



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KEILA SILVA DOS SANTOS

**RESSOADOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL PARA DETECÇÃO DE  
HIDROGÊNIO**

Recife

2025

KEILA SILVA DOS SANTOS

**RESSOADOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL PARA DETECÇÃO DE  
HIDROGÊNIO**

Dissertação ou Tese apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade  
Federal de Pernambuco, como requisito  
parcial para a obtenção do título de  
Doutora em Engenharia Elétrica

Área de concentração: Fotônica

Orientador: Prof. Marcos Tavares de Melo, PhD.

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Oliveira Cavalcanti.

Recife  
2025

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Keila Silva dos.

Ressorador de microfita reconfigurável para detecção de hidrogênio / Keila Silva dos Santos. - Recife, 2025.  
117f.: il.

Tese (Doutorado)- Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2025.

Orientação: Marcos Tavares de Melo, PhD.

Coorientação: Dr. Gustavo Oliveira Cavalcanti.

1. Detecção de hidrogênio; 2. Ressorador; 3. Micro-ondas. I. Melo, Marcos Tavares de. II. Cavalcanti, Gustavo Oliveira. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central

**KEILA SILVA DOS SANTOS**

**“RESSOADOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL PARA DETECÇÃO  
DE HIDROGÊNIO”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção  
do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área  
de concentração em Fotônica.

Aprovada em: 27/02/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Marcos Tavares de Melo  
(Orientador e Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Lauro Rodrigo Gomes da Silva Lourenço Novo  
(Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Guilherme Nunes Melo  
(Examinador Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ignacio Llamas-Garro  
(Examinador Externo)  
Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya

---

Prof. Dr. Raoni de Freitas Góis  
(Examinador Externo)  
Universidade de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, depois ao meu esposo Vitor pela compreensão perante minha ausência em muitos momentos, necessários para conclusão desta etapa tão importante em minha vida, pelo amor e companheirismo. Aos meus familiares, minha mãe Rosemary, meu pai Sebastião e meu irmão Caio, por todo apoio, paciência e incentivo a não desistir perante as adversidades. Ao meu filho Joaquim, que mesmo antes de nascer me acompanhou nesta etapa final do doutorado, trazendo força, alegria e motivação.

Agradeço ao Prof. Marcos Tavares pela orientação nesta fase final do meu doutorado, por ter me aceitado como sua orientanda, devido a perda imensurável que tivemos do Prof. Eduardo Fontana, que mesmo não estando presente para acompanhar os últimos passos desta jornada, sua contribuição e ensinamentos foram essenciais para que esta tese se concretizasse. Agradeço também ao meu coorientador Gustavo Cavalcanti pela parceria acadêmica.

Ao professor Ignácio Llamas e Zabdiel Brito pelas valiosas sugestões e discussão para esse trabalho. Agradeço também ao tempo dedicado no doutorado sanduíche realizado no CTTC em 2022 e aos amigos que fiz durante minha temporada na Espanha.

Não poderia esquecer dos meus amigos que me deram todo apoio necessário desde o início de minha trajetória na graduação de engenharia até aqui e aos amigos que conquistei no doutorado, meu muito obrigada a todos.

Agradeço à Camila Cavalcanti pela ajuda na parte experimental, e palavras de incentivo que foram tão importantes para a conclusão deste projeto e a Raoni Góis por todo apoio prestado desde a época da graduação.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), por oferecer toda infraestrutura e conhecimentos necessários para alcançar meus objetivos acadêmicos. Um agradecimento à CAPES Print e ao CNPq por todo apoio financeiro para realização deste projeto.

## RESUMO

Esta tese apresenta o projeto, a otimização de parâmetros, simulação e fabricação de um dispositivo ressonante, utilizando o *software* de simulação *CST Studio Suite*, para o desenvolvimento de um sensor capaz de detectar hidrogênio em frequências de micro-ondas. O dispositivo é reconfigurável, pois incorpora um ressoador em formato de "U", que pode deslizar em relação a uma linha de transmissão estática. Essa abordagem permite investigar a configuração que proporciona a melhor resposta para a detecção de hidrogênio, considerando a variação da frequência de ressonância e a perda por inserção induzida pelo gás hidrogênio no paládio presente no dispositivo. Concluída a etapa de fabricação do sensor e do módulo de vedação de gases e movimento do sensor, foram realizadas medições em laboratório, utilizando um Analisador de Redes Vetorial, a fim de verificar as alterações nos parâmetros de detecção de hidrogênio. Após um período de investigação, pôde-se concluir que o dispositivo sensor para uma configuração de  $K = -2,5$  mm em relação à microfita, é capaz de detectar o hidrogênio com um  $\Delta f = 8$  MHz e  $\Delta S = 0,074$  dB. Os fatores que possivelmente contribuíram para a baixa sensibilidade do dispositivo para outras configurações, são analisados. São também investigadas configurações alternativas de estruturas ressonantes, projetadas para serem usadas em aplicações de tecnologias RFID.

Palavras-chave: Detecção de Hidrogênio; Paládio; Ressoador; Micro-ondas; Sensor; Perda por inserção.

## ABSTRACT

This thesis presents the design, parameter optimization, simulation, and fabrication of a resonant device using the CST Studio Suite simulation software for the development of a sensor capable of detecting hydrogen at microwave frequencies. The device is reconfigurable, as it incorporates a U-shaped resonator that can slide relative to a static transmission line. This approach enables the investigation of the configuration that provides the optimal response for hydrogen detection, considering the variation in resonance frequency and the insertion loss induced by hydrogen gas on the palladium present in the device. Following the fabrication of the sensor and the gas-sealing and motion control module, laboratory measurements were conducted using a Vector Network Analyzer to assess changes in the hydrogen detection parameters. After a period of investigation, it was concluded that the sensor, when configured at  $K = -2.5$  mm relative to the microstrip, is capable of detecting hydrogen with a frequency shift of  $\Delta f = 8$  MHz and an insertion loss variation of  $\Delta S = 0.074$  dB. The factors that may have contributed to the device's low sensitivity in other configurations are analyzed. Additionally, alternative configurations of resonant structures designed for use in RFID technology applications are investigated.

Keywords: Hydrogen Detection; Palladium; Resonator; Microwave; Sensor; Insertion Loss.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Resposta da perda por inserção após exposição dos gases $N_2$ e $H_2$ , para $x = 20$ mm. ....	17
Figura 2.2 Variação do parâmetro de espalhamento medido na porta 1 do dispositivo ( $S_{11}$ ) quando um objeto se aproxima do EMP. ....	19
Figura 2.3 Respostas transitórias do dispositivo sob $H_2$ /ar nas concentrações de 5, 50, 100 e 1000 ppm a 175 °C. ....	22
Figura 2.4 Resposta dos deslocamentos de comprimento de onda de FBG1, FBG2 e FBG3 às concentrações de hidrogênio.....	23
Figura 2.5 Respostas do FMR medido após exposição aos gases nitrogênio e hidrogênio. (a) Campo magnético estático é aplicado no plano do filme fino. (b) O campo é aplicado perpendicularmente ao plano do filme. ....	25
Figura 2.6 Resposta transitória do sensor MS a diferentes concentrações de $H_2$ .....	26
Figura 3.1 Linhas de transmissão. (a) cabos paralelos, (b) cabo coaxial, (c) microfita. ....	30
Figura 3.2 (a) Representação de uma linha de transmissão, (b) representação de um trecho infinitesimal ( $\Delta z$ ). ....	31
Figura 3.3 Configuração básica de uma microfita. ....	34
Figura 3.4 Linhas de campo elétrico e magnético. ....	35
Figura 3.5 Circuito ressonantes. (a) em série, (b) em paralelo. ....	39
Figura 3.6 Magnitude da impedância de entrada versus frequência em circuitos ressonantes. (a) série, (b) paralelo. ....	41
Figura 3.7 Diferentes tipos de estruturas de ressonância. (a) ressonância “shunt” em série, (b) ressonância “shunt” em paralelo, (c) ressonador em linha de meio comprimento de onda, (d) ressoadores de microfita acoplados (acoplamento elétrico), cada ressoador é de meio comprimento de onda.....	42
Figura 3.8 Rede de dois acessos composta por ondas de tensão e parâmetros S...43	43
Figura 4.1 Variação do deslocamento $K$ em relação à microfita. ....	45
Figura 4.2 Microfita reconfigurável e seus parâmetros (visão frontal).....	47
Figura 4.3 Microfita reconfigurável e seus parâmetros (visão lateral).....	47
Figura 4.4 Módulo de vedação e movimento. (a) câmara de vedação de gás com a base de movimentação do sensor integrada em seu interior e com a tampa acrílica,	



(b) Câmara de vedação de gases equipada com um dispositivo de fixação em ferro sobre a tampa de acrílico. ....	49
Figura 4.5 Módulo de vedação e movimento. (a) câmara de vedação com tampa acrílica e com valores de medições atribuídos as dimensões dos lados da caixa e da tampa acrílica, (b) os furos presentes na caixa foram designados para a passagem e/ou conexão de componentes específicos, conforme as necessidades do projeto. 49	
Figura 4.6 Módulo de movimento para a microfita reconfigurável. (a) componente fixado à caixa, com encaixe do motor de passo sob a base estática, (b) primeira peça de encaixe que garantirá a movimentação do ressoador, (c) segunda peça de encaixe que garantirá a movimentação do ressoador, (d) terceira peça de encaixe que garantirá a movimentação do ressoador. ....	50
Figura 4.7 Sistema de detecção de hidrogênio. (1) Sistema de gases, (2) conjunto motor de passo + Arduino, (3) analisador de redes vetorial, (4) computador, (5) sensor/estrutura de vedação de gás. ....	52
Figura 4.8 Fotografia do ressoador de microfita em substrato de quartzo, com deposição de paládio. ....	53
Figura 4.9 Etapas de fabricação do dispositivo de microfita. (a) placa de FR-4 com a tinta fotossensível, (b) secagem da tinta na placa por uma fonte de calor, (c) exposição da tinta com a transparência pela lâmpada UV, (d) placa imersa na barrilha pra retirada da tinta não sensibilizada pelo UV, (e) imersão da placa no percloro de ferro para corrosão, (f) parte superior e inferior da linha de microfita. ....	53
Figura 4.10 Linha de microfita em um substrato de FR-4. ....	54
Figura 4.11 Fabricação do modulo de vedação e movimento. (a) impressão da caixa de vedação de gases, (b) impressão de parte do componente responsável pelo movimento do sensor. ....	54
Figura 4.12 Sensor/módulo de movimento. ....	55
Figura 4.13 Módulo de vedação e movimento concluídos. ....	55
Figura 4.14 (a) Sistema de detecção do laboratório LSI1 do grupo de Fotônica da UFPE, (b) sistema de gases que se conecta à entrada e saída de gases. ....	56
Figura 4.15 Otimização do dispositivo sensor no <i>CST Microwave Studio</i> . ....	58
Figura 4.16 Posições assumidas para $K$ . ....	59
Figura 4.17 Transmitância do dispositivo para diversos valores de $K$ (Simulação no CST). ....	59
Figura 5.1 Ressonâncias para $K = - 2,5$ mm. ....	62

Figura 5.2 Ressonâncias para $K = 0,8$ mm. ....	63
Figura 5.3 Relação permissividade x frequência. ....	64
Figura 5.4 Variação da profundidade pelicular nos metais. ....	65
Figura 5.5 Perda por inserção variando com a frequência. ....	66
Figura 5.6 Fluxograma de medição. ....	68
Figura 5.7 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado. ....	69
Figura 5.8 Análise do erro para a posição de $K = - 2,5$ mm. ....	70
Figura 5.9 Perda por inserção do dispositivo para $K = - 2,5$ mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1° ciclo e tempo = 5 min. ....	72
Figura 5.10 Dependência do sinal $\Delta S$ e do parâmetro de incertezas (o erro) $\Delta S'$ em relação à frequência. ....	73
Figura 5.11 Variação da perda por inserção por todo espectro para o 1° ciclo. ....	73
Figura 5.12 Variação da perda por inserção por todo espectro para o 2° ciclo. ....	74
Figura 5.13 Variação da perda por inserção por todo espectro para o 3° ciclo. ....	74
Figura 5.14 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado para $K = - 3,0$ mm. ....	75
Figura 5.15 Análise do erro para a posição de $K = - 3,0$ mm. ....	76
Figura 5.16 Perda por inserção do dispositivo para $K = - 3,0$ mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1° ciclo e tempo = 5 min. ....	77
Figura 5.17 Dependência do sinal $\Delta S$ e do parâmetro de incertezas (o erro) $\Delta S'$ em relação à frequência para $K = - 3,0$ mm. ....	78
Figura 5.18 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado para $K = - 4,0$ mm. ....	78
Figura 5.19 Análise do erro para a posição de $K = - 4,0$ mm. ....	79
Figura 5.20 Perda por inserção do dispositivo para $K = - 4,0$ mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1° ciclo e tempo = 5 min. ....	81
Figura 5.21 Dependência do sinal $\Delta S$ e do parâmetro de incertezas (o erro) $\Delta S'$ em relação à frequência para $K = - 4,0$ mm. ....	81
Figura 5.22 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado para $K = 0,8$ mm. ....	82
Figura 5.23 Análise do erro para a posição de $K = 0,8$ mm. ....	83
Figura 5.24 Perda por inserção do dispositivo para $K = 0,8$ mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1° ciclo e tempo = 3 min. ....	84

Figura 5.25 Dependência do sinal $\Delta S$ e do parâmetro de incertezas (o erro) $\Delta S'$ em relação à frequência para $K = 0,8$ mm.....	84
Figura 5.26 Perda por inserção do dispositivo para $K = - 2,5$ mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1º ciclo e tempo = 30 min..	85
Figura 5.27 Dependência do sinal $\Delta S$ e do parâmetro de incertezas (o erro) $\Delta S'$ em relação à frequência para $K = -2,5$ mm, tempo=30 min. ....	86
Figura B.1 Dispositivos ressonantes. (a) Ressorador em T, (b) ressoador quadrado de malha aberta. ....	98
Figura B.2 Corte transversal dos dispositivos.....	98
Figura B.3 Profundidade pelicular x frequência. ....	99
Figura B.4 Ressorador em T ( $\lambda/4$ ), com seus parâmetros. A linha de transmissão composta por prata (representada pela cor cinza) e o ressoador em T por paládio (representado pela cor azul). ....	100
Figura B.5 Ressorador em T ( $\lambda/2$ ), com seus parâmetros. A linha de transmissão composta por prata (representada pela cor cinza) e o ressoador em quadrado de malha aberta, por paládio (representado pela cor azul). ....	101
Figura B.6 Dois dispositivos com tamanho máximo de 50 x 40 mm cada. ....	101
Figura B.7 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST). ....	103
Figura B.8 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST). ....	104
Figura B.9 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST). ....	106
Figura B.10 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST). ....	107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Parâmetros da microfita. ....	47
Tabela 4.2 Parâmetros do ressoador. ....	48
Tabela 5.1 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para $t_{pd} = 500$ nm. ....	61
Tabela 5.2 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para $t_{pd} = 800$ nm. ....	62
Tabela 5.3 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min. ....	71
Tabela 5.4 Resultados de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 5 min. ....	71
Tabela 5.5 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min. ....	76
Tabela 5.6 Resultados de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 5 min. ....	77
Tabela 5.7 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min. ....	80
Tabela 5.8 Resultados de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 5 min. ....	80
Tabela 5.9 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min. ....	83
Tabela B.1 Profundidade pelicular para o alumínio, paládio e prata nas frequências de 2,45 e 5,8 GHz. ....	99
Tabela B.2 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para $t_{res} = 100$ e 500 nm, $f_0 = 2,45$ GHz. ....	103
Tabela B.3 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para $t_{res} = 100$ e 500, $f_0 = 5,8$ GHz. ....	104
Tabela B.4 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para $t_{res} = 100$ e 500, $f_0 = 2,45$ GHz. ....	105
Tabela B.5 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para $t_{res} = 100$ e 500 nm, $f_0 = 5,8$ GHz. ....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS

