

# Dispositivos optoeletrônicos estratégicos: fotodetectores de infravermelho, células fotovoltaicas e *lab-on-a-chip*



Seminário CEFET- RJ  
Dezembro 2022

Patrícia Lustoza de Souza



# Equipe

PUC-Rio, IEAv, IME,  
UFRJ e CEFET- RJ



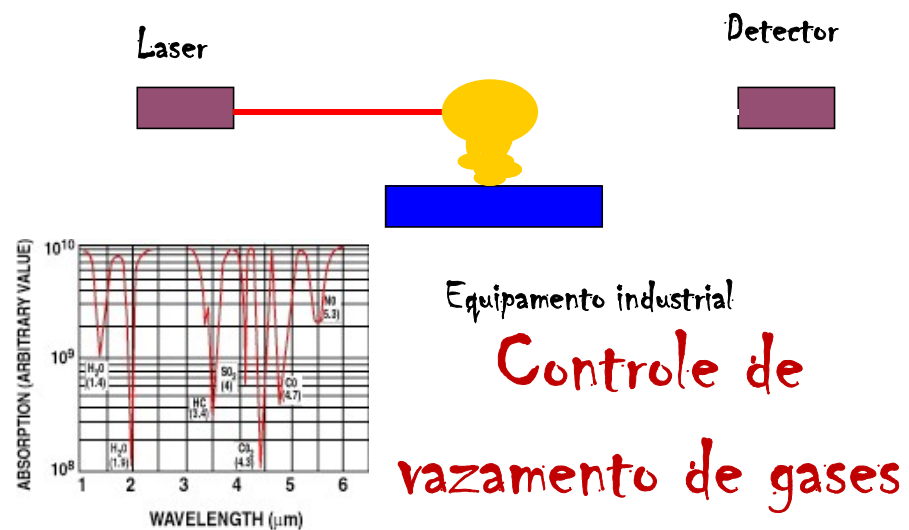
# DISPOSITIVOS DE FOTODETECÇÃO: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

## *Dispositivos estratégicos:*

- *Fotodetectores de infravermelho*

Os fotodetectores de infravermelho, em função de suas aplicações militares, são difíceis de serem adquiridos no mercado internacional apesar das inúmeras aplicações civis, daí a necessidade de se desenvolver essa tecnologia no país. Sensores de infravermelho possuem uma gama enorme de aplicações.

# Aplicações de detecção no infravermelho

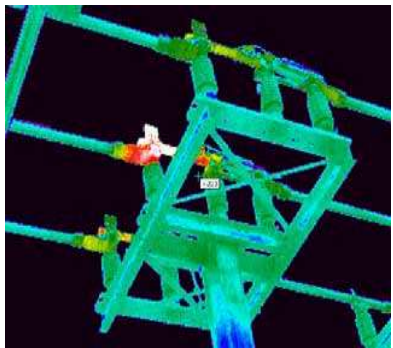




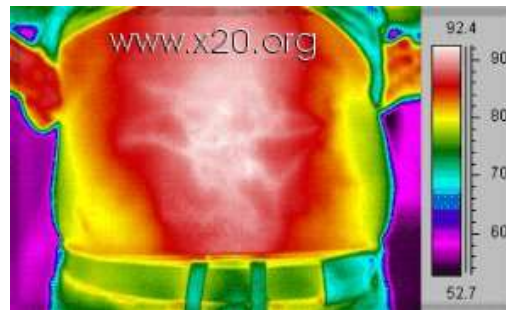
# Aplicações de detecção no infravermelho



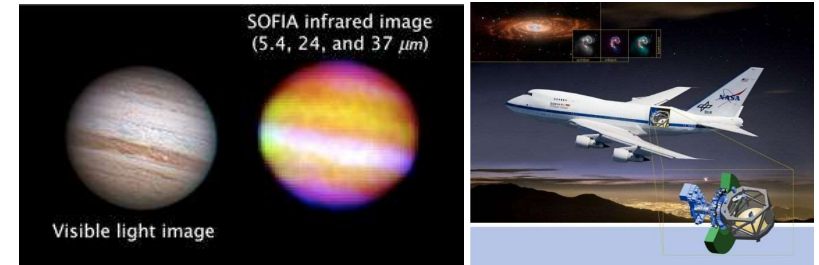
## Imageamento



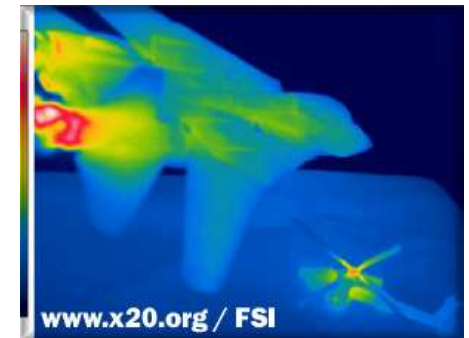
## Medicina



## Astronomia



## Militar



# DISPOSITIVOS DE FOTODETECÇÃO: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

## *Dispositivos estratégicos:*

- *Fotodetectores de infravermelho*

Os fotodetectores de infravermelho, em função de suas aplicações militares, são difíceis de serem adquiridos no mercado internacional apesar das inúmeras aplicações civis, daí a necessidade de se desenvolver essa tecnologia no país. Sensores de infravermelho possuem uma gama enorme de aplicações.

- *Células fotovoltaicas*

A pesquisa científica e tecnológica na área de conversão de energia solar em energia elétrica é fundamental para melhorar a qualidade da matriz energética no mundo todo e, em particular, no Brasil e também para utilizá-la de forma mais eficiente em satélites espaciais, onde seu uso é mandatório.



# DISPOSITIVOS DE FOTODETECÇÃO: CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

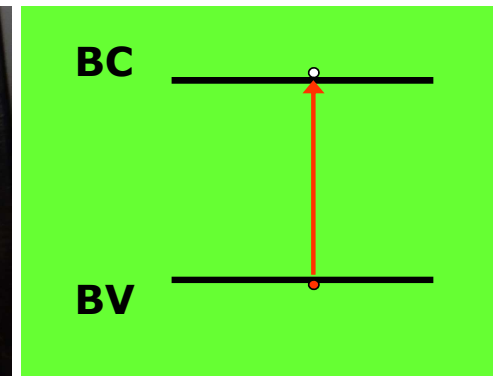
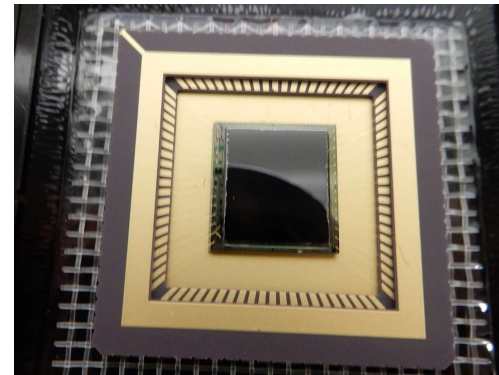
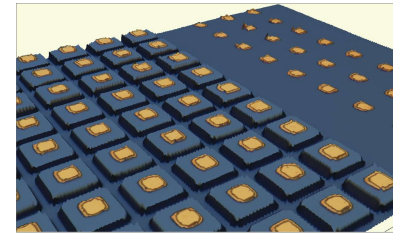
- A. Fotodiodos para o SWIR baseados em semicondutores III-V*
- B. QWIPs usando superredes assimétricas*
- C. Células fotovoltaicas de junção tripla*

# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO

## *Fotodiodos para o SWIR baseados em semicondutores III-V*

1 a 1,7  $\mu\text{m}$  faixa do SWIR

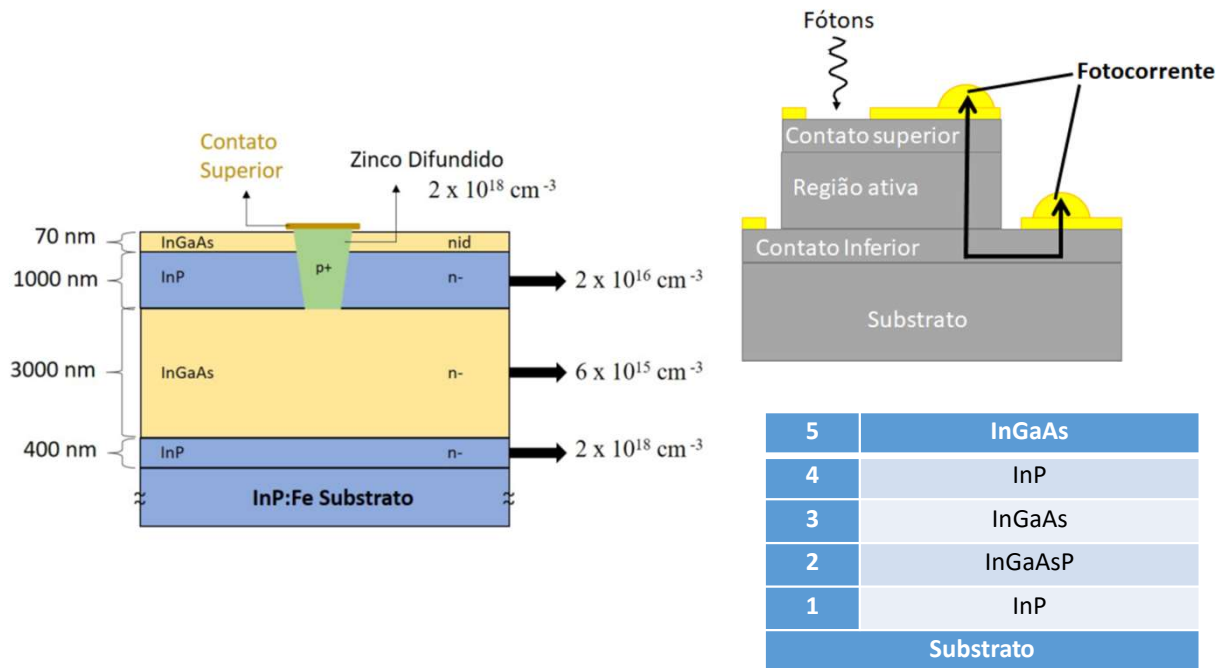
- sensoriamento remoto, avaliação de coberturas vegetais e cursos d'água
- combate a incêndios florestais
- localização de pistas clandestinas
- visualização em missões noturnas
- segunda cor em sistemas de identificação e rastreamento de alvos aéreos
- designadores de alvos
- auxílio a diagnósticos e acompanhamento de tratamento médicos





# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO PARA O SWIR

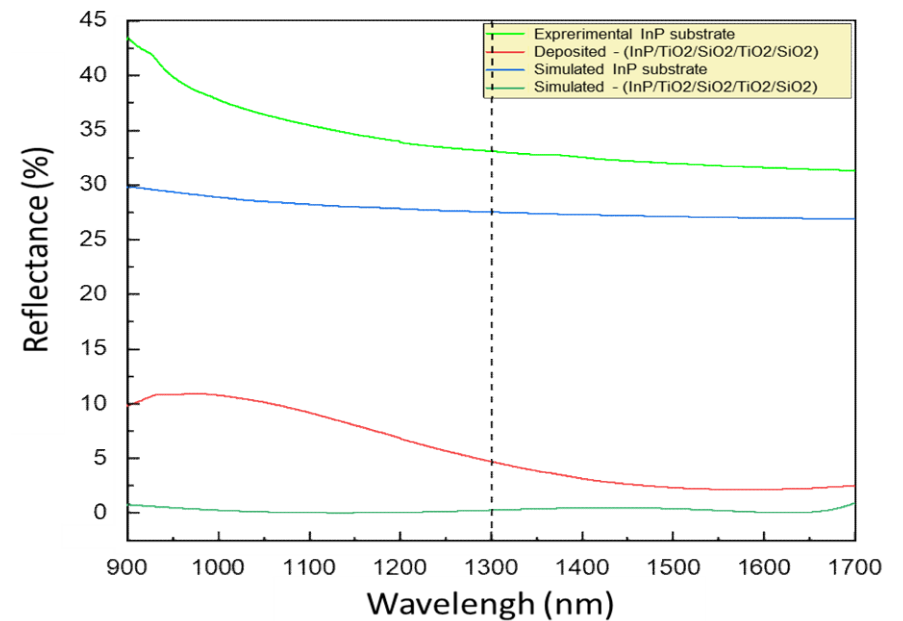
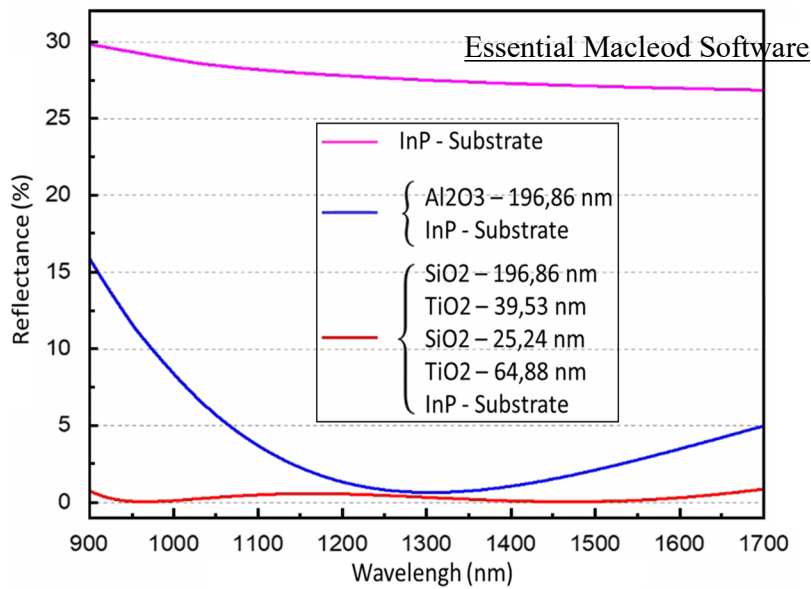
## Fotodiodos para o SWIR baseados em semicondutores III-V



- Desenvolver um fotodetector de InGaAs/InP de baixa corrente reversa para a faixa do SWIR em geometria planar.
- Obter filmes antirreflexo sobre substratos de InP depositados por *sputtering*.

# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO PARA O SWIR

## CAMADA ANTIREFLEXO SOBRE InP

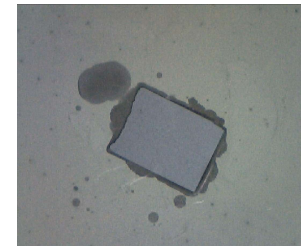




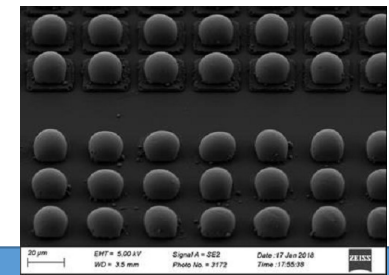
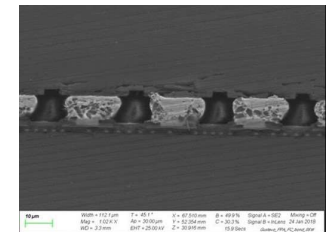
# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO PARA O SWIR

## AFINAMENTO DE SUBSTRATO/EVAPORAÇÃO DE In

Processo de afinamento de substratos de InP por abrasão mecânica. Esse processo é particularmente desafiador devido à fragilidade mecânica do material. Espessuras próximas das desejáveis já foram obtidas, mas o desenvolvimento continuará visando espessuras ainda menores e garantia de reprodutibilidade do processo.



Deposição de filmes espessos de In. Esses filmes visam o acoplamento face a face entre matrizes de sensores e circuitos integrados de leitura. O In não pode ser evaporado em evaporadoras que depositam metais de ponto de fusão elevado devido ao risco.



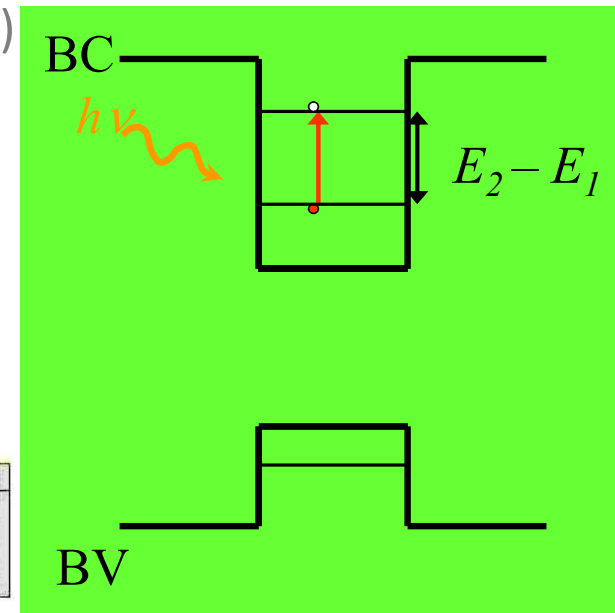
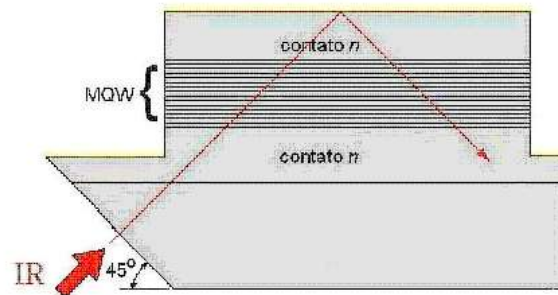
# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: QWIPs

## *QWIPs usando superredes assimétricas*

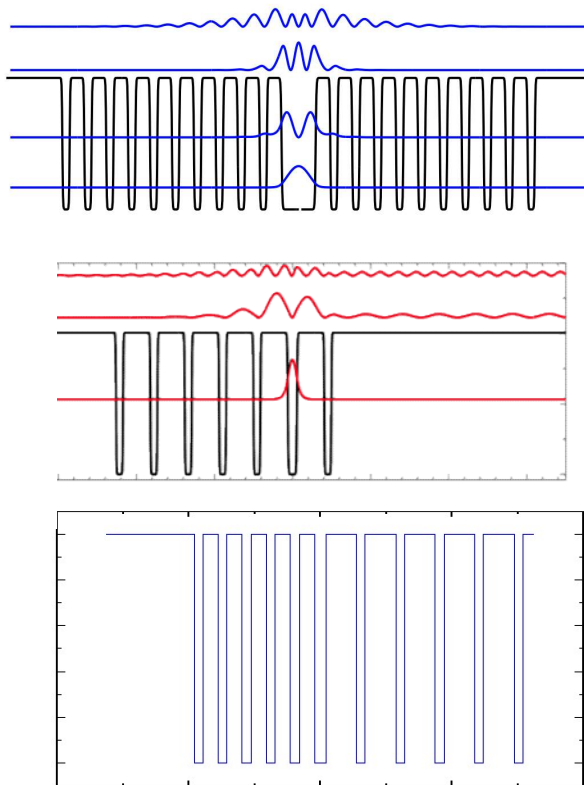
As faixas do MWIR (2 a 5  $\mu\text{m}$ ), LWIR (8 a 14  $\mu\text{m}$ ) e VLWIR ( $>14 \mu\text{m}$ )

- detecção de gases tóxicos
- imageamento noturno
- comunicações ópticas no espaço livre

Para tal QWIPs



# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: QWIPs

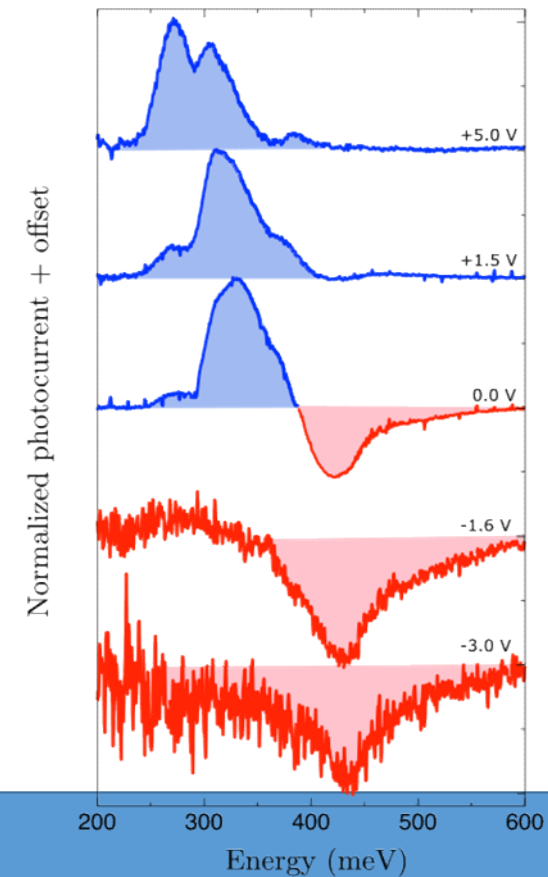
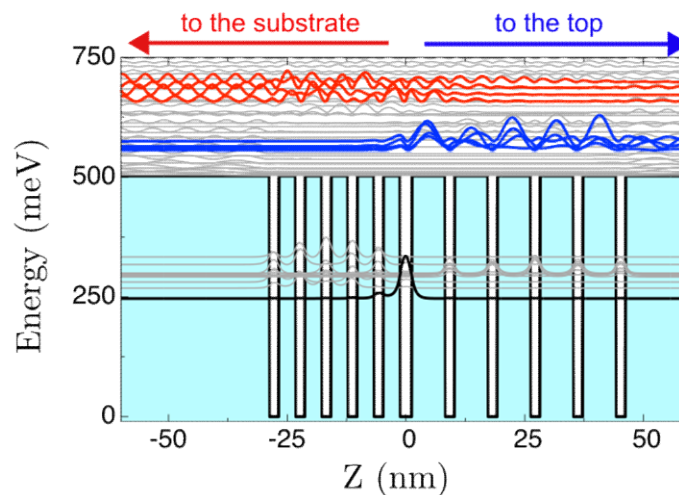


InGaAs:n	500nm [Si]		
InAlAs	30nm		
InGaAs	Well	} X10	} X20
InAlAs	Barrier		
InGaAs:n	Central Well [Si]	} X10	
InAlAs	Barrier		
InGaAs	Well		
InAlAs	30nm		
InGaAs:n	500nm [Si]		
InP:n Buffer	100nm		
InP	Substrate		

- Obter QWIPs com superrede assimétrica operando de forma dual, detectando dois comprimentos de onda.
- Demonstrar a sintonizabilidade de QWIPs com superrede.

# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: *QWIPs usando superredes assimétricas - QBMD*

- Fotodetector fotovoltaico e fotocondutivo
- Detecção de duas cores a 0V
- Seleção de comprimento de onda por aplicação de tensão
- Figuras de mérito comparáveis com detectores da literatura





# FOTODETECTORES DE INFRAVERMELHO: *QWIPs usando superredes assimétricas - QBMD*

## Sistema de monitoramento de gás com um Quantum Bragg Mirror Detector QBMD assimétrico

Integração de tecnologia desenvolvida nacionalmente

- QBMD (LSDOpto – UFRJ + LabSem – PUC-Rio)
- CTIA-ROIC (OptMA Lab - UFMG)

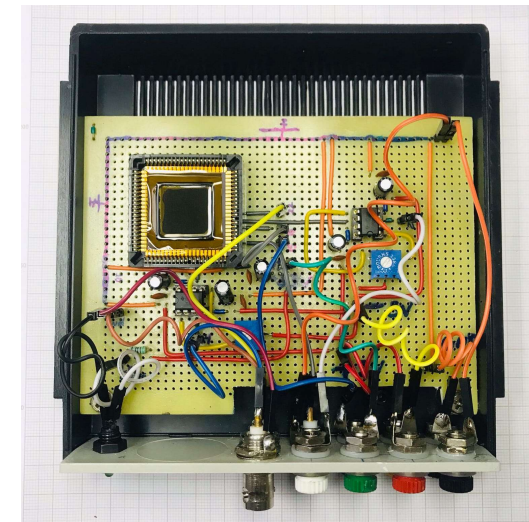
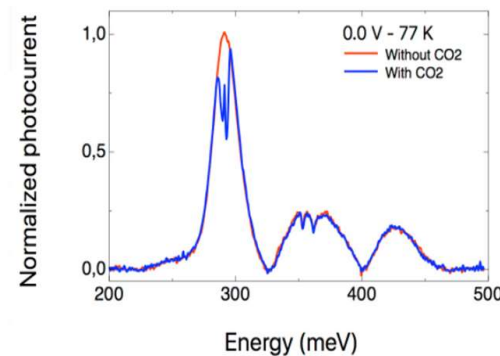
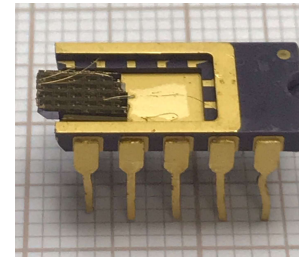
Detecção na faixa do infravermelho médio - MIR

Monitoramento de gás CO<sub>2</sub> -  $\lambda = 4,2 \mu\text{m}$

Temperatura ambiente de trabalho - T = 300 K

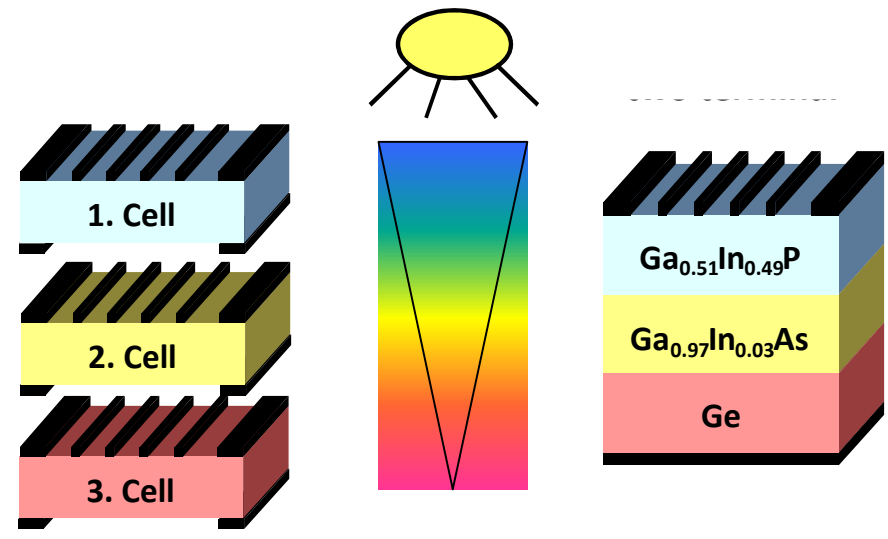
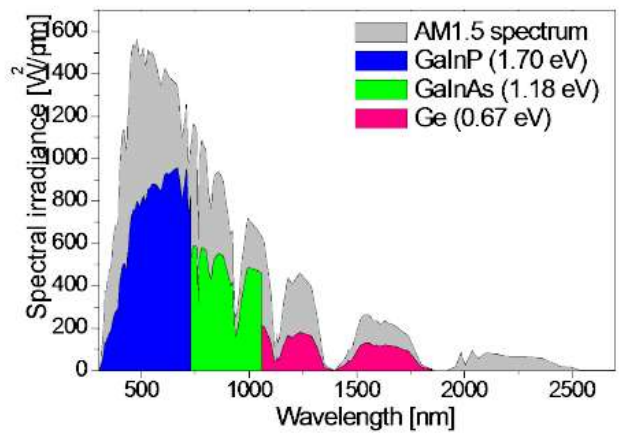
Modo fotovoltaico e fotocondutivo

Dispositivo Dual-color

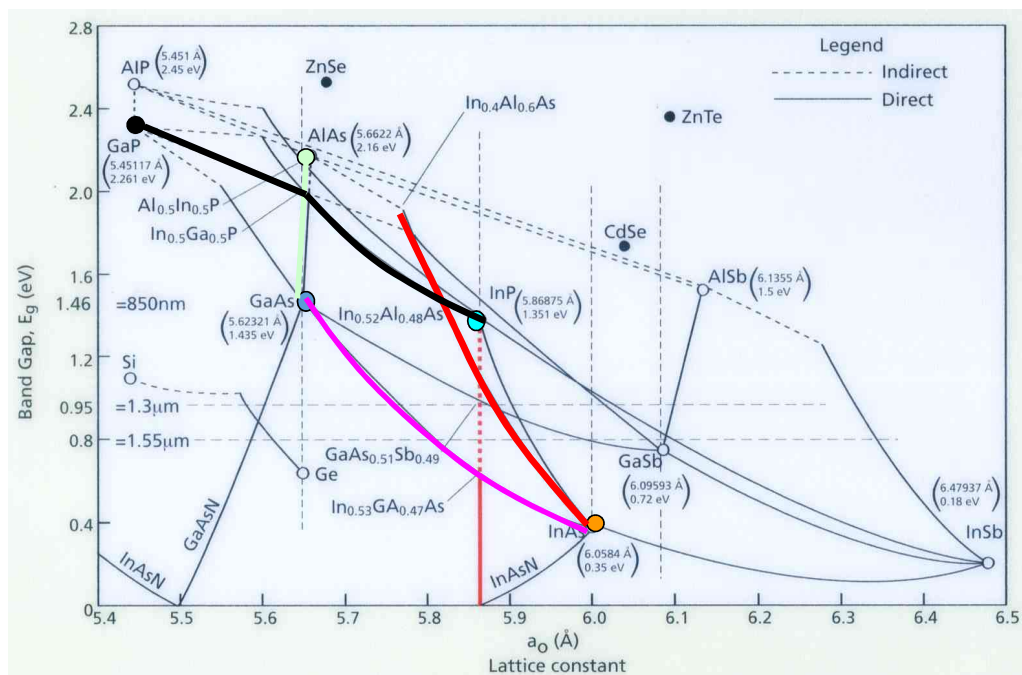


# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

## *Células fotovoltaicas de junção tripla*

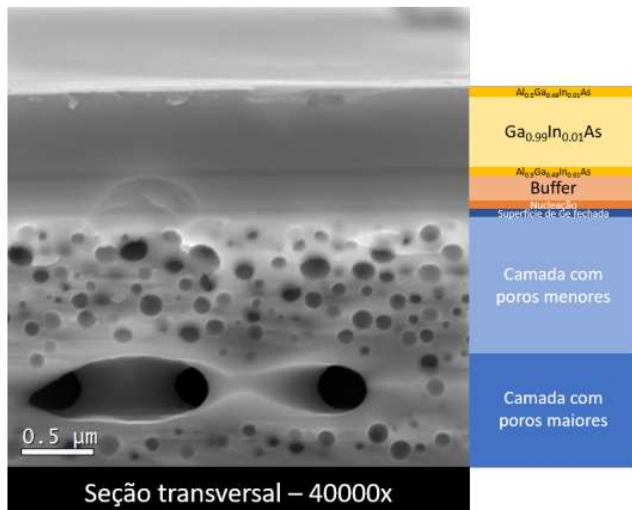


# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

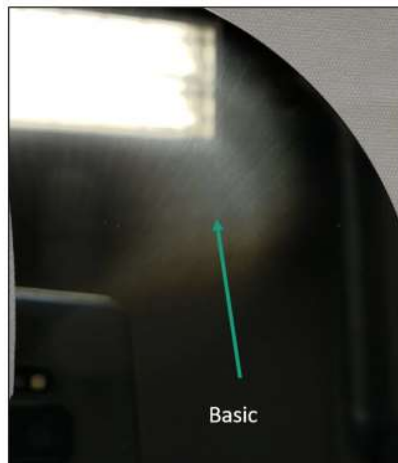


- Aprimorar o balanço de tensão de poços quânticos de InGaAs/InGaP casados com substrato de Ge e/ou GaAs para uso na célula intermediária de uma tripla junção.
- Fabricar a célula de poços quânticos múltiplos.

# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: substratos alternativos de Ge



Ge poroso  
Substrato reutilizado



Ge com menos etapas de  
polimento

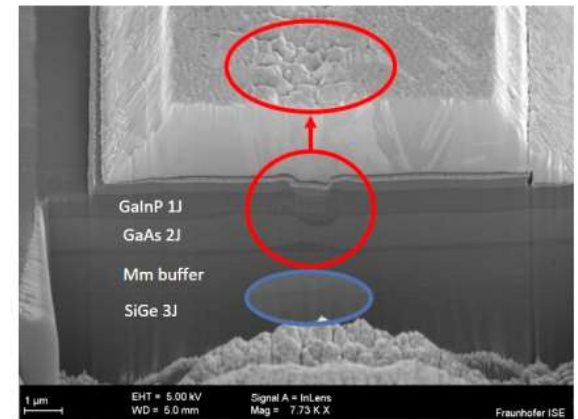


Imagem de MEV da célula solar de junção tripla após corte com FIB. Círculo azul indica a origem dos defeitos no substrato e os círculos vermelhos indicam os defeitos sendo amplificados no *buffer* metamórfico e se propagando até o metal de contato do topo da célula solar

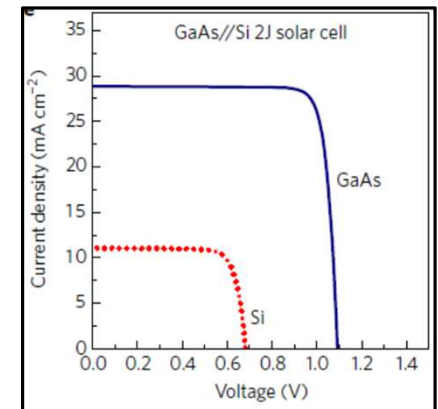
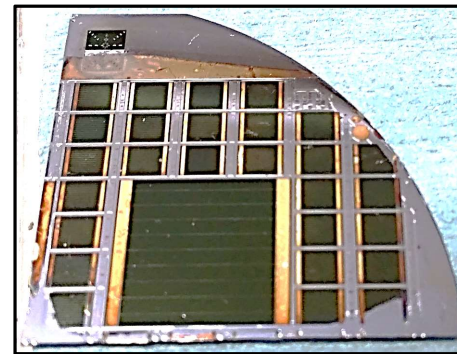
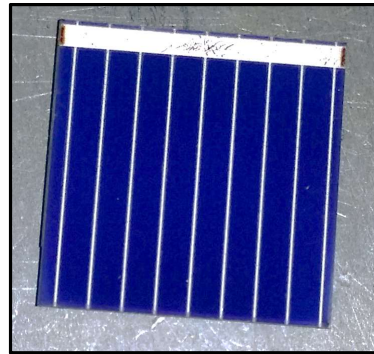
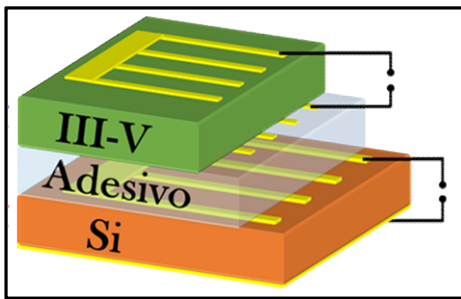
Parceria com ISE Fraunhofer

