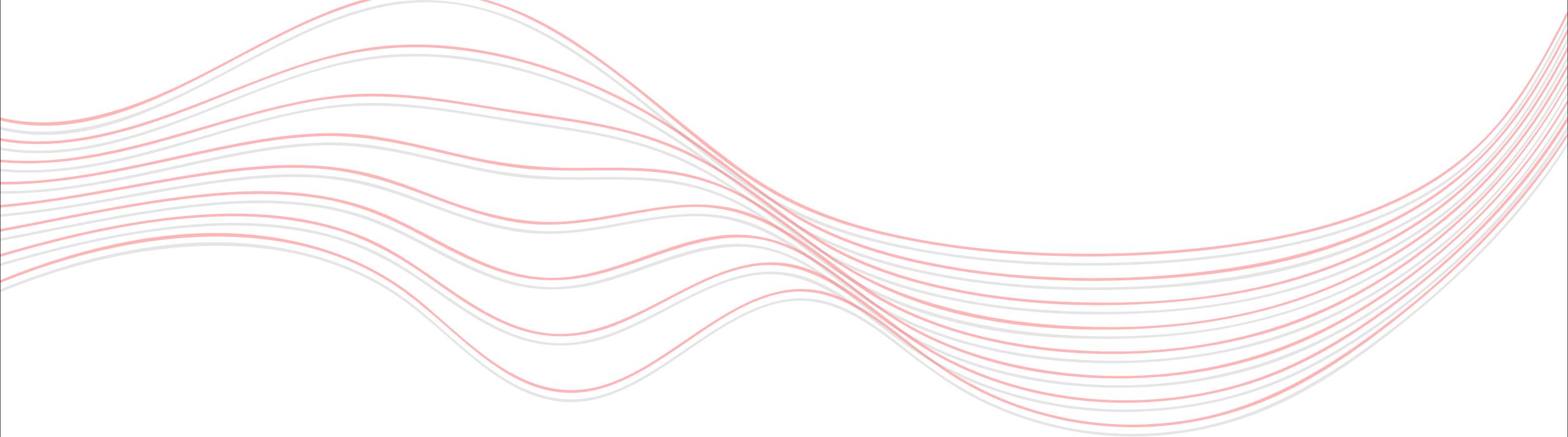


Exame de Qualificação

Metodologias de detecção de gases em baixas concentrações por
meio de sensores de atraso de fase em micro-ondas

RODRIGO ANJOS DE SOUZA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA



Exame de qualificação apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientadora: Profa. Dra. Fátima Salete Correra

Coorientadora: Profa. Dra. Elisabete Galeazzo

RODRIGO ANJOS DE SOUZA

SUMÁRIO

1 Contextualização

2 Metodologia

3 Desenvolvimento Atual

4 Atividades em Andamento

5 Atividades Futuras

6 Cronograma de Execução

1. CONTEXTUALIZAÇÃO – INTRODUÇÃO

Diabetes Melito Tipo I

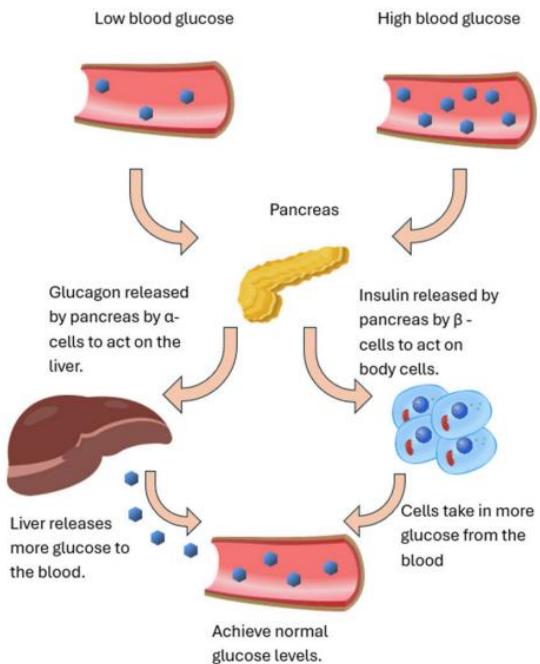


FIGURE 2. The roles of insulin and glucagon in achieving normal glucose levels in the blood.

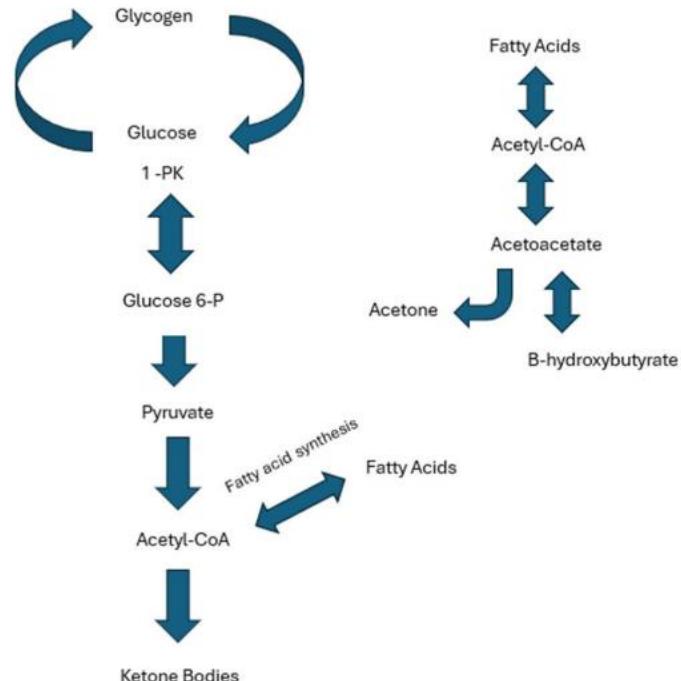


FIGURE 3. Pathophysiology of ketones in DKA patients [24].

1. CONTEXTUALIZAÇÃO – ESTADO DA ARTE

Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas
[GC-MS]

Limite de Detecção

- ppb → ppt

Faixa de Operação

- 49 ppt → 659 ppb

Vantagens

- Alta sensibilidade
- Alta Seletividade

Desvantagens

- Preparação de amostra
- Resultado em 40 min
- Altamente Custoso
- Operador Treinado

Espectroscopia de massas com tubo de fluxo de íons
[SIFT-MS]

Limite de Detecção

- ppb → ppt

Faixa de Operação

- 50 ppb → 1.3 ppm

Vantagens

- Resultado em Tempo Real
- Faixa de operação extensa

Desvantagens

- Ausência de Seletividade
- Operador Treinado

Espectroscopia de decaimento em cavidade
[CRDS]

Limite de Detecção

- ppb → ppt

Faixa de Operação

- 50 ppb → 1.3 ppm

Vantagens

- Resultado em Tempo Real
- Faixa de operação extensa

Desvantagens

- Ausência de Seletividade
- Operador Treinado

1. CONTEXTUALIZAÇÃO – ESTADO DA ARTE

Sensores Capacitivos Interdigitados **[CAP]**

Limite de Detecção

- ppm → %

Faixa de Operação

- 1 ppm → 10%

Vantagens

- Resultado em Tempo Real
- Faixa de operação extensa
- Alta Sensibilidade
- Alta reprodutibilidade

Desvantagens

- Alto limite de detecção
- Custo moderado (fab)

Sensores de balança de Quartzo **[QCM]**

Limite de Detecção

- ppm → %

Faixa de Operação

- 0.26 ppm → 10%

Vantagens

- Resultado em Tempo Real
- Faixa de operação extensa
- Baixo Custo
- Alta Sensibilidade

Desvantagens

- Tempos de resposta longos
- Resposta não-linear

Sensores de óxidos de metais semicondutores **[MOX]**

Limite de Detecção

- ppt → ppm

Faixa de Operação

- 10 ppb → 200 ppm [Linear]

Vantagens

- Resultado em Tempo Real
- Baixo Custo
- Alta Sensibilidade e Seletividade

Desvantagens

- Opera em altas temperaturas (400°C)
- Degradação com o tempo
- Baixa Reprodutibilidade (fab)

1. CONTEXTUALIZAÇÃO – ESTADO DA ARTE

Sensores de Micro-ondas [MW]

Limite de Detecção

- ppt → %

Faixa de Operação

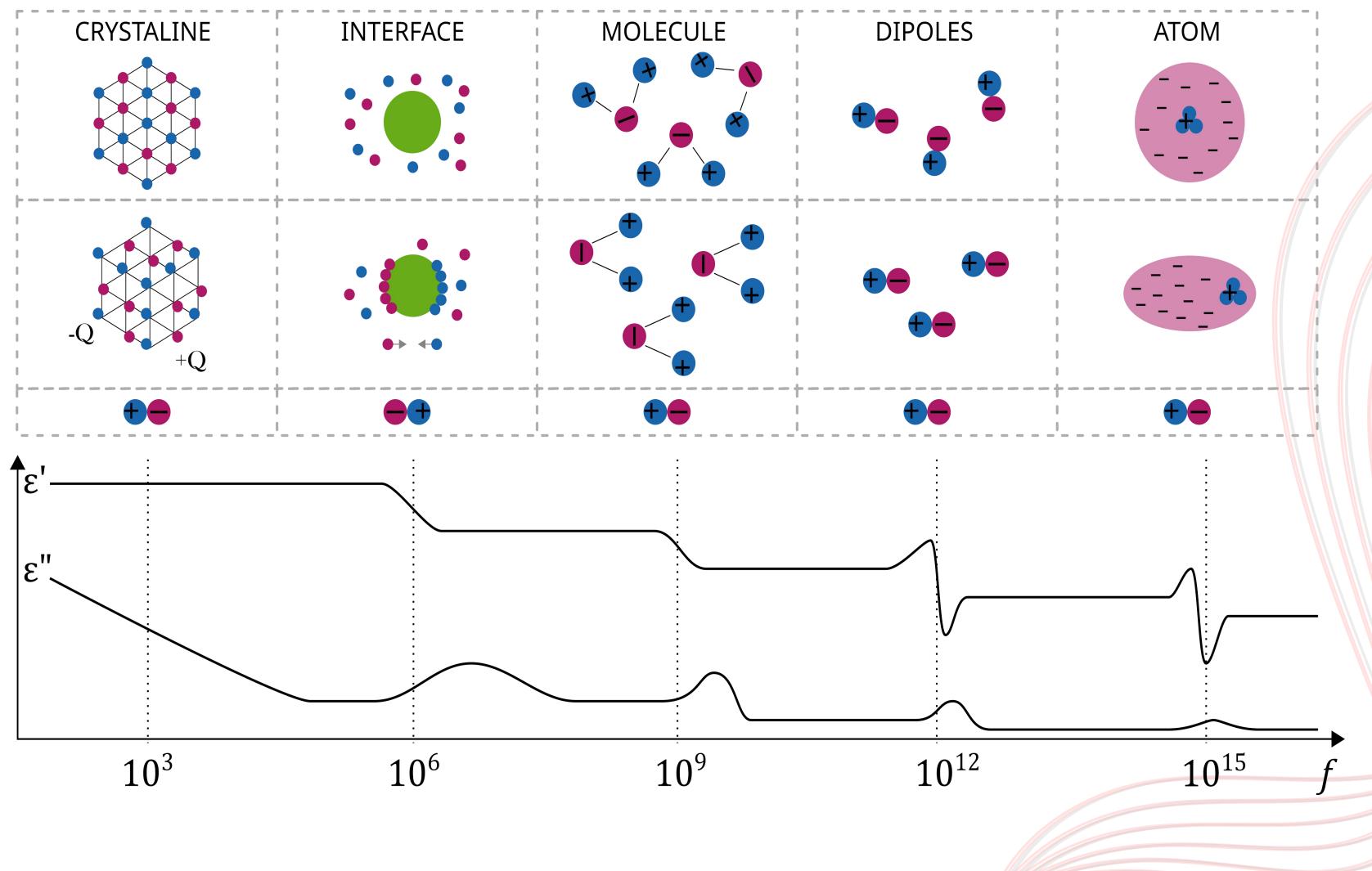
- TBD

Vantagens

- Resultado em Tempo Real
- Alta Sensibilidade
- Alta reproduzibilidade

Desvantagens

- Circuitos adicionais para geração de micro-ondas
- Pouco miniaturizáveis



1. CONTEXTUALIZAÇÃO – PROPOSTA DE PESQUISA

A proposta da pesquisa é entender e explorar os mecanismos de transdução em **micro-ondas** que podem ser utilizados para medição de concentrações diminutas de **acetona** em atmosfera ambiente, bem como possíveis caminhos de **otimização** para sensores atuais.



Transdução em Micro-ondas



Medição de Gases



Vias de Otimização

1. CONTEXTUALIZAÇÃO – OBJETIVOS

Objetivo Primário:

Explorar estruturas de micro-ondas aplicadas à caracterização de atmosferas gasosas, de modo a **propor, projetar, fabricar e caracterizar** um sensor operando em frequências de micro-ondas para detecção de acetona, realizando-se experimentos para determinar a resposta do sensor, sua sensibilidade e limites de detecção.

Objetivos Secundários:

Estudar
os mecanismos
representados
pela
permissividade
elétrica
complexa

Desenvolver
modelos que
permitem
analisar a
resposta de
transdutores de
micro-ondas

Propor
configurações
de transdutores
de micro-ondas
transdução de
atmosferas
gasosas

Projetar
elementos
sensores com
as
configurações
propostas

Construir
sistema de
detecção
projeto

Caracterizar
sensores
projetados nas
condições de
contorno
delimitadas

Comparar
os resultados
experimentais
com aqueles
obtidos em
simulação e
reportados na
literatura

2. METODOLOGIA – ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA

Condições de Contorno

- Atmosfera sob análise

Concentração da atmosfera sob análise (C_{MUT}): **0,01% → 10%**

Temperatura da atmosfera sob análise (T_{MUT}): **23 °C → 25 °C**

- Excitação de Entrada

Frequência da excitação de entrada (f_{IN}): **4 GHz → 6 GHz**

Potência da excitação de entrada (P_{IN}): **0 dBm**

Métricas de Análise

- Sensibilidade (S_{MUT})

$$S_{MUT} = \frac{\partial V_{DET}}{\partial C_{MUT}}$$

- Tempo de Resposta (τ_{MUT})

$$S_{MUT} = \frac{\partial V_{DET}}{\partial C_{MUT}}$$

- Limite de Detecção (LoD)

$$LoD = \min(\Delta C_{MUT}) | \Delta V_{DET} \neq 0$$

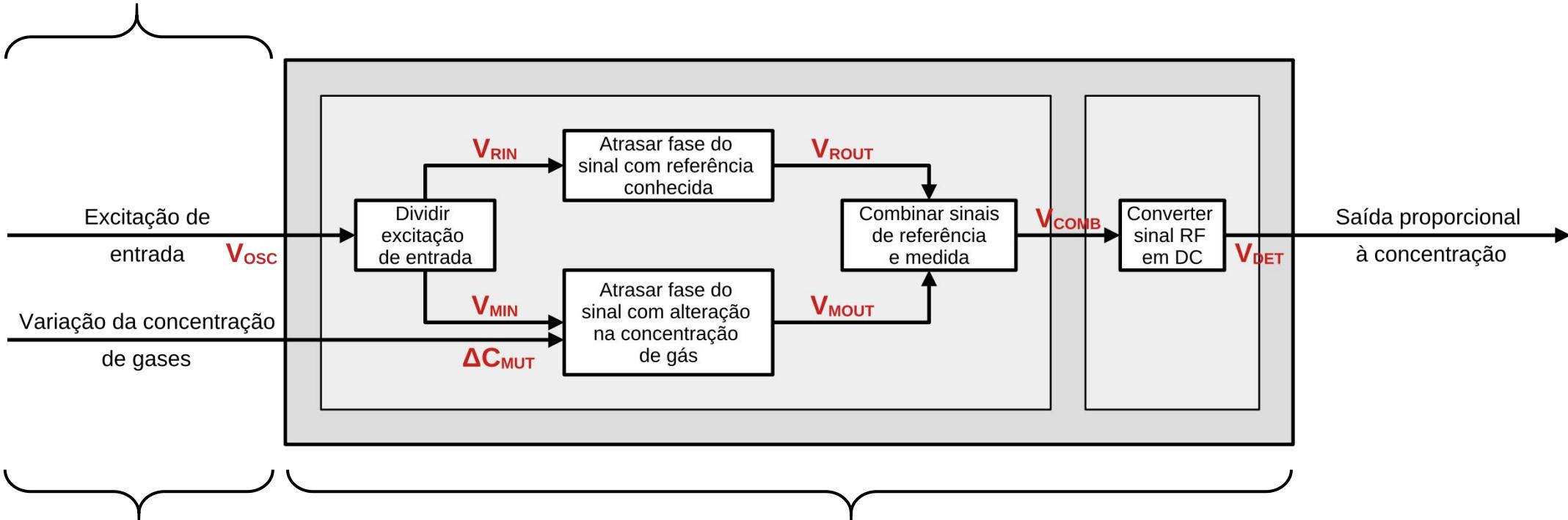
- Seletividade ($S_{MUT,x}$)