<i>RFID</i>	<i>Radio Frequency Identification</i>
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i>
<i>SIW</i>	<i>Substrate Integrated Waveguide</i>
<i>EMP</i>	<i>Evanescente Microwave Probes</i>
<i>EDS</i>	<i>energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
<i>AFM</i>	<i>atomic force microscopy</i>
<i>HRSEM</i>	<i>high-resolution scanning electron microscopy</i>
<i>TEM</i>	<i>transmission electron microscopy</i>
<i>SEM</i>	<i>scanning electron microscopy</i>
<i>EPD</i>	<i>electrophoretic deposition</i>
<i>VTE</i>	<i>vacuum thermal evaporation</i>
<i>FFP</i>	<i>fiber-optic Fabry-Perot</i>
<i>FBG</i>	<i>fiber Bragg grating</i>
<i>SPR</i>	<i>surface plasmon resonance</i>
<i>PMA</i>	<i>perpendicular interface magnetic anisotropy</i>
<i>FMR</i>	<i>ferromagnetic resonance</i>
<i>MS</i>	<i>magnetic semiconductor</i>
<i>VOCs</i>	<i>volatile organic compounds</i>
<i>RF</i>	<i>Radio Frequency</i>
<i>LT</i>	<i>Linhas de Transmissão</i>
<i>TEM</i>	<i>Modos transversais eletromagnéticos</i>
<i>EM</i>	<i>Ondas eletromagnéticas</i>
<i>VNA</i>	<i>Vector Network Analyzer</i>
<i>CTTC</i>	<i>Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya</i>
<i>PLA</i>	<i>Ácido polilático</i>
<i>CAD</i>	<i>Computer-Aided Design</i>
<i>MoM</i>	<i>Method of Moments</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite-Element Method</i>
<i>FDTD</i>	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
<i>IE</i>	<i>Integral Equation</i>
<i>PCB</i>	<i>Printed Circuit Board</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$H_2$	Hidrogênio
$H_2O$	Água
$Pd$	Paládio
$\Delta f$	Frequência de ressonância
$S_{21}$	perda por inserção do sinal de transmissão
$PdH_2$	Hidreto de Paládio
$PdH_x$	Hidreto de Paládio onde o $x$ representa a fração atômica do hidrogênio
$\alpha$	Fase de baixa concentração de $H_2$
$\beta$	Fase de alta concentração de $H_2$
$Cu - Pd - Cu$	(cobre – paládio – cobre)
FR-4	Material dielétrico composto de fibra de vídeo e resina epóxi
$N_2$	Nitrogênio
$SnO_2$	Dióxido de estanho
$S_{11}$	Parâmetro de espalhamento medido na porta 1 do dispositivo
$In_2O_3$	Óxido de Índio
$S_R$	Resposta de detecção
$CeO_2$	Óxido de Cério
$PdNP$	Palladium Nanoparticles
$Pd - InP$	Junção de diodo Shottky de Paládio no substrato de Índio
$WO_3$	Óxido de tungstênio
$NH_3$	Nitreto de Hidrogênio (Amônia)
$CH_4$	Metano
$CH_3OH$	Metanol
$Pd - Y$	Paládio - Ítrio
$Ti$	Titânio
$Pt$	Platina
$Pd - Co$	Paládio - Cobalto
$CO_2$	Dióxido de Carbono

$R_H$	resistência na presença do gás hidrogênio
$R_N$	resistência na presença do gás nitrogênio
RF-35	substrato de fibra de vidro preenchido com cerâmica
$\lambda$	Comprimento de onda
$c$	Velocidade da luz
$f$	Frequência
$\Delta z$	Comprimento infinitesimal de uma linha de transmissão
$R$	resistência por unidade de comprimento
$L$	indutância por unidade de comprimento
$G$	condutância por unidade de comprimento
$C$	capacitância por unidade de comprimento
$\gamma$	constante de propagação da linha
$e^{-\gamma z}$	propagação da onda na direção $+z$
$e^{\gamma z}$	propagação da onda na direção $-z$
$Z_0$	impedância característica da linha
$v_p$	Velocidade de fase
$Z_{in}$	Impedância de entrada
$\beta_1$	Beta
$\lambda_1$	comprimento de onda da frequência central de projeto
$f_1$	frequência central de projeto
$Z_1$	Impedância da linha de casamento
$\Gamma_m$	coeficiente de reflexão máximo
$\epsilon_{ef}$	permissividade relativa efetiva
$\epsilon_r$	permissividade relativa
$C_d$	capacitância do dielétrico
$C_a$	Capacitância do ar
$Z_a$	Impedância característica da microfita
$w$	Largura da fita condutora
$h$	Altura do substrato
$t$	Espessura da camada de metal
$\lambda_g$	Comprimento da onda no guia
$\beta$	Constante de propagação

$v_f$	Velocidade de fase
$\alpha_{tot}$	Perda total
$\alpha_c$	Atenuação do sinal no condutor
$\alpha_d$	Atenuação do sinal no dielétrico
$tg\delta$	tangente de perdas do substrato
$R_{skin}$	resistência do efeito pelicular no condutor
$\delta$	profundidade pelicular
$\sigma$	Condutividade
$\mu$	Permeabilidade do meio
$P_l$	Potência dissipada no resistor
$W_m$	energia magnética média armazenada no indutor
$W_e$	energia elétrica média armazenada no capacitor
$P_{in}$	potência complexa do circuito ressonante
$Z_{in}$	impedância de entrada em ressonância
$\omega_0$	Frequência de ressonância
$\lambda_{g0}$	comprimento de onda no guia na frequência fundamental de ressonância
$S$	parâmetros de espalhamento
$V_1^+$	Onda de tensão entrando pela Porta 1
$V_1^-$	Onda de tensão saindo pela Porta 1
$V_2^+$	Onda de tensão entrando pela Porta 2
$V_2^-$	Onda de tensão saindo pela Porta 2
$S_{11}$	Coeficiente de reflexão do sinal da Porta 1
$S_{22}$	Coeficiente de reflexão do sinal da Porta 2
$S_{12}$	Coeficiente de transmissão do sinal da Porta 2 para Porta1
$S_{21}$	Coeficiente de transmissão do sinal da Porta 1 para Porta2
$K$	Fator de variação de posição do sensor em relação à microfita
$Ti/Au/Pd$	titânio–ouro–paládio
$f_h$	ressonância do dispositivo exposto ao hidrogênio
$f_0$	ressonância do dispositivo não exposto ao hidrogênio
$t_{Pd}$	Espessura da camada de Paládio



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	PANORAMA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO .....	12
1.2	OBJETIVOS .....	14
1.2.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>14</b>
1.2.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>14</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1	MÉTODOS DE DETECÇÃO DE HIDROGÊNIO .....	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO .....	29
3.1	INTRODUÇÃO À TEORIA DE MICRO-ONDAS .....	29
3.1.1	<b>Linhas de transmissão .....</b>	<b>29</b>
3.2	CIRCUITOS EM MICROFITA .....	33
3.2.1	<b>Parâmetros de uma microfita .....</b>	<b>34</b>
3.3	RESSOADORES ELETROMAGNÉTICOS .....	38
3.3.1	<b>Ressoadores de micro-ondas .....</b>	<b>38</b>
3.3.2	<b>Ressoadores em microfita .....</b>	<b>41</b>
3.4	ANÁLISE DE REDES DE MICRO-ONDAS .....	42
4	PROJETO DO SENSOR .....	45
4.1	DISPOSITIVO PROPOSTO .....	45
4.1.1	<b>Projeto do sensor reconfigurável em U .....</b>	<b>45</b>
4.1.2	<b>Projeto do módulo de vedação e movimento .....</b>	<b>48</b>
4.2	FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO PROPOSTO .....	51
4.2.1	<b>Fabricação do sensor de hidrogênio .....</b>	<b>52</b>
4.2.2	<b>Fabricação do módulo de vedação e movimento .....</b>	<b>54</b>
4.3	SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA .....	57
4.3.1	<b>Simulação no <i>CST Microwave Studio</i> .....</b>	<b>57</b>
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	60
5.1	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SENSOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL .....	60
5.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SENSOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL .....	65
5.2.1	<b>Resultados experimentais de medição para <math>K = -2,5</math> mm .....</b>	<b>69</b>
5.2.2	<b>Resultados experimentais de medição para <math>K = -3,0</math> mm .....</b>	<b>75</b>
5.2.3	<b>Resultados experimentais de medição para <math>K = -4,0</math> mm .....</b>	<b>78</b>

<b>5.2.4</b>	<b>Resultados experimentais de medição para <math>K = 0,8</math> mm</b>	<b>82</b>
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
	REFERÊNCIAS	89
	APÊNDICE A – PRODUÇÃO CIENTÍFICA DURANTE O DOUTORADO	95
	APÊNDICE B – DISPOSITIVOS RFID PARA DETECÇÃO DE HIDROGÊNIO EM FREQUÊNCIAS DE MICRO-ONDAS	97
	B.1 MODELAGEM DOS SENSORES RFID	97
	<b>B.1.1 Modelagem do sensor no simulador que emprega onda completa</b>	<b>97</b>
	B.2 SIMULAÇÃO DOS DISPOSITIVOS SENSORES RFID	102
	<b>B.2.1 Ressorador em T (<math>f_0 = 2,45</math> GHz)</b>	<b>102</b>
	<b>B.2.2 Ressorador em T (<math>f_0 = 5,8</math> GHz)</b>	<b>103</b>
	<b>B.2.3 Ressorador quadrado de malha aberta (<math>f_0 = 2,45</math> GHz)</b>	<b>105</b>
	<b>B.2.4 Ressorador quadrado de malha aberta (<math>f_0 = 5,8</math> GHz)</b>	<b>106</b>
	APÊNDICE C – VISTAS E COTAS DO MÓDULO DE VEDAÇÃO DE GASES	108
	APÊNDICE D – VISTAS E COTAS DO MÓDULO DE MOVIMENTO	110
	APÊNDICE E – CÓDIGO DO ARDUINO	114
	APÊNDICE F – CÁLCULO DO EFEITO PELICULAR	116
	ANEXO A – PROJETO ORIGINAL DA MICROFITA RECONFIGURÁVEL	117

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo fornece o contexto para o estudo do hidrogênio, destacando as razões que motivaram esta pesquisa, conforme apresentado na Seção 1.1. Na Seção 1.2 são apresentados os objetivos a serem alcançados e na Seção 1.3 é descrita a estrutura deste documento.

### 1.1 PANORAMA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

O fornecimento de energia limpa é um desafio iminente para as sociedades atuais. Isso exige o desenvolvimento de pesquisas visando viabilizar alternativas às fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis [1], [2].

O gás hidrogênio ( $H_2$ ) tem sido apontado como a maior fonte de energia limpa e tem seu uso em diversos setores, incluindo aplicações em refinarias, indústrias químicas, siderúrgicas, indústria alimentícia e células a combustível [2], [3], [4], [5]. Devidos às inúmeras aplicações em áreas significativas, o número de estudos que utilizam o hidrogênio como fonte de energia limpa vem aumentando.

O hidrogênio possui um baixo limite explosivo, e pode se tornar perigoso quando a sua concentração no ar ultrapassa 4% em condições de pressão atmosférica. A literatura apresenta três zonas de classificação para a mistura  $H_2$  –  $H_2O$  – ar: zona de segurança (concentração de  $H_2$  inferior a 4%, não há risco de explosão), zona de deflagração de chamas (para uma mistura de 4% de  $H_2$  para 20% ar) e a zona da detonação (para mistura de 18% de  $H_2$  45% de ar) [6]. Por essa razão e devido a sua alta relevância como potencial fonte de energia [7], [8], o desenvolvimento de sensores com alta sensibilidade de detecção, resposta rápida e operação em temperatura ambiente é de grande importância [9].

Como a molécula de  $H_2$  é extremamente pequena, ela pode penetrar em compostos metálicos, posicionando-se entre os átomos da rede cristalina, o que resulta em alterações ópticas, elétricas e estruturais no material [10]. O paládio (Pd) possui uma afinidade específica pelo gás hidrogênio [7], [9], [11], [12], [13], [14], [15]. De fato, a molécula de  $H_2$  se dissocia na superfície do Pd como hidrogênio atômico [16], [17] e a permeação de  $H_2$  em filmes finos de Pd leva à formação de hidretos de paládio [18].

Há muitos estudos na literatura voltados para detecção de hidrogênio. As técnicas mais comuns incluem a síntese de novos compostos à base de paládio, para melhorar o limite de detecção do hidrogênio. Essas técnicas geralmente utilizam designs resistivos [19], semicondutores [20], [21], [22], [23], magnéticos [24], [25] e ópticos [26], [27], [28], [29]. A detecção de hidrogênio baseada em micro-ondas tem sido pouco explorada, a proposta nesta tese é o estudo e fabricação de sensores de micro-ondas que detectam hidrogênio, baseada em micro-ondas e que seu desenvolvimento tenha um impacto relevante para a sociedade.

Em Santos e colaboradores [11], [12] há a investigação da detecção do hidrogênio em estruturas híbridas simples, de linhas de microfita, utilizando o paládio (*Pd*) como metal catalisador, no qual a variação do sinal de transmissão é observada como fator de detecção. A proposta deste projeto é otimizar e fabricar um dispositivo com maior sensibilidade, baseado em um ressonador que pode operar em diferentes configurações posicionais, visando à detecção de  $H_2$  em diversas frequências.

Esta tese também contempla a realização de simulações voltadas à detecção de gases, explorando o potencial de sensores baseados em micro-ondas no contexto da Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*). O crescimento expressivo de dispositivos inteligentes conectados à internet, capazes de coletar, processar e transmitir dados, tem impulsionado aplicações em setores como a indústria, saúde e automação de ambientes. A IoT representa a convergência de tecnologias que integram o ambiente físico ao mundo digital, possibilitando o monitoramento em tempo real de variáveis ambientais por meio de sensores [30].

Neste cenário, há uma demanda crescente por sensores eficientes operando na faixa de micro-ondas, especialmente em sistemas que empregam a tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*), a qual permite a identificação única de objetos conectados à rede. A partir dessa integração, os sensores podem coletar informações contextuais, transmitindo-as a centros de armazenamento e processamento [30]. Assim, no âmbito deste trabalho, foram realizadas simulações de sensores com estruturas ressonantes projetadas para aplicações em RFID, que trabalham nas frequências de 2,45 GHz e 5,8 GHz, com o objetivo de detectar a presença de hidrogênio em ambientes específicos [31], [32], [33]. A metodologia adotada considera como parâmetros de detecção a variação da frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) e a perda por inserção do sinal de transmissão ( $S_{21}$ ). Os

resultados das simulações encontram-se apresentados no Apêndice B desta tese, servindo como base para futuras implementações experimentais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Será projetado e construído um sensor de micro-ondas, reconfigurável, que apresente alta sensibilidade e resposta rápida em temperatura ambiente, empregando um modelo de estrutura de microfita ressonante, projetada para frequências entre 1 e 5 GHz.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para se alcançar o objetivo geral as etapas a seguir devem ser desenvolvidas:

- a) Investigar por meio de simulação e modelar dispositivos ressonantes para detecção de gases em um *software* que emprega onda completa como o *CST Studio Suite* [34];
- b) Projetar e construir uma câmara de confinamento de gás;
- c) Projetar e construir o módulo de movimentação para o sensor;
- d) Projetar e construir um dispositivo reconfigurável de micro-ondas;
- e) Construir um ressoador móvel em uma placa de quartzo;
- f) Realização de experimentos em laboratório, onde serão feitas as medições para detecção de hidrogênio.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 são apresentados diversos métodos de detecção de hidrogênio, descritos na literatura. Projetos de detecção foram desenvolvidos por diferentes técnicas, incluindo abordagens ópticas, elétricas, químicas, magnéticas e semicondutivas.