Perspectiva otimista

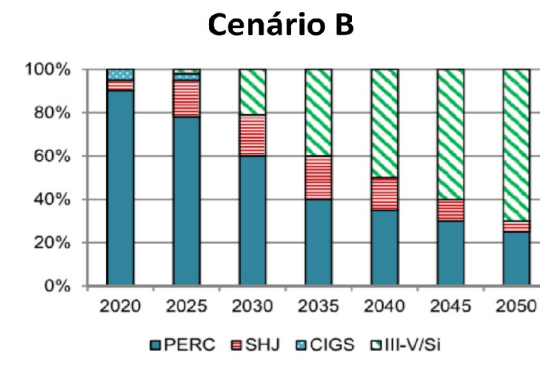
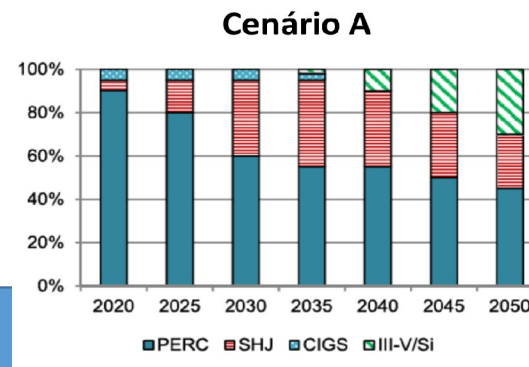
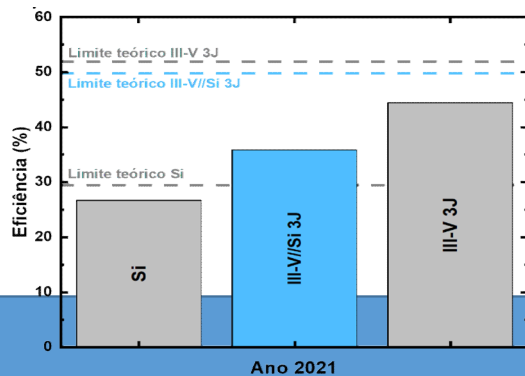


# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: III-V/Si

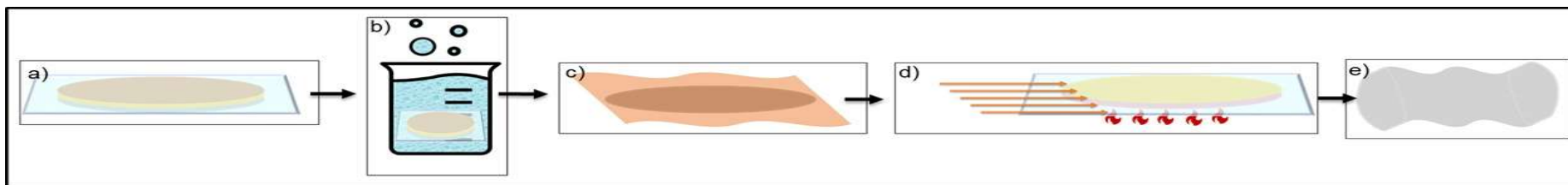
Célula solar multijunção III-V/Si: fótons mais energéticos absorvidos pelo material III-V, fótons menos energéticos absorvidos pelo silício



Perspectiva para aumento da eficiência das células solares atuais e participação futura no mercado



# CÉLULAS FOTOVOLTAICAS: III-V sobre flexíveis



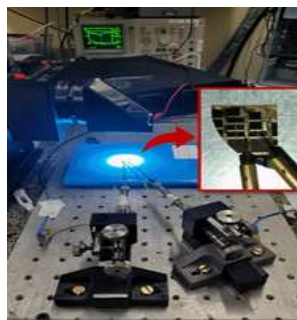
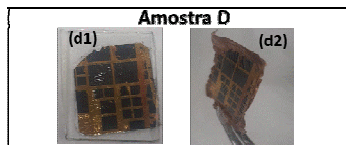
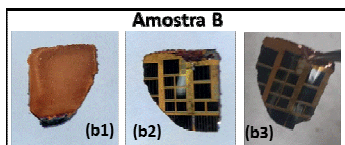
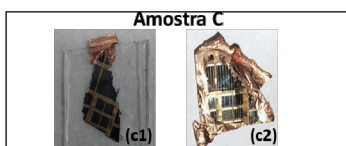
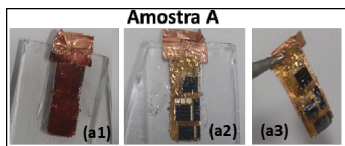
Substrato rígido



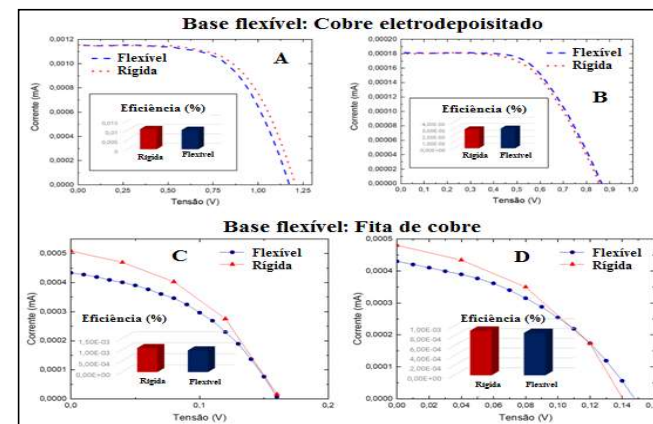
Cobre eletrodepositado



Fita de cobre



\* sob a luz do simulador solar Sciencetech SF300A com filtro AM1.5G





# *Lab-on-a-chip* na faixa do infravermelho médio para monitoramento de fluidos



Borislav Hinkov, Florian Pilat, Mauro David, Daniela Ristanić, Benedikt Schwarz, Aaron M. Andrews & Gottfried Strasser

*TU Wien, Institute of Solid State Electronics & Center for Micro- & Nanostructures, Vienna, Austria*



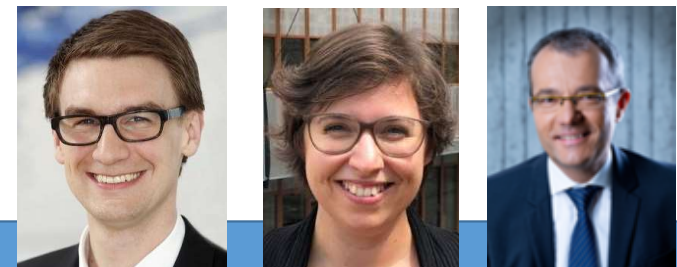
Hermann Detz

*TU Wien, Center for Micro- & Nanostructures, Vienna, Austria & Brno University of Technology, CEITEC, Brno, Czech Republic*



Laurin Lux, Andreas Schwaighofer, Bettina Baumgartner & Bernhard Lendl

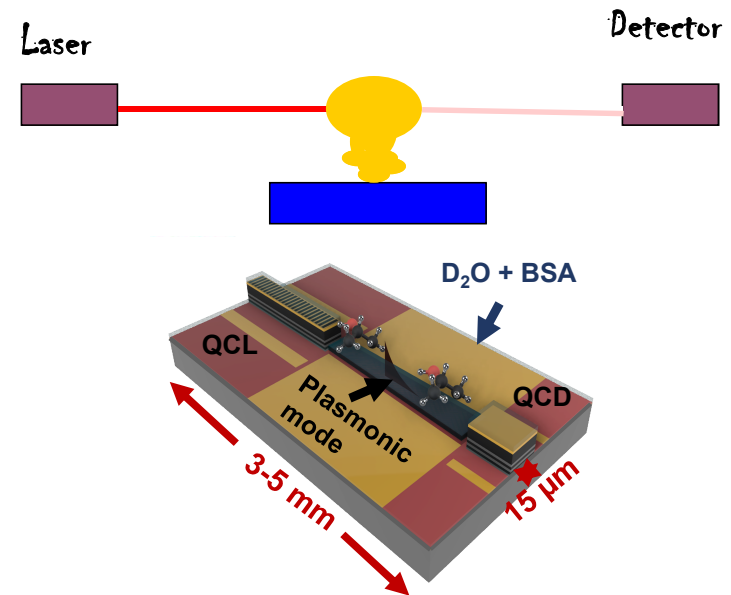
*TU Wien, Institute of Chemical Technologies & Analytics, Vienna, Austria*





## Lab-on-a-chip na faixa do infravermelho médio para monitoramento de fluidos

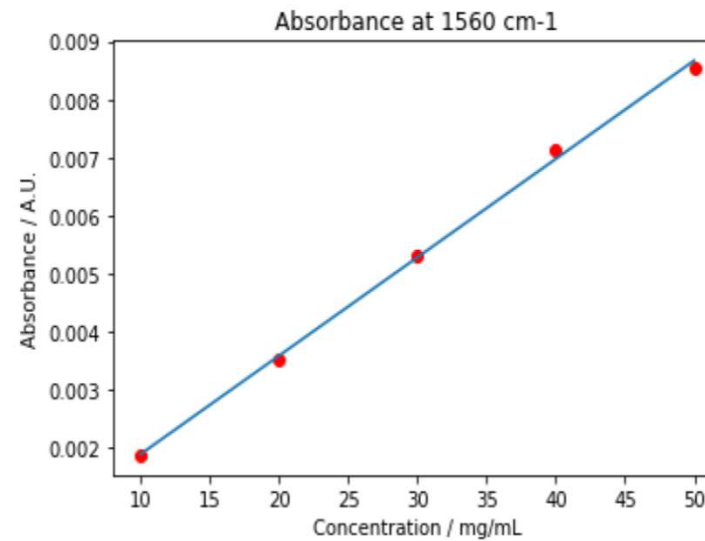
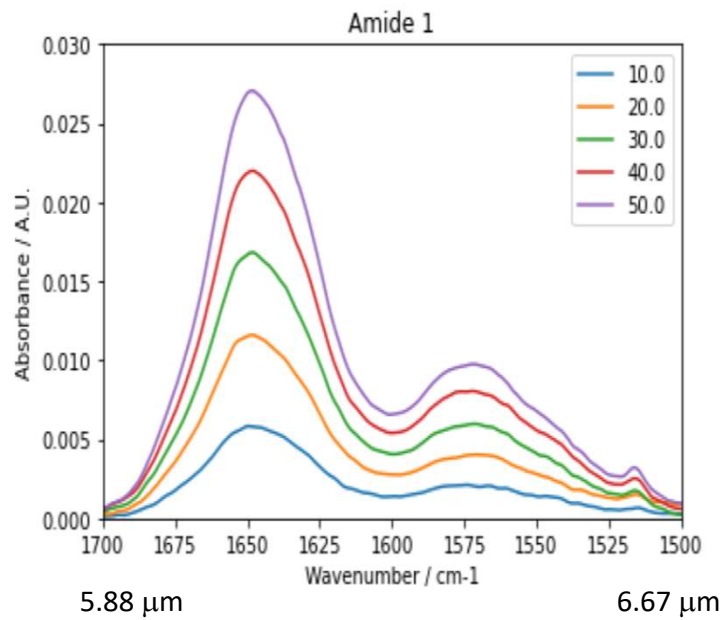
- Proteína BSA a ser monitorada
- Descrição dos elementos: QCL, QCD e WG
- Fabricação do dispositivo QCLD
- Experimento de medida de concentração de BSA em D<sub>2</sub>O\*
- Experimento de monitoramento de reação molecular