$$S_{MUT,x} = \frac{\partial V_{DET}}{\partial C_x} | x \neq MUT$$

2. METODOLOGIA – ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA

P_{IN} : 0 dBm

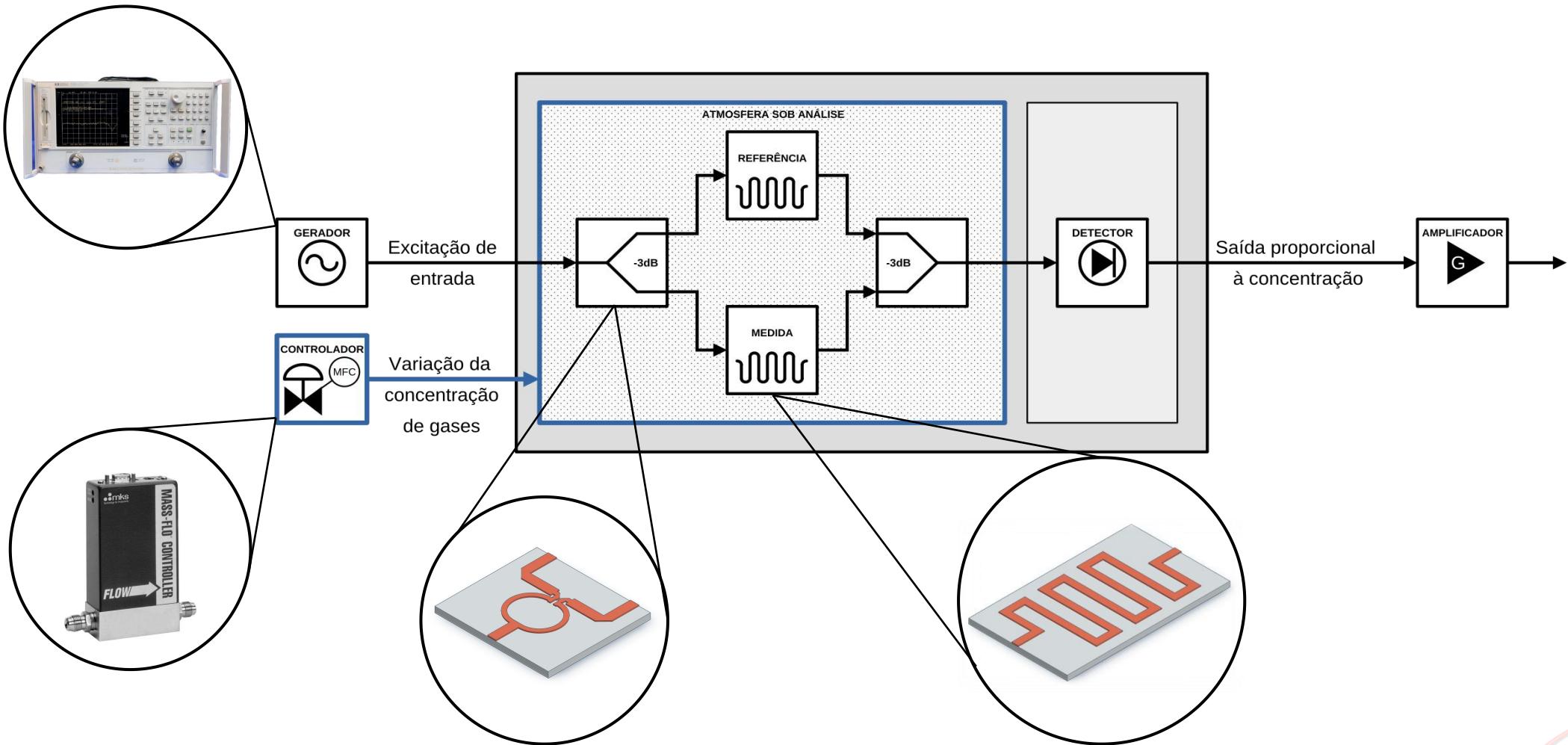
f_{IN} : 4 GHz → 6 GHz



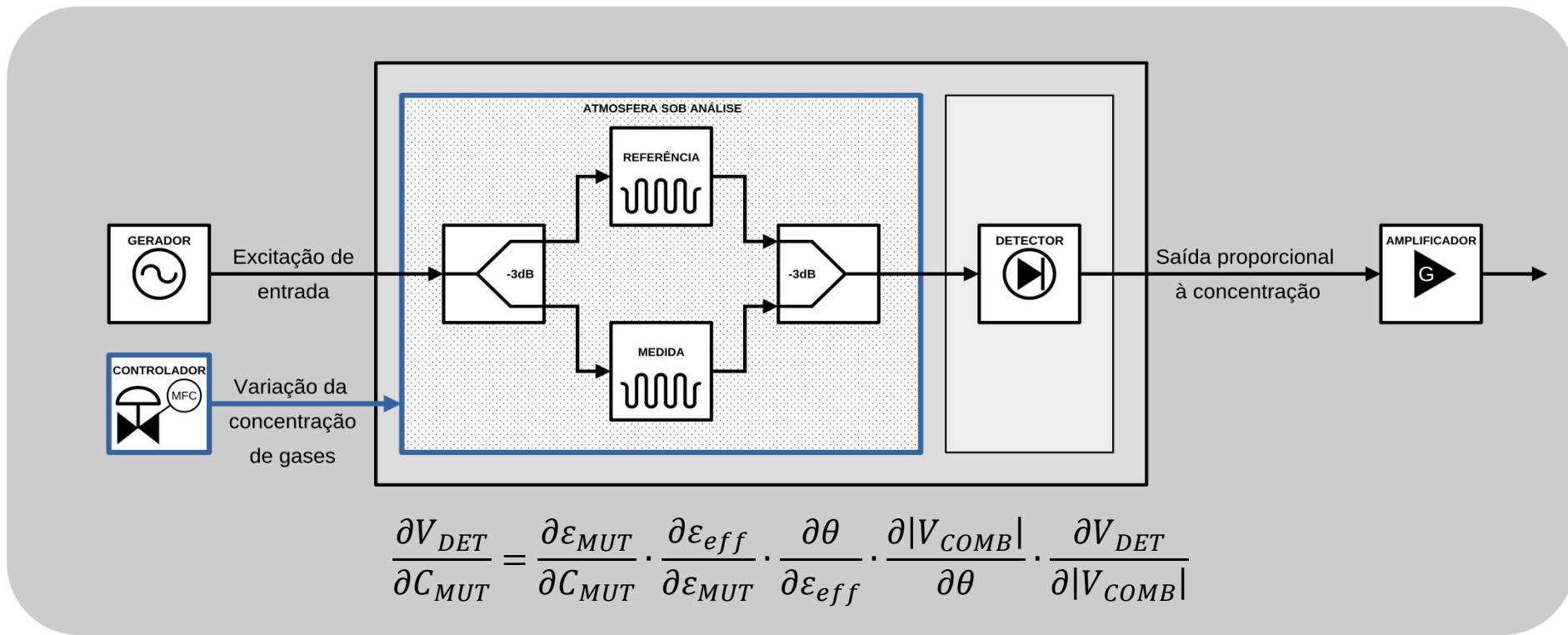
C_{MUT} : 0, 01% (100ppm) → 10%

T_{MUT} : 23 °C → 25°C

2. METODOLOGIA – ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA



2. METODOLOGIA – ANÁLISE DIFERENCIAL DO SISTEMA



$$\frac{\partial \varepsilon_{eff}}{\partial \varepsilon_{MUT}} = \frac{h}{2W_{ef}} \cdot \ln \left(\frac{\pi}{h} \cdot W_{ef} - 1 \right)$$

$$\frac{\partial \Delta\theta}{\partial \varepsilon_{eff}} = \left(\frac{l \cdot \omega}{2c} \cdot \sqrt{\frac{\mu_{eff}}{\varepsilon_{eff}}} \right)$$

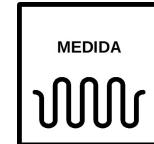
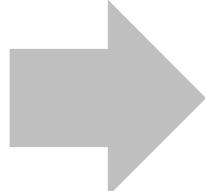
$$\frac{\partial V_{comb}}{\partial \Delta\theta} = -\frac{\sqrt[2]{2}}{2} V \cdot \sin \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right)$$

2. METODOLOGIA – ANÁLISE DIFERENCIAL DO SISTEMA

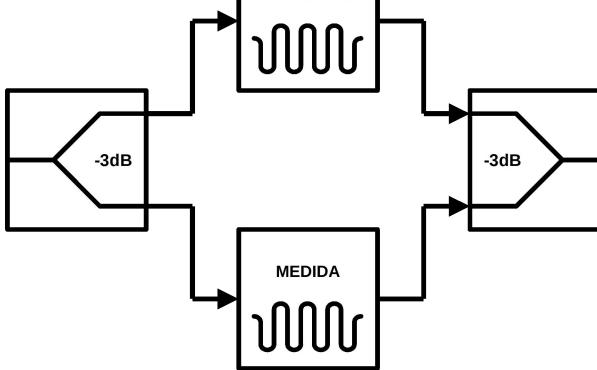
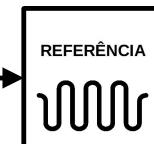
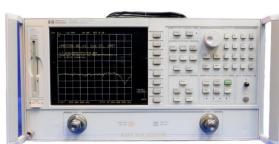
$$\frac{\partial \varepsilon_{eff}}{\partial \varepsilon_{MUT}} = \frac{h}{2W_{ef}} \cdot \ln\left(\frac{\pi}{h} \cdot W_{ef} - 1\right)$$

$$\frac{\partial \Delta\theta}{\partial \varepsilon_{eff}} = \left(\frac{l \cdot \omega}{2c} \cdot \sqrt[2]{\mu_{eff}} \right)$$

$$\frac{\partial V_{comb}}{\partial \Delta\theta} = -\frac{\sqrt[2]{2}}{2} V \cdot \sin\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right)$$

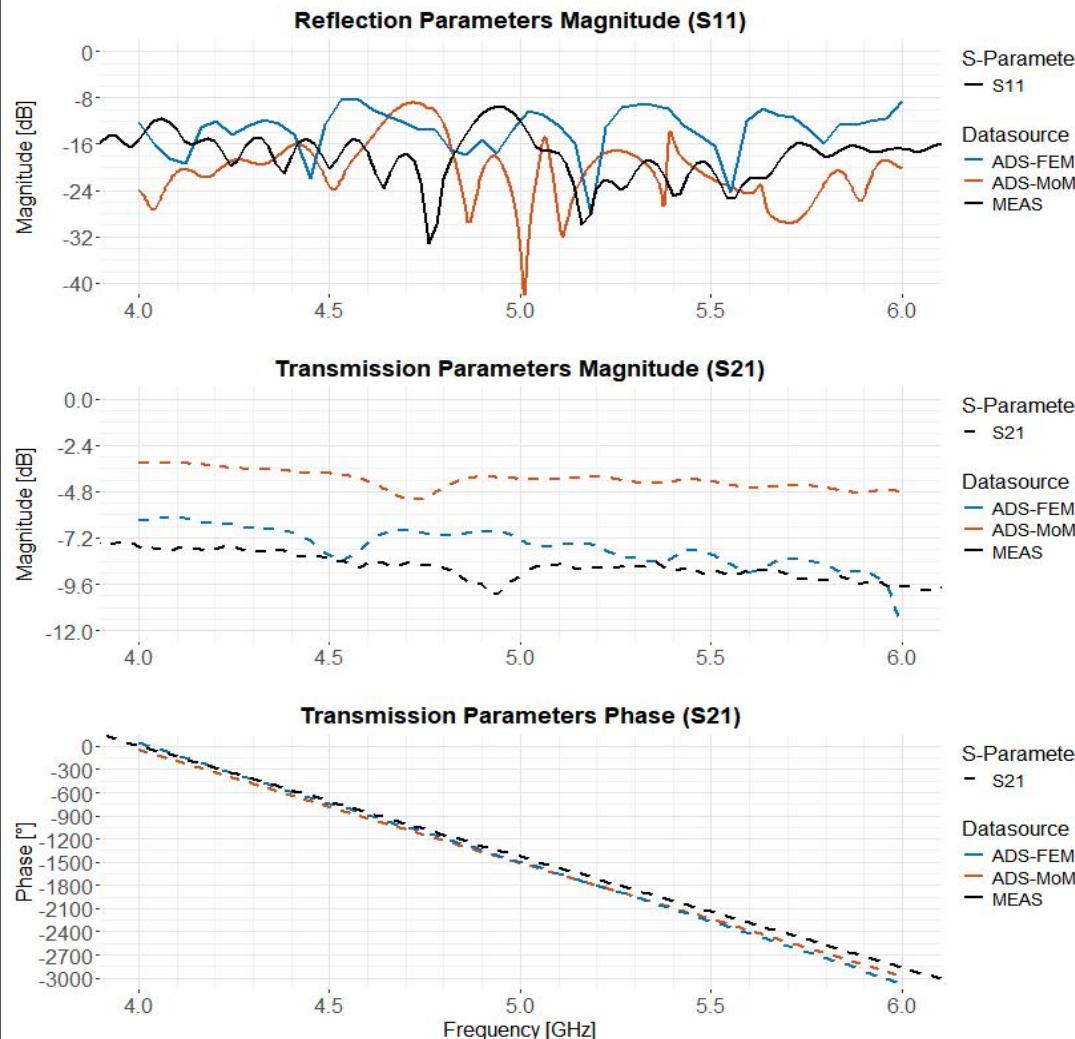


Caracterização I

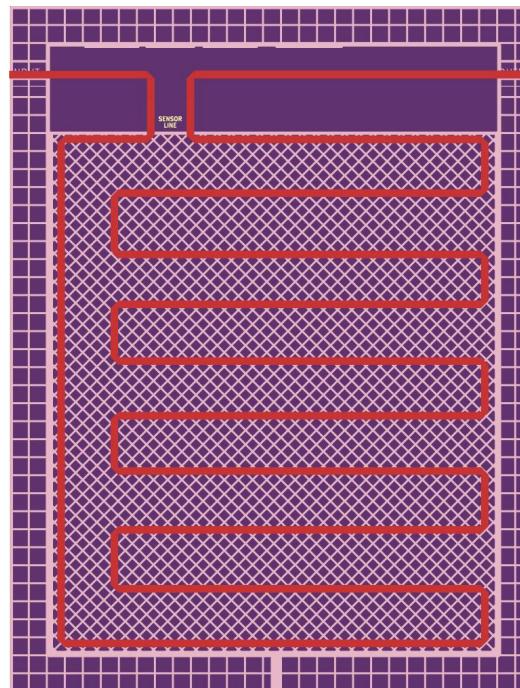


Caracterização II

2. METODOLOGIA – SIMULAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



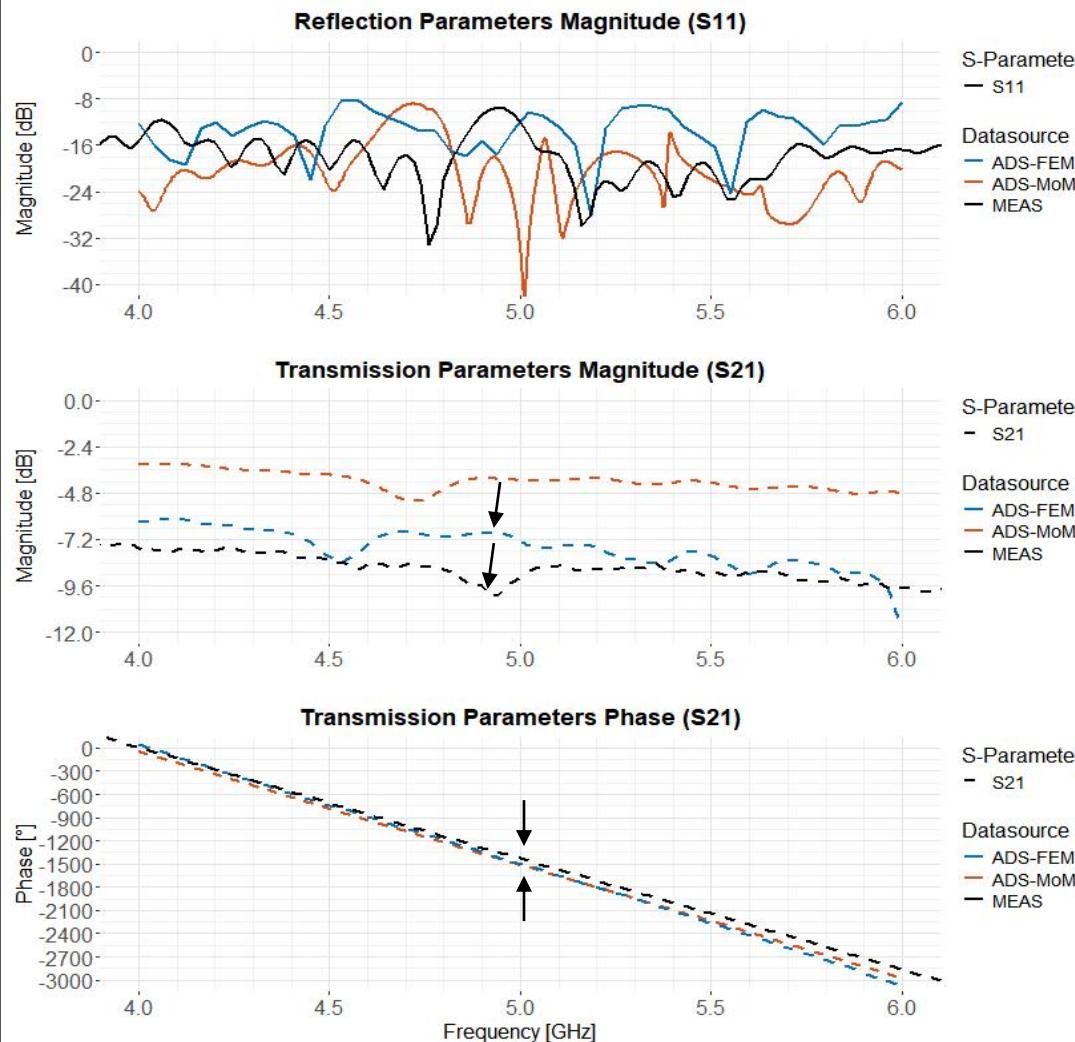
Caracterização I



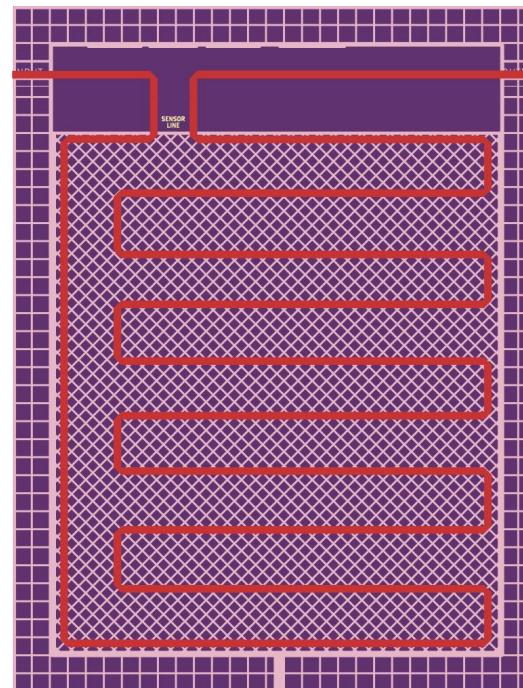
Design de linha de microfita para transdutor de permissividade elétrica