O Capítulo 3 apresenta uma breve fundamentação teórica, essencial para a compreensão de pontos relevantes deste trabalho. Os dispositivos ressonantes propostos foram desenvolvidos a partir de linhas de transmissão em microfita, por esta razão, este capítulo aborda os principais conceitos relacionados a esse tipo de linha, bem como noções sobre ressoadores e os parâmetros de espalhamento, elementos fundamentais para a análise e caracterização desses dispositivos.

No Capítulo 4 é apresentado inicialmente todo projeto desde a modelagem e simulação, por meio de um ambiente virtual de simulação, o *CST Studio Suite* [34], até a fabricação dos dispositivos. Esta investigação, por meio de simulação computacional, foi realizada com a finalidade de otimizar e determinar as melhores estruturas para construção do sensor de hidrogênio.

O Capítulo 5 apresenta a análise dos dados obtidos em todo processo, desde a investigação dos dados por medição experimental, para verificar se houve detecção de hidrogênio nos sensores propostos, até a comparação dos dados obtidos na simulação por *software*.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões da tese e projetos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são discutidos os principais métodos de detecção de hidrogênio descritos na literatura, abrangendo diferentes abordagens, materiais e tecnologias. Na Seção 2.1 são apresentados estudos e resultados que evidenciam os mecanismos de detecção e as estratégias desenvolvidas para aprimorar a sensibilidade, seletividade e desempenho dos sensores, fornecendo uma visão geral das tendências e avanços na área.

### 2.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE HIDROGÊNIO

O paládio e suas ligas têm sido amplamente estudados na detecção de  $H_2$ , devido às suas propriedades únicas de difusão para o hidrogênio. Esse metal é capaz de absorver até 900 vezes seu próprio volume de hidrogênio, formando  $PdH_2$  [35]. Como a molécula de  $H_2$  é extremamente pequena, ela consegue penetrar em compostos metálicos, posicionando-se entre os átomos na rede cristalina do metal. Na superfície do  $Pd$ , o  $H_2$  se dissocia em hidrogênio atômico [16]. A permeação do  $H_2$  em filmes finos de  $Pd$  ocorre por meio de um processo de dissociação da molécula de hidrogênio, que inclui sua separação na superfície do paládio e a subsequente formação de  $PdH_x$  onde  $x$  representa a fração atômica de hidrogênio [18], [36].

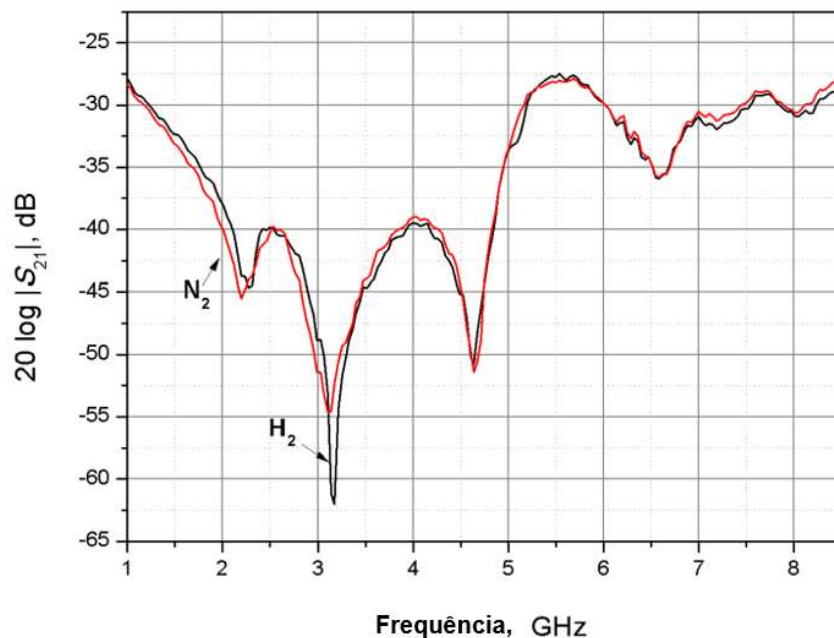
A presença de hidrogênio na rede cristalina do metal faz com que provoque mudanças ópticas, elétricas e estruturais [10]. Na literatura, a detecção de hidrogênio em paládio e suas ligas — que podem conter elementos como ouro, cobre, titânio, nióbio, zircônio, vanádio e tântalo [37] — é amplamente estudada por meio da variação da resistência elétrica do filme de  $Pd$ . A principal hipótese para esse aumento na resistência é que a absorção de  $H_2$  leva a uma maior dispersão dos elétrons no material [13], [38].

O paládio possui duas fases de absorção do hidrogênio. A fase  $\alpha$  que corresponde a baixa concentração de  $H_2$  e a fase  $\beta$  que corresponde a altas concentrações de  $H_2$ . A mudança da fase  $\alpha$  para a fase  $\beta$  depende da pressão, temperatura e concentração de  $H_2$ . Na fase  $\beta$  é observado o aumento abrupto da

resistência, atribuído à deformação plástica causada pela formação de  $PdH_2$ . Essa fase não é totalmente reversível [9], [39], [40].

Trabalhos sobre detecção de hidrogênio baseada em micro-ondas têm sido pouco explorados em comparação com aqueles realizados por meio de técnicas resistivas, ópticas, semicondutivas e magnéticas. Pode-se observar alguns trabalhos na literatura referente à detecção de hidrogênio em micro-ondas em Santos e colaboradores [12], em que é investigado o espectro de transmissão na faixa de frequência de 1 GHz a 8,5 GHz de uma configuração híbrida de microfita com uma configuração simples de cobre e paládio ( $Cu - Pd - Cu$ ), em um substrato de baixo custo, o FR-4, no qual são observadas alterações na perda por inserção do dispositivo estudado, após o dispositivo ser exposto ao hidrogênio a 1,6% a uma pressão de 0,4 bar. A melhor resposta do dispositivo em relação à perda por inserção ocorre na frequência de  $f = 3,2$  GHz, considerando o comprimento da seção de paládio igual a  $x = 20$  mm, conforme observada na Figura 2.1

Figura 2.1 Resposta da perda por inserção após exposição dos gases  $N_2$  e  $H_2$ , para  $x = 20$  mm.



Fonte: Adaptada de [12].



Em Ndoye e colaboradores [41] é realizado um estudo teórico e experimental de um substrato integrado a estruturas de ressonância (do inglês *Substrate Integrated Waveguide* – SIW), para aplicação de detecção de gases. É avaliada neste trabalho a sensibilidade dos sensores SIW, de acordo com a perturbação da ressonância. A frequência do ressonador SIW está entre 4 GHz e 6 GHz, no qual o hidrogênio é utilizado como gás de detecção. Os SIW possuem uma fina camada de dióxido de estanho ( $SnO_2$ ), que é um material dielétrico sensível ao hidrogênio. Os resultados experimentais para este trabalho, cujo princípio de detecção se baseia na variação da permissividade elétrica efetiva causada pela presença do  $H_2$ , apresentam sensibilidade variando de 8,1% a 33,9%, dependendo do tamanho ou da topologia da região funcional do sensor de gás.

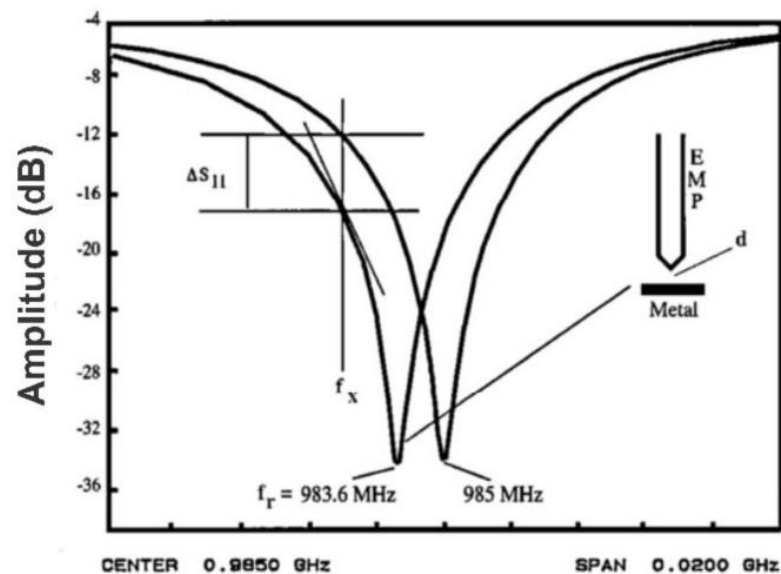
O sensor proposto por Benleulmi e colaboradores [42] é baseado em um deslocador de fase integrado com um substrato de micro-ondas passivo, no qual o deslocamento de fase do sinal de saída varia em função da concentração de gás hidrogênio. A estrutura utiliza uma fina camada de dióxido de estanho ( $SnO_2$ ), como material sensor de hidrogênio e apresenta uma variação de fase de  $19,5^\circ$ , com hidrogênio a 1,6%. Essa também é a proposta de um sensor simples e de fabricação de baixo custo.

Tabib-Azar e B. Sutapun [43], utilizaram a técnica de sondas de micro-ondas evanescentes (do inglês *evanescent microwave probes* – EMP), para medir a resistividade do filme de Pd em 13,5% a uma concentração de 3% de hidrogênio, com uma mudança em 18% do sinal a 1 GHz com  $0,1\ \mu m$  de espessura para filme de Pd depositado em  $5\ \mu m$  de silício. Os princípios de funcionamento do EMP são explicados utilizando uma geometria de ressonador de microfita, quando um objeto é colocado na proximidade da extremidade do ressonador, o coeficiente de reflexão sofre alteração na ressonância e no fator de qualidade [43], conforme observado na Figura 2.2.

Neste artigo [43] foi relatado o desenvolvimento de um sensor de gás inovador utilizado para mapear a condutividade e outras não uniformidades em uma variedade de materiais orgânicos e inorgânicos incluindo metais, polímeros, semicondutores e isoladores. Foi estudada em específico a detecção de alterações que ocorrem na resistividade e no volume da película de paládio em exposição ao hidrogênio. Apesar do Pd aumentar pouco de volume devido a conversão do Pd em

$PdH_x$ , o substrato de silício no qual foi depositado se deforma e enverga, estando esse envergamento relacionado à quantidade de hidrogênio absorvido.

Figura 2.2 Variação do parâmetro de espalhamento medido na porta 1 do dispositivo ( $S_{11}$ ) quando um objeto se aproxima do EMP.



Fonte: Adaptada de [43].

No trabalho de Yang e colaboradores [22], que emprega dispositivos semicondutores, foi fabricado um sensor composto por uma camada de óxido de índio ( $In_2O_3$ ) e nanopartículas de paládio evaporado. Para investigar os comportamentos relevantes do material no dispositivo sensor, foram utilizadas técnicas de espectroscopia de raios X por dispersão de energia (do inglês *energy-dispersive X-ray spectroscopy* – EDS), microscopia de força atômica (do inglês *atomic force microscopy* – AFM), microscopia eletrônica de varredura de alta resolução (do inglês *high-resolution scanning electron microscopy* – HRSEM) e microscopia eletrônica de transmissão (do inglês *transmission electron microscopy* – TEM). Para esse dispositivo, foi obtida uma resposta de detecção muito alta, de  $S_R = 5243$ , para uma concentração de 1% de  $H_2$  em ar, com um tempo de resposta de 12 segundos e limite de detecção de 100 ppb de  $H_2$ /ar, a uma temperatura de 225°C. Essa resposta de detecção é definida como a razão entre as correntes medidas em atmosfera de ar e em presença do gás-alvo, o hidrogênio,

evidenciando, assim, uma excelente seletividade ao hidrogênio. O parâmetro  $S_R$  é calculado de acordo com [22]:

$$S_R = \frac{I_g - I_a}{I_a} = \frac{R_a - R_g}{R_g}, \quad (2.1)$$

em que  $I_a$  e  $R_a$  representam, respectivamente, a corrente e a resistência medidas em atmosfera de ar, enquanto  $I_g$  e  $R_g$  correspondem à corrente e à resistência na presença do gás-alvo, o hidrogênio.

Outro trabalho que utiliza dispositivos semicondutores é o de Chen e colaboradores [21], que fabricaram um dispositivo composto por uma fina camada de óxido de cério ( $CeO_2$ ) e nanopartículas de paládio. As nanopartículas de  $Pd$  aumentam a relação área de superfície/volume e a reatividade catalítica do metal  $Pd$ , aprimorando o efeito de adsorção das moléculas de  $H_2$  na superfície do dispositivo sensor, melhorando seu desempenho. Para caracterizar as propriedades do dispositivo, foram utilizadas técnicas de espectroscopia de raios-x por dispersão de energia (do inglês *Energy-dispersive X-ray spectroscopy* – EDS), microscopia de força atômica (do inglês *atomic force microscopy* – AFM), microscopia eletrônica de varredura (do inglês *scanning electron microscopy* – SEM) e microscopia eletrônica de transmissão (do inglês *transmission electron microscopy* – TEM).

Experimentalmente, foi obtida uma alta resposta de detecção  $S_R = 120,2$  a uma concentração de 1% de  $H_2$  em ar a 350 °C com um tempo de resposta de 5 segundos. O sensor baseado em  $PdNP/CeO_2$ , apresenta ampla faixa de operação, tanto em temperatura (200 a 400 °C) quanto em concentração de hidrogênio (10 ppm – 1% de  $H_2$  no ar).

Em [20], Chou e colaboradores propuseram um sensor de hidrogênio inovador baseado em um diodo Schottky  $Pd - InP$ , fabricado pela técnica de deposição eletroforética (do inglês *electrophoretic deposition* – EPD) com nanopartículas de paládio. O dispositivo apresentou desempenho superior, com excelente retificação de corrente e uma altura de barreira Schottky de 829 meV, superando métodos tradicionais como deposição térmica e eletrolítica. O sensor demonstrou alta sensibilidade, sendo capaz de detectar concentrações de hidrogênio tão baixas quanto 15 ppm, com tempos de resposta e recuperação

rápidos, o que o torna uma solução promissora para monitoramento seguro de hidrogênio.

A técnica de deposição eletroforética garantiu uma distribuição uniforme das nanopartículas de *Pd* sobre o substrato de *InP*, ampliando a área de adsorção de hidrogênio e melhorando significativamente o desempenho do sensor. Os testes experimentais mostraram um aumento de corrente de até quatro ordens de magnitude, ao elevar a concentração de hidrogênio de 15 ppm para 1,0%  $H_2$ /ar a 303 K. O sensor atingiu tempos de resposta e recuperação de 33 segundos e 7 segundos, respectivamente.