\*evitar a absorção intensa da água, aumentando o comprimento de interação







**Beer-Lambert law**

$$A = \log_{10}(I_0/I_T) = edc$$

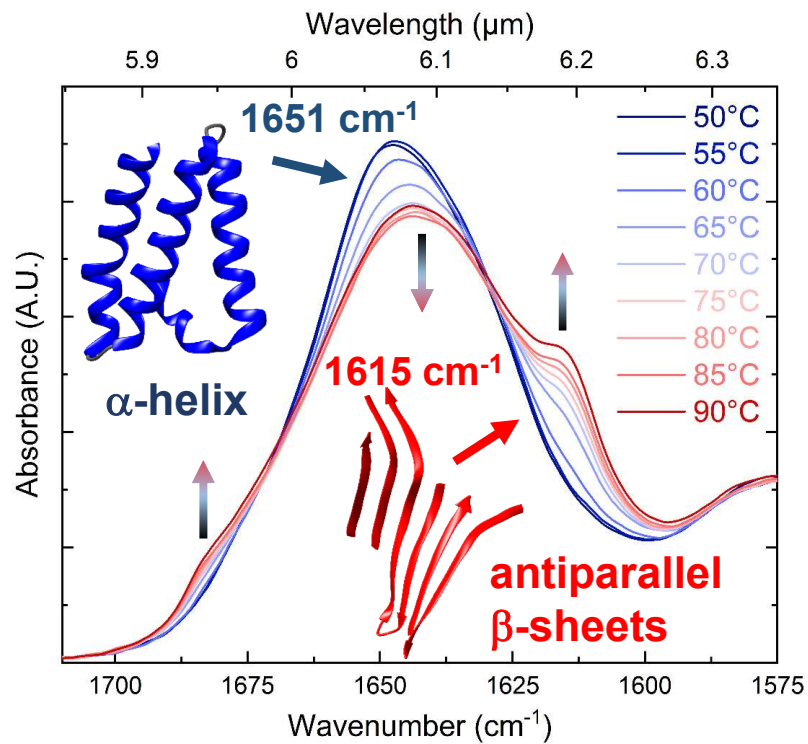




Reação termicamente induzida

Modifica a natureza da proteína

Experimentos de BSA em D<sub>2</sub>O

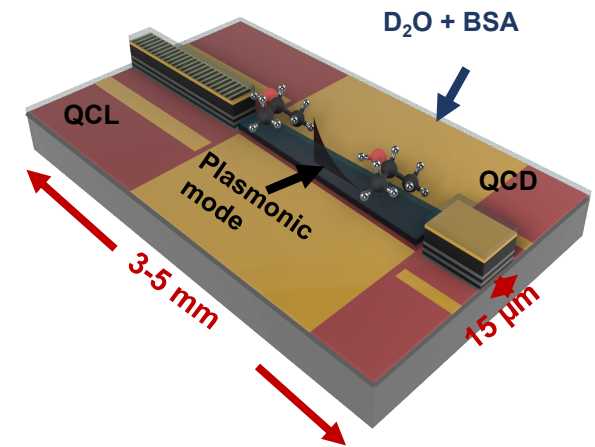
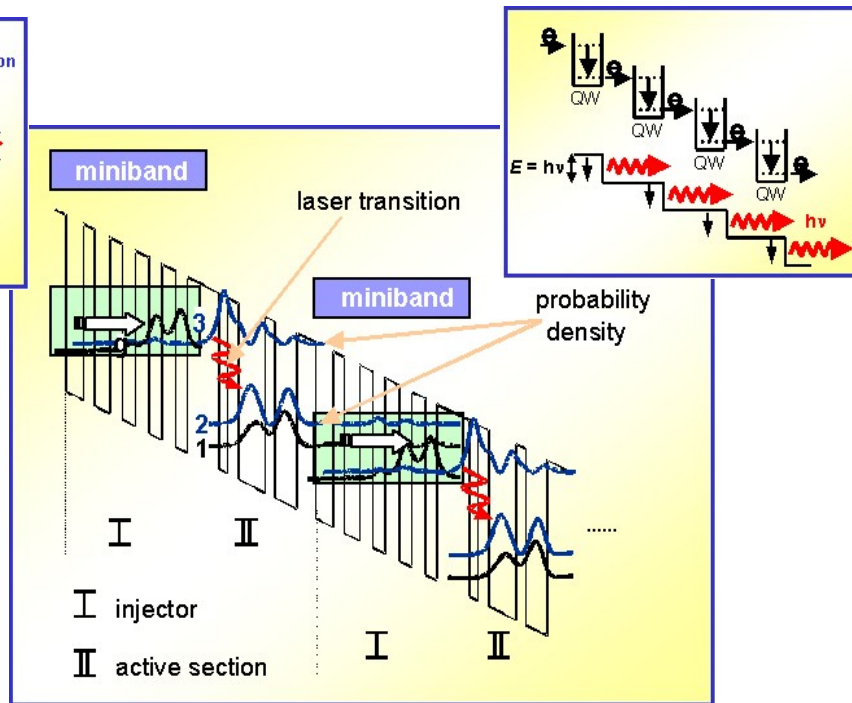
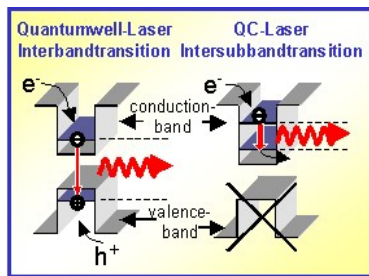


Estável até 40 graus  
A partir de 60 graus  
é totalmente irreversível



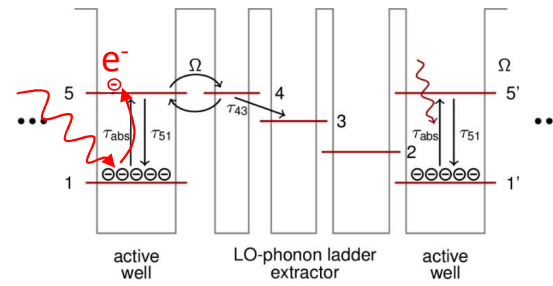
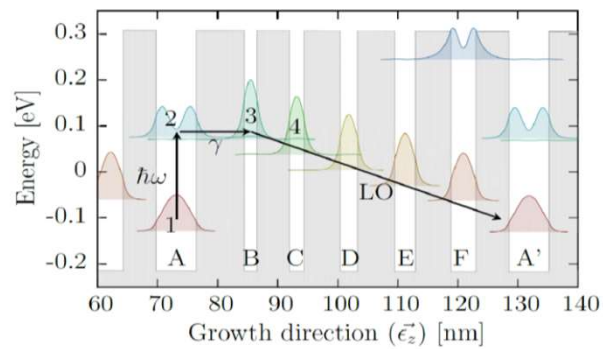


## Operação com tensão aplicada

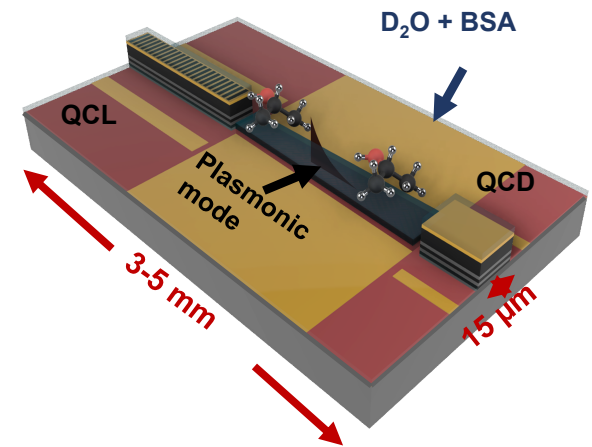
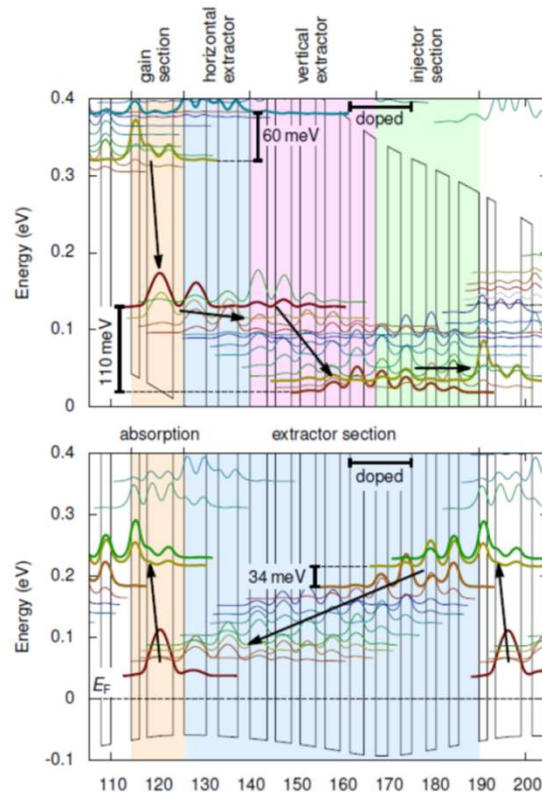




## Operação no modo fotovoltaico





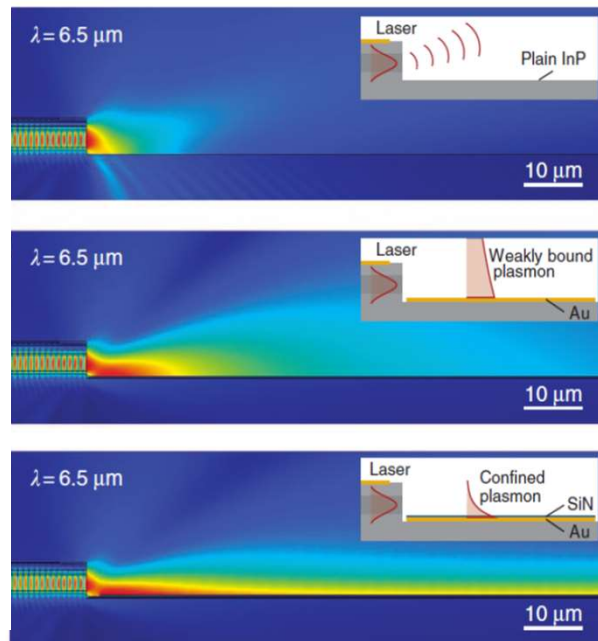
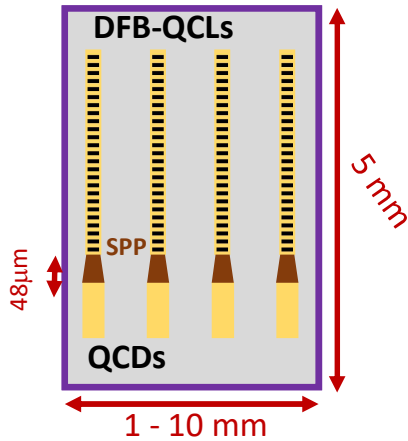
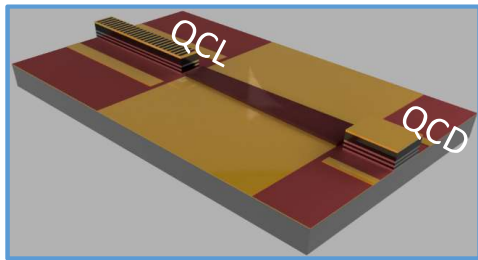


Schwarz et al., *Nat. Commun.* **5**, 4085, 2014  
 Schwarz et al., *ACS Photonics* **4**(5), 1225, 2017

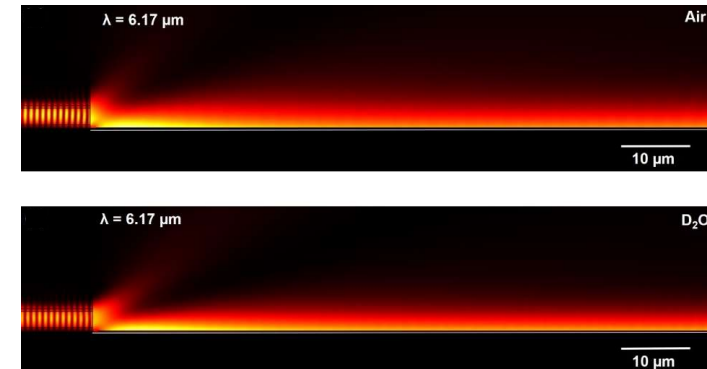




## Guia de onda plasmônico



## Simulação com COMSOL



$L_p \geq 1.7 \text{ mm}$   
Perda < 0.13dB para  $L = 48 \mu\text{m}$   
> 96% do modo é guiado fora do guia de onda