Protótipo de linha de microfita para transdutor de permissividade elétrica

2. METODOLOGIA – SIMULAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



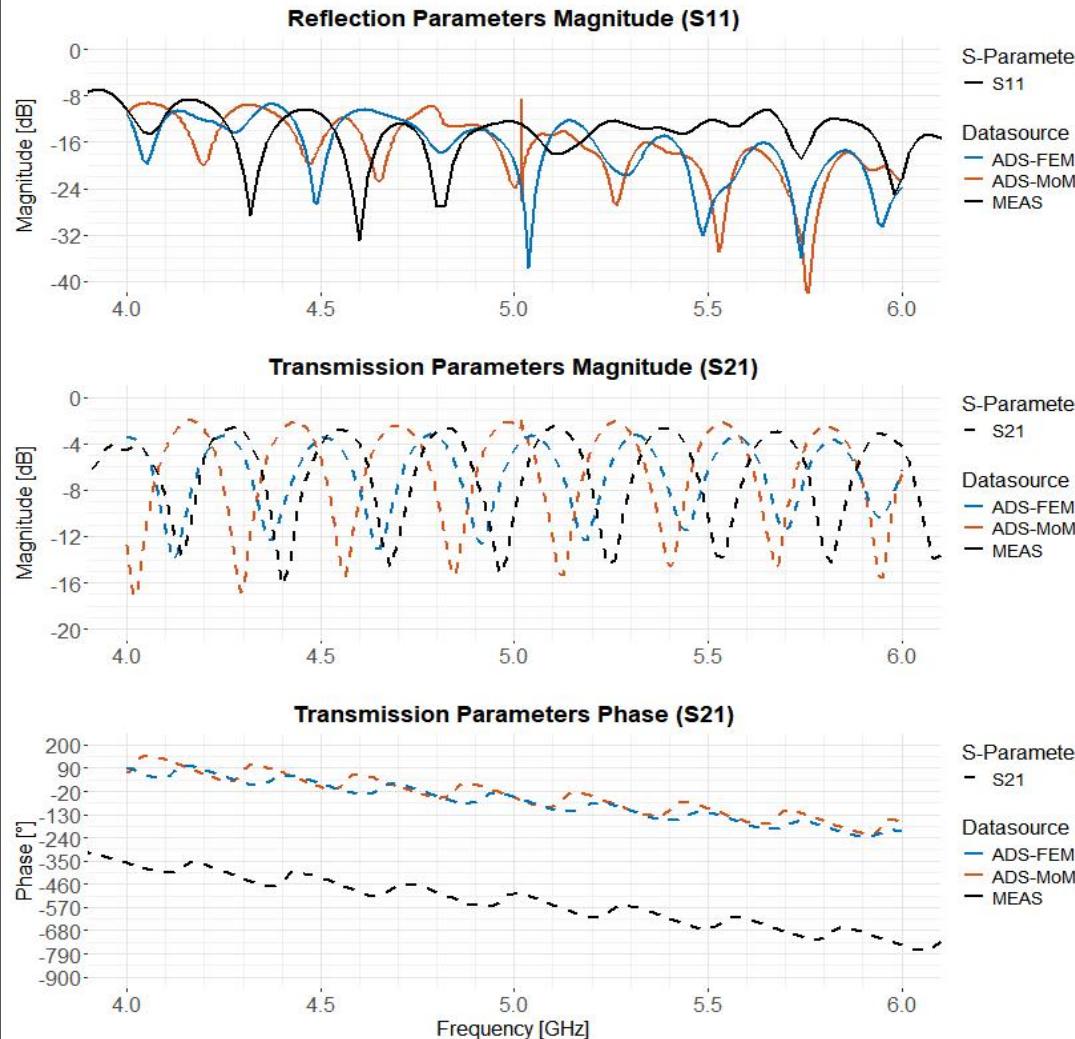
Caracterização I



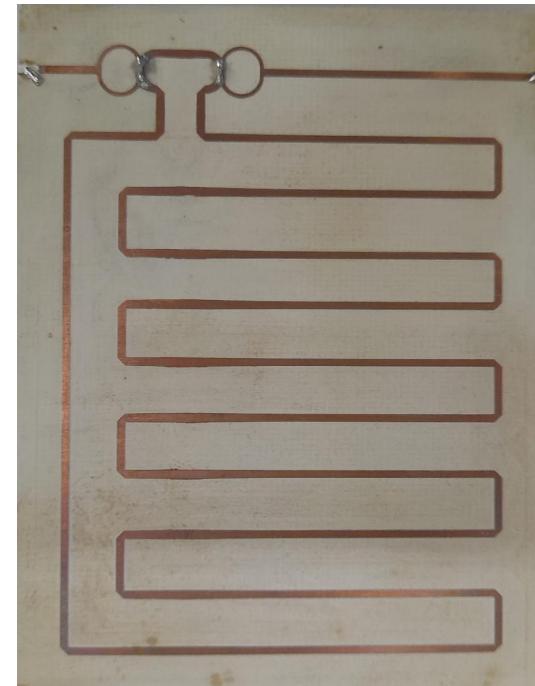
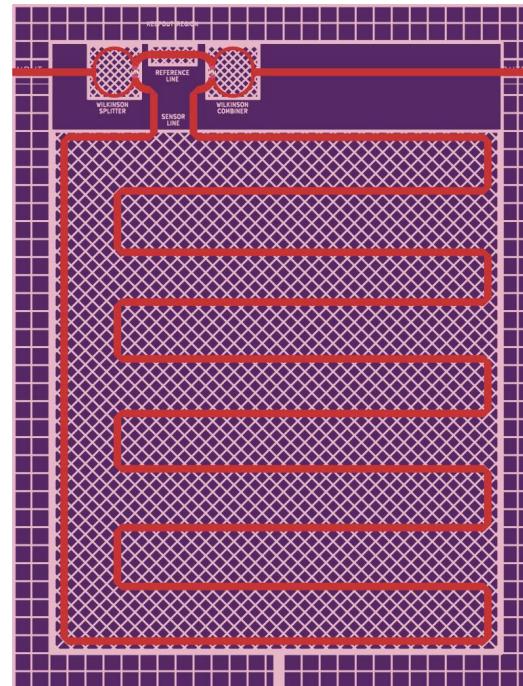
Design de linha de microfita para transdutor de permissividade elétrica

Protótipo de linha de microfita para transdutor de permissividade elétrica

2. METODOLOGIA – SIMULAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



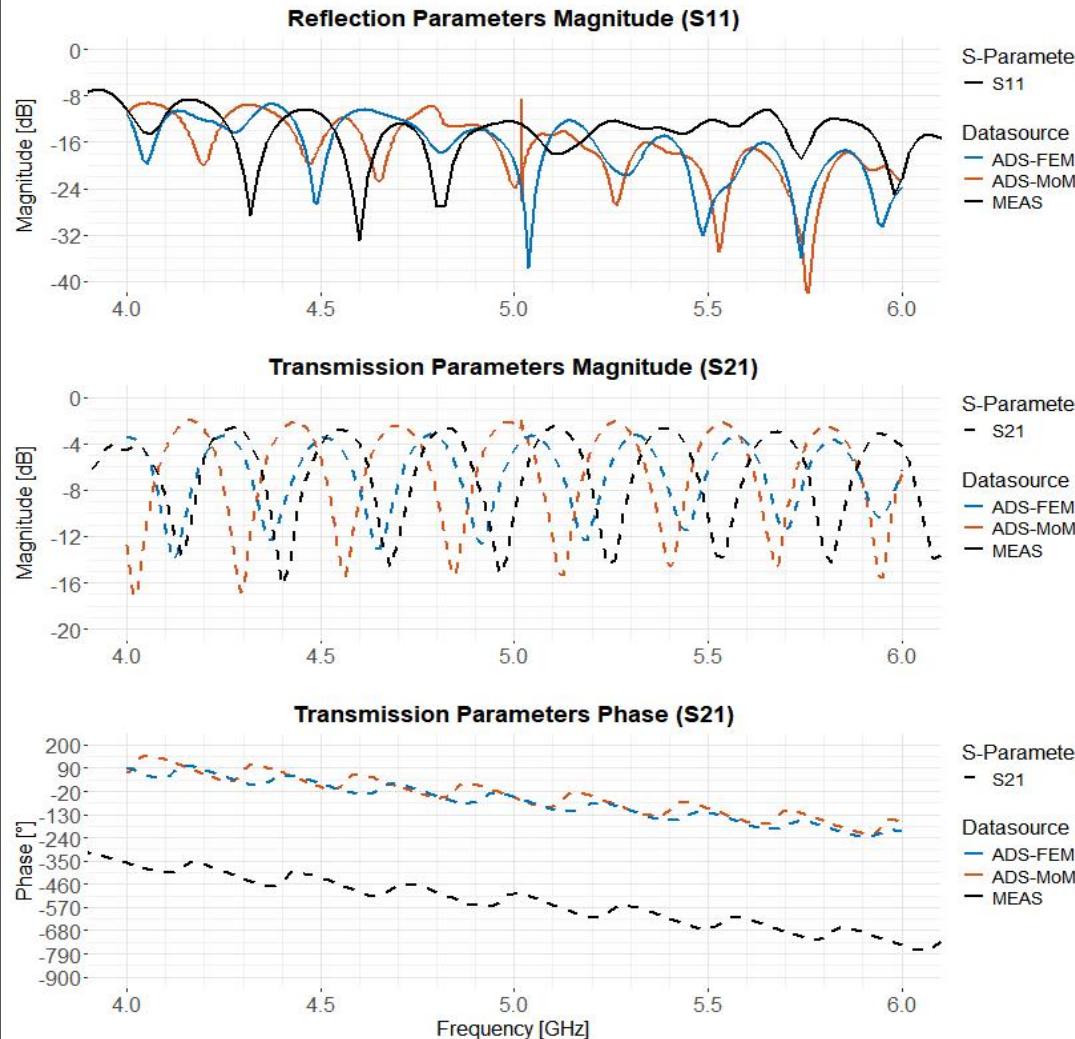
Caracterização II



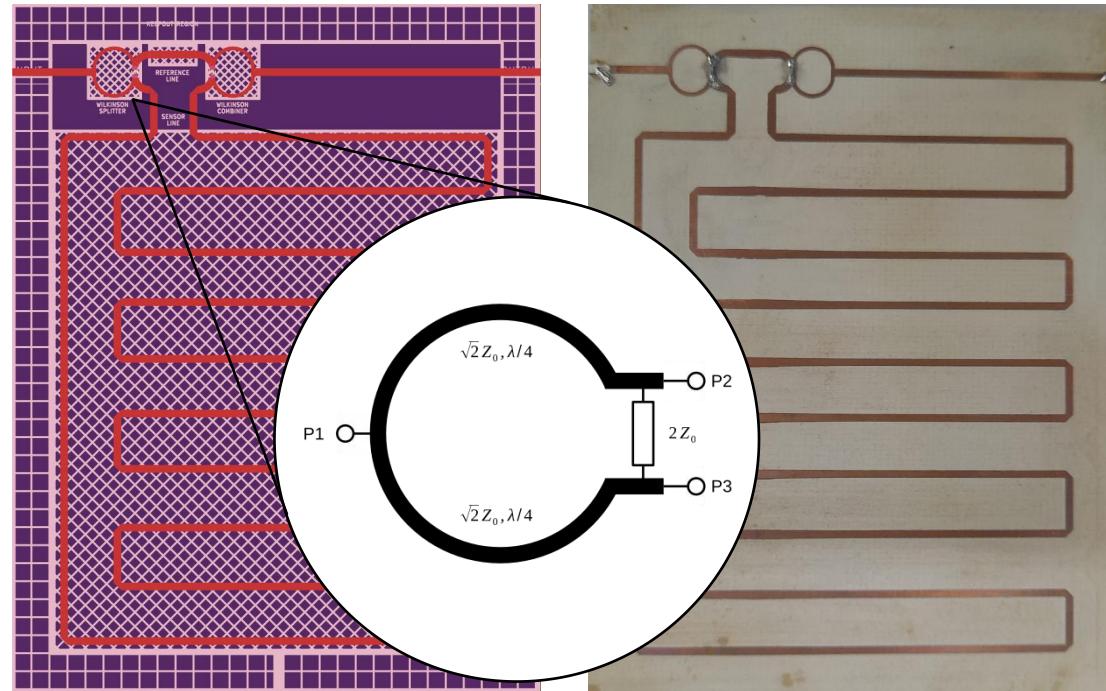
Design de sensor com estruturas de divisão de potência

Protótipo de sensor com estruturas de divisão de potência

2. METODOLOGIA – SIMULAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



Caracterização II



Design de sensor com estruturas de divisão de potência

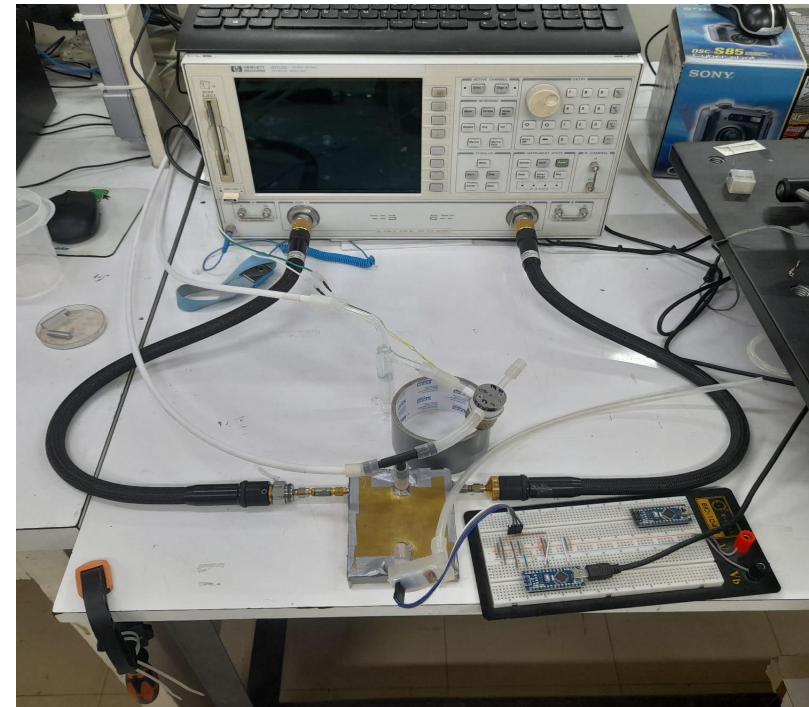
Protótipo de sensor com estruturas de divisão de potência

2. METODOLOGIA – ENSAIOS COM GASES

Bancada de gases

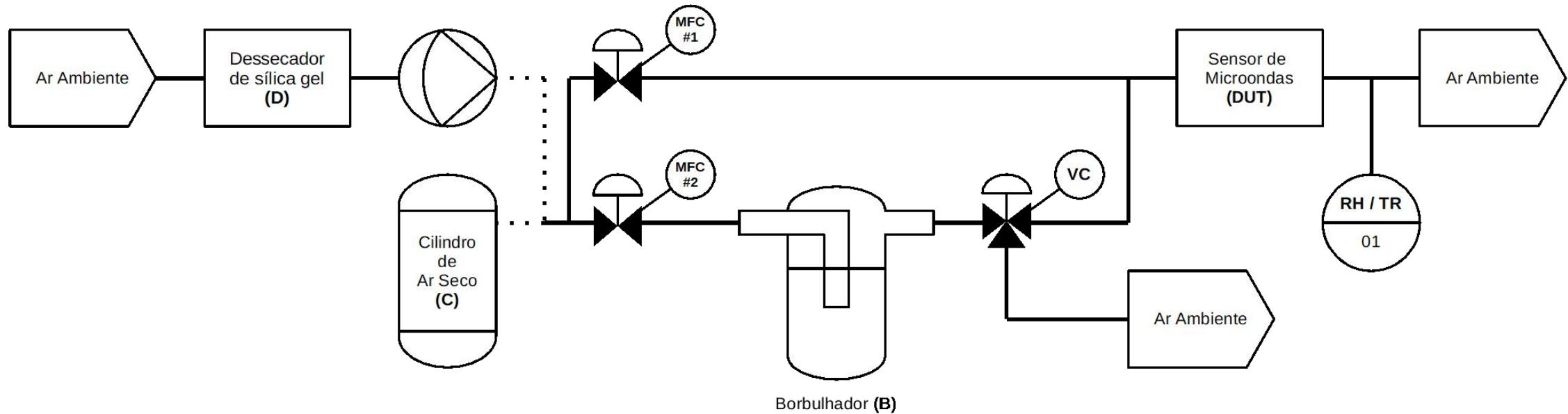


Bancada de Medidas

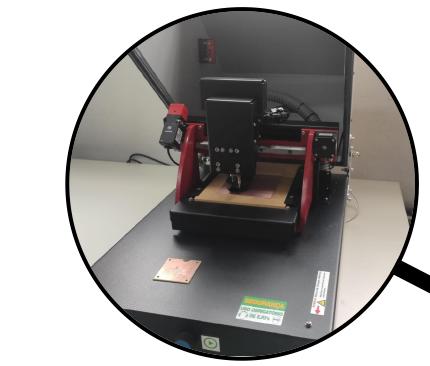


2. METODOLOGIA – ENSAIOS COM GASES

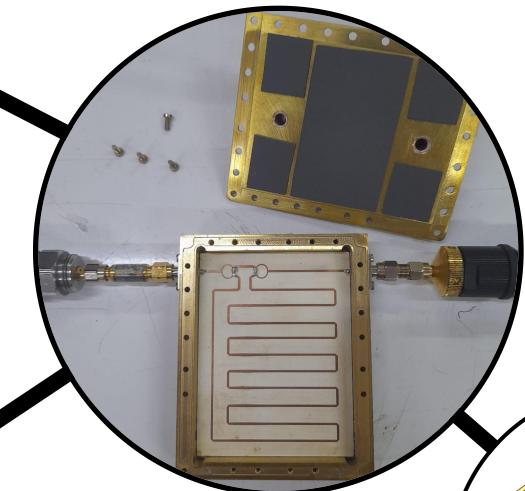
Diagrama esquemático da bancada de gases



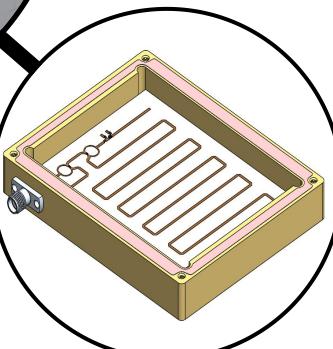
3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS



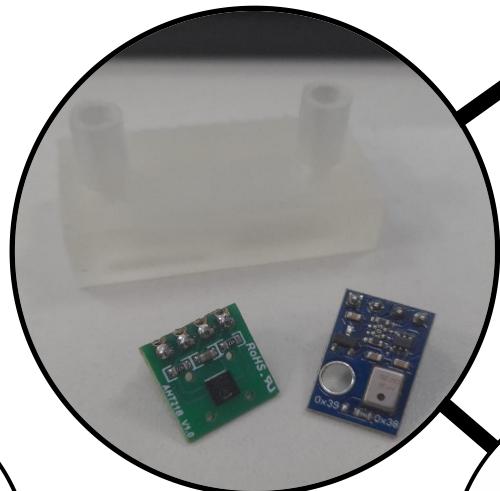
Microfresamento



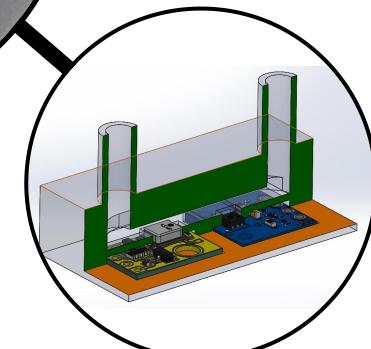
Microfresamento



CAD - 3D

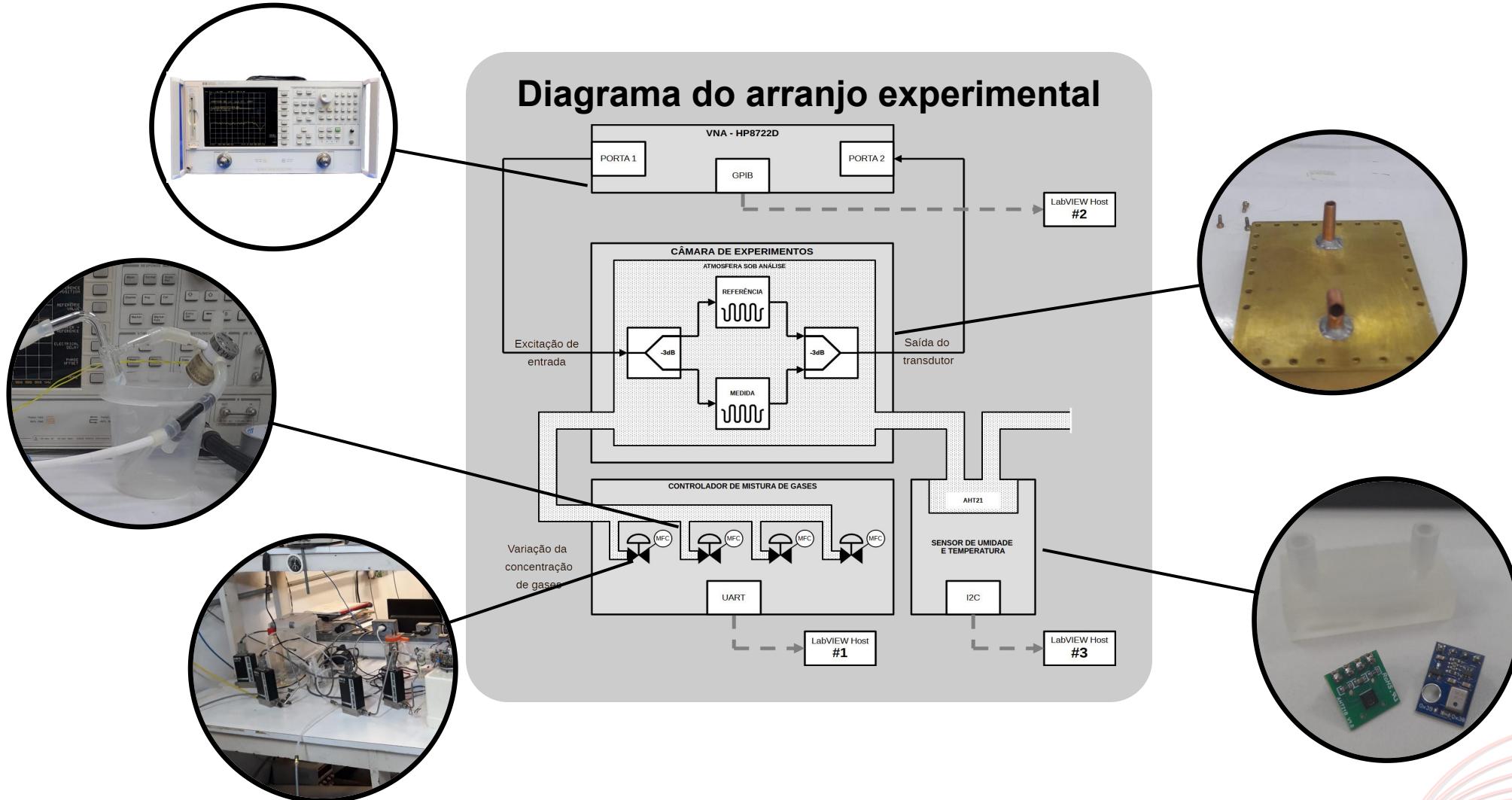


Impressão 3D



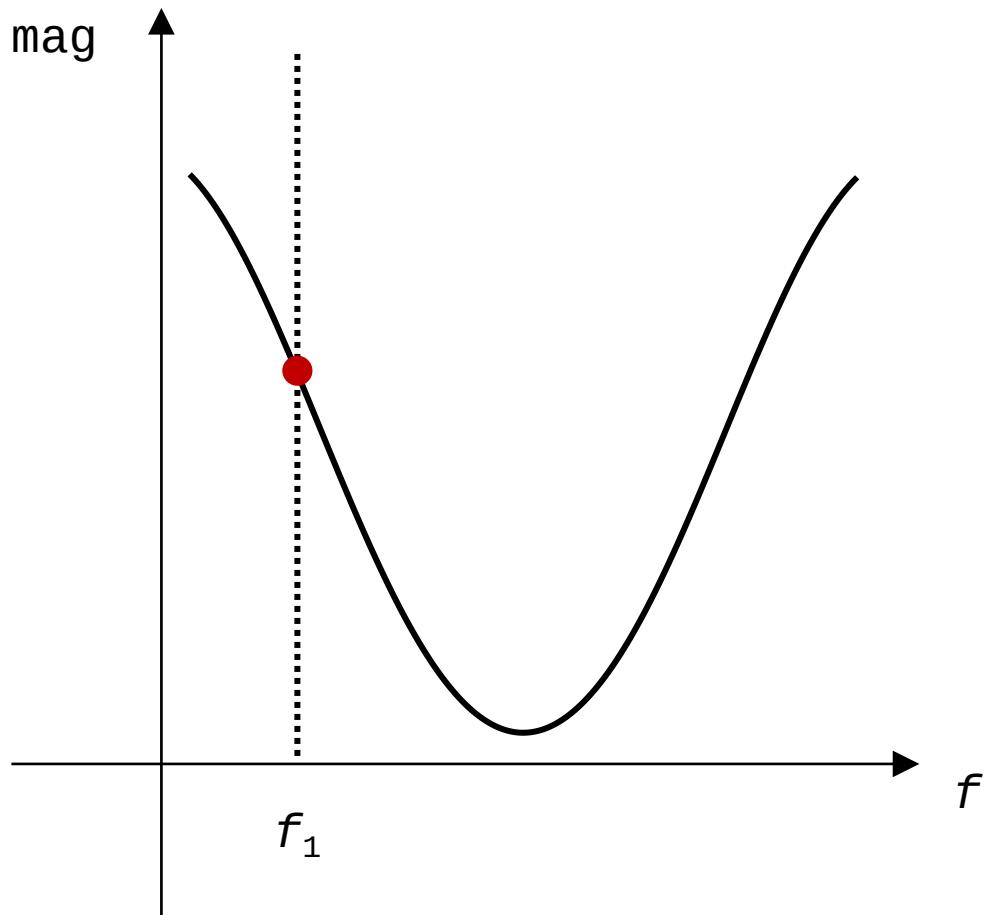
CAD - 3D

3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

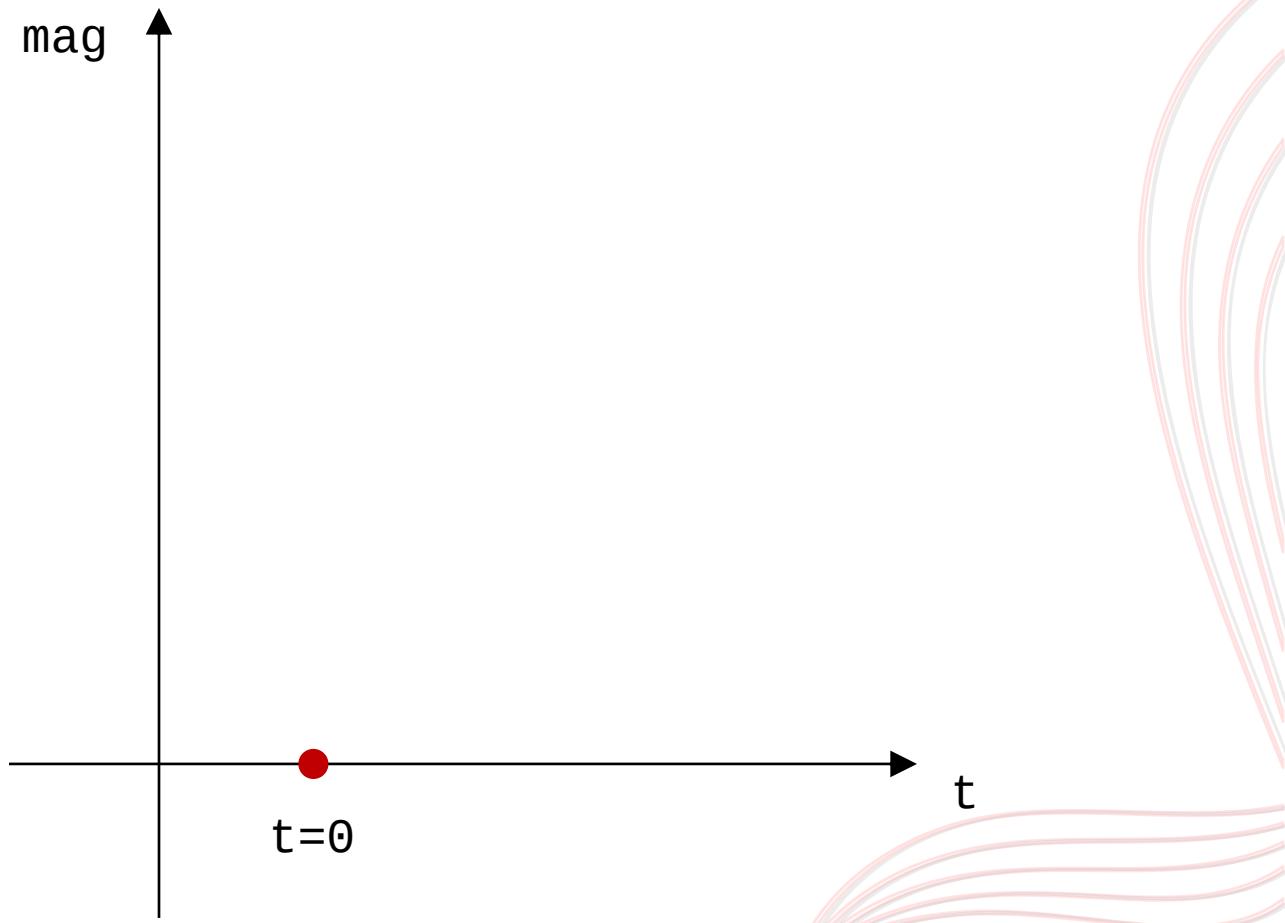


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Representação em Parâmetro S

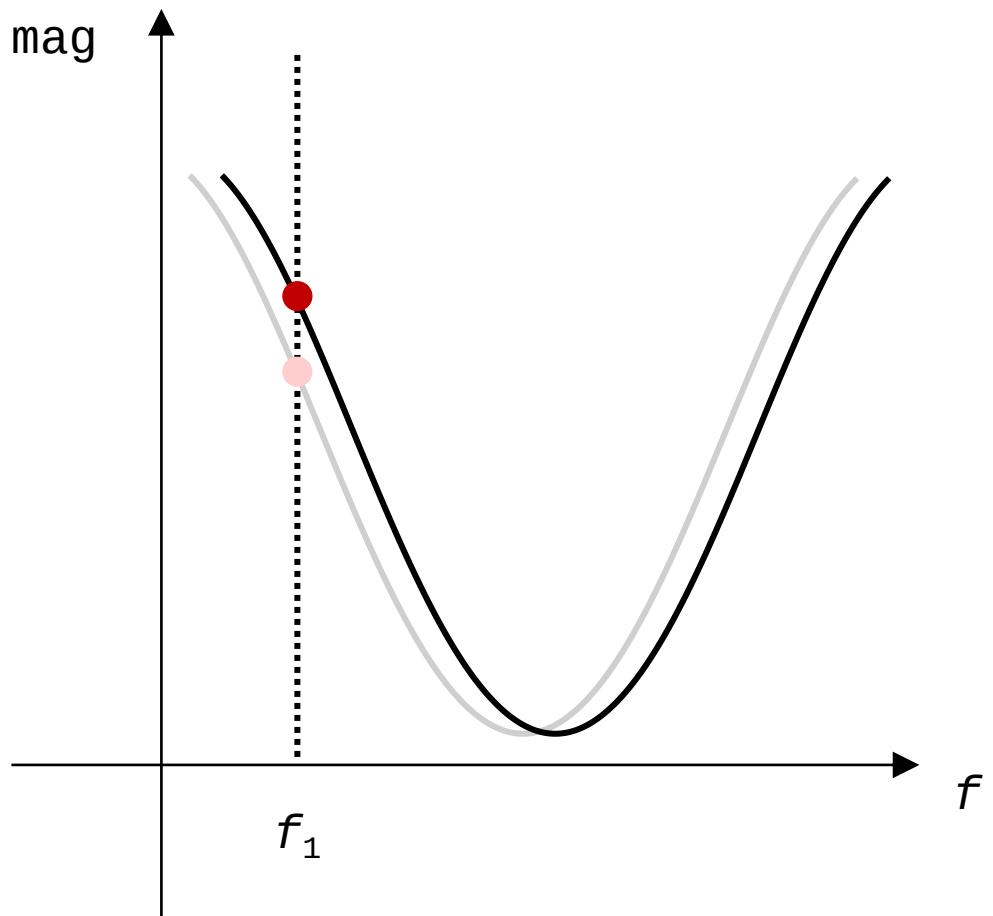


Representação Temporal

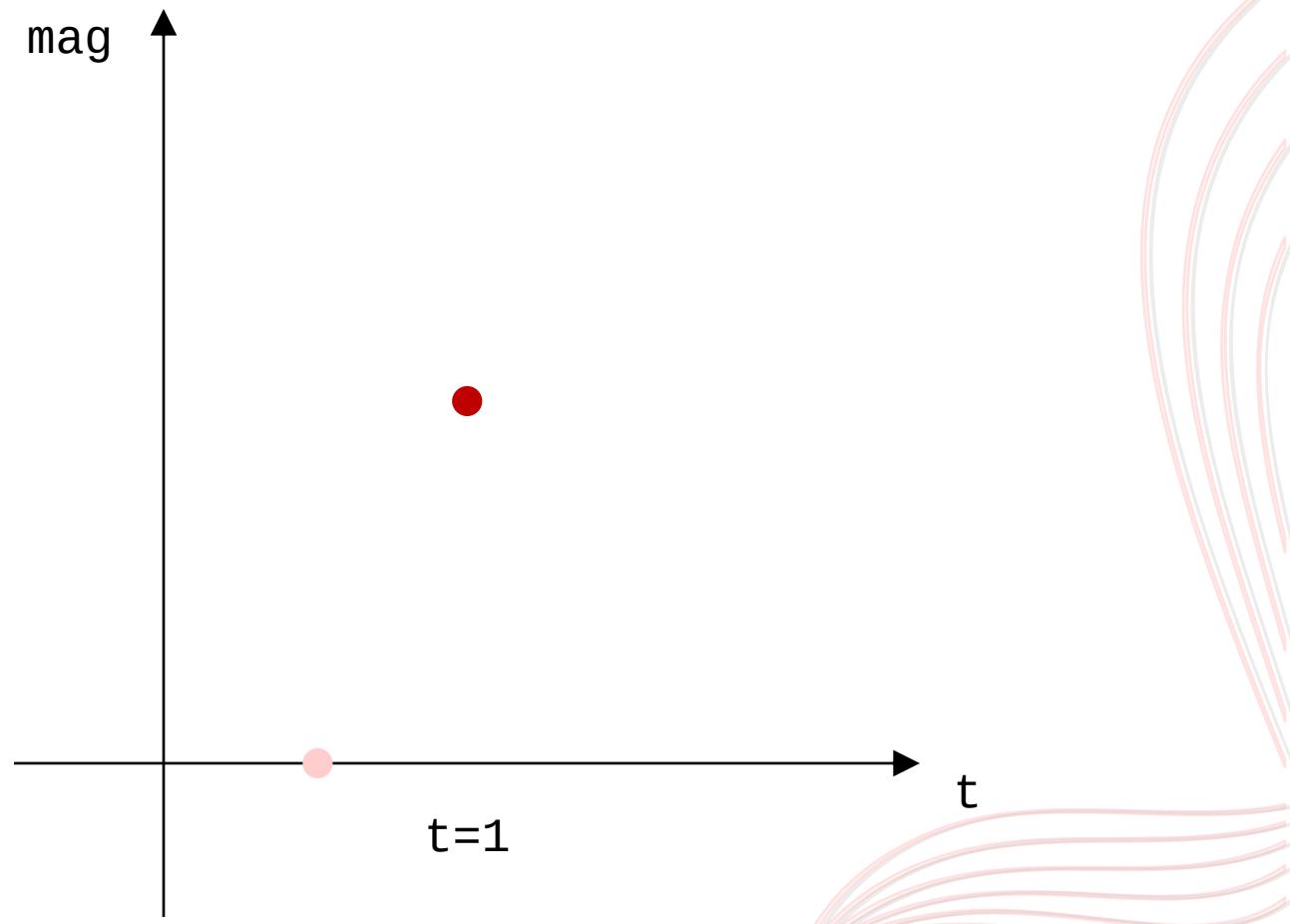


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Representação em Parâmetro S

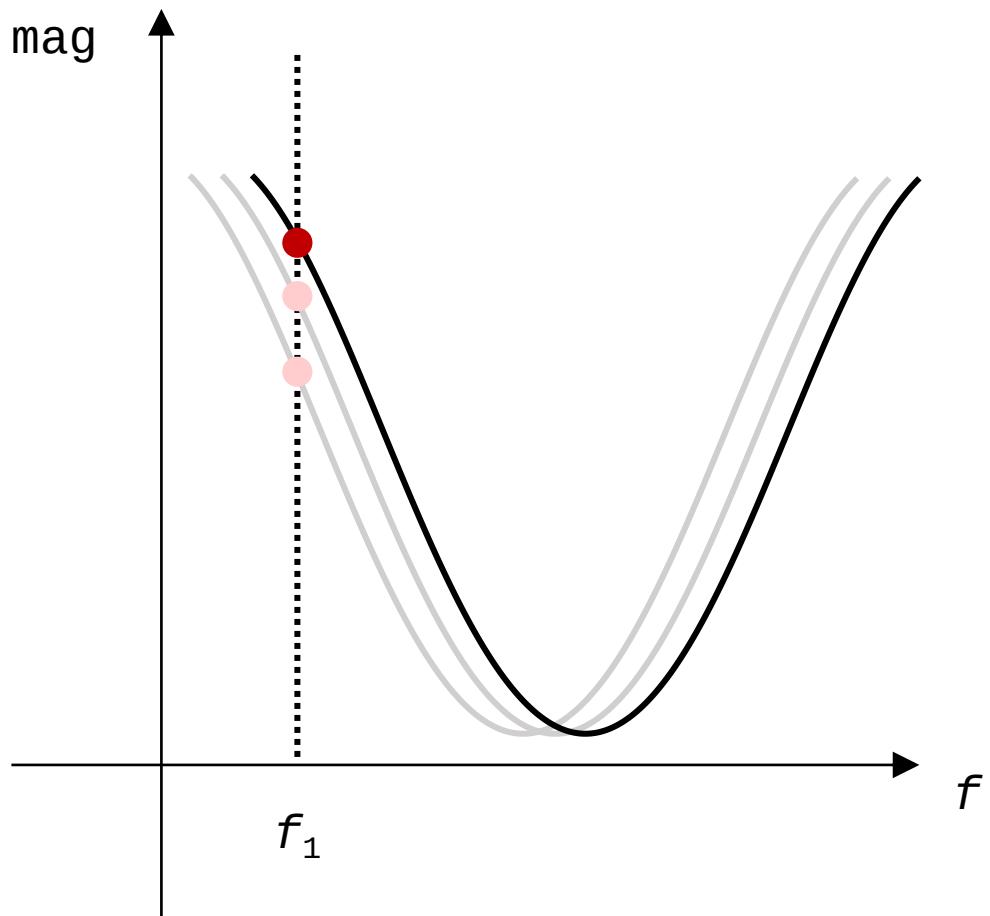


Representação Temporal

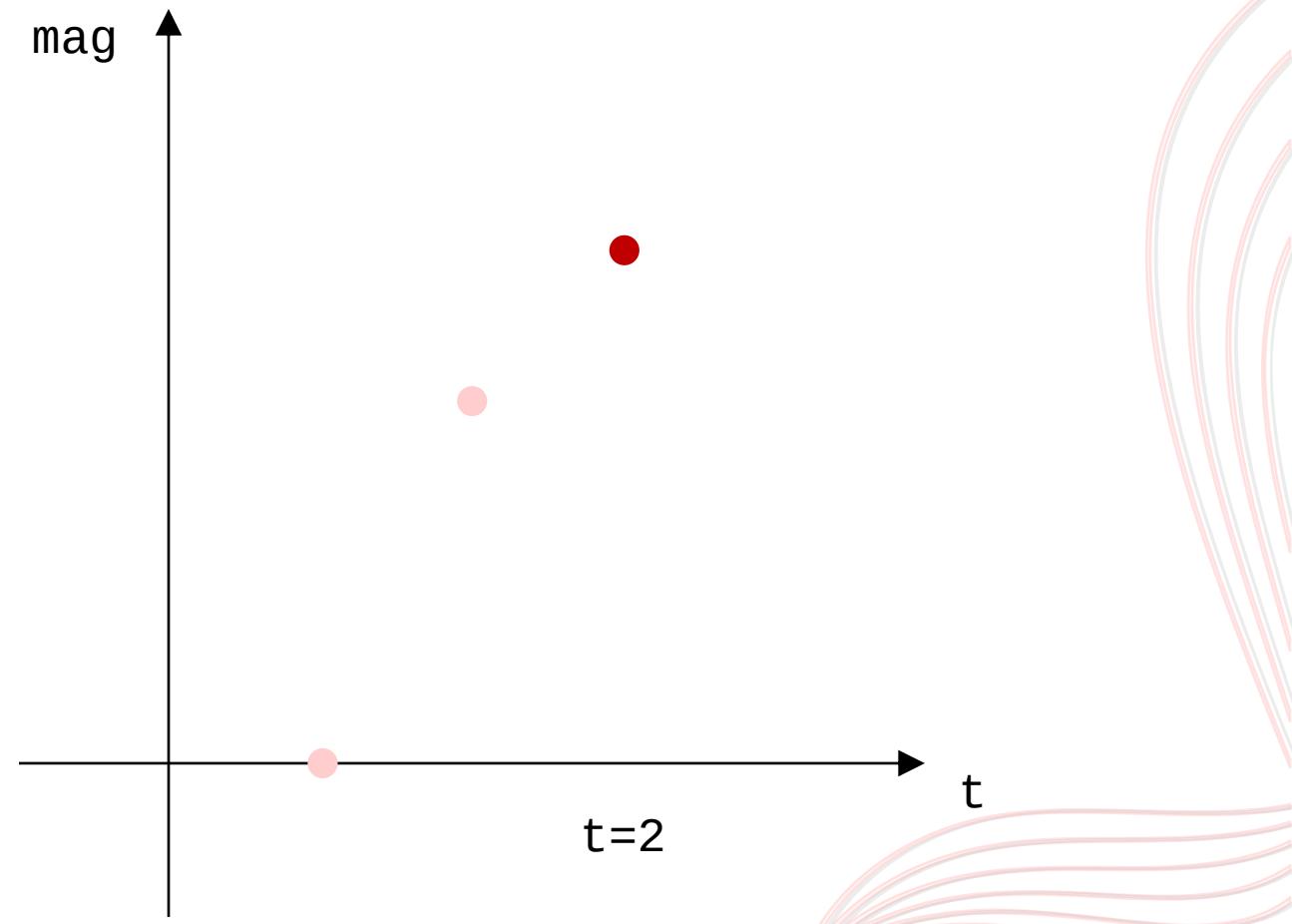


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Representação em Parâmetro S