No tocante às propostas de dispositivos sensores de hidrogênio, Lee e colaboradores [19] propuseram uma técnica que utiliza um sensor resistivo, no qual apresenta um alto desempenho, sendo desenvolvido a partir de nanopartículas de paládio (*Pd NP<sub>5</sub>*), combinadas com uma fina camada de trióxido de tungstênio (*WO<sub>3</sub>*). O dispositivo foi fabricado utilizando técnicas de evaporação térmica a vácuo (do inglês *vacuum thermal evaporation* – VTE) e pulverização catódica por radiofrequência (do inglês *RF sputtering*). Graças à notável atividade catalítica das nanopartículas de Pd e à elevada qualidade do filme de *WO<sub>3</sub>* (com espessura de 20 nm), o sensor alcançou uma resposta de alta sensibilidade ( $1,8 \times 10^4$  para 1000 ppm de  $H_2$  em ar a 175°C), um limite de detecção muito baixo ( $\leq 5$  ppm de  $H_2$ ) e rápida velocidade de resposta. Com uma estrutura simples e um processo de fabricação econômico, o dispositivo mostra grande potencial para aplicações em monitoramento de hidrogênio.

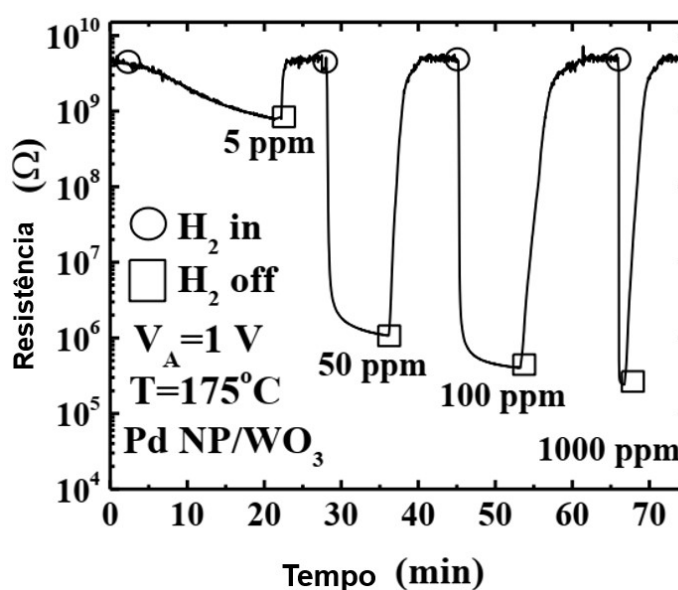
Os resultados demonstraram que as nanopartículas de *Pd* foram distribuídas de maneira uniforme na superfície do filme de *WO<sub>3</sub>*, o que contribuiu para a alta sensibilidade e seletividade para detecção de hidrogênio. A resposta do sensor foi proporcional à concentração de hidrogênio, superando dispositivos semelhantes, devido ao efeito *spill-over* promovido pelas nanopartículas de *Pd*, que facilita a dissociação das moléculas de  $H_2$ . A temperatura ideal de operação foi determinada em 175°C, com tempos de resposta e recuperação de 8 e 21 segundos, respectivamente. Ensaio adicionais evidenciaram a excelente seletividade do dispositivo, destacando sua superioridade frente a gases como  $NH_3$ ,  $CH_4$  e  $CH_3OH$ , o que reforça suas possibilidades de uso em ambientes industriais e sistemas de segurança. Na Figura 2.3 é possível observar o desempenho na detecção de

hidrogênio (mudança na resistência) com a introdução e remoção de  $H_2$  em diferentes concentrações.

Nas propostas sobre dispositivos que utilizam técnicas de detecção de hidrogênio utilizando o método óptico, em [27] Yu e colaboradores descrevem o desenvolvimento de um sensor de hidrogênio baseado em fibra óptica Fabry-Perot (do inglês *fiber-optic Fabry-Perot* – FFP), revestido com um filme de paládio-ítrio ( $Pd - Y$ ). O funcionamento do sensor se baseia na medição das mudanças no contraste das franjas em diferentes concentrações de hidrogênio. Comparações feitas entre o filme de  $Pd - Y$  e o de paládio puro ( $Pd$ ), revelaram que o filme de  $Pd - Y$  apresenta maior sensibilidade e melhor linearidade na detecção de hidrogênio.

Nos testes realizados, o sensor revestido com  $Pd - Y$  apresentou uma redução de 0,5 dB no contraste das franjas, para uma variação de concentração de hidrogênio de 0% a 5,5%. Em contraste, o sensor com filme de  $Pd$  mostrou uma redução menor, de apenas 0,2 dB, ao variar a concentração de 0% a 3,3%. O filme de  $Pd - Y$  também se destacou pela sua capacidade de recuperação após a exposição ao hidrogênio, podendo ser reutilizado várias vezes.

Figura 2.3 Respostas transitórias do dispositivo sob  $H_2$ /ar nas concentrações de 5, 50, 100 e 1000 ppm a 175 °C.

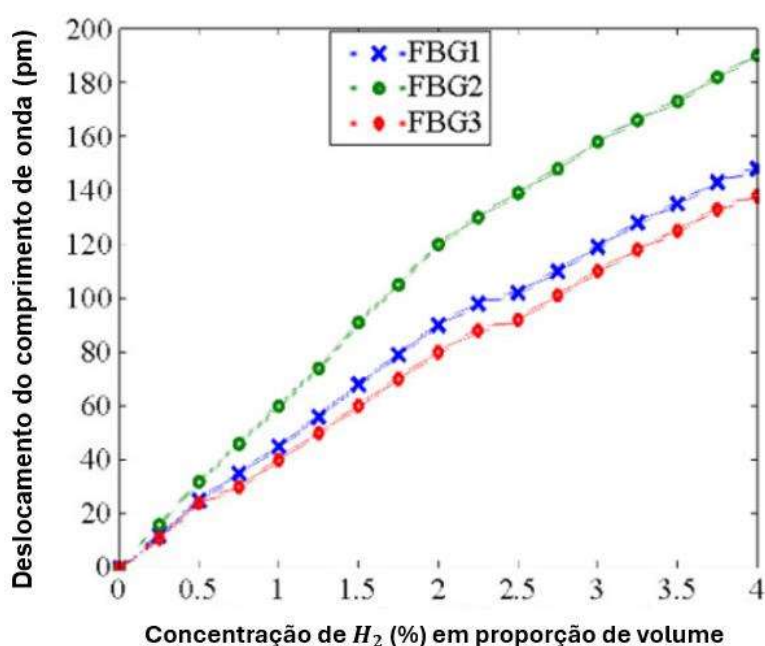


Fonte: Adaptada de [19].

Na pesquisa de Saad e colaboradores [28], são apresentados três sistemas de sensores de grade de Bragg em fibra óptica (do inglês *fiber Bragg grating* – FBG) para detecção de hidrogênio, em que é utilizada a técnica clássica de revestimento com paládio (*Pd*) (500 nm), como filme sensível ao hidrogênio, e o titânio (*Ti*), como camada adesiva, com o revestimento óptico gravado.

Com esses sistemas, foi possível detectar e monitorar experimentalmente concentrações de hidrogênio na faixa de 0,1% a 4% em volume, em uma sala de testes, com um valor altamente sensível e estável, atingindo 60 pm/1%  $H_2$ . Dentre os três sensores testados, o sensor (FBG2) apresentou a melhor sensibilidade. Além disso, um tempo de resposta rápido, de aproximadamente 6 segundos, foi obtido com um sensor avançado. Na Figura 2.4 tem-se a resposta dos deslocamentos de comprimento de onda, para os três sistemas de sensores.

Figura 2.4 Resposta dos deslocamentos de comprimento de onda de FBG1, FBG2 e FBG3 às concentrações de hidrogênio.



Fonte: Adaptada de [28].

Em Cavalcanti e colaboradores [26] é investigado o desempenho de filmes de *Pd* sobre uma camada de siloxano, para o desenvolvimento de sensores de  $H_2$ , baseados no efeito de ressonância de plásmon de superfície (do inglês *surface plasmon resonance* – SPR). Foram realizadas medições de refletância em filmes de

*Pd* depositados por *sputtering* sobre vidro puro e sobre vidro pré-revestido com uma camada de siloxano, utilizando a configuração de acoplamento por prisma de Kretschmann. Para a maioria das espessuras de *Pd* analisadas, a sensibilidade à detecção de  $H_2$  no vidro puro foi maior do que no *Pd*-siloxano, sendo que a sensibilidade máxima deste último correspondeu a do *Pd* puro. Uma comparação direta entre os dados de sensibilidade das duas configurações multicamadas, indica uma tendência de melhoria na sensibilidade ao  $H_2$ , para maiores valores de espessura nos filmes de paládio siloxanados.

No trabalho de Yi e colaboradores [44], é investigado um sensor óptico de hidrogênio baseado em um microressoador em anel, destacando sua elevada sensibilidade e *design* ultracompacto, com dimensões de  $4 \times 4 \mu m^2$ . O dispositivo possui uma camada interna sensível ao hidrogênio, composta por paládio (*Pd*) ou platina (*Pt*), permitindo a detecção de pequenas variações na concentração do gás.

Os experimentos revelaram que o deslocamento do comprimento de onda de ressonância e a variação da intensidade relativa, são mais acentuados nos sensores revestidos com platina, em comparação com aqueles revestidos com paládio. Além disso, foi identificada uma correlação direta entre a proporção de cobertura da camada sensível e a eficiência do sensor, embora um aumento excessivo na cobertura possa comprometer o fator de qualidade da ressonância. A investigação sobre diferentes larguras das camadas de *Pd* e *Pt*, mostrou que mesmo camadas finas, a partir de 100 nm, são suficientes para garantir uma interação eficaz com o campo evanescente do microrressoador.

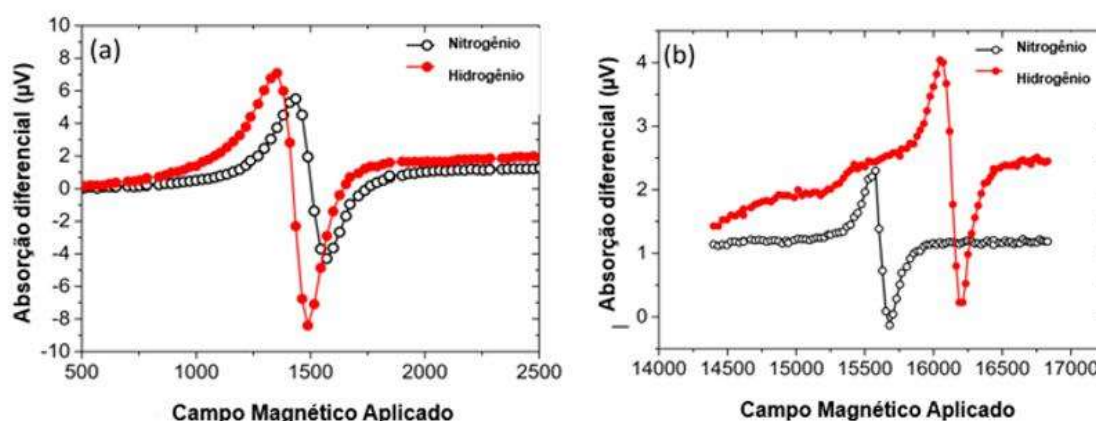
Pode-se observar uma extensa revisão sobre detecção de hidrogênio utilizando dispositivos ópticos em [29]. O sensor de hidrogênio baseado em fibra óptica se tornou um tema de pesquisa popular desde que foi proposto, devido às suas propriedades únicas de segurança intrínseca. Nas últimas três décadas, diversas variedades de sensores de hidrogênio em fibra óptica foram desenvolvidas, podendo ser categorizadas em cinco tipos: interferência, microespelho, campo evanescente, ressonância de plásmon de superfície e grade de Bragg em fibra. Este trabalho de revisão foca nos representantes desses cinco tipos de sensores de hidrogênio, baseados em ligas de *Pd* e/ou materiais sensíveis de  $WO_3$ . Os sensores de hidrogênio baseados em fibra óptica são muito promissores por oferecerem imunidade a interferências eletromagnéticas, alta sensibilidade e leveza. Apesar dos

avanços significativos, existem alguns desafios importantes a serem superados como o tempo de resposta lento em determinadas configurações, a necessidade de altas temperaturas de operação em alguns casos, além de questões relacionadas à estabilidade e à reversibilidade da resposta do sensor.

Em detecção de hidrogênio que utiliza dispositivos magnéticos, Lueng e colaboradores [24] demonstraram em seu trabalho que a força da anisotropia magnética perpendicular (do inglês *perpendicular interface magnetic anisotropy* – PMA) de uma bicamada de filmes finos de paládio – cobalto ( $Pd - Co$ ), pode ser modificada quando o gás hidrogênio é absorvido pela camada de paládio.

O trabalho mostra que a resposta de ressonância ferromagnética (do inglês *ferromagnetic resonance* – FMR), obtida em uma frequência de 12,6 GHz, é sensível às mudanças na PMA após a exposição do paládio ao hidrogênio. É apresentado neste trabalho uma proposta de um sensor de gás simples e compacto para o gás hidrogênio, no qual é explorada a detecção baseada em FMR, de acordo com as mudanças no PMA, induzidas pelo hidrogênio. A magnitude do deslocamento do pico de FMR determina a sensibilidade de detecção, quanto maior o deslocamento do pico para uma determinada concentração de gás, maior a sensibilidade. Foi demonstrado que a sensibilidade de detecção é aumentada quando o campo magnético estático é aplicado perpendicularmente ao plano do filme, conforme observado na Figura 2.5.

Figura 2.5 Respostas do FMR medido após exposição aos gases nitrogênio e hidrogênio. (a) Campo magnético estático é aplicado no plano do filme fino. (b) O campo é aplicado perpendicularmente ao plano do filme.



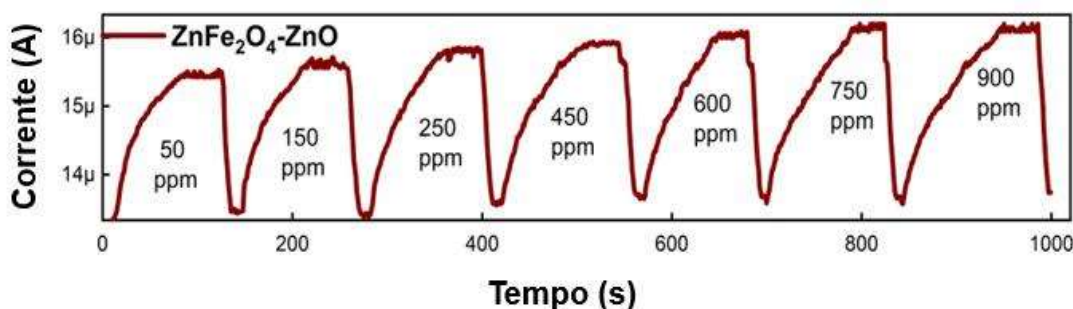
Fonte: Adaptada de [24].



Ainda referente à utilização de dispositivos magnéticos na detecção de hidrogênio em [25], Daniel e colaboradores apresentam o desenvolvimento de um sensor de hidrogênio baseado em um resistor magneto-semicondutor (do inglês *magnetic semiconductor* – MS), utilizando uma heteroestrutura de  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4 - \text{ZnO}$ . O sensor foi fabricado por meio de um processo hidrotérmico e demonstrou alta capacidade de detecção de hidrogênio, alcançando concentrações mínimas de 50 ppm e operando de forma eficiente em temperatura ambiente. A interação com o  $\text{H}_2$  provoca um aumento na magnetização da heteroestrutura  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4 - \text{ZnO}$ , resultando em mudanças na condutividade elétrica do material. Os testes indicaram que o sensor possui um limite de detecção de 8,9 ppm e uma sensibilidade máxima de 20% para concentrações de até 900 ppm de  $\text{H}_2$ , com tempos de resposta entre 35 e 55 segundos. Além disso, sua seletividade foi avaliada em relação a compostos orgânicos voláteis (do inglês *volatile organic compounds* – VOCs), demonstrando uma resposta superior ao hidrogênio, em comparação com outros gases.