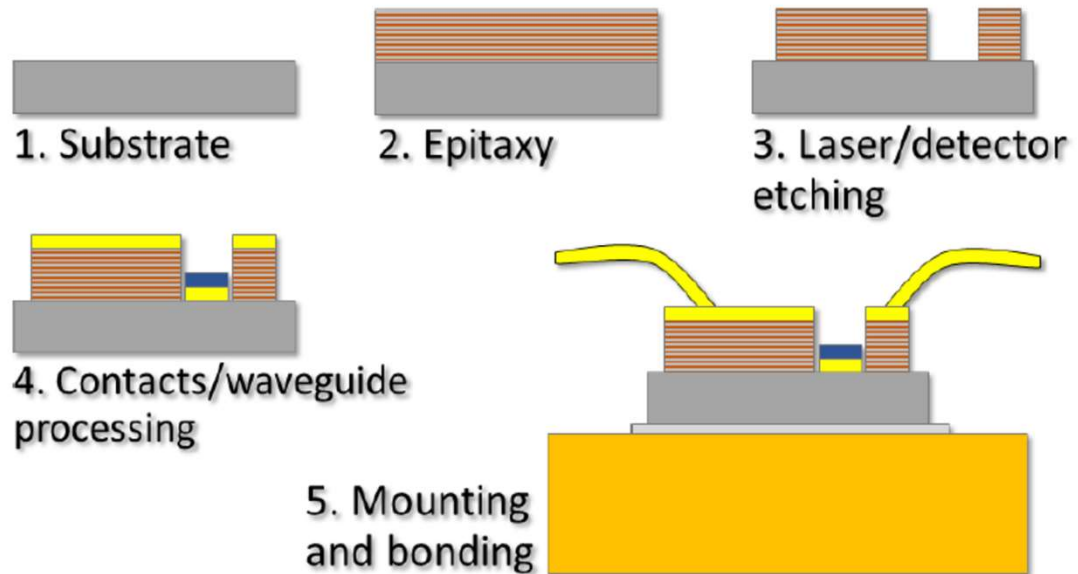


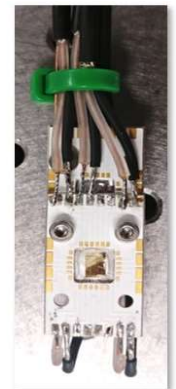
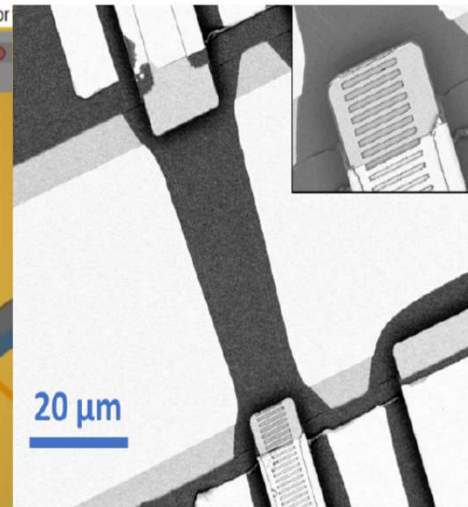
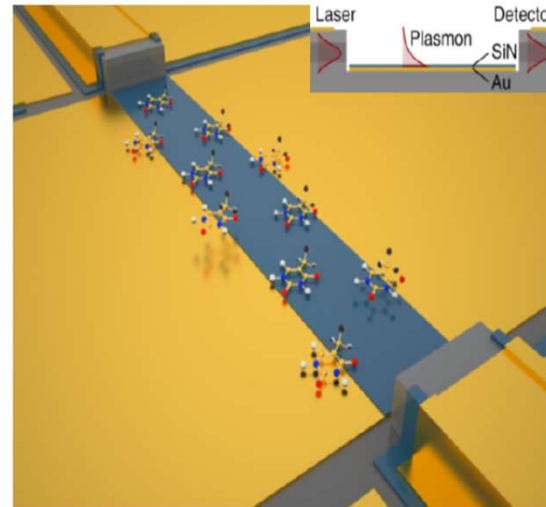
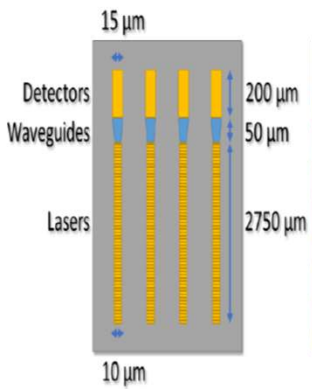
Projetado para operar em torno de  $6.5 \mu\text{m}$

MBE

Material	x (%)	Thickness (nm)	Doping ( $\text{cm}^{-3}$ )
InP (substrate)	-	$350 \mu\text{m}$	$2-4 \times 10^{17}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	53	500	$5 \times 10^{16}$
<b>37 x cascaded AR</b>			
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	53	300	$5 \times 10^{16}$
$\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$	52	$600 + 800$	$1 \times 10^{17} + 2 \times 10^{17}$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	53	$350 + 10$	$8 \times 10^{18} + 1 \times 10^{19}$

Guias plasmônicos: 200 nm SiN e  
60 nm de Au





Grade de difração para estreitar a emissão do laser (DFB)  
 $\Delta f$  na faixa de MHz



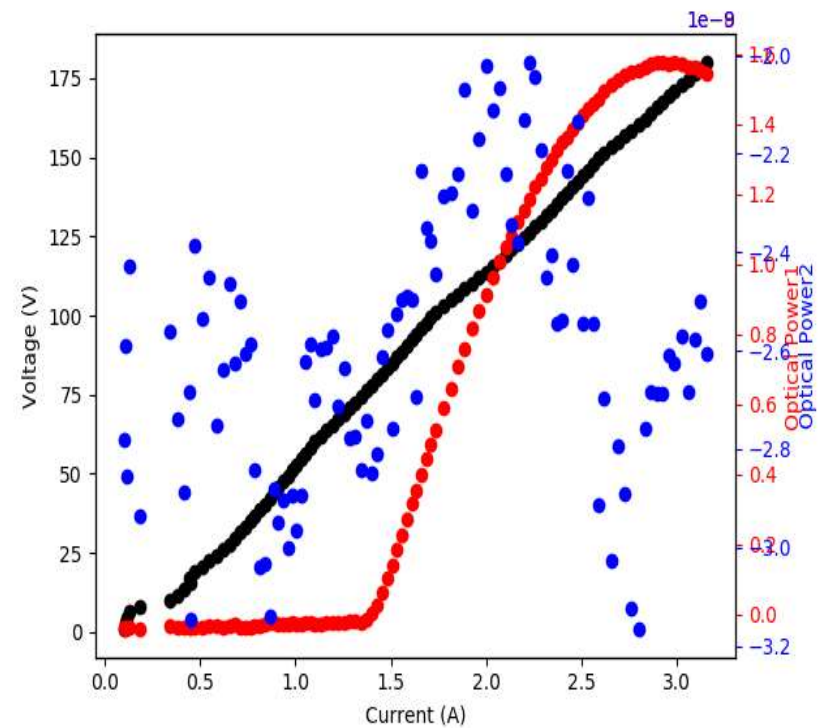


R detectores em torno de 3 kohms  
 R lasers em torno de 200 ohms

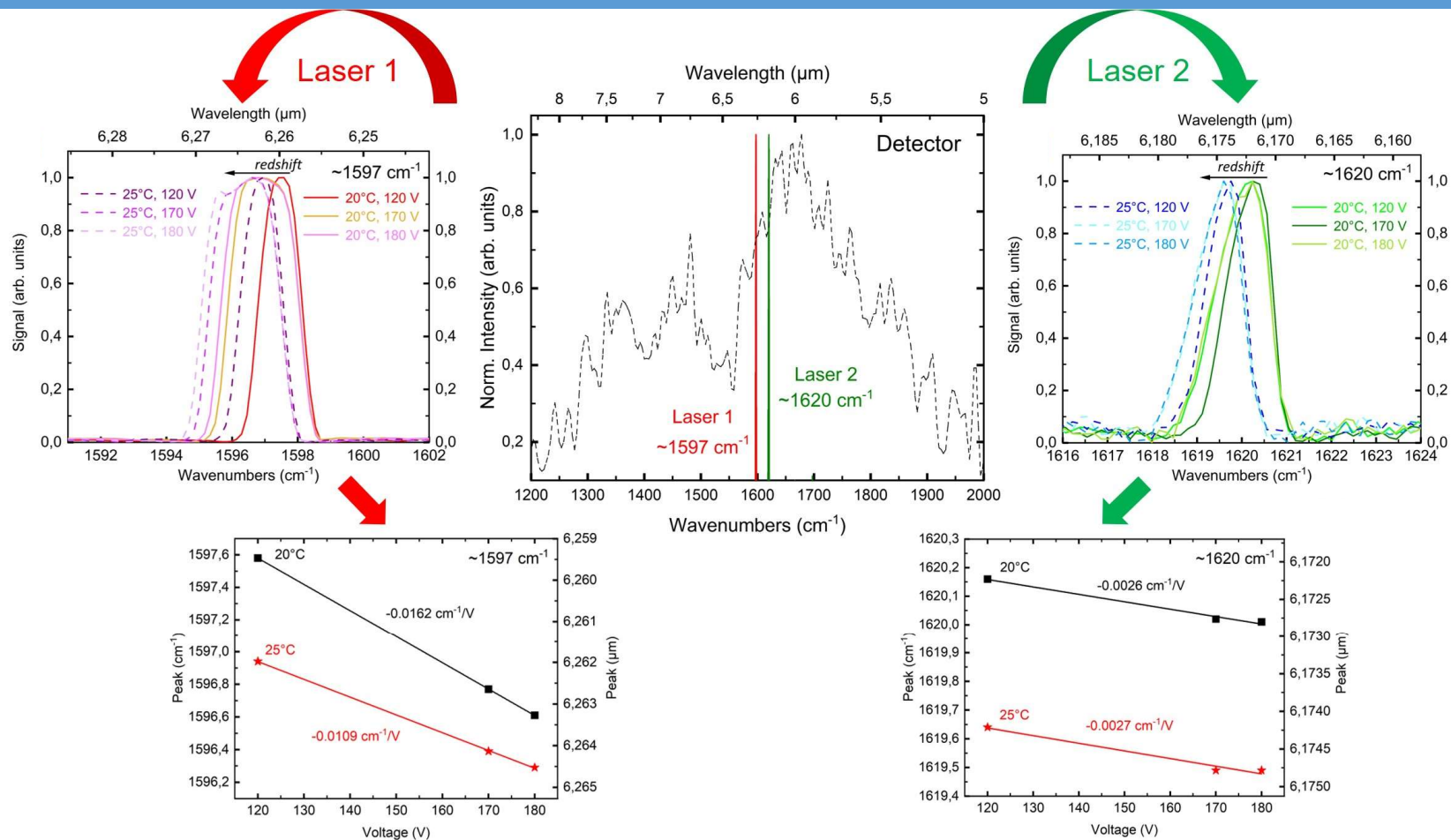
Um gerador de pulso aplica pulsos entre 0 e 180 V. Pulsos de 100 ns, 5 KHz. Duty cycle de 0.05%, bem baixo.