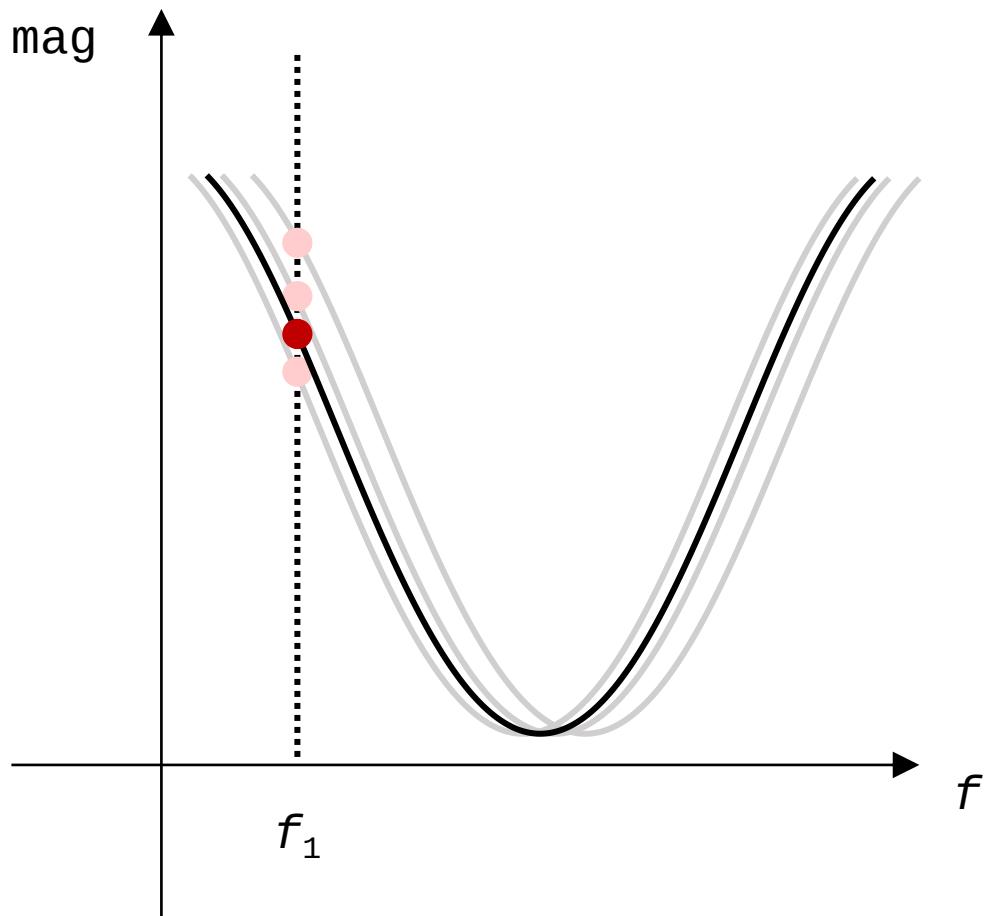


Representação Temporal

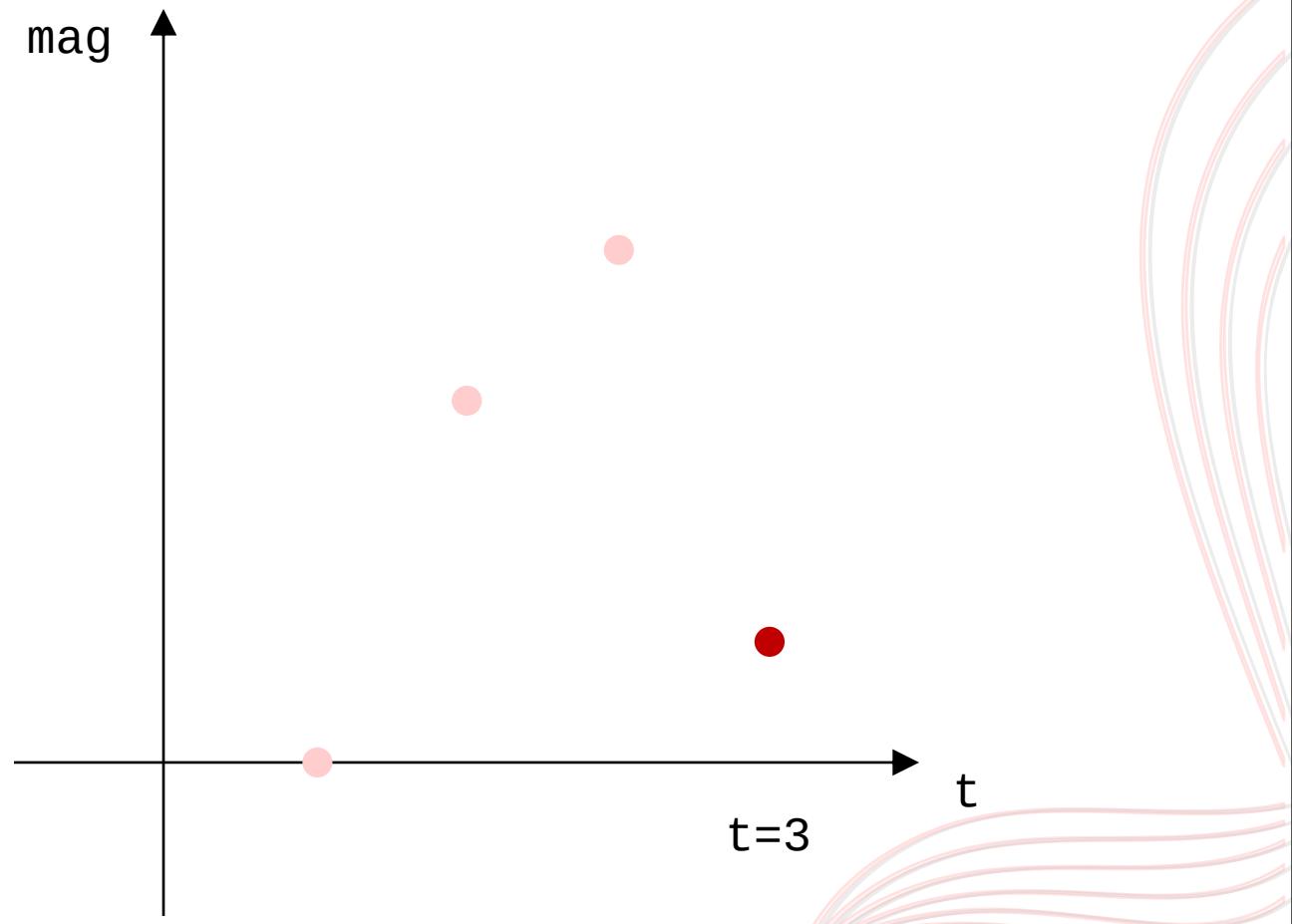


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Representação em Parâmetro S

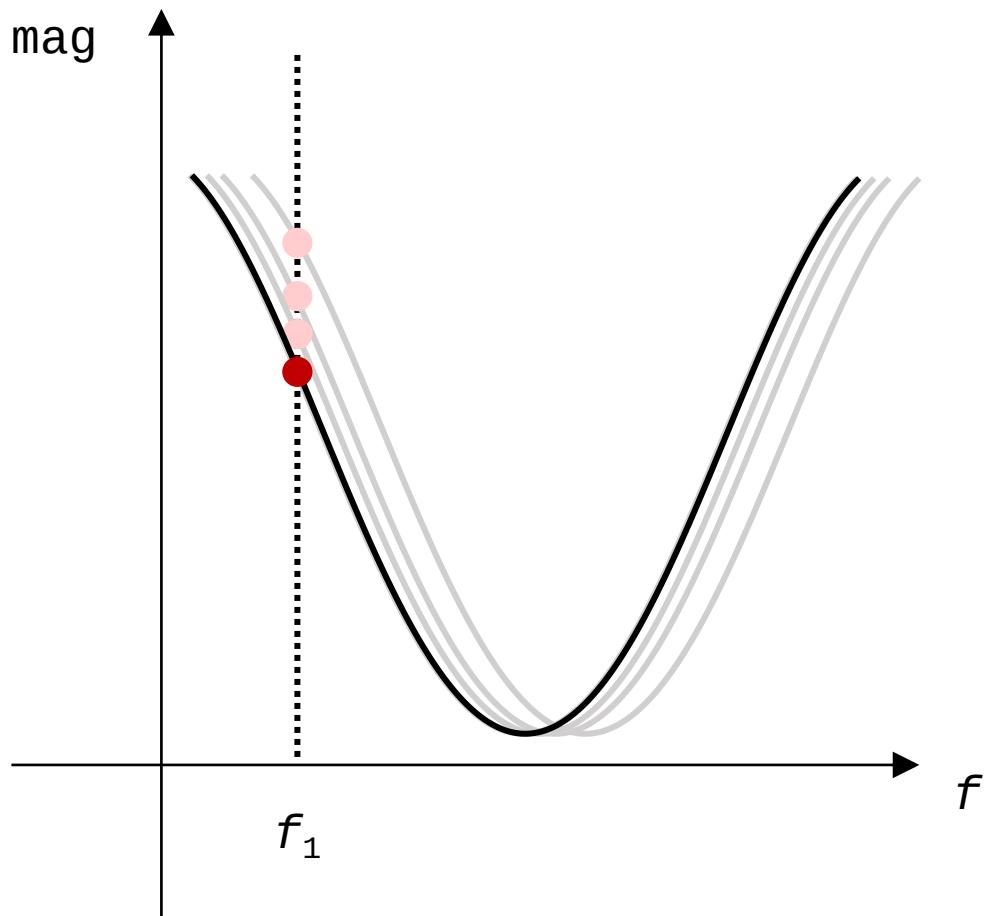


Representação Temporal

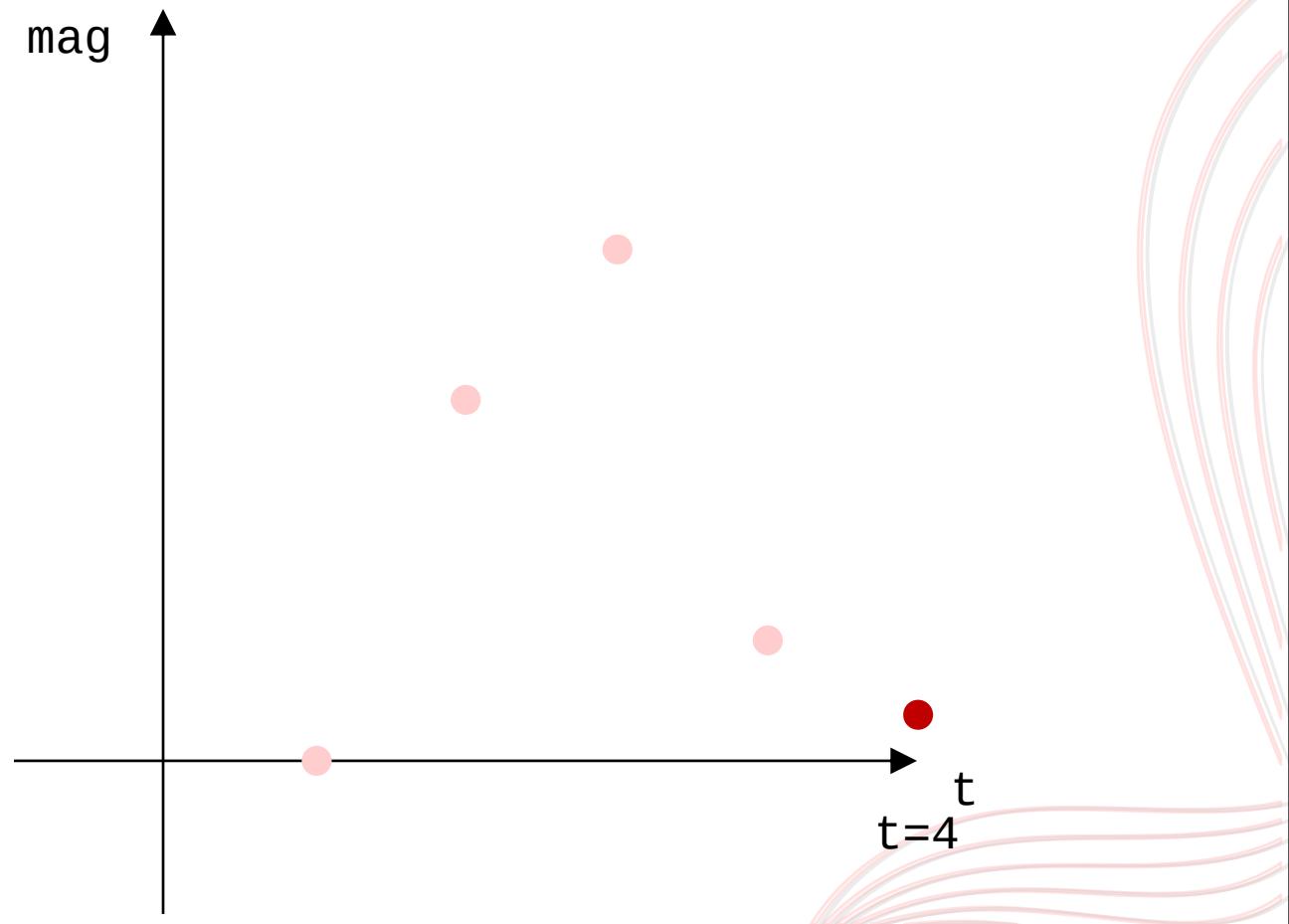


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Representação em Parâmetro S