Do ponto de vista elétrico, observou-se uma diminuição da resistência quando o sensor foi submetido ao  $\text{H}_2$ , comprovando o princípio de detecção baseado na alteração da condutividade do material. A sensibilidade do sensor MS a alguns compostos orgânicos voláteis (VOCs) presentes no hálito e a interferência cruzada entre  $\text{H}_2$  e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) foram analisadas. O trabalho visa fornecer uma abordagem direta para o teste de  $\text{H}_2$  no hálito, usando partículas magnéticas, com potencial para se tornar um dispositivo portátil de diagnóstico. Na Figura 2.6 é mostrada a resposta transitória do sensor MS a diferentes concentrações de  $\text{H}_2$ .

Figura 2.6 Resposta transitória do sensor MS a diferentes concentrações de  $\text{H}_2$ .



Fonte: Adaptada de [25].

Noh e colaboradores [9], realizaram um estudo comparativo, no qual foram analisadas as principais características, problemas e possíveis soluções de sensores de hidrogênio com base em nanoestruturas de *Pd*, de baixa dimensionalidade, com ênfase em películas finas e nanofios de paládio. A sensibilidade na detecção de hidrogênio pode ser definida segundo a alteração da resistência, na presença dos gases  $H_2$  e  $N_2$ , de acordo com [9]

$$\text{Sensibilidade (\%)} = \left[ \frac{(R_H - R_N)}{R_N} \right] \times 100, \quad (2.2)$$

em que  $R_H$  é a resistência na presença do gás hidrogênio e  $R_N$  é a resistência na presença do gás nitrogênio. Observou-se que o tipo de substrato e espessura da película de *Pd*, também influenciam na resposta do sensor. As nanopartículas de *Pd* podem satisfazer quase todos os requisitos para um bom sensor de hidrogênio como: alta sensibilidade, resposta rápida, detecção escalonável de hidrogênio e baixo limite de detecção.

Nas pesquisas de Öztürk e colaboradores [7], foram observados que em filmes de paládio com espessuras de 6 nm, 20 nm e 60 nm, depositados em substratos duros como vidro, os filmes foram deformados a uma exposição de 10% de  $H_2$ . Não houve uma deformação estrutural em 6 nm de *Pd* depositados em substrato flexível, como o polímero poliamida, exposto a 10% de  $H_2$ . O experimento mostrou que para essa espessura de 6 nm de *Pd*, o sensor apresenta alta sensibilidade e reversibilidade.

Na faixa de frequência de micro-ondas pode ser desenvolvida uma série de dispositivos como ressoadores, guias de onda, entre outros [45]. Os ressoadores podem ser aplicados como sensores para detecção de algum componente específico, como por exemplo detecção de um gás e umidade apresentado por N. Donato e colaboradores [46], que propuseram o desenvolvimento de ressoadores de microfita, cujo *design* consiste em um disco ressonante com anéis externos acoplados a uma microfita, que trabalham na faixa de frequência de 3 GHz a 6 GHz, que tem como objetivo a mensuração de umidade em um intervalo de 0% a 70%, no qual pode-se observar que o aumento da umidade trouxe uma diminuição do valor de ressonância.

Para este trabalho de tese, foram realizadas simulações e experimentos em laboratório, utilizando ressoadores de microfita, com o objetivo de detectar hidrogênio. As simulações de um ressoador de microfita reconfigurável podem ser analisadas em Santos e colaboradores, em um substrato RF-35 [47].

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são abordados os conceitos fundamentais necessários para compreender o projeto dos dispositivos desta tese. Na Seção 3.1 é feita uma introdução à teoria de micro-ondas. Na Seção 3.2 e 3.3 são abordados assuntos que servem como base teórica, para compreensão e realização deste trabalho, que são as linhas de transmissão em microfita e ressoadores de micro-ondas, respectivamente.

#### 3.1 INTRODUÇÃO À TEORIA DE MICRO-ONDAS

Os dispositivos de micro-ondas têm desempenhado um papel relevante em diversas aplicações, incluindo redes sem fio, sistemas de comunicação, radares, sensoriamento remoto, sistemas médicos, entre outros, e contribuem significativamente para o avanço das tecnologias de radiofrequência (RF) e micro-ondas [48].

A engenharia de micro-ondas atua em projetos de equipamentos, dispositivos e sistemas de comunicação, na faixa do espectro eletromagnético, que é o conjunto de todas as frequências que constituem a energia eletromagnética, na faixa de 3 a 300 GHz, cujos comprimentos de onda envolvidos estão na ordem de grandeza entre 10 cm a 1 mm e são calculados supondo a onda se propagando no vácuo, segundo  $\lambda = c/f$ , em que  $c$  é a velocidade da luz em (m/s) no vácuo e  $f$  é a frequência em (Hz), esses comprimentos de onda são da mesma ordem de grandeza dos dispositivos empregados em projetos de micro-ondas [48], [49].

Nos dispositivos de baixa frequência, as dimensões dos condutores em relação ao comprimento de onda exercem pouca influência sobre a resposta elétrica. Entretanto, em estruturas que operam na faixa de micro-ondas, essa relação torna-se relevante, tornando inadequada a aplicação direta da teoria clássica de circuitos.

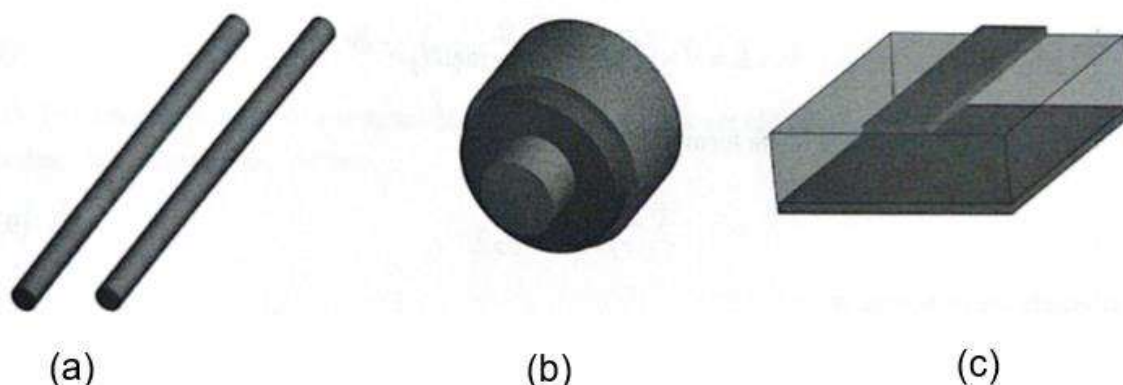
##### 3.1.1 Linhas de transmissão

As linhas de transmissão (LT) e os guias de onda são estruturas utilizadas para a condução de energia e informação. As linhas de transmissão constituem um tipo particular de guia de onda, no qual a propagação do campo eletromagnético

ocorre ao longo do eixo da estrutura, sendo, portanto, guiado por ela [45]. Essas linhas podem assumir diferentes configurações, como ilustrado na Figura 3.1: cabos paralelos (Figura 3.1a), cabo coaxial (Figura 3.1b) e microfitas (Figura 3.1c). Por apresentarem uma configuração longitudinal composta por dois ou mais condutores, tais estruturas permitem a propagação de modos transversais eletromagnéticos (TEM), nos quais os campos elétrico e magnético estão totalmente contidos no plano perpendicular à direção de propagação [45].

Em aplicações de baixa potência, as linhas de transmissão são empregadas na transmissão de informações em sistemas de telecomunicações e no transporte de dados entre diferentes porções de circuitos integrados e processadores; já em situações de alta potência, essas estruturas desempenham o papel de conduzir energia em sistemas de alta tensão [45].

Figura 3.1 Linhas de transmissão. (a) cabos paralelos, (b) cabo coaxial, (c) microfitas.



Fonte: [45].

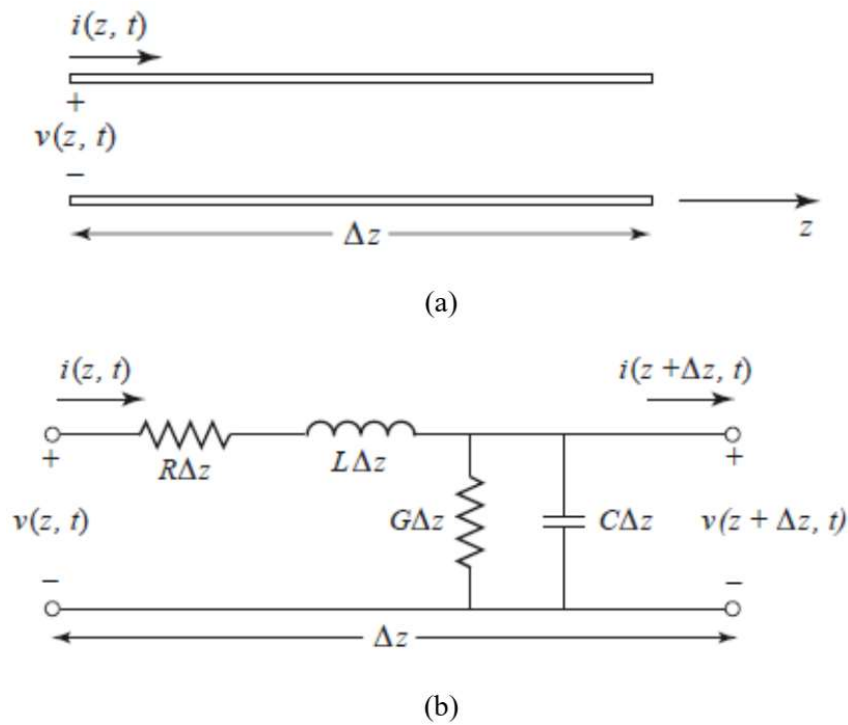
A Figura 3.2 (a) apresenta a estrutura básica de uma linha de transmissão, representada por dois fios paralelos, onde as tensões e correntes podem variar a magnitude e a fase em função do comprimento [48]. Um segmento de comprimento infinitesimal  $\Delta z$  dessa linha, pode ser caracterizado por elementos discretos, conforme ilustrado na Figura 3.2 (b).

O capacitor e o indutor são os elementos responsáveis por representar, respectivamente, a capacitância (armazenamento de energia elétrica) e a indutância (armazenamento de energia magnética) da linha de transmissão, e os resistores, as

perdas do circuito. O capacitor em paralelo e o indutor em série representam, respectivamente, a capacitância e a autoindutância entre os dois fios condutores. O resistor em série representa as perdas nos condutores, e o resistor em paralelo representa as perdas no material dielétrico [48].

Um pedaço de linha de comprimento infinitesimal  $\Delta z$  pode ser modelada por elementos discretos  $R$ ,  $L$ ,  $G$  e  $C$  distribuídos ao longo de todo comprimento da linha de transmissão [48], conforme Figura 3.2 (b).

Figura 3.2 (a) Representação de uma linha de transmissão, (b) representação de um trecho infinitesimal ( $\Delta z$ ).



Fonte: [48].

- $R$  é a resistência por unidade de comprimento, para ambos os condutores, em  $\Omega/\text{m}$ ;
- $L$  é a indutância por unidade de comprimento, para ambos os condutores, em  $\text{H}/\text{m}$ ;
- $G$  é a condutância por unidade de comprimento, em  $\text{S}/\text{m}$ ;
- $C$  é a capacitância por unidade de comprimento, em  $\text{F}/\text{m}$ .

A propagação das ondas em uma linha de transmissão pode ser abordada pela Teoria dos Circuitos. Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões e das correntes, tem-se [48]:

$$v(z, t) - R\Delta z i(z, t) - L\Delta z \frac{\partial i(z, t)}{\partial t} - v(z + \Delta z, t) = 0, \quad (3.1)$$

$$i(z, t) - G\Delta z v(z + \Delta z, t) - C\Delta z \frac{\partial v(z + \Delta z, t)}{\partial t} - i(z + \Delta z, t) = 0, \quad (3.2)$$

que fornecem [48]:

$$\frac{dV(z)}{dz} = -(R + j\omega L)I(z), \quad (3.3)$$

$$\frac{dI(z)}{dz} = -(G + j\omega C)V(z), \quad (3.4)$$

a partir da Equação (3.3), utiliza-se a segunda derivada de  $V$  em relação a  $z$  e emprega na Equação (3.4) obtendo [48]:

$$\frac{d^2V(z)}{dz^2} - \gamma^2 V(z) = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2I(z)}{dz^2} - \gamma^2 I(z) = 0, \quad (3.6)$$

onde  $\gamma$  é a constante de propagação da linha, definida por [48]:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}, \quad (3.7)$$

assim, as soluções para as Equações (3.5) e (3.6) são dadas por:

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z}, \quad (3.8)$$

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z}, \quad (3.9)$$

$$I(z) = \frac{1}{Z_0} (V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}) \quad (3.10)$$

em que  $V_0^+$ ,  $V_0^-$ ,  $I_0^+$  e  $I_0^-$  são as amplitudes da onda e o termo  $e^{-\gamma z}$  representa a propagação da onda na direção  $+z$ , o termo  $e^{\gamma z}$  representa a propagação da onda na direção  $-z$  e  $Z_0$  é a impedância característica da linha que tem o comprimento de onda ( $\lambda$ ), dado pela Equação (3.12) e a velocidade de fase ( $v_p$ ) pela Equação (3.13) [48].

Substituindo as Equações (3.8) e (3.9) na Equação (3.11), obtém-se a impedância característica da linha [48]:

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}, \quad (3.11)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}, \quad (3.12)$$

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f. \quad (3.13)$$

### 3.2 CIRCUITOS EM MICROFITA

As linhas de transmissão planares são compactas, de baixo custo e permitem fácil integração com outros circuitos ou dispositivos discretos como diodos, transistores, capacitores, resistores, entre outros, possibilitando a implementação de circuitos integrados de micro-ondas. Elas surgem como uma alternativa às linhas



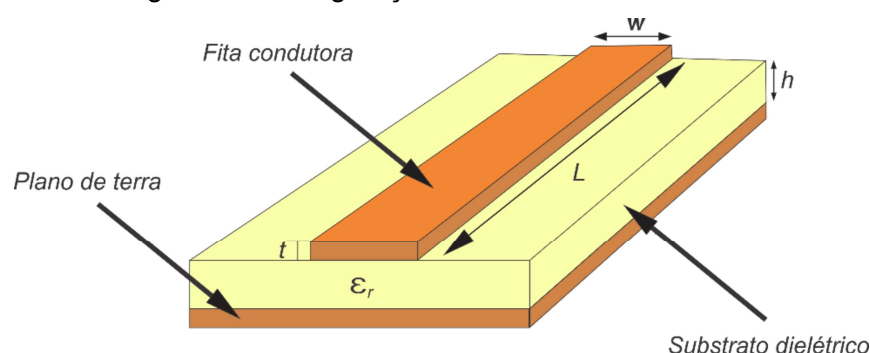
convencionais, apresentando diferentes geometrias, como *stripline*, microfita, *slotline*, guias de onda coplanares, entre outras [48], [50].

As linhas de transmissão em microfita, que será utilizada no projeto dos dispositivos desta tese, fazem parte da categoria de linhas de placas paralelas e operam em frequências que variam de alguns GHz a dezenas de GHz. São estruturas de fácil fabricação e amplamente aplicadas em circuitos integrados de micro-ondas, como componentes de circuitos como filtros, acopladores, ressoadores e antenas [48], [50].

### 3.2.1 Parâmetros de uma microfita

Na Figura 3.3 é ilustrada uma linha de transmissão em microfita. Ela consiste em uma fita condutora separada de um plano terra por um dielétrico de espessura constante [48], [51]. Para encontrar os valores que estejam de acordo com a impedância característica e com o comprimento elétrico desejados é necessário obter os valores dos parâmetros adequados. Os terminais precisam estar casados, mesmo que as conexões sejam por outros segmentos de linhas de transmissão [48], [51].