A corrente é medida entre 0 e 3.5 A

Corrente de limiar em torno de 1.5 A

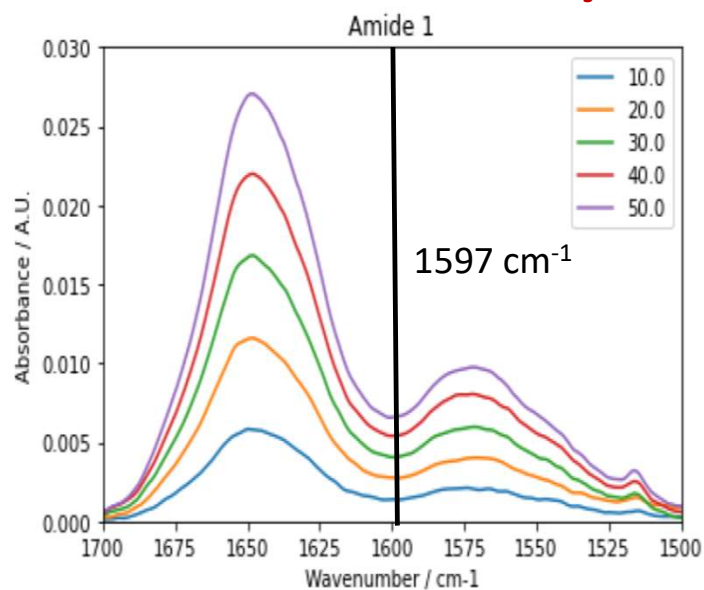




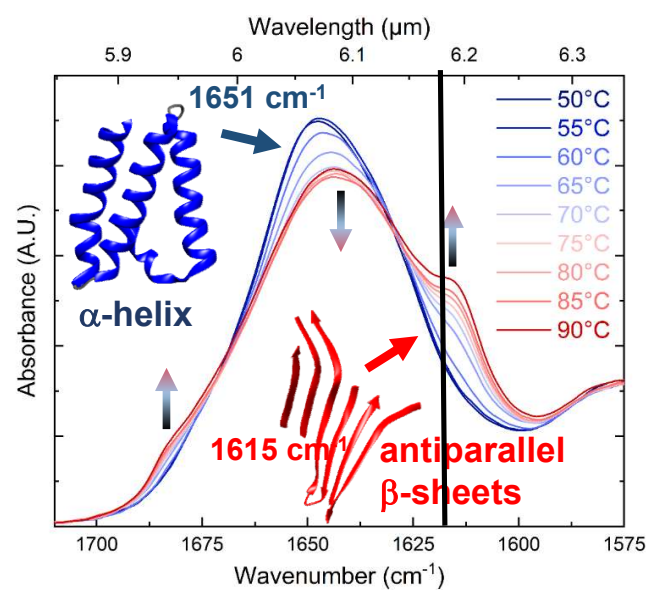




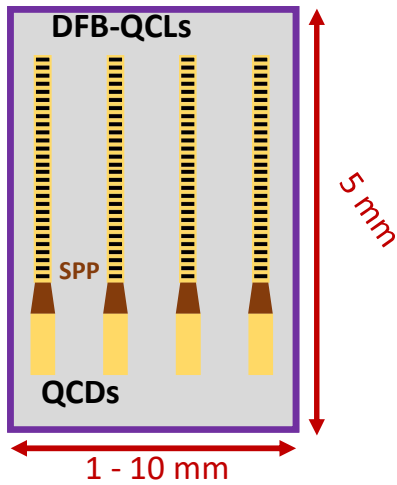
## Medida de concentração



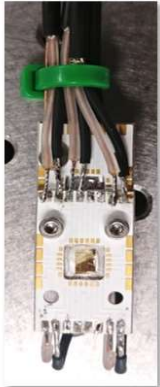
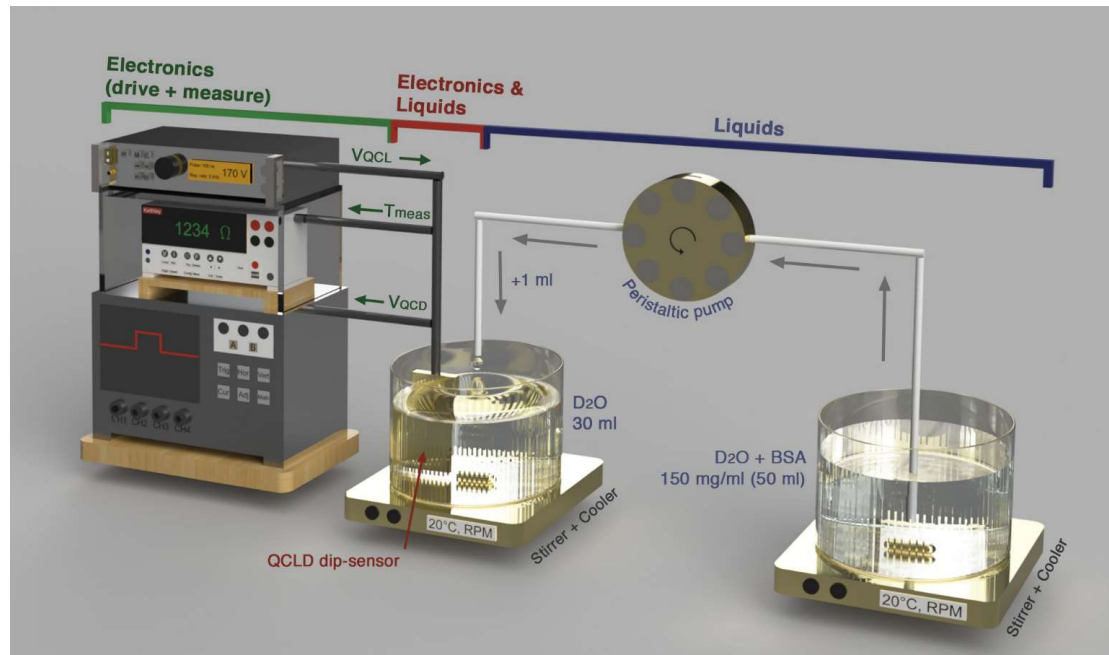
## Medida de denaturação da proteína

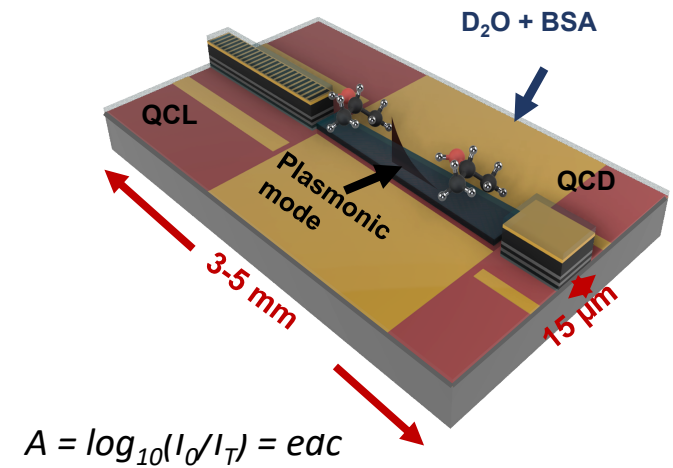
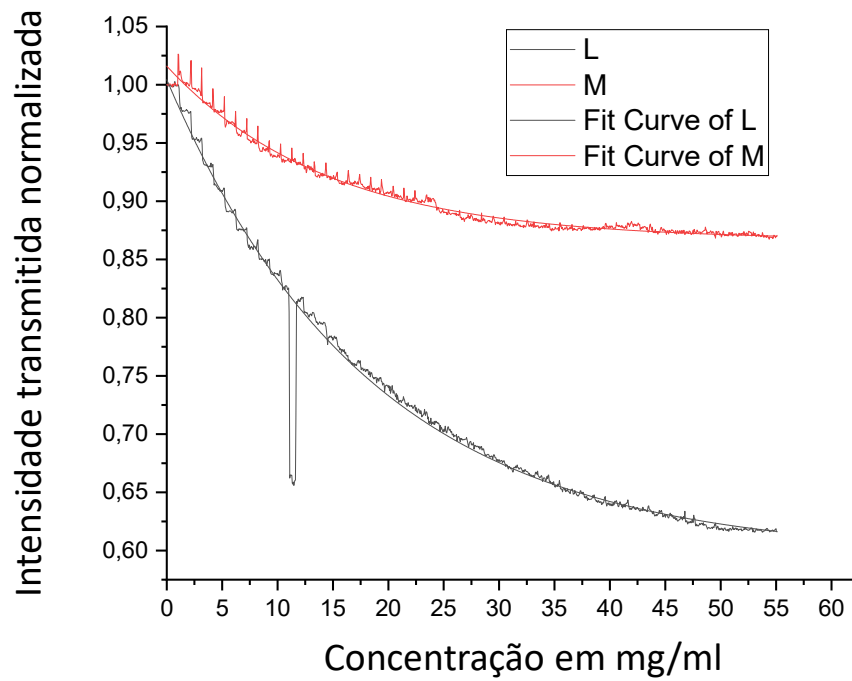


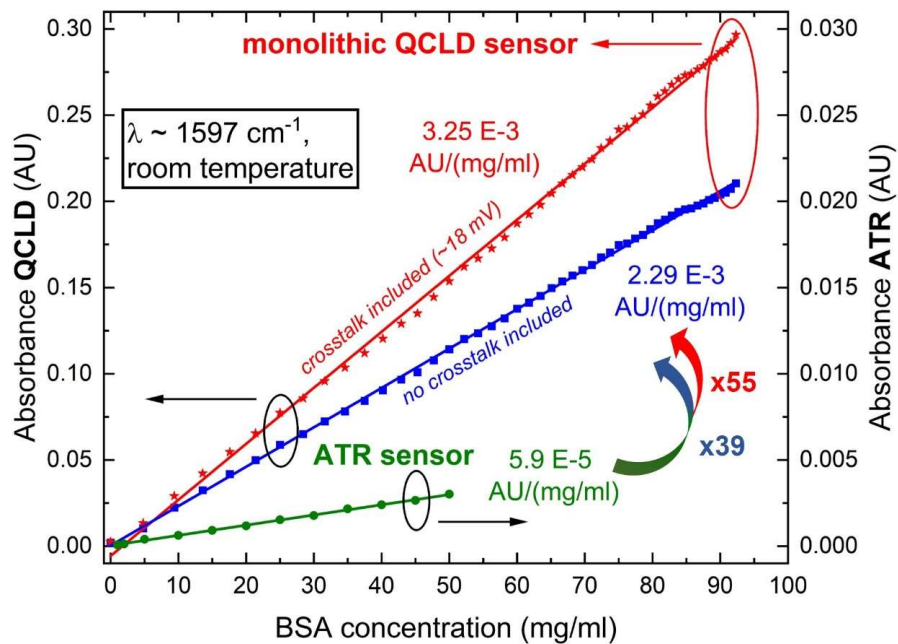
# Experimento para determinar a concentração



Um laser como sensor de temperatura







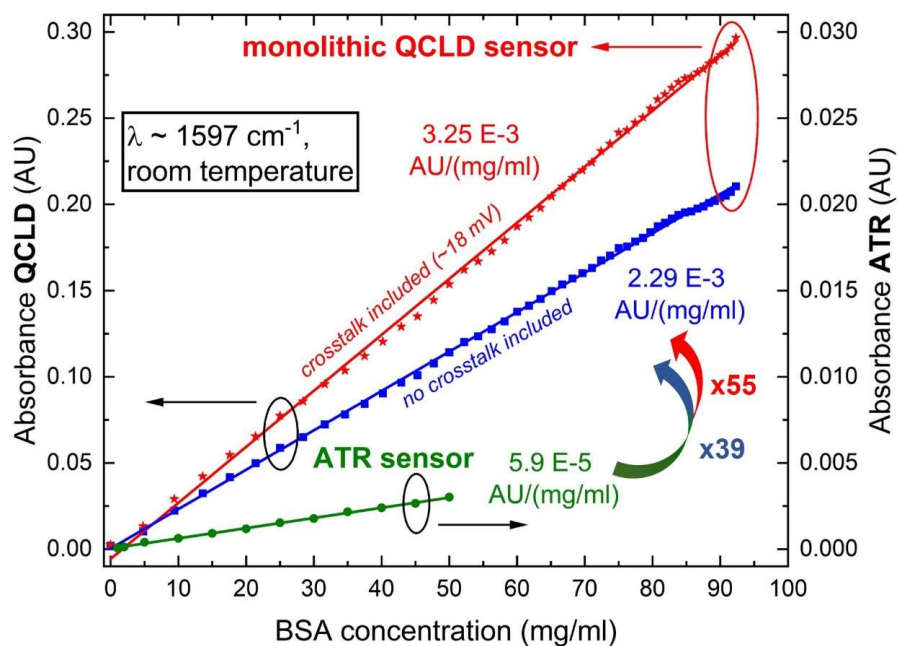
$$A = d_{eff} \cdot e \cdot c$$

$d_{eff}$  profundidade de penetração efetiva  
 $e$  coeficiente de absorção molar  
 $c$  concentração

$d_{eff} = 43.1 \mu\text{m}$  (cálculo) vs  $48 \mu\text{m}$  (geometria *on-chip*)







**Cobertura de >3 ordens de concentração:**  
(75  $\mu\text{g/ml}$  – 92 mg/ml)

## Beer-Lambert para absorbância

$$A = d_{eff} \cdot e \cdot c$$

$d_{eff}$  profundidade de penetração efetiva  
 $e$  coeficiente de absorção molar  
 $c$  concentração

$$d_{eff} = 43.1 \mu\text{m} \text{ (cálculo)} \text{ vs } 48 \mu\text{m} \text{ (geometria on-chip)}$$