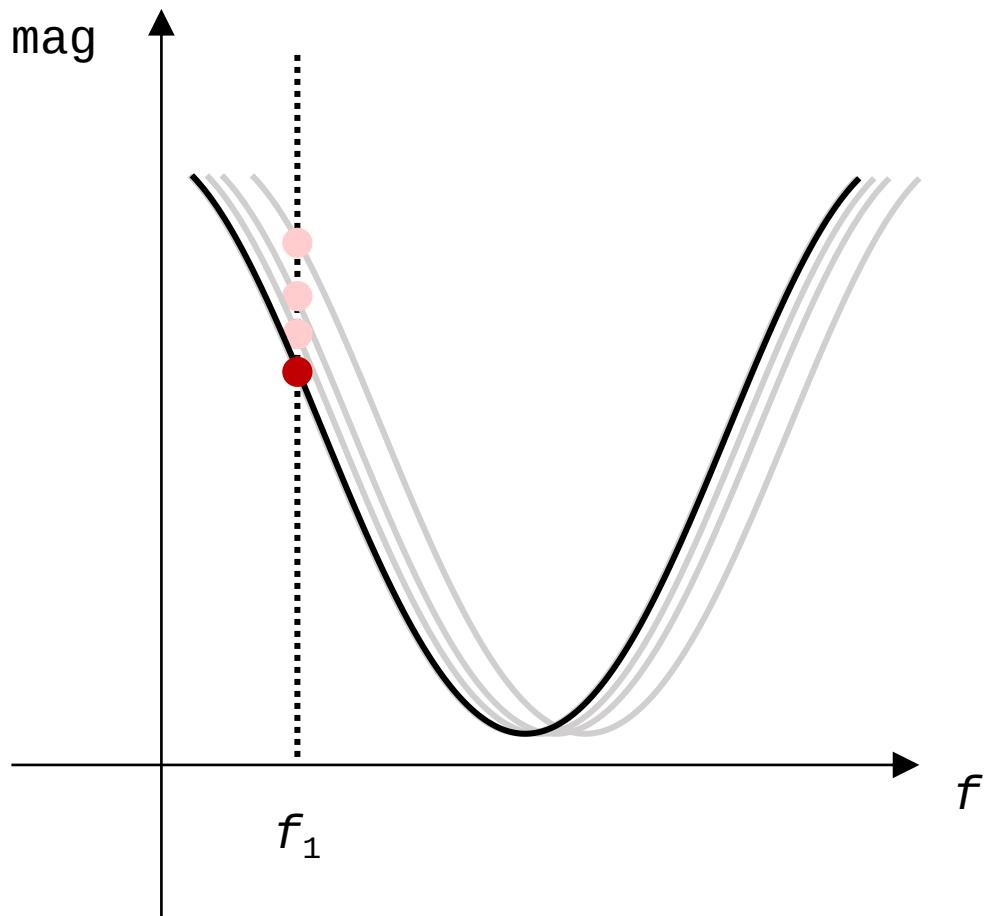


Representação Temporal

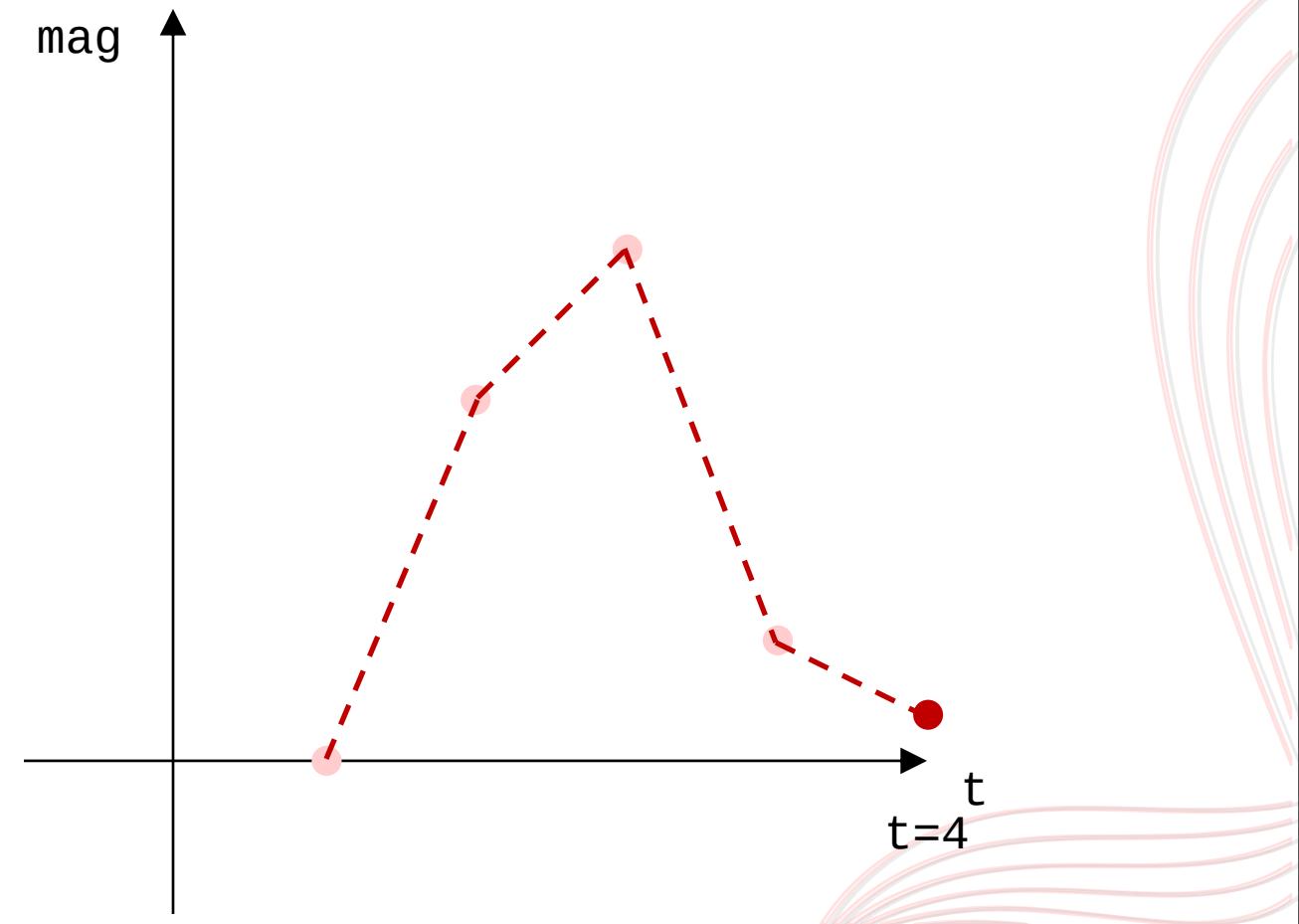


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Representação em Parâmetro S

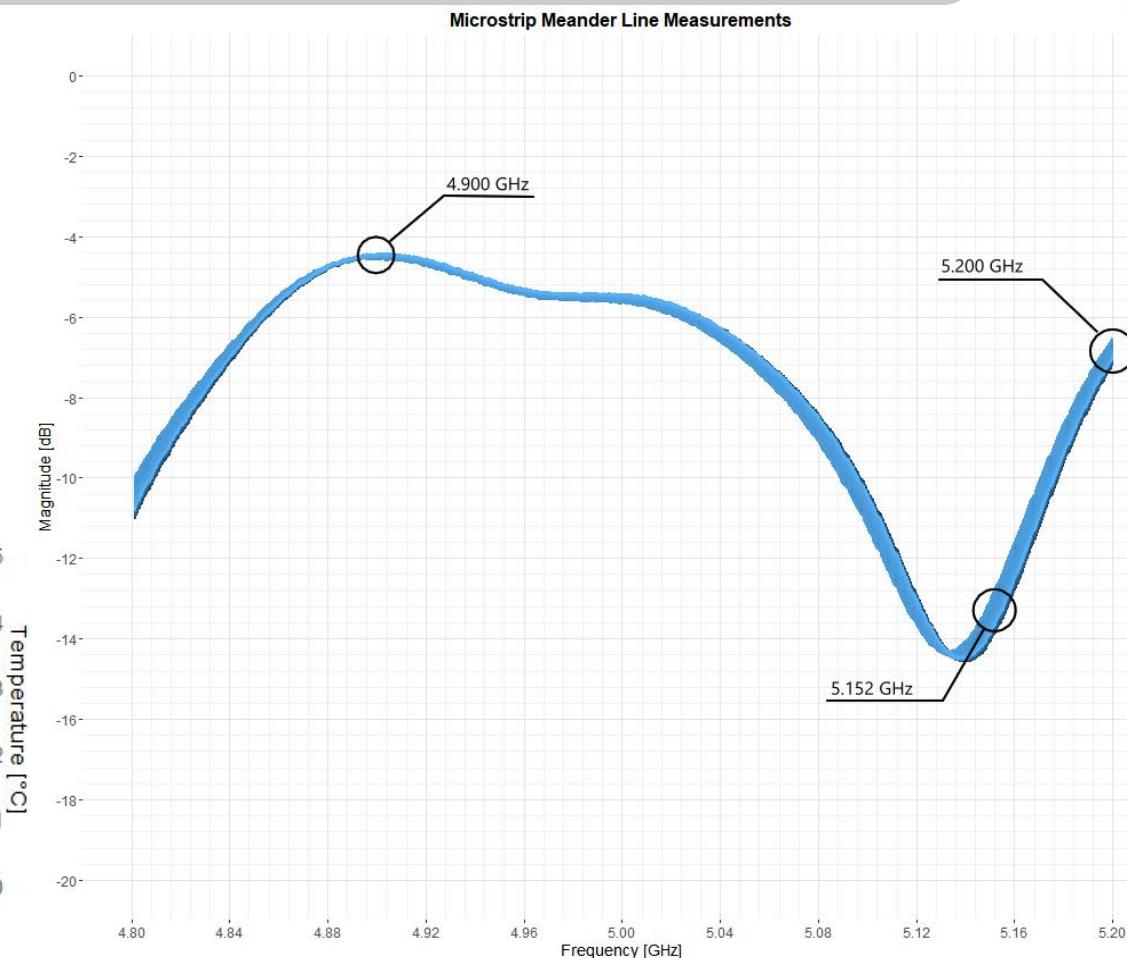
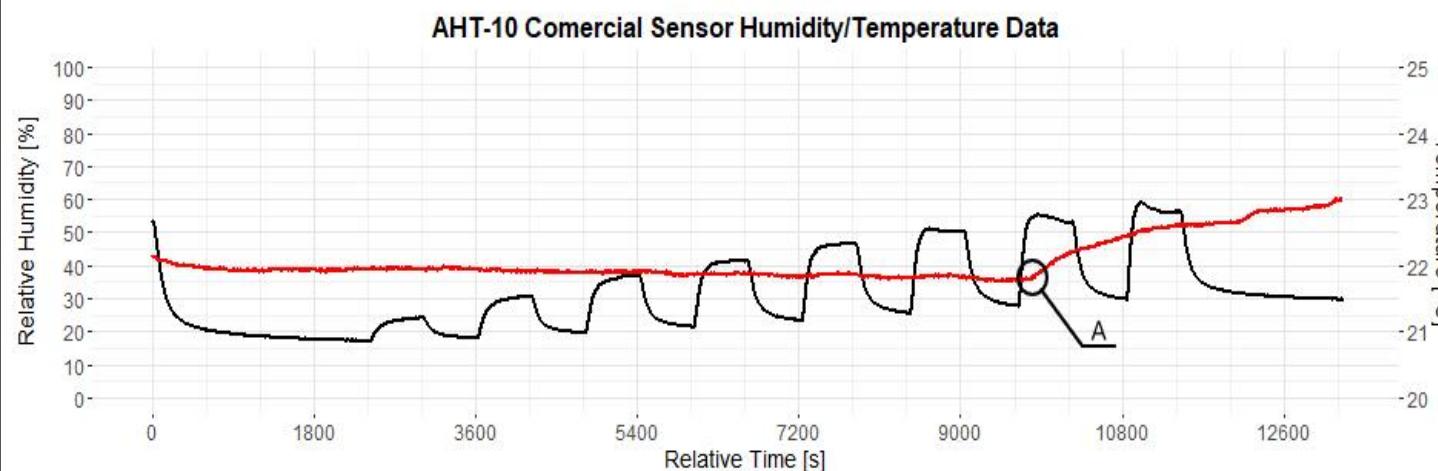
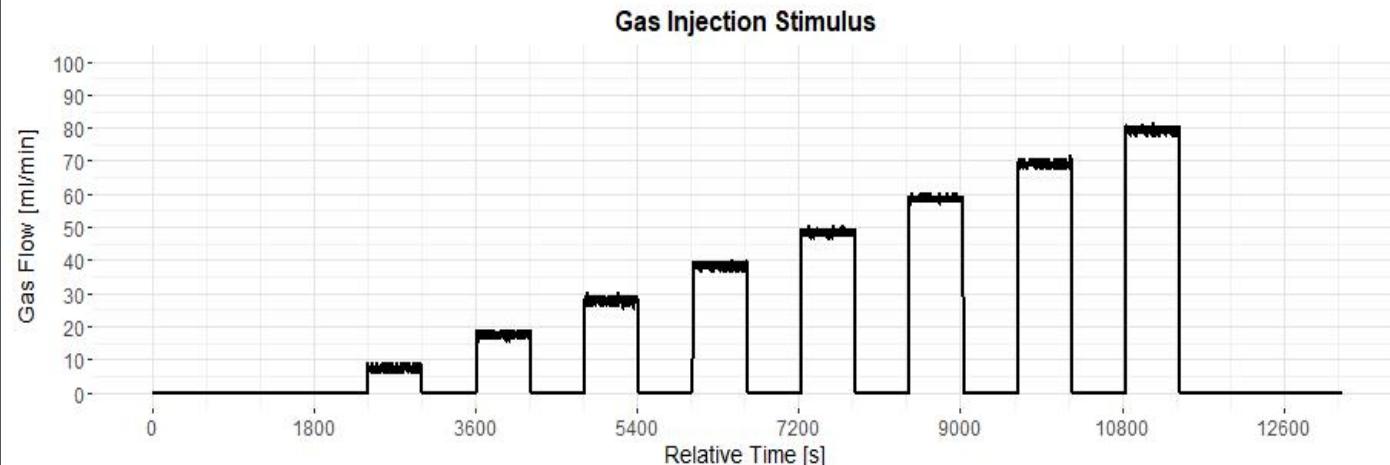


Representação Temporal



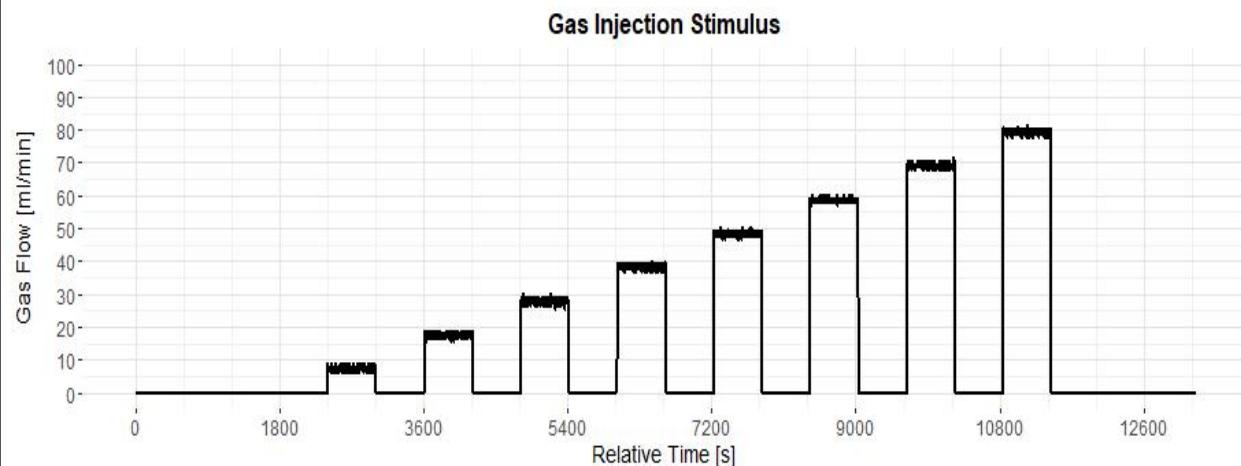
3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Experimento #4 – Atmosfera de ar Seco com vapor de Acetona

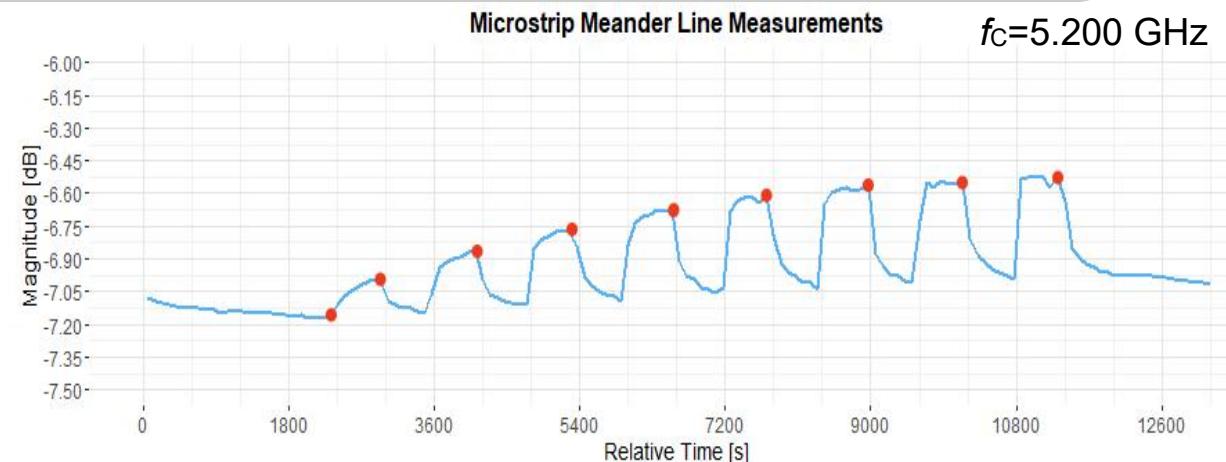
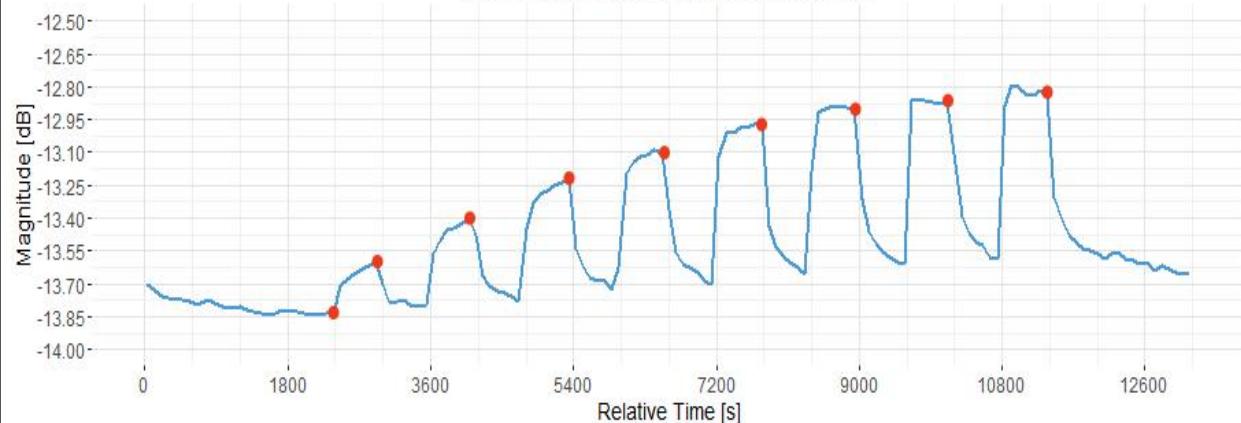


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

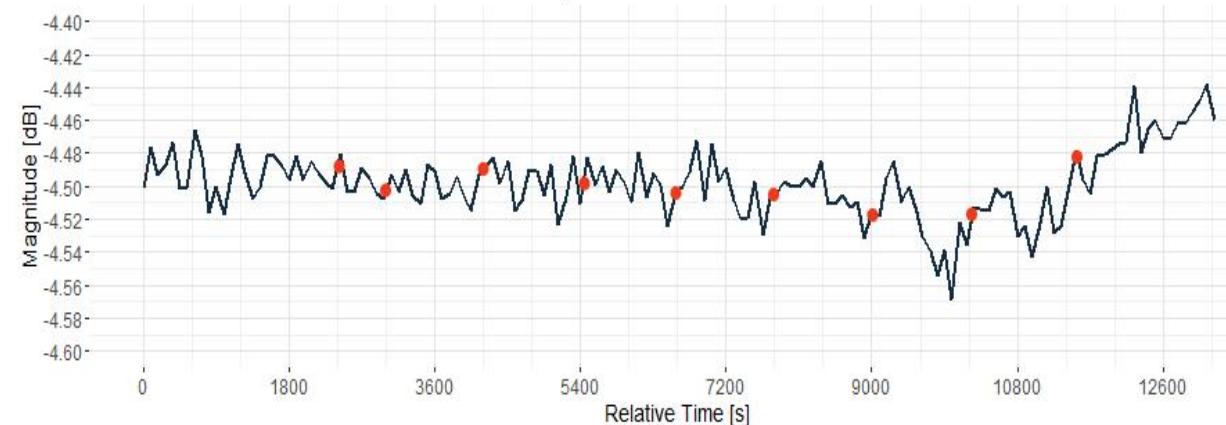
Experimento #4 – Atmosfera de ar Seco com vapor de Acetona