Figura 3.3 Configuração básica de uma microfita.

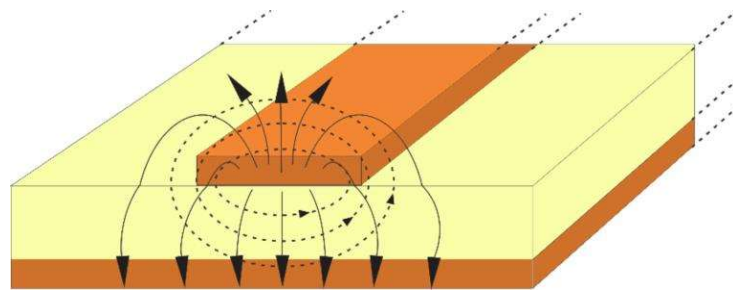


Fonte: Modificada de [52].

As ondas eletromagnéticas se propagam simultaneamente no dielétrico e no ar, por esse motivo o modo de propagação não é estritamente transversal eletromagnético (TEM), mas sim uma combinação híbrida entre TM-TE. Em situações práticas, a espessura do dielétrico é muito menor que o comprimento de onda do sinal, o que permite uma aproximação do modo “quasi-TEM” [48], [51].

Conforme observado na Figura 3.3, a impedância da microfita é em função da largura da linha condutora  $w$  que é impresso em um substrato fino separado do plano terra por um dielétrico de espessura  $h$ , permissividade relativa  $\epsilon_r$  e pela espessura da linha  $t$  [48], [51]. A Figura 3.4, ilustra as linhas de campo magnético representadas por ( $\cdots\rightarrow$ ) e as linhas de campo elétrico representadas por ( $\rightarrow$ ) na microfita, que permeia entre o ar e o dielétrico.

Figura 3.4 Linhas de campo elétrico e magnético.



Fonte: Acervo do autor.

Como o campo permeia entre o ar e o dielétrico, utiliza-se a permissividade relativa efetiva  $\epsilon_{ef}$ , que possui um valor menor que a permissividade relativa  $\epsilon_r$  do dielétrico, para projetos de dispositivos de microfita [48], [51]. A impedância e a permissividade relativa podem ser determinadas a partir dos valores de capacitância do dielétrico  $C_d$  e capacitância do dielétrico substituído pelo ar  $C_a$ , por meio de [50]:

$$Z_0 = \frac{1}{c\sqrt{C_a C_d}}, \quad (3.14)$$

$$\epsilon_{ef} = \frac{C_d}{C_a}, \quad (3.15)$$

em que  $c$  é a velocidade da onda no espaço livre ( $c \approx 3.0 \times 10^8$  m/s). Em relação a  $\epsilon_{ef}$  a impedância característica pode ser obtida pela relação:

$$Z_0 = \frac{Z_a}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}}, \quad (3.16)$$

em que  $Z_a$  é a impedância característica da microfita preenchida pelo ar. Também é obtida a impedância característica de uma microlinha e sua permissividade efetiva pelo cálculo da razão entre a largura da fita condutora  $w$  e a altura do substrato  $h$  [48], [50]. Para  $w/h \leq 1$ ,

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2} + 0,04 \left( 1 - \frac{W}{h} \right)^2 \right], \quad (3.17)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right) \Omega, \quad (3.18)$$

e para  $w/h > 1$ ,

$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-1/2}, \quad (3.19)$$

$$Z_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}} \frac{120\pi\Omega}{\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.444 \right)}. \quad (3.20)$$

As Equações (3.17) e (3.19) não consideram a espessura da camada do metal ( $t \rightarrow 0$ ).

Uma vez calculada a permissividade efetiva do dielétrico, pode-se calcular o comprimento da onda no guia como [50]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}}, \quad (3.21)$$

em que  $\lambda_0$  é o comprimento da onda no espaço livre, referente a frequência  $f_0$  (em GHz), dado por [50]:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}. \quad (3.22)$$

A constante de propagação e a velocidade de fase da onda podem ser obtidas respectivamente por [50]:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}, \quad (3.23)$$

$$v_f = \frac{\omega}{\beta} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{ef}}}. \quad (3.24)$$

A atenuação do sinal em uma linha de microfita é provocada pelas perdas no condutor e perdas no dielétrico, em que a perda total  $\alpha_{tot}$  pode ser calculada por [51]:

$$\alpha_{tot} = \alpha_c + \alpha_d, \quad (3.25)$$

em que  $\alpha_c$  é a atenuação do sinal no condutor e  $\alpha_d$  é a atenuação do sinal no dielétrico. Uma aproximação simples para cálculo da perda no condutor e perda no dielétrico podem ser obtidas respectivamente por [48], [51]:

$$\alpha_c = 8,686 \frac{R_{skin}}{Z_0 w} \left( \frac{dB}{m} \right), \quad (3.26)$$

$$\alpha_d = 8,686\pi \left( \frac{\varepsilon_{ef} - 1}{\varepsilon_r - 1} \right) \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{ef}} \frac{tg\delta}{\lambda_g} \left( \frac{dB}{m} \right), \quad (3.27)$$

em que  $w$  é a largura da linha condutiva, a tangente de perdas do substrato  $tg\delta$  que é totalmente dependente da frequência e o  $R_{skin}$  que é a resistência do efeito pelicular no condutor, definida por [48], [51]:

$$R_{skin} = \frac{1}{\sigma\delta} = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}. \quad (3.28)$$

Na Equação (3.28),  $\sigma$  é a condutividade no condutor e  $\delta$  é a profundidade pelicular, que é a medida da profundidade de penetração de uma onda eletromagnética (EM) em um meio e  $\mu$  é a permeabilidade do meio. A profundidade de penetração pode ser expressa na forma [48], [51]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} = \frac{1}{\alpha}. \quad (3.29)$$

### 3.3 RESSOADORES ELETROMAGNÉTICOS

Os sistemas ressonantes apresentam características relevantes relacionadas à capacidade de armazenamento de energia. No regime de baixas frequências, é possível construir ressoadores utilizando indutores e capacitores. Com o aumento da frequência, trechos de linhas de transmissão terminadas em aberto ou em curto-circuito, exibem o comportamento ressonante típico dos circuitos de baixa frequência [45].

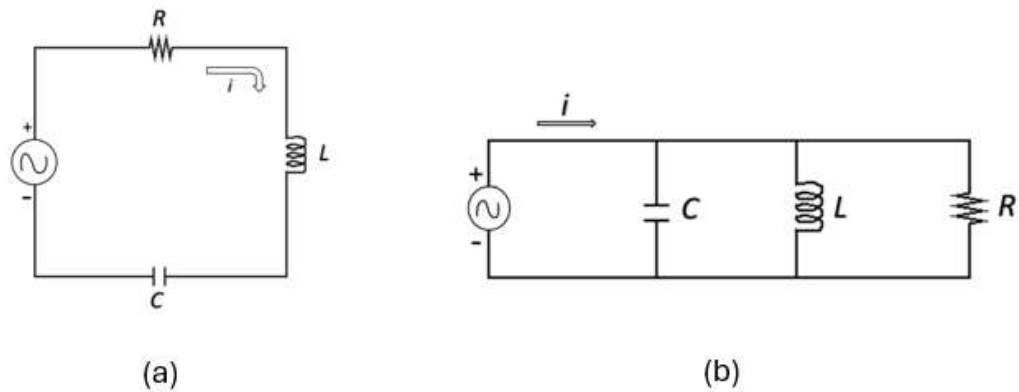
Para frequências maiores, guias de onda terminados por superfícies condutoras em duas extremidades apresentam o comportamento ressonante esperado, isto é, elevada capacidade de armazenamento de energia em torno de uma ou mais frequências de ressonância. No regime de frequências mais altas, quando a estrutura está confinada por paredes condutoras, ela passa a ser denominada cavidade ressonante [45]. Nesta seção são abordados alguns conceitos de ressoadores, que são a base para o entendimento das simulações desenvolvidas neste trabalho.

#### 3.3.1 Ressoadores de micro-ondas

Em diferentes faixas do espectro eletromagnético, os ressoadores têm grande relevância, sendo aplicados no desenvolvimento de osciladores, filtros, amplificadores sintonizáveis, entre outros. A operabilidade dos ressoadores de micro-ondas é muito similar aos ressoadores de elementos discretos de circuitos ressonantes série e paralelo [48], [50].

Para entender as principais características de um circuito ressonante, circuitos RLC em série e em paralelo serão analisados conforme ilustra a Figura 3.5.

Figura 3.5 Circuito ressonantes. (a) em série, (b) em paralelo.



Fonte: Acervo do autor.

O circuito ressonante em série, conforme ilustra a Figura 3.5 (a), possui uma impedância de entrada de [48]:

$$Z_{in} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1}, \quad (3.30)$$

no qual  $C$  é o capacitor,  $L$  é o indutor e  $R$  é o resistor.

A potência dissipada no resistor é representada pela Equação (3.31) [48]:

$$P_l = \frac{|I|^2 R}{2}, \quad (3.31)$$

a energia magnética média armazenada no indutor é representada pela Equação (3.32) [48]:

$$W_m = \frac{|I|^2 L}{4}, \quad (3.32)$$

a energia elétrica média armazenada no capacitor é obtida pela Equação (3.33) [48]:

$$W_e = \frac{|I|^2}{4\omega^2 C}, \quad (3.33)$$

a partir das equações (3.31), (3.32) e (3.33), obtêm-se a potência complexa do circuito ressonante [48]:

$$P_{in} = P_l + 2j\omega(W_m - W_e). \quad (3.34)$$

A ressonância ocorre quando as energias acumuladas média, magnética e elétrica são iguais  $W_m = W_e$ , a partir disto obtêm-se um valor puramente real de impedância de entrada em ressonância por [48]:

$$Z_{in} = \frac{P_l}{1/2 |I|^2} = R, \quad (3.35)$$

a partir dessa igualdade também pode-se chegar ao valor da frequência de ressonância [48]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3.36)$$

Nos circuitos ressonantes em paralelo conforme ilustrado na Figura 3.5 (b) possui uma impedância de entrada de [48]:

$$Z_{in} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right)^{-1}. \quad (3.37)$$

A potência dissipada no resistor é obtida por [48]:

$$P_l = \frac{1}{2} \frac{|V|^2}{R}, \quad (3.38)$$

a energia elétrica média acumulada no capacitor e a energia magnética média acumulada no indutor podem ser encontradas respectivamente por [48]:

$$W_e = \frac{|V|^2 C}{4}, \quad (3.39)$$

$$W_m = \frac{1}{4} |V|^2 \frac{1}{\omega^2 L}, \quad (3.40)$$

a partir das Equações (3.38), (3.39) e (3.40), obtêm-se a potência complexa do circuito ressonante [48]:

$$P_{in} = P_l + 2j\omega(W_m - W_e) . \quad (3.41)$$

Uma impedância puramente real é obtida quando ocorre a ressonância [48]:

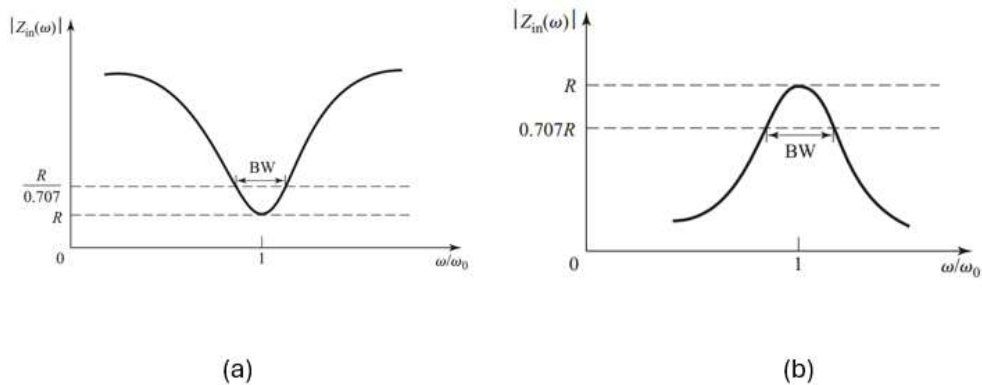
$$Z_{in} = \frac{P_l}{\frac{1}{2}|I|^2} = R . \quad (3.42)$$

A frequência de ressonância é definida por [48]:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} , \quad (3.43)$$

a ressonância em um circuito paralelo é comumente chamada de antirressonância. A impedância de entrada em função da frequência angular, para os dois tipos de frequências ressonantes, é observada pela Figura 3.6.

Figura 3.6 Magnitude da impedância de entrada versus frequência em circuitos ressonantes. (a) série, (b) paralelo.



Fonte: [51].

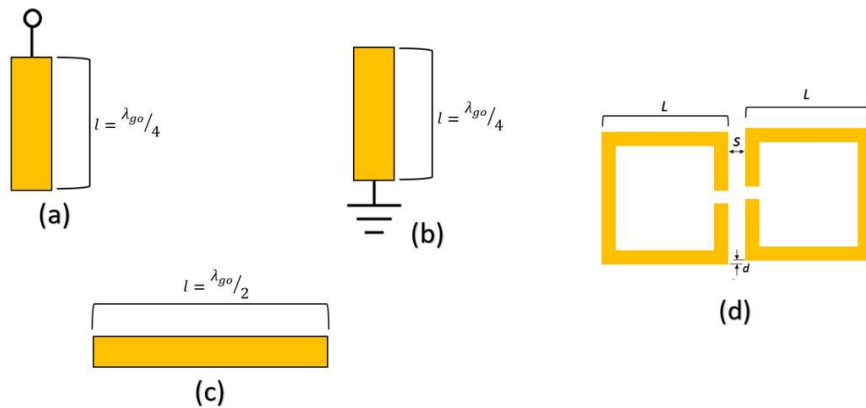
### 3.3.2 Ressonadores em microfita

Um ressonador em microfita é qualquer estrutura construída em linhas de microfita que é capaz de propagar um campo eletromagnético oscilante [48], [50]. São classificados como ressonadores de elementos discretos e de elementos quase discretos, em linha ou em patch [53]. Ressonadores em linha podem ser de um quarto



de onda, na frequência fundamental de ressonância,  $\lambda_{g0}/4$ , podendo ressoar em outras frequências mais altas, dadas por  $f \approx (2n - 1)f_0$ , para  $n = 2,3,4,\dots$ . Outro tipo de ressoador é o de meio comprimento de onda,  $\lambda_{g0}/2$ , ressoando em frequências mais altas em  $f \approx nf_0$ , para  $n = 2,3,4,\dots$ . Na Figura 3.7 são apresentadas configurações para dispositivos de  $\lambda_{g0}/4$  e  $\lambda_{g0}/2$  [48], [50].

Figura 3.7 Diferentes tipos de estruturas de ressonância. (a) ressonância “shunt” em série, (b) ressonância “shunt” em paralelo, (c) ressonador em linha de meio comprimento de onda, (d) ressoadores de microfita acoplados (acoplamento elétrico), cada ressoador é de meio comprimento de onda.



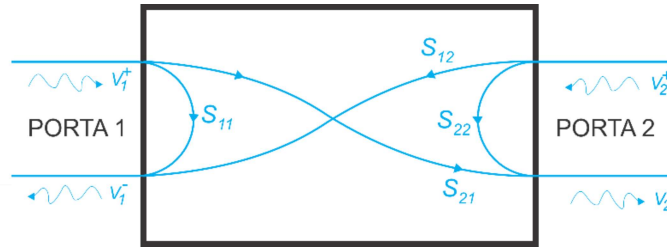
Fonte: Modificada de [50].

