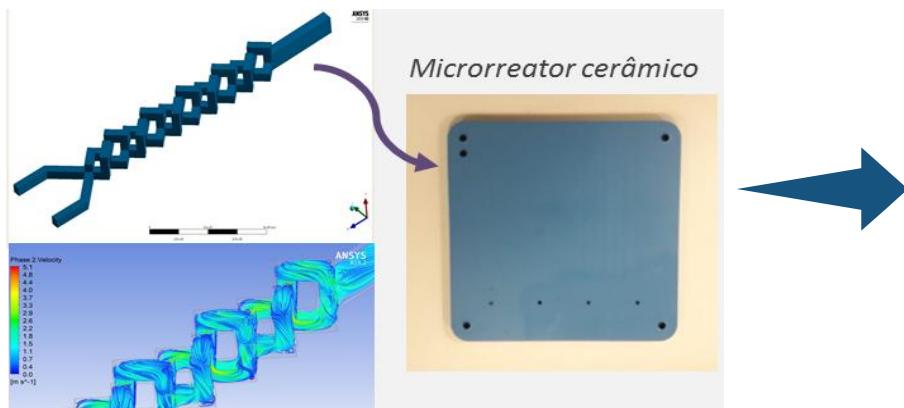
2024 – 2025
FASE III



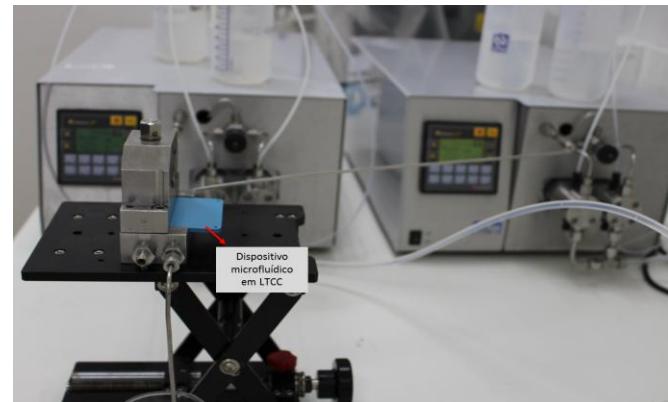
Sistema bastidor

PROCESSO EM ESCALA MODELO DE PRODUÇÃO

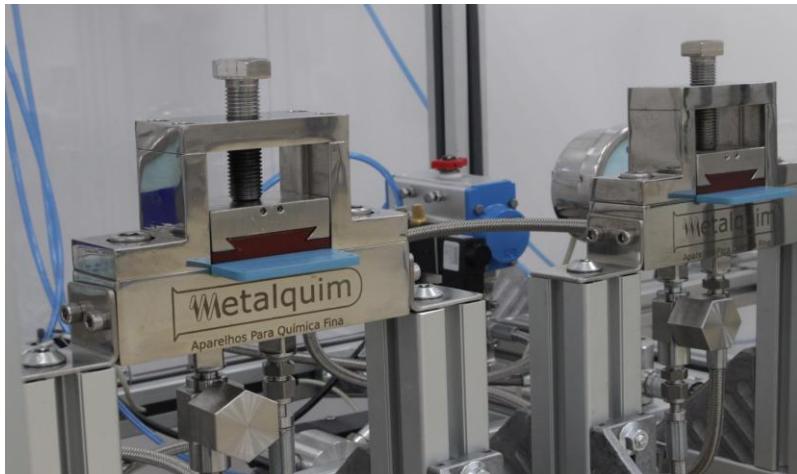
Desenvolvimento em microfluídica



Testes em bancada

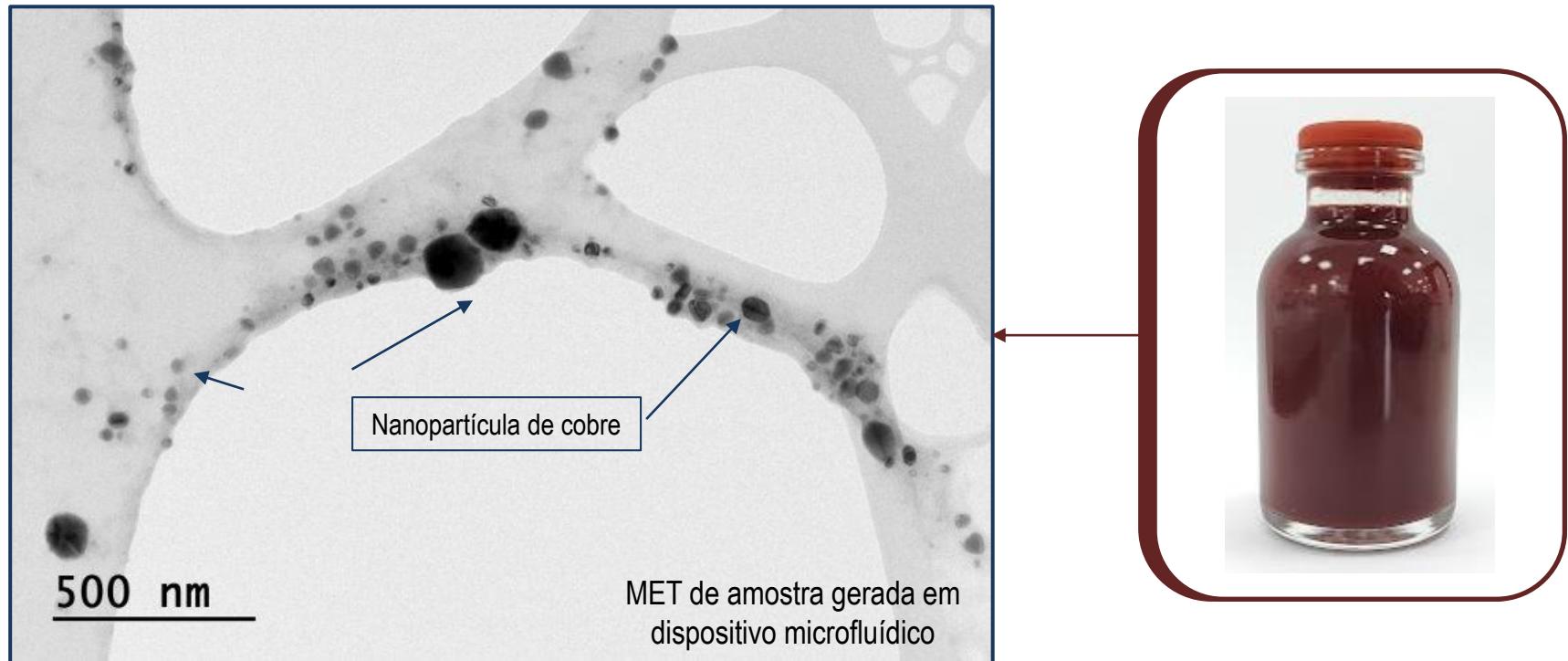


Processo em escala modelo de produção

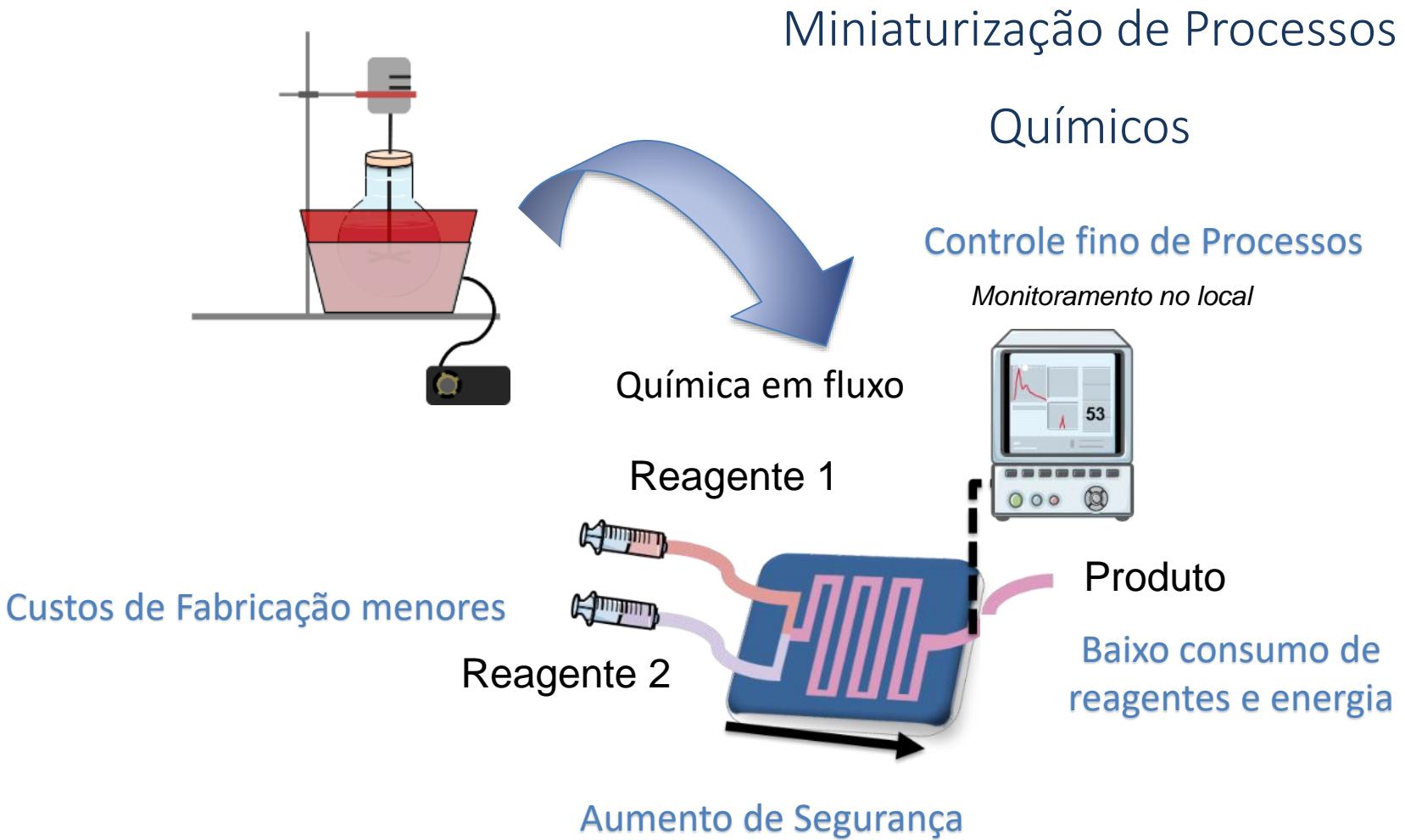


PRODUTO OBTIDO