Microstrip Meander Line Measurements $f_C=5.152 \text{ GHz}$

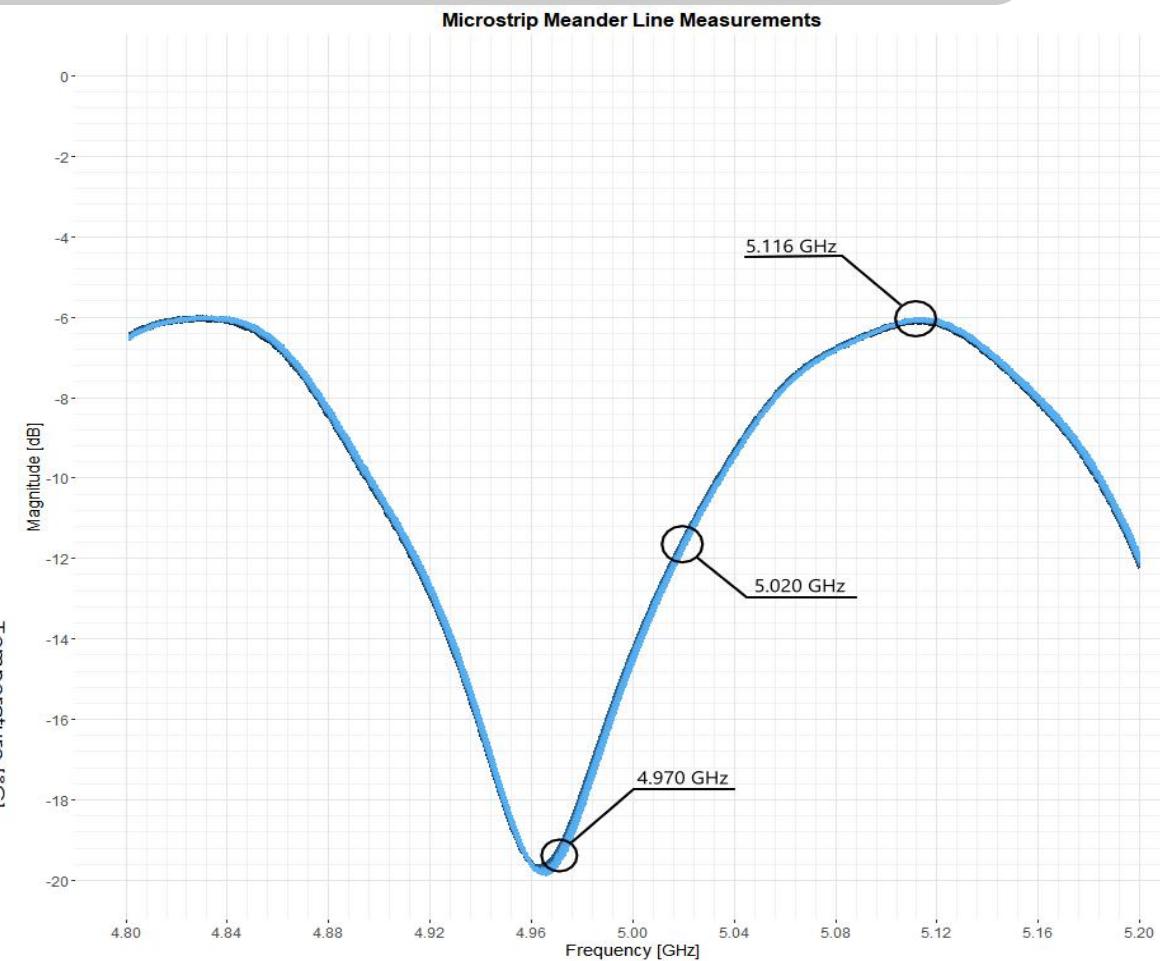
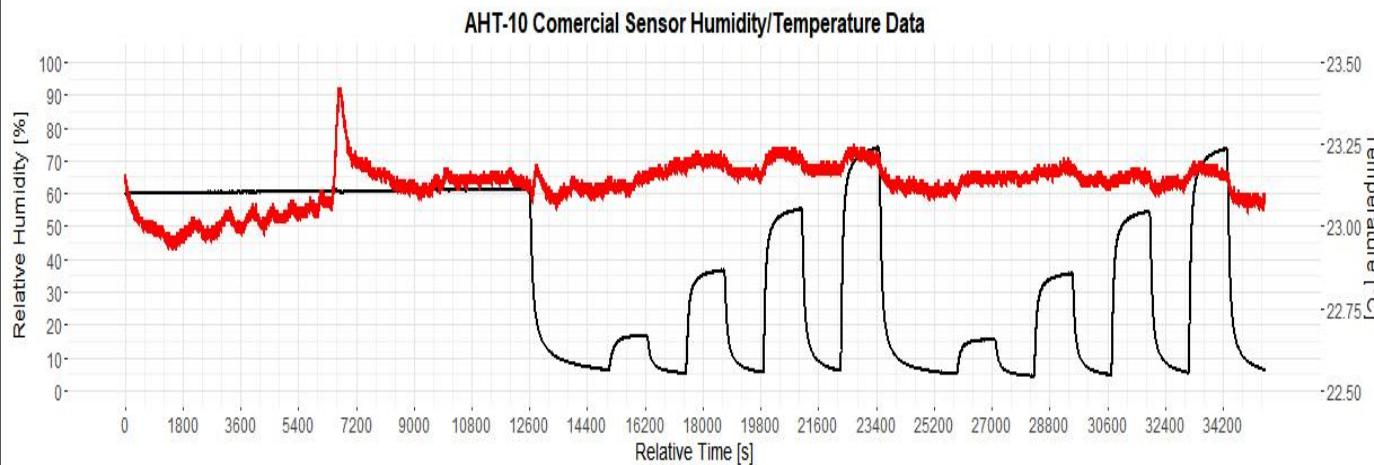
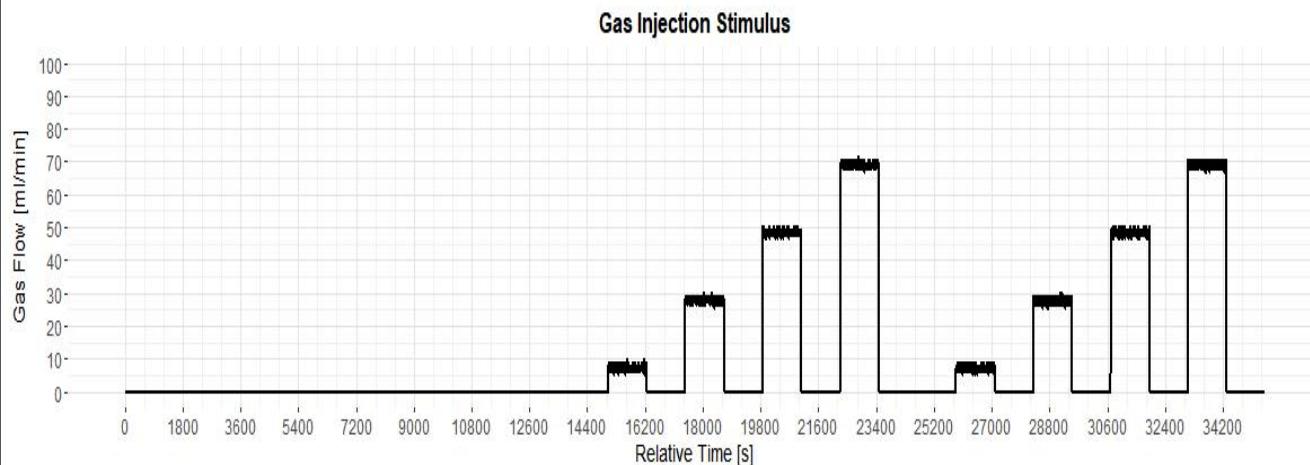


Microstrip Meander Line Measurements $f_C=4.900 \text{ GHz}$



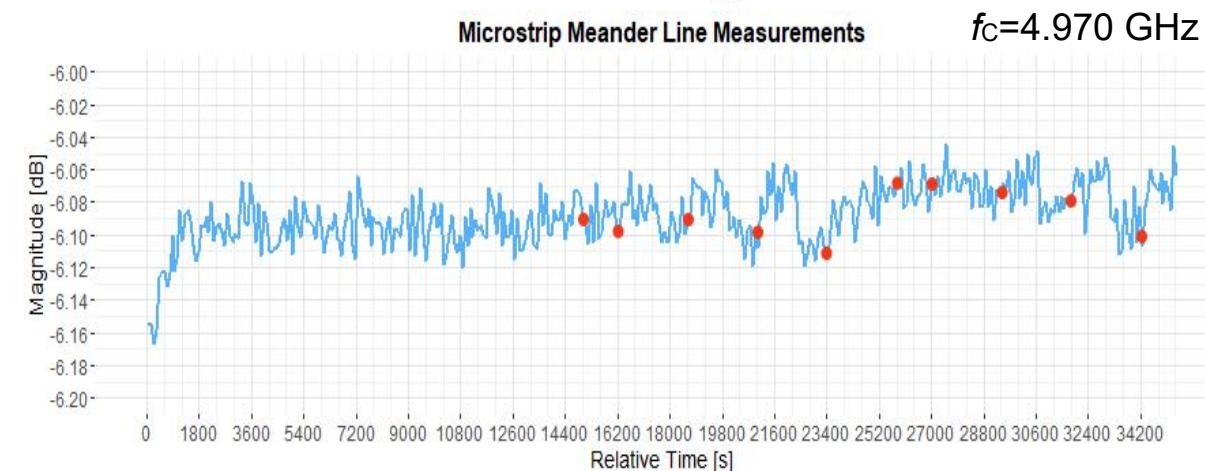
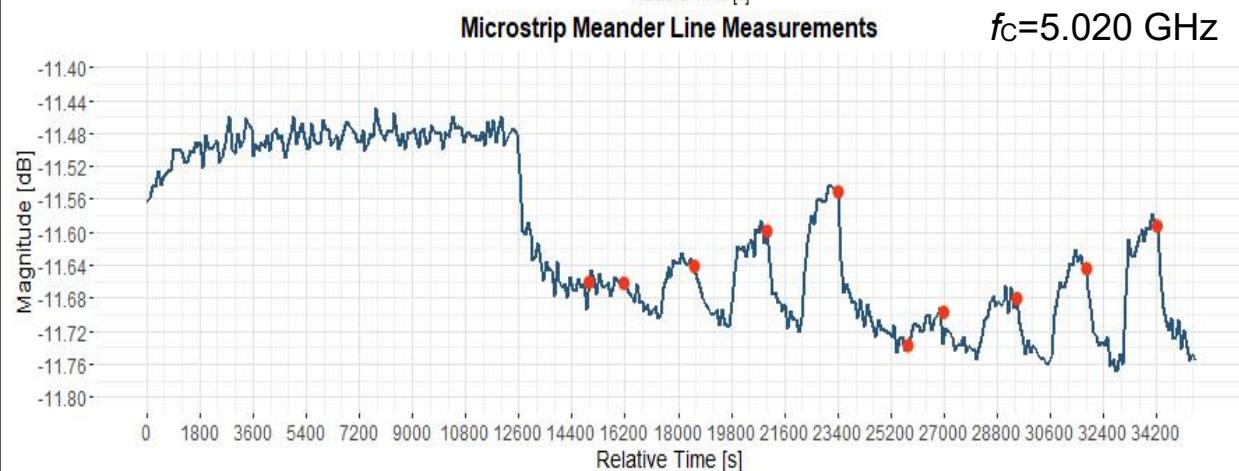
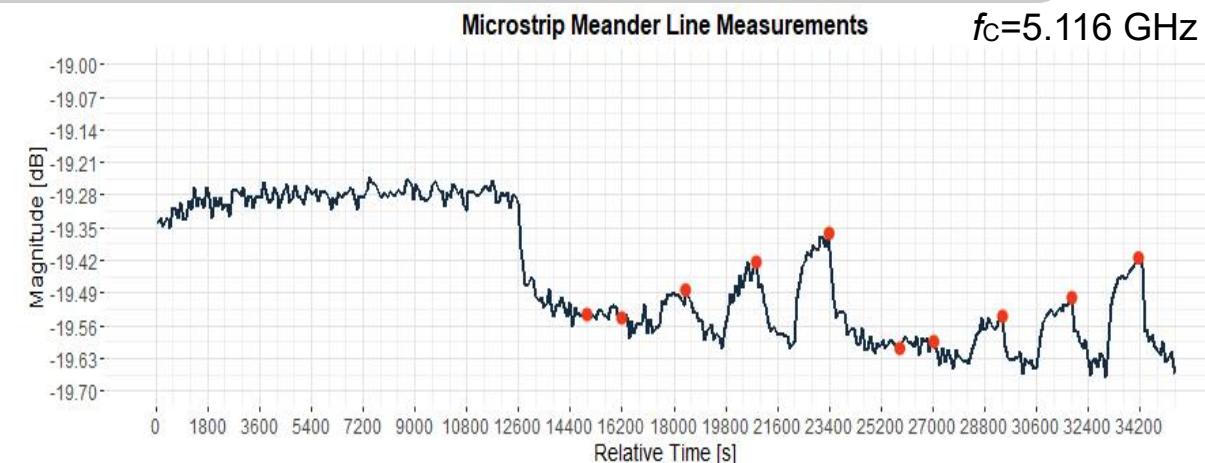
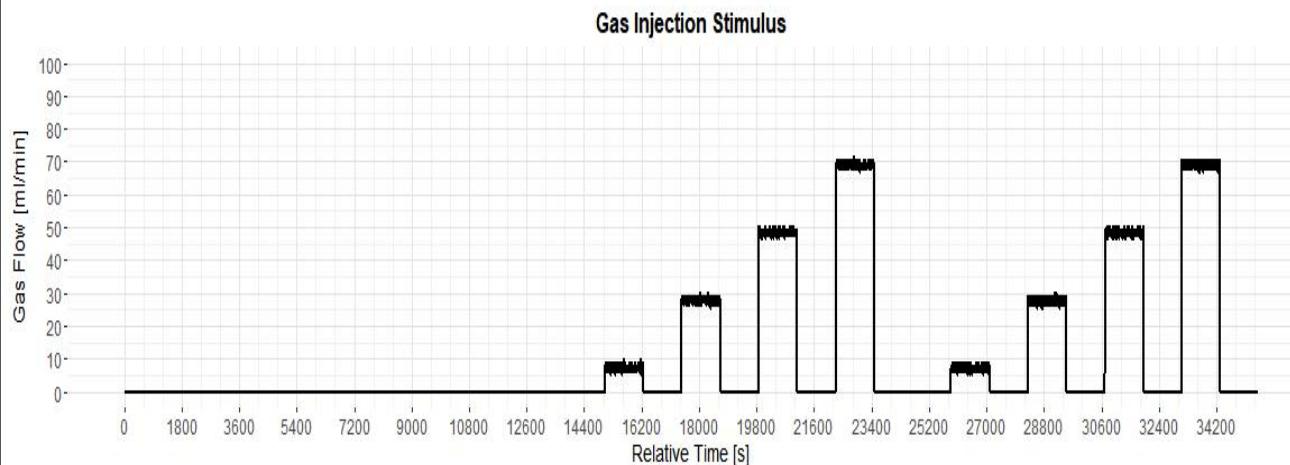
3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Experimento #9 – Atmosfera de ar Seco com vapor de H₂O



3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – RESULTADOS

Experimento #9 – Atmosfera de ar Seco com vapor de H₂O



3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – DISCUSSÃO

Análise de Sensibilidade

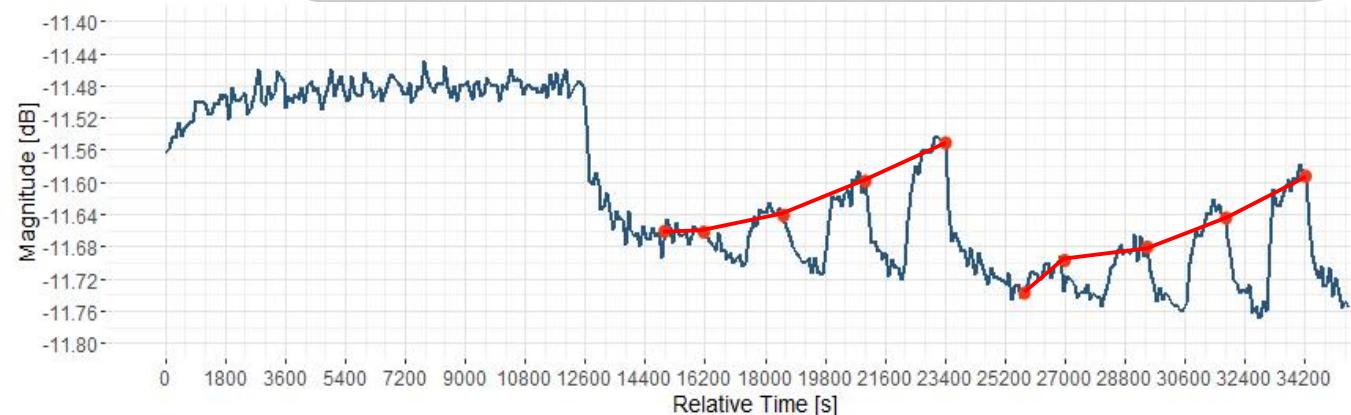
Atmosfera de ar seco com vapor de água [Exp. #9]:

É necessário realizar experimentos com mais pontos para extração de curva de sensibilidade

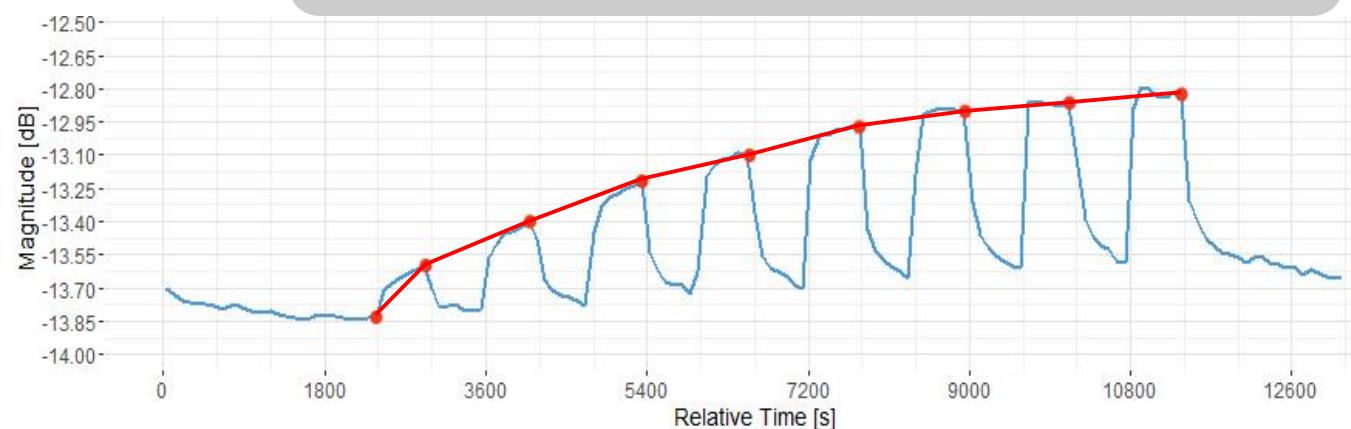
Atmosfera de ar seco com vapor de água [Exp. #4]:

Curva de sensibilidade obtida parece saturar a partir de 50% de saturação relativa de vapor de acetona.
Verificar se borbulhador é um fator limitante.