### 3.4 ANÁLISE DE REDES DE MICRO-ONDAS

No trabalho com altas frequências, redes de duas portas são mais bem caracterizadas em termos de parâmetros de espalhamento, também denominado de parâmetros  $S$  [54].

Os parâmetros de espalhamento são definidos em termos de ondas viajantes, que são as variáveis naturais a serem utilizadas em um ambiente de linha de transmissão. Pode-se utilizar parâmetros de espalhamento para caracterizar todos os elementos constituintes de uma rede como por exemplo: tensão, corrente e potência [48]. Para uma rede com dois acessos, segue a Figura 3.8.

Figura 3.8 Rede de dois acessos composta por ondas de tensão e parâmetros S.



Fonte: Acervo do autor.

As grandezas estão relacionadas na seguinte forma [48], [54]:

$$V_1^- = V_1^+ S_{11} + V_2^+ S_{12} , \quad (3.44)$$

$$V_2^- = V_1^+ S_{21} + V_2^+ S_{22} , \quad (3.45)$$

em que,

- $V_1^+$  = Onda de tensão entrando pela Porta 1;
- $V_1^-$  = Onda de tensão saindo pela Porta 1;
- $V_2^+$  = Onda de tensão entrando pela Porta 2;
- $V_2^-$  = Onda de tensão saindo pela Porta 2;
- $S_{11}$  = Coeficiente de reflexão do sinal da Porta 1;
- $S_{22}$  = Coeficiente de reflexão do sinal da Porta 2;
- $S_{12}$  = Coeficiente de transmissão do sinal da Porta 2 para Porta 1;
- $S_{21}$  = Coeficiente de transmissão do sinal da Porta 1 para a Porta 2.

Para uma rede de  $N$ -portas a seguinte relação é obtida

$$\begin{bmatrix} v_1^- \\ \vdots \\ v_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1^+ \\ \vdots \\ v_N^+ \end{bmatrix} , \quad (3.46)$$

que equivale a

$$[V^-] = [S][V^+], \quad (3.47)$$

em que  $[V^-]$  é a onda de tensão saindo e  $[V^+]$  é a onda de tensão entrando no sistema, cada elemento específico pode ser determinado por  $S_{ij}$ , que é a relação entre a tensão da onda refletida na porta  $i$  quando as ondas incidentes nas portas restantes são iguais a zero, exceto a porta  $j$  [48]:

$$S_{ij} = \left. \frac{V_i^-}{V_j^+} \right|_{V_k^+ = 0 \text{ para } k \neq j}, \quad (3.48)$$

se  $i = j$  o termo  $S_{ij}$  é o coeficiente de reflexão, se  $i \neq j$  o coeficiente é de transmissão da porta  $j$  para a porta  $i$ .

Para situações com meios isotrópicos, as propriedades eletromagnéticas independem das direções dos campos e da propagação da energia eletromagnética. A resposta no acesso  $i$ , com excitação em  $j$ , é igual à resposta no acesso  $j$ , com excitação no acesso em  $i$ , para  $i \neq j$  temos que  $S_{ij} = S_{ji}$ . Em uma situação com junções sem perdas, a soma das potências que incidem no sistema é igual à soma das potências que saem do sistema. Considerando um acesso  $p$  qualquer, temos que [48]:

$$\sum_{p=1}^{\infty} |v_p^-|^2 = \sum_{p=1}^{\infty} |v_p^+|^2. \quad (3.49)$$

## 4 PROJETO DO SENSOR

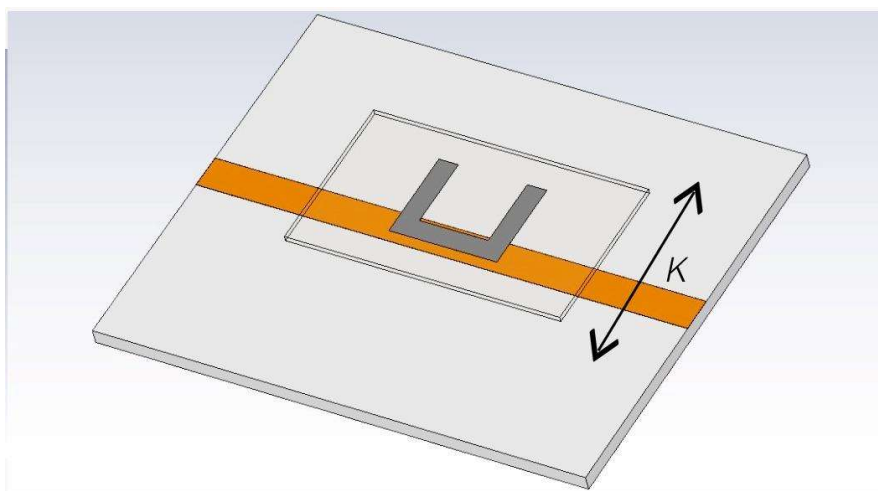
Este capítulo descreve os procedimentos adotados neste trabalho. Na Seção 4.1, são definidos os valores dos parâmetros dos dispositivos de microfita, do módulo de vedação de gases e movimento do sensor. A Seção 4.2 aborda a fabricação dos dispositivos projetados e mencionados na Seção 4.1. A Seção 4.3 aborda a simulação das estruturas de microfita no ambiente virtual *CST Studio Suite*.

### 4.1 DISPOSITIVO PROPOSTO

#### 4.1.1 Projeto do sensor reconfigurável em U

Como o paládio possui uma afinidade específica com o hidrogênio, amplamente documentada na literatura, este metal foi selecionado como parte integrante do dispositivo sensor. Inicialmente, foi projetado um ressoador de microfita reconfigurável, capaz de assumir diferentes configurações apenas ajustando sua posição em relação a uma linha de microfita, conforme Figura 4.1. No Anexo A é possível observar o rascunho original do projeto. Na Figura 4.1 é possível ver um ressoador no formato em “U”, que se movimenta variando o valor de  $K$ .

Figura 4.1 Variação do deslocamento  $K$  em relação à microfita.



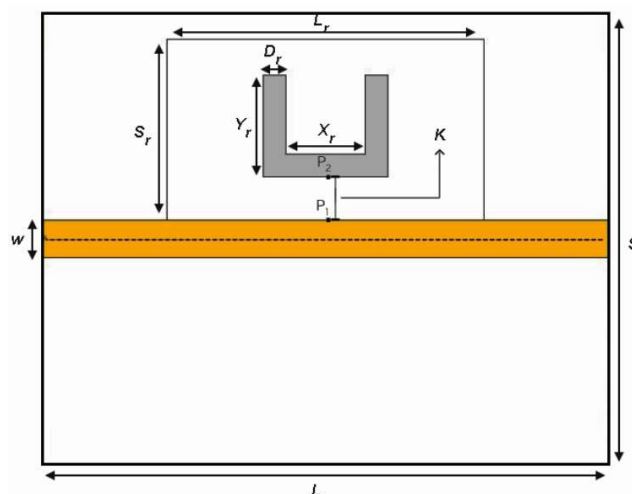
Fonte: Acervo do autor.

Os valores do deslocamento  $K$  foram definidos no intervalo de -5 a 5 mm, com incrementos de 0,1 mm. O processo de otimização desse parâmetro envolveu a análise do efeito do deslizamento do ressoador em relação à faixa de cobre da microfita fixa. As melhores respostas de simulação foram obtidas para  $K = 3,8$  mm; 2,3 mm; 0,8 mm; -2,5 mm; -3,0 mm; -4,0 mm e -5,0 mm, por meio de simulações realizadas no *software CST Studio Suite*. Maiores detalhes sobre essa análise são apresentados na subseção 4.3.1.

Os parâmetros de uma microfita, conforme observado nas Figura 4.2 e 4.3, devem ser definidos de modo a garantir que a impedância característica da linha de transmissão seja de 50  $\Omega$ . Essa impedância foi escolhida, pois, o circuito de microfita se conectará às portas 1 e 2 de um Analisador de Redes Vetorial (VNA, do inglês *Vector Network Analyzer*), cujo sistema de medição é calibrado para 50  $\Omega$ . O equipamento utilizado foi o modelo ZVL (9 KHz – 6,0 GHz), do fabricante ROHDE&SCHWARZ [55], assegurando o casamento de impedâncias durante as medições. Os parâmetros do dispositivo e a impedância da linha podem ser definidos conforme as equações da Seção 3.2, utilizando calculadoras *online* [56] ou a calculadora pré-existente no simulador, para determinar esses parâmetros automaticamente. Os valores de  $K$ , foram escolhidos baseados em simulações feitas no simulador *CST Studio Suite*.

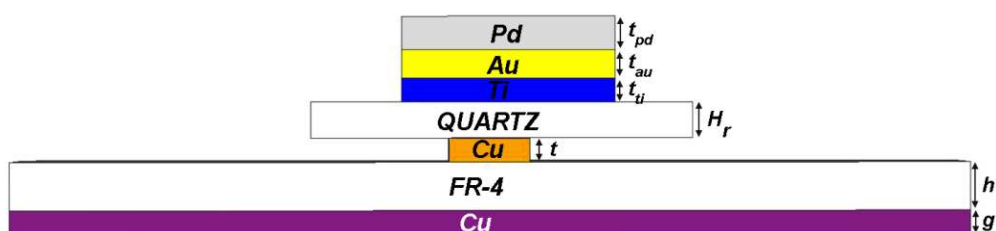
Para a linha de microfita optou-se por adquirir uma placa de FR-4, dupla face cobreada [57] encontrada comercialmente com valores pré-definidos para altura da placa  $h = 1,6$  mm e para a espessura do cobre  $t = 18$   $\mu$ m. Com base nesses valores pré-determinados, os valores obtidos para uma impedância  $Z_o \approx 50$   $\Omega$  são: largura da linha  $w = 3,0$  mm e comprimento da linha  $L = 50$  mm. Todos os parâmetros definidos para o dispositivo podem ser analisados nas Tabela 4.1 e 4.2. O ressoador em U, foi projetado em cima de um substrato de quartzo com três camadas de metais, titânio–ouro–paládio ( $Ti/Au/Pd$ ). A camada de titânio ( $Ti$ ) de 30 nm de espessura serve como camada adesiva para deposição uniforme do ouro ( $Au$ ) de 10 nm de espessura, que por sua vez, evita a remoção do paládio ( $Pd$ ), quando camadas mais espessas são depositadas.

Figura 4.2 Microfita reconfigurável e seus parâmetros (visão frontal).



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.3 Microfita reconfigurável e seus parâmetros (visão lateral).



Fonte: Acervo do autor.

Tabela 4.1 Parâmetros da microfita.

Parâmetro	Valor
Comprimento do dispositivo $L$ , mm	50
Largura do dispositivo $S$ , mm	40
Largura da microfita $w$ , mm	3
Altura da microfita $h$ , mm	1,6
Espessura do cobre $t$ , $\mu\text{m}$	18
Plano terra $g$ , $\mu\text{m}$	18
Permissividade relativa do FR-4 $\epsilon$	4,3

Fonte: O autor.

Tabela 4.2 Parâmetros do ressoador.

Parâmetro	Valor
Comprimento do dispositivo $L_r$ , mm	28
Largura do dispositivo $S_r$ , mm	16
Parâmetro 1 do ressoador $X_r$ , mm	7
Parâmetro 2 do ressoador $Y_r$ , mm	9
Parâmetro 3 do ressoador $D_r$ , mm	2
Altura do quartzo $H_r$ , $\mu\text{m}$	525
Espessura do titânio $t_{Ti}$ , nm	10
Espessura do ouro $t_{Au}$ , nm	30
Espessura do paládio $t_{Pd}$ , nm	500,800
Condutividade do paládio $\sigma$ , S/m	$9,3 \times 10^6$
Permissividade relativa do quartzo $\epsilon$	3,75

Fonte: O autor.

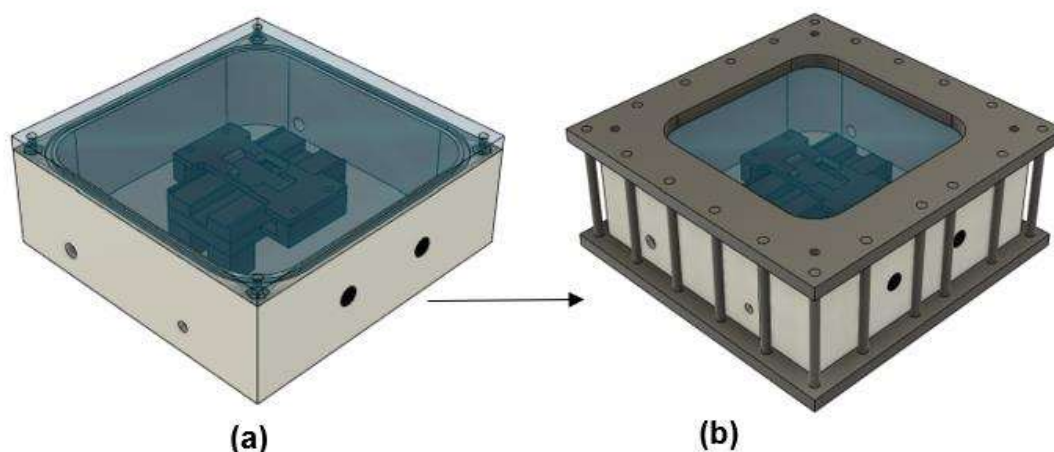
#### 4.1.2 Projeto do módulo de vedação e movimento

Para o confinamento dos gases a serem trabalhados, nitrogênio  $N_2$  e hidrogênio  $H_2$ , foi projetada uma câmara de vedação de gases, no *software Autodesk Fusion*, conforme Figura 4.4 e 4.5, as cotas com os respectivos valores estão definidas no Apêndice C.

Dentro da câmara de confinamento de gases foi projetada, também no *software Autodesk Fusion*, uma base fixa com uma parte móvel que é responsável pelo suporte e movimentação do ressoador em U sobre a microfita, a fim de, garantir a alteração do deslocamento  $K$ , conforme Figura 4.6, as cotas com os respectivos valores estão definidas no Apêndice D.

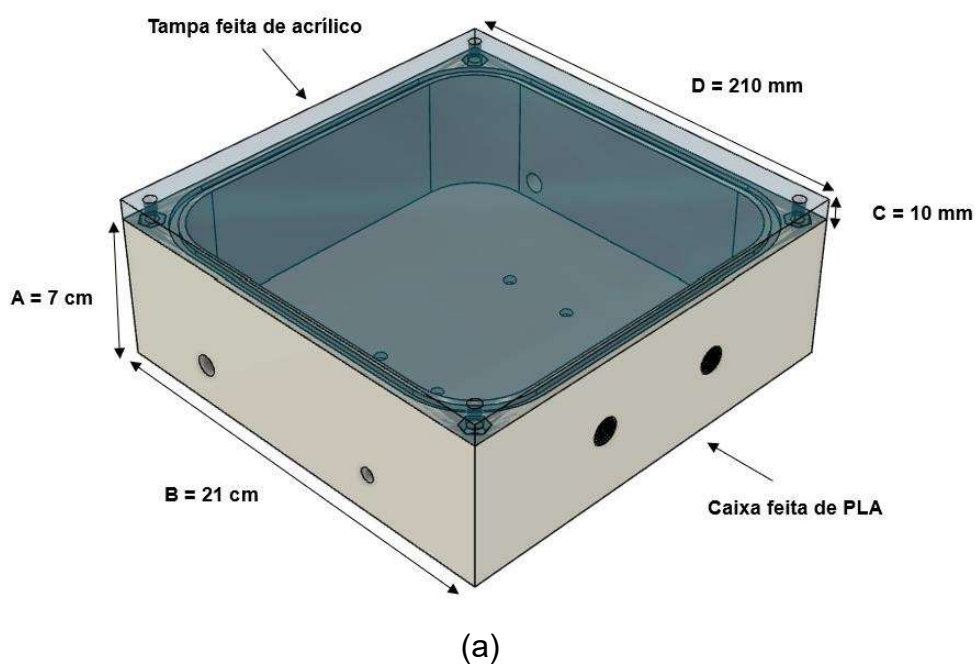
Para a movimentação do sensor, foi utilizado um motor de passo, cuja programação foi desenvolvida na plataforma Arduino, conforme detalhado no Apêndice E. Com a intenção de evitar vazamento de gases, garantindo assim uma maior segurança, foi colocado um suporte de ferro em cima e embaixo da câmara, ligados por vergalhões, tornando-o assim uma câmara hermética.