Foram obtidas nano partículas de 200 nm para a diluição de 10x do produto em água, segundo a análise por DLS, e aproximadamente 140 nm na análise por MET. Foram também observadas partículas menores que 100 nm.

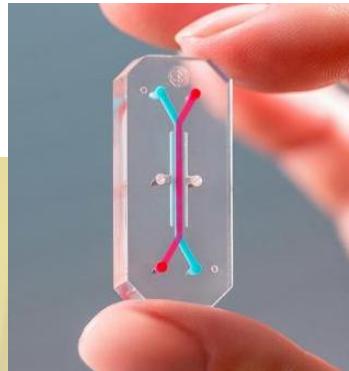


CONCLUSÃO



LABORATÓRIO DE MICROMANUFATURA

Microtecnologias



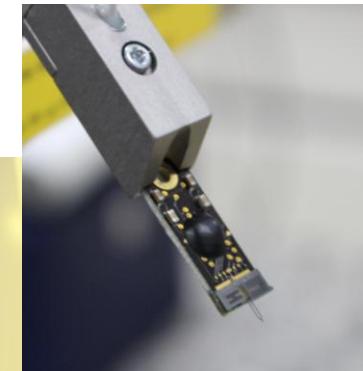
TECNOLOGIAS EM
MICROFLUÍDICA



MICRORREATORES
CERÂMICOS



ESCALA MODELO
DE PRODUÇÃO



SISTEMAS MICRO
ELETROMECÂNICOS

NÚCLEO DE BIONANOMANUFATURA



- LPP - Lab. Processos Químicos e Tecnologia de Partículas

Nanotecnologia e processos químicos avançados

LBI - Laboratório de Biotecnologia Industrial

Desenvolvimento e caracterização de soluções biotecnológicas

LMI - Lab. de Micromanufatura

Miniaturização e intensificação de processos e desenvolvimento de sensores e atuadores.

Seu desafio é nosso.

Bionanomanufatura

Obrigada!