Experimento #9 – Atmosfera de ar Seco com vapor de H₂O

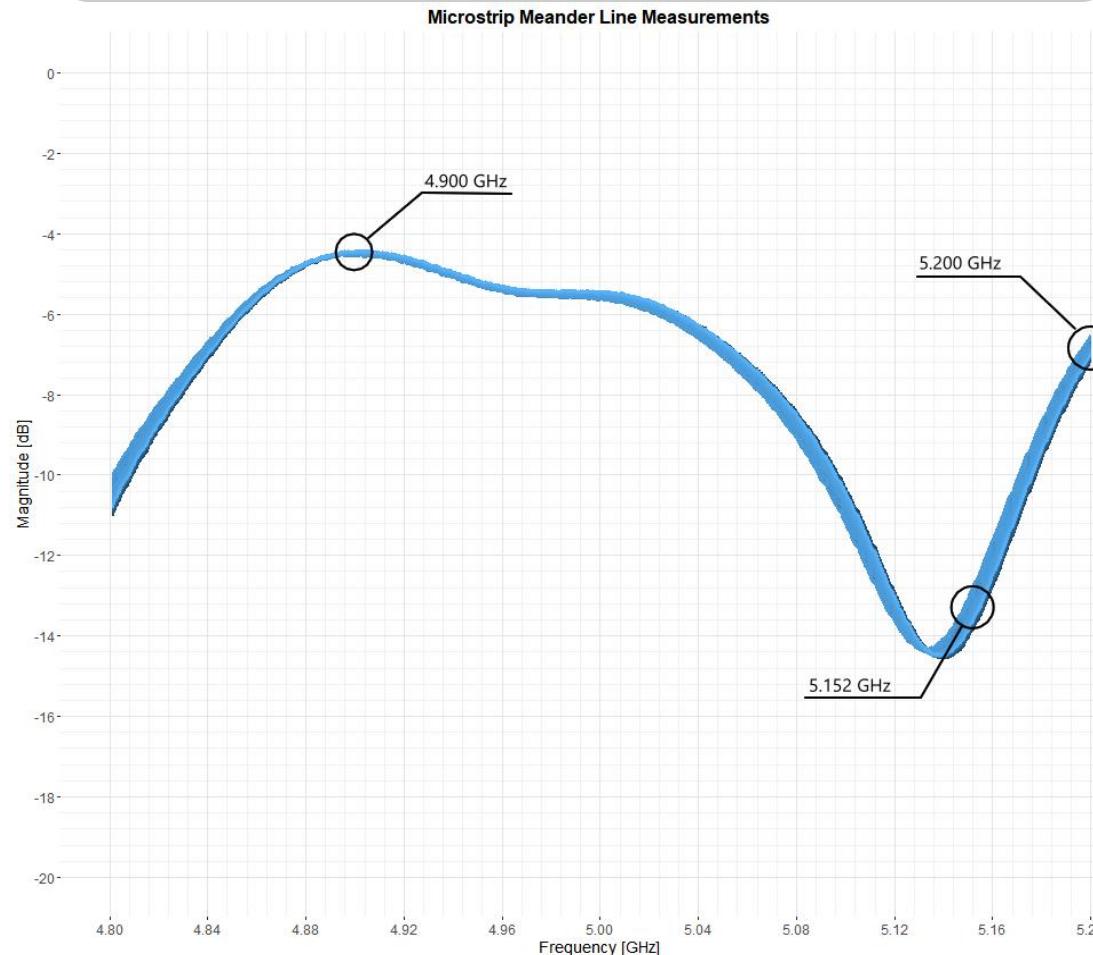


Experimento #4 – Atmosfera de ar Seco com vapor de Acetona

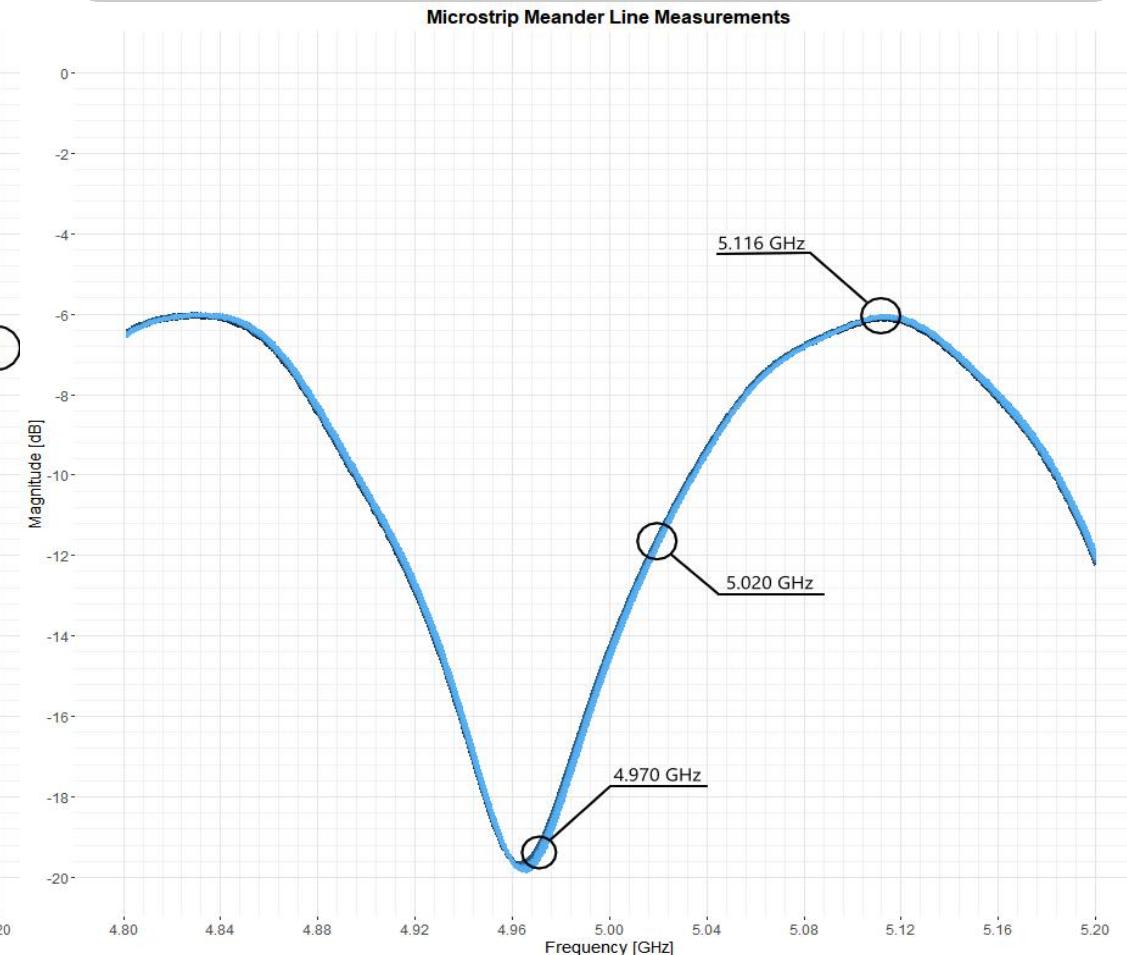


3. DESENVOLVIMENTO ATUAL – DISCUSSÃO

Experimento #4 – Atmosfera de ar Seco com vapor de Acetona



Experimento #9 – Atmosfera de ar Seco com vapor de H₂O

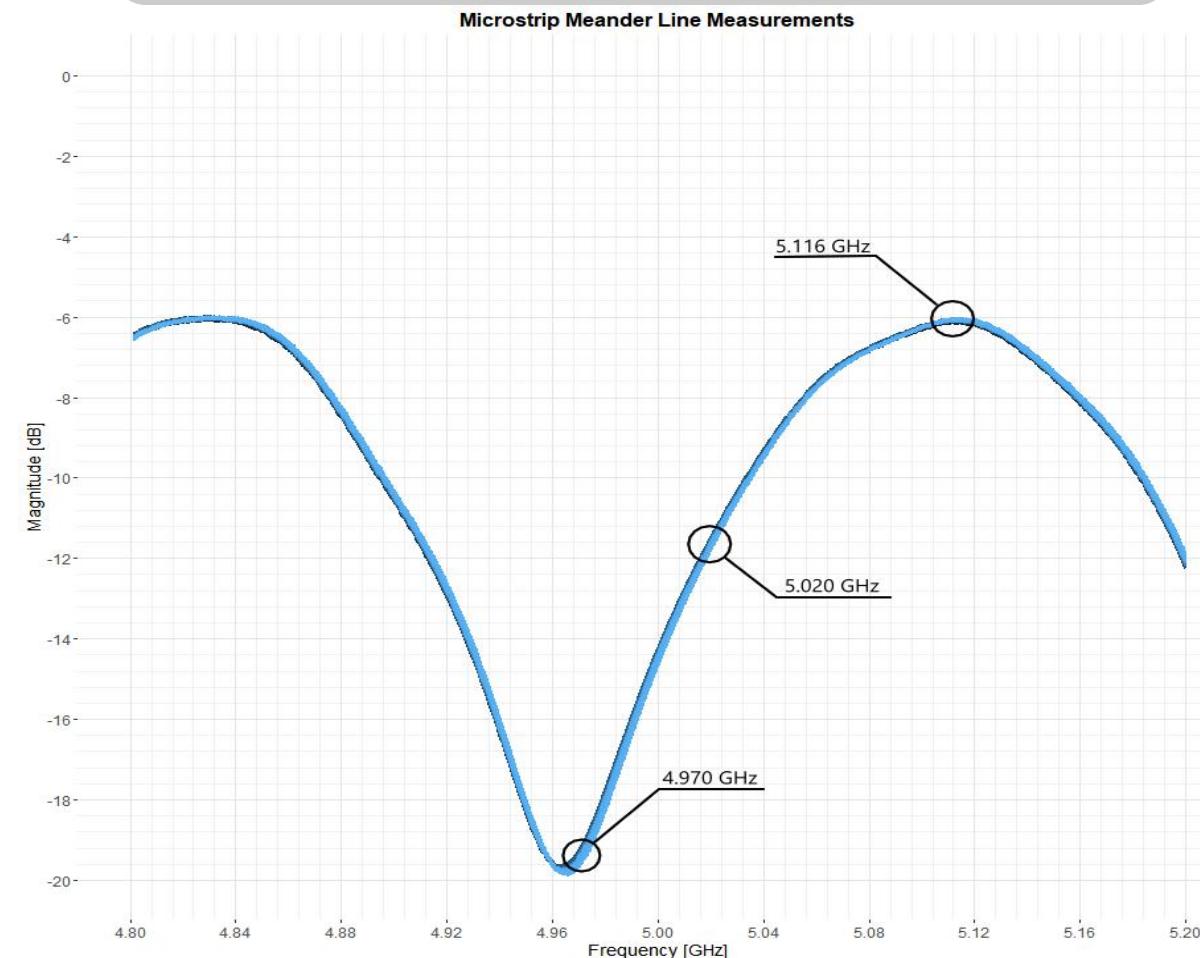


4. ATIVIDADES EM ANDAMENTO – MEDAÇÃO DE POTÊNCIA

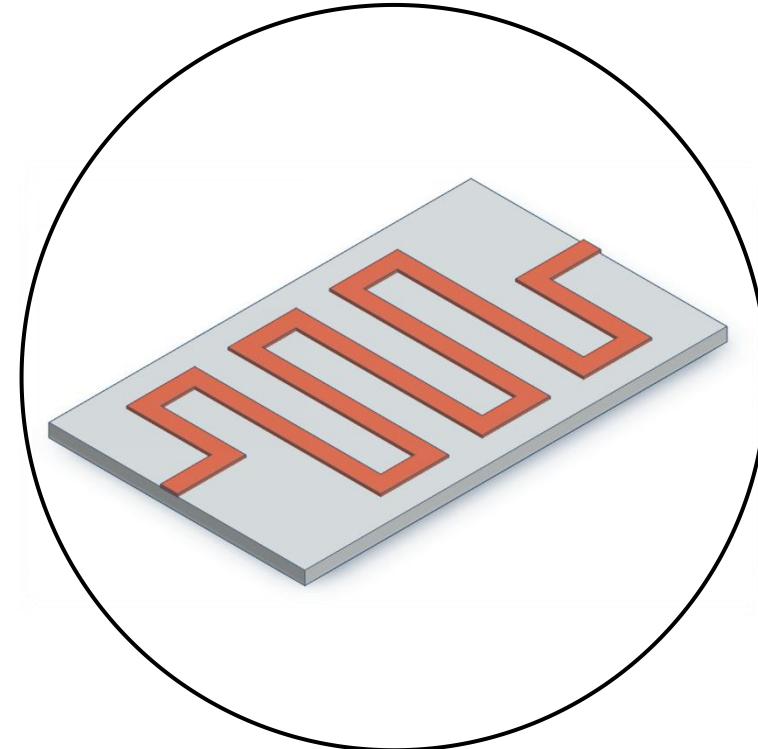


Espera-se obter uma resolução temporal maior com a utilização de captura de dados a partir do medidor de potência para frequências específicas. Acredita-se que tal ganho temporal se traduza numa melhoria do tracejado da curva de sensibilidade.

Experimento #9 – Atmosfera de ar Seco com vapor de H₂O

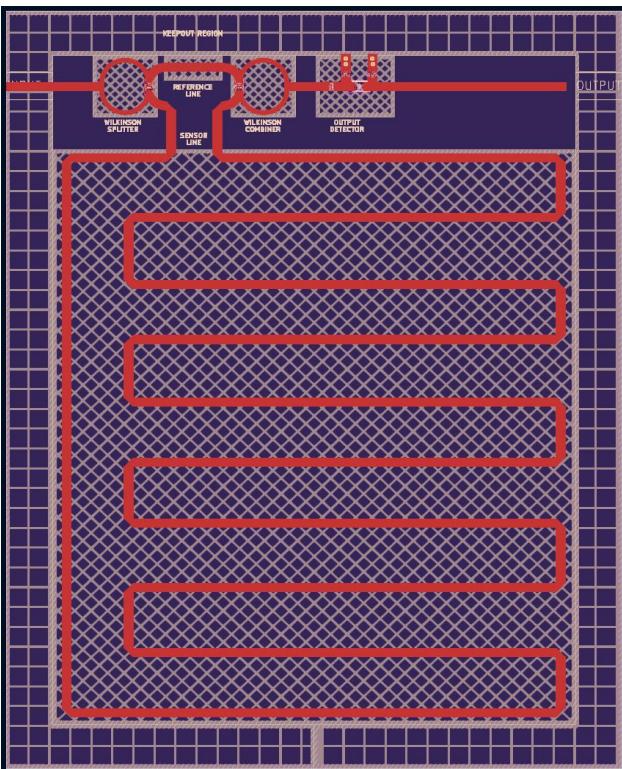


5. ATIVIDADES FUTURAS – OTIMIZAÇÃO COM NANOMATERIAIS

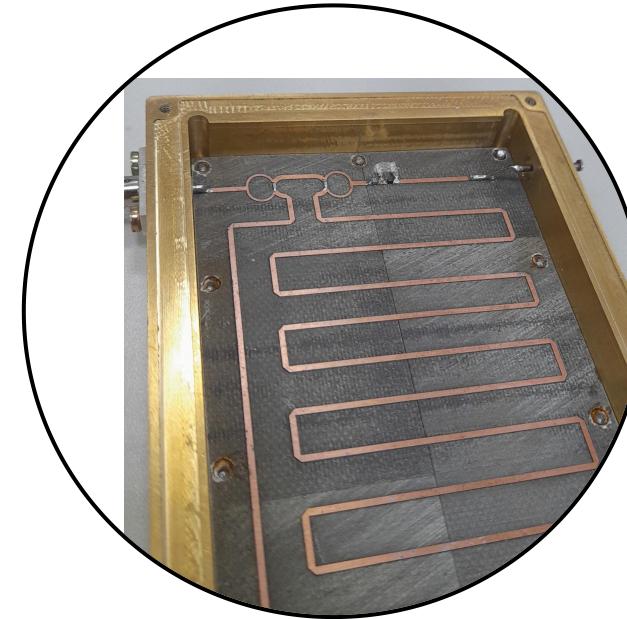
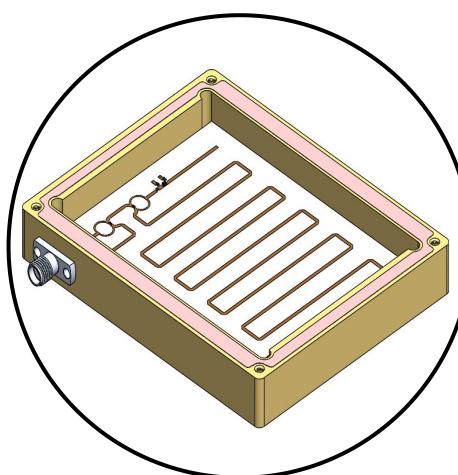


Espera-se aumentar a sensibilidade e a seletividade para vapores de gases de acetona com a utilização de filmes sensíveis tais como aqueles de nanotubos de carbono.

5. ATIVIDADES FUTURAS – DETECTOR INTEGRADO



Design de sensor com estruturas de divisão de potência e diodo detector



Por meio da adição de um diodo detector, espera-se eliminar a necessidade de equipamentos especializados para inferência da concentração de gases dentro da câmara de gás, demonstrando a portabilidade do sensor.

6. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

Etapa	Mês				
	2025				
	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Medidas com Power Meter					
Reprodutibilidade dos resultados reportados					
Caracterização de linhas com nanoestruturas					
Fabricação de protótipo com diodo integrado					
Caracterização de protótipo com diodo integrado					
Análises comparativas de resultados					
Redação e defesa da dissertação de mestrado					

7. SUMÁRIO ESTRUTURADO

1. Contextualização

- 1.1. Introdução e Justificativa
- 1.2. Estado da Arte
- 1.3. Proposta de Pesquisa
- 1.4. Objetivos

2. Metodologia

- 2.1. Estudo bibliográfico de metodologias de espectroscopia em micro-ondas e suas estruturas de micro-ondas associadas
- 2.2. Estudo bibliográfico do fenômeno de polarização dielétrica
- 2.3. Avaliação e seleção dos programas mais adequados para simulações computacionais EM-3D de circuitos de micro-ondas para o processo de transdução proposto
- 2.4. Estudo e definição de especificações e proposição de novas configurações para o sistema de transdução de micro-ondas
- 2.5. Projeto dos circuitos que compõem o sensor
- 2.6. Simulações computacionais EM-3D dos circuitos projetados e otimização de seus parâmetros
- 2.7. Fabricação dos circuitos projetados
- 2.8. Caracterização elétrica do sensor projetado
- 2.9. Análises comparativas de resultados

3. Estágio atual de desenvolvimento da pesquisa

- 3.1. Especificação do Sistema
 - 3.1.1. Definição de estrutura e métricas gerais do sistema
 - 3.1.2. Definição de estruturas específicas do sistema
- 3.2. Análise Diferencial do Sistema
 - 3.2.1. Permissividade Efetiva e Permissividade do MUT
 - 3.2.2. Diferença de Fase dos Sinais e Permissividade Efetiva
 - 3.2.3. Tensão após combinador e Diferença de Fase dos Sinais
 - 3.2.4. Simulações de Linhas de Transmissão
 - 3.2.5. Design e Simulação de sistema de conversão Concentração-Fase
 - 3.2.6. Design e Simulação de sistema de conversão Fase-Amplitude
- 3.3. Fabricação de Protótipos
- 3.4. Ensaios com Gases
 - 3.4.1. Bancada de Gases
 - 3.4.2. Bancada de Testes de Micro-ondas
- 4. Resultados
- 4.1. Conversor fase-amplitude
- 4.2. Conversor RF-DC
- 5. Discussão
- 6. Trabalhos Futuros
- 7. Referências Bibliográficas

A Review of Acetone Vapor Sensors for Non-Invasive Diabetes Diagnosis and Management: Technologies, Challenges, and Future Directions

JOEL GEORGEOUS^a¹, LUTFI ALBASHA^b², (Senior Member, IEEE),
AND GHALEB A. HUSSEINI^c³

¹Biomedical Engineering Program, American University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates

²Electrical Engineering Department, American University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates

³Chemical Engineering Department, American University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates

Corresponding author: Joel Georgeous (g00099462@aus.edu)

This work was supported in part by the American University of Sharjah under Grant FRG23-C-E08, and in part by the Open Access Program from the American University of Sharjah.

Sensing Technologies for Detection of Acetone in Human Breath for Diabetes Diagnosis and Monitoring

by Valentine Saasa^{1,2,*}✉, Thomas Malwela¹, Mervyn Beukes², Matlou Mokgotho³, Chaun-Pu Liu⁴ and Bonex Mwakikunga^{1,*}✉