## Limite de detecção (LOD)

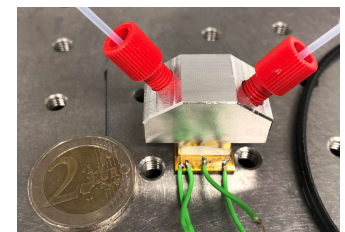
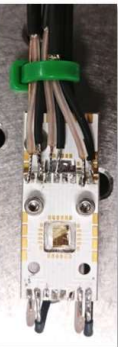
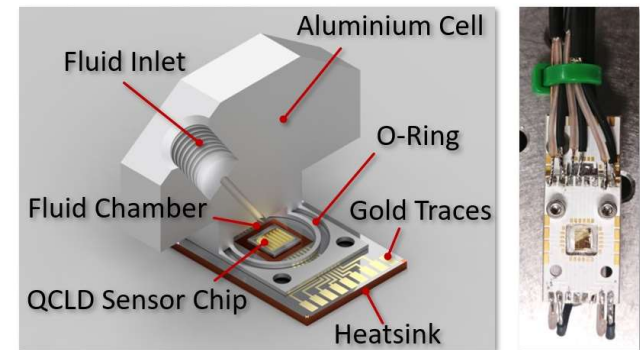
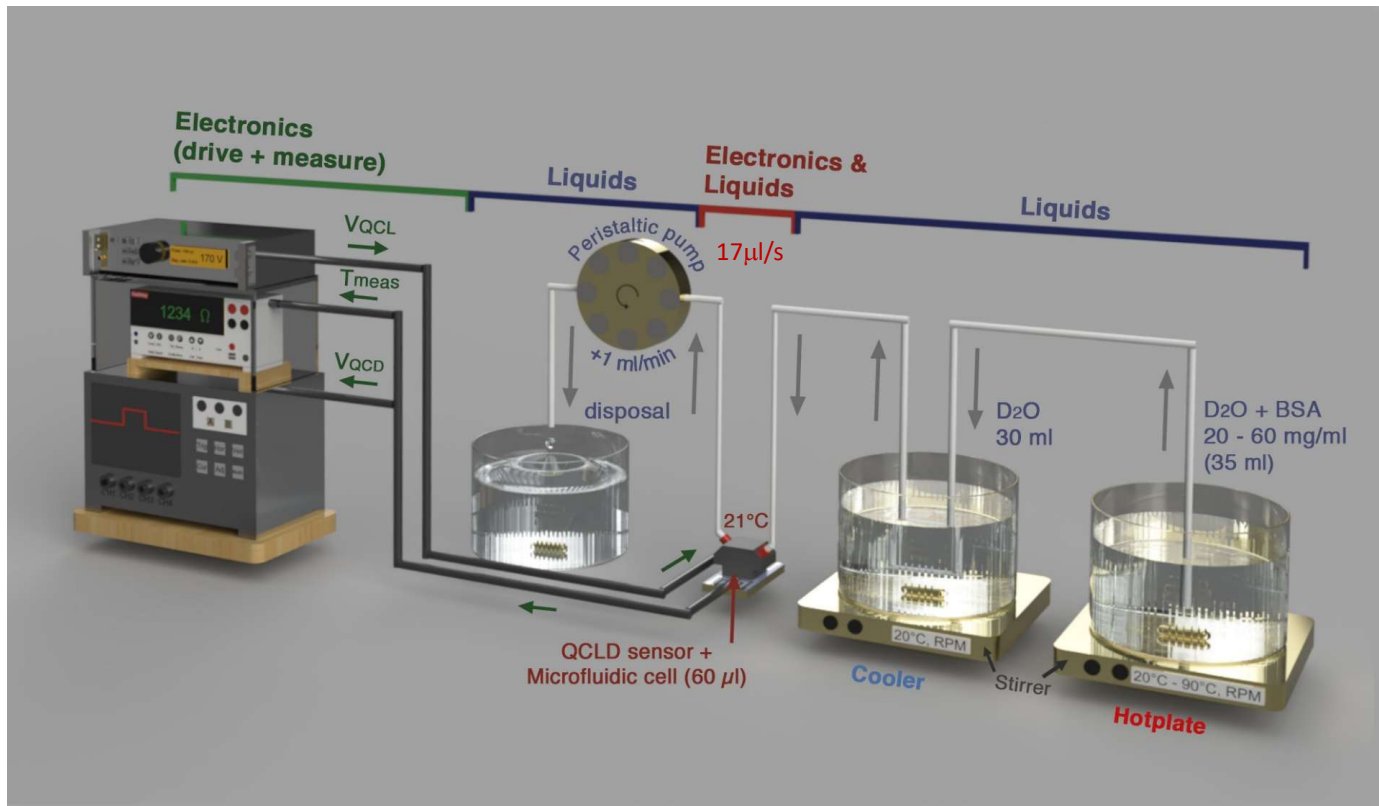
$$LOD = \frac{3 * RMS \text{ noise}}{\text{slope}}$$

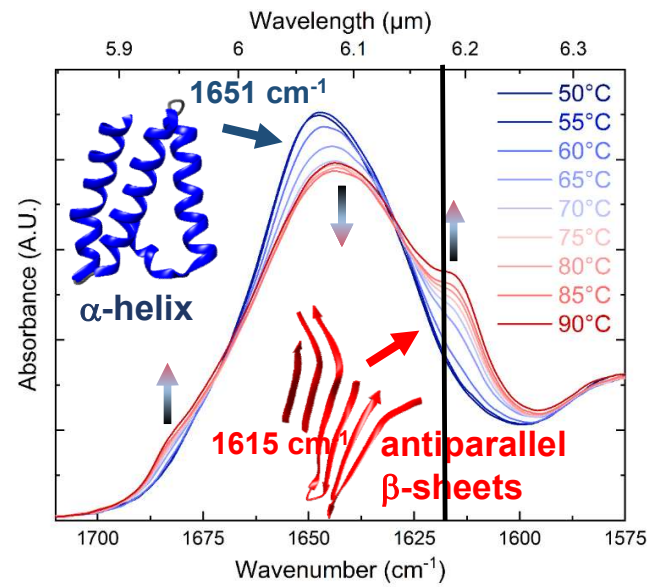
Sensor	Tempo	LOD
FTIR_ATR	11 s	~9000 ppm
QCLD	11 s	75 ppm

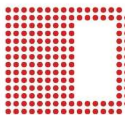
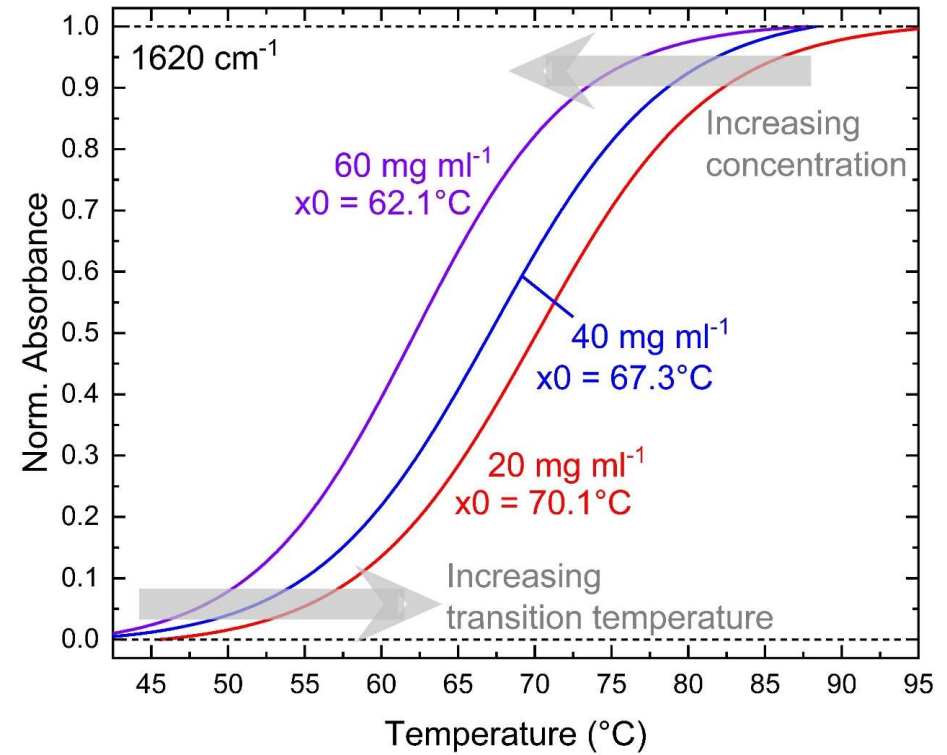
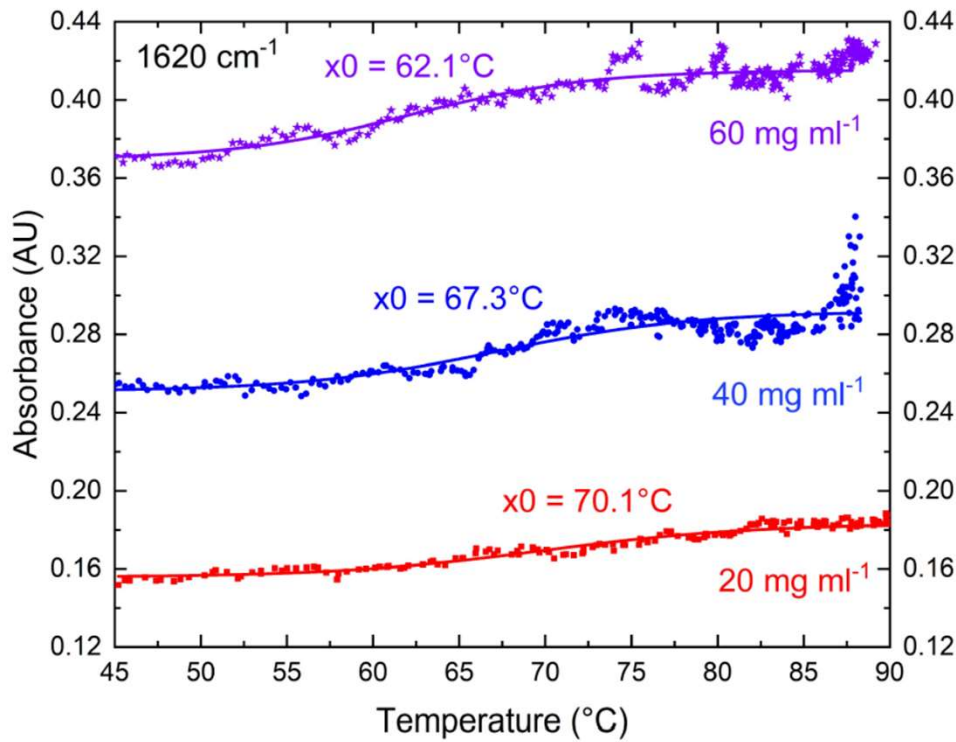
**Literatura:**  
LOD~2 – 18 vezes  
menor<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bibikova et al., *Anal. Chem. Acta* **990**, 141 – 149, 2017.

<sup>2</sup>López-Lorente et al., *Microchem. Acta* **184**, 453-462, 2017.







# Conclusões

**Demonstração de um *Lab-on-a-chip* para líquidos seletivo, preciso, robusto, de elevada sensibilidade e trabalhando em tempo real:**

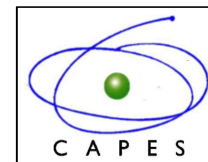
Volume	→	μl
LOD	→	75 ppm
Intervalo	→	3 ordens de grandeza

**Desafio de fazer medida em água**





Muito obrigada





RIO DE JANEIRO 2023  
chipinrio@puc-rio.br  
dipgg.cefet-rj.br/chipinrio



August 28<sup>th</sup> to September 1<sup>st</sup> 2023



Schwaighofer et. al, *Sci. Rep.* 6, 33556, 2016.