Figura 4.4 Módulo de vedação e movimento. (a) câmara de vedação de gás com a base de movimentação do sensor integrada em seu interior e com a tampa acrílica, (b) Câmara de vedação de gases equipada com um dispositivo de fixação em ferro sobre a tampa de acrílico.

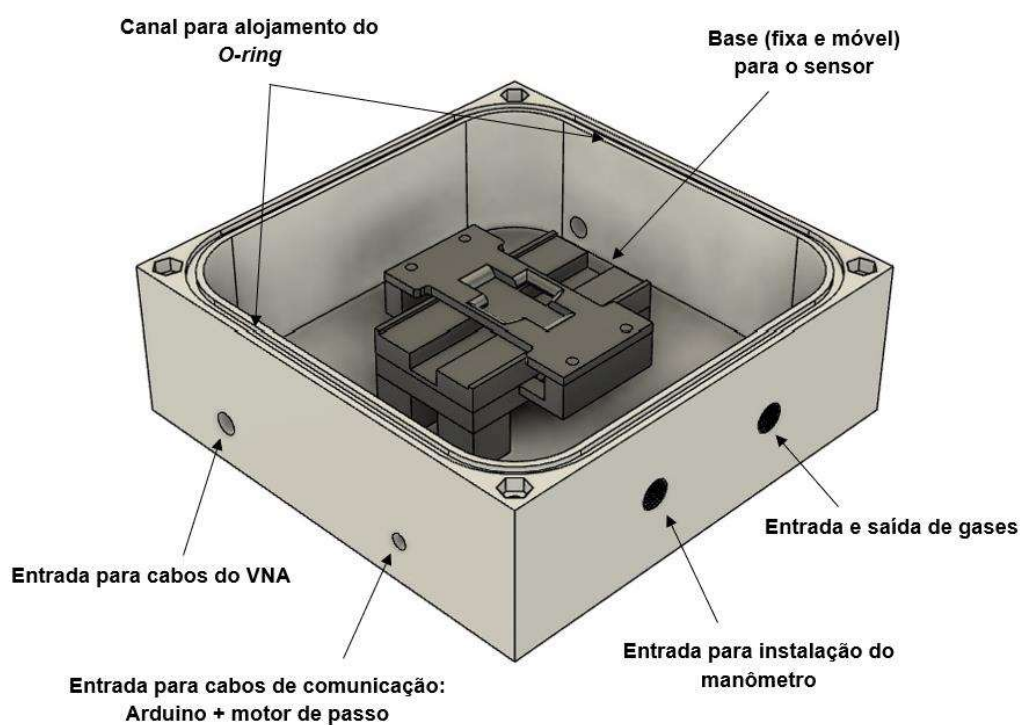


Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.5 Módulo de vedação e movimento. (a) câmara de vedação com tampa acrílica e com valores de medições atribuídos às dimensões dos lados da caixa e da tampa acrílica, (b) os furos presentes na caixa foram designados para a passagem e/ou conexão de componentes específicos, conforme as necessidades do projeto.



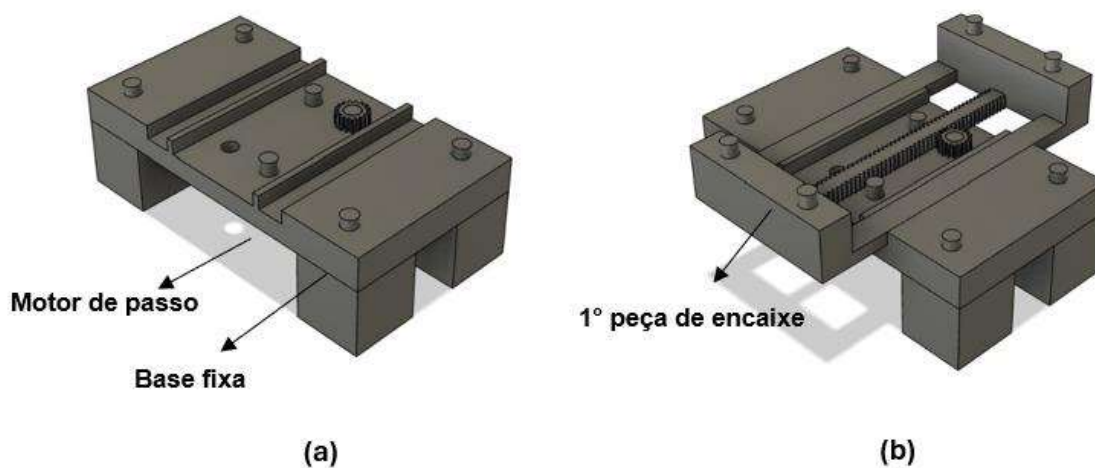


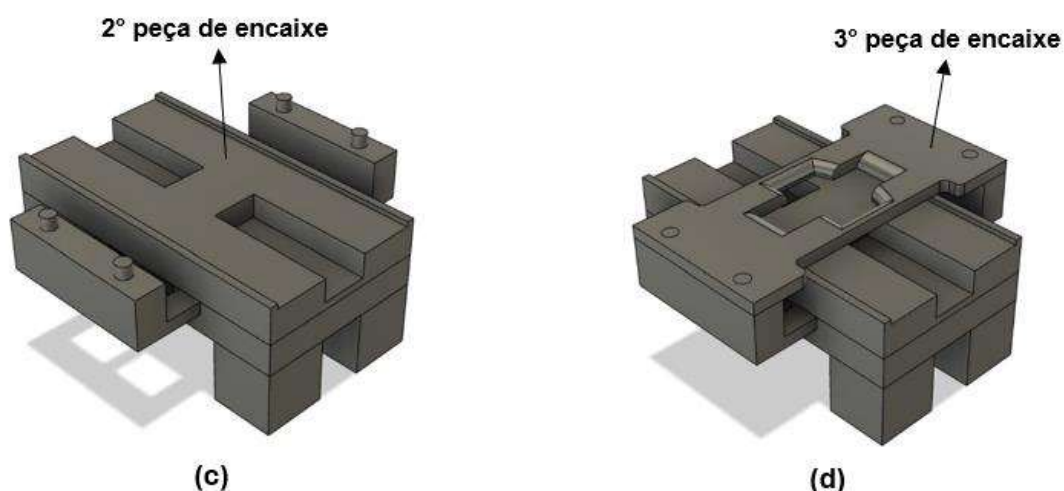


(b)

Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.6 Módulo de movimento para a microfita reconfigurável. (a) componente fixado à caixa, com encaixe do motor de passo sob a base estática, (b) primeira peça de encaixe que garantirá a movimentação do ressoador, (c) segunda peça de encaixe que garantirá a movimentação do ressoador, (d) terceira peça de encaixe que garantirá a movimentação do ressoador.





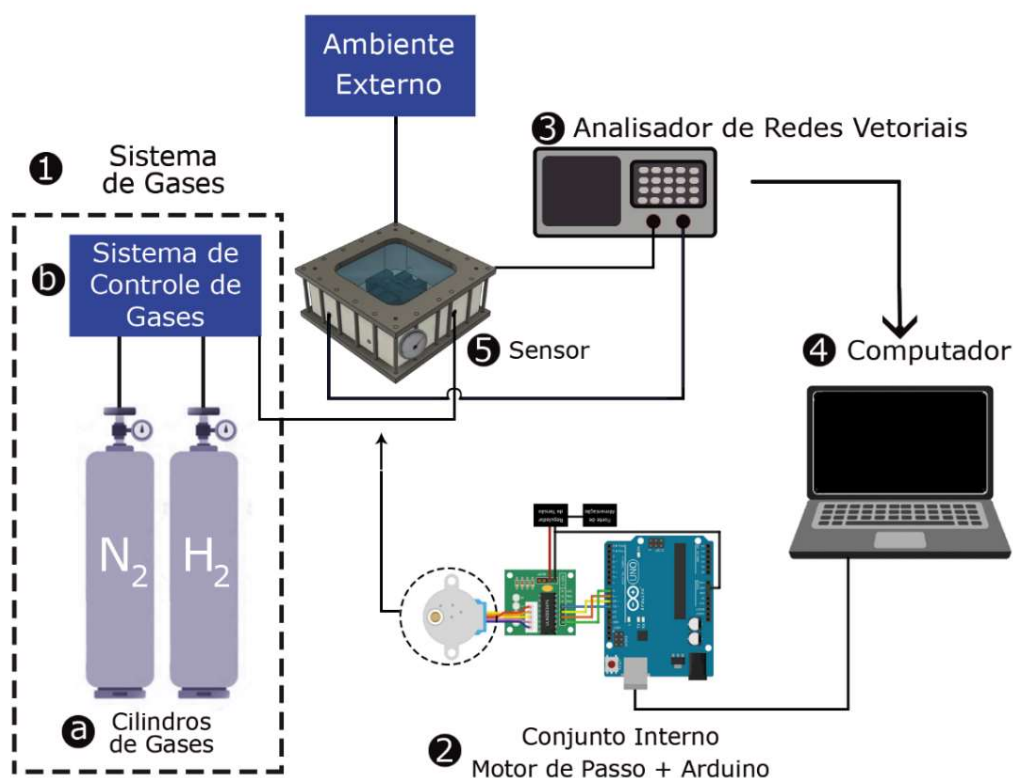
Fonte: Acervo do autor.

## 4.2 FABRICAÇÃO DO DISPOSITIVO PROPOSTO

O aparato experimental, conforme apresentado na Figura 4.7, tem como objetivo detectar o hidrogênio a uma mistura padrão 4% de  $H_2$  e 96% de  $N_2$ , a partir das variações de alguns parâmetros importantes, como variação da frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) e a perda por inserção do sinal de transmissão ( $S_{21}$ ). O dispositivo opera em uma faixa de frequência de 1 a 5 GHz.

O sistema é composto por diferentes módulos que atuam de forma integrada no processo de detecção. O sistema de gases (1) é responsável pelo controle dos fluxos de hidrogênio e nitrogênio. O conjunto motor de passo e o microcontrolador Arduino (2) permite o posicionamento e o acionamento precisos do sensor. O analisador de redes vetoriais (3) realiza a medição dos parâmetros de espalhamento, fornecendo dados essenciais para a caracterização do dispositivo. Os resultados são adquiridos e processados em um computador (4), que armazena e organiza as informações obtidas durante os experimentos. Por fim, o sensor associado à estrutura de vedação de gás (5) constitui o núcleo do sistema, garantindo que a mistura gasosa entre em contato apenas com a região ativa do dispositivo. O aparato, como um todo, opera em uma faixa de frequência de 1 a 5 GHz.

Figura 4.7 Sistema de detecção de hidrogênio. (1) Sistema de gases, (2) conjunto motor de passo + Arduino, (3) analisador de redes vetorial, (4) computador, (5) sensor/estrutura de vedação de gás.



Fonte: Acervo do autor.

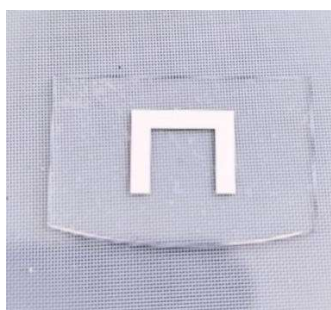
#### 4.2.1 Fabricação do sensor de hidrogênio

Como parte do dispositivo sensor, o ressoador em formato de U, conforme mostrado na Figura 4.8, foi fabricado sobre um substrato de quartzo, incorporando três camadas metálicas de titânio, ouro e paládio (*Ti/Au/Pd*). A camada de titânio, com 30 nm de espessura, atua como adesivo para garantir a deposição uniforme do ouro (*Au*) de 10 nm de espessura, que, por sua vez, previne a remoção do paládio cuja espessura varia entre 500 e 800 nm. Por fim, a camada de paládio (*Pd*) foi depositada utilizando a técnica de evaporação por feixe de elétrons (do inglês *e-beam evaporation*). Esta parte sensora do dispositivo foi fabricada por uma empresa na Coreia, a qual possui uma parceria com o CTTC (Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya), que, por sua vez, mantém uma colaboração com

a UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) e dispõe de todos os equipamentos necessários para fabricação dos sensores, que são o *e-beam evaporator* equipment, o *lithography equipment* e uma serra de corte de diamante para ter estruturas individuais.

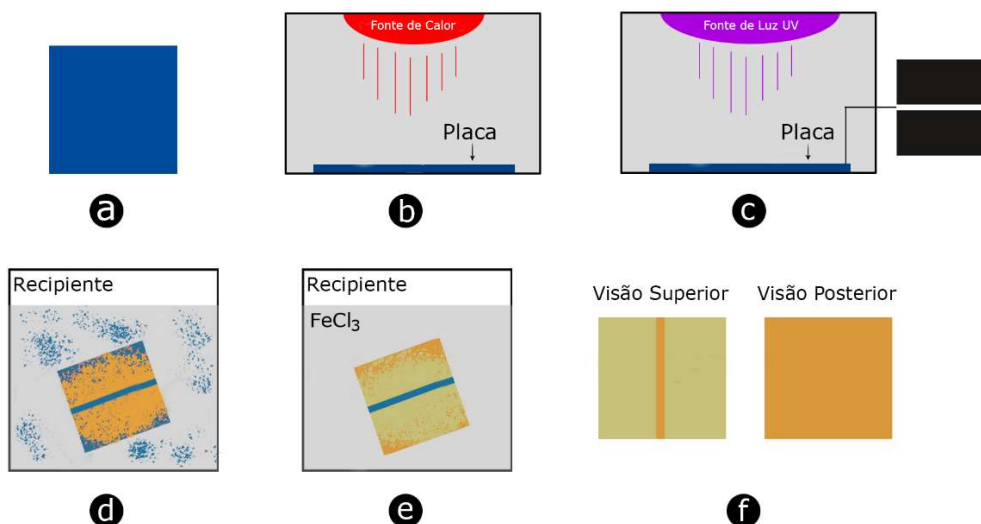
A linha de microfita em substrato de FR-4 foi fabricada no laboratório de Micro-ondas do Grupo de Fotônica do Departamento de Engenharia Elétrica na UFPE por meio da técnica de fotolitografia. O processo de fabricação, desde suas etapas iniciais até a obtenção do resultado final, pode ser observado nas Figura 4.9 e 4.10.

Figura 4.8 Fotografia do ressoador de microfita em substrato de quartzo, com deposição de paládio.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.9 Etapas de fabricação do dispositivo de microfita. (a) placa de FR-4 com a tinta fotossensível, (b) secagem da tinta na placa por uma fonte de calor, (c) exposição da tinta com a transparência pela lâmpada UV, (d) placa imersa na barrilha pra retirada da tinta não sensibilizada pelo UV, (e) imersão da placa no percloroeto de ferro para corrosão, (f) parte superior e inferior da linha de microfita.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.10 Linha de microfita em um substrato de FR-4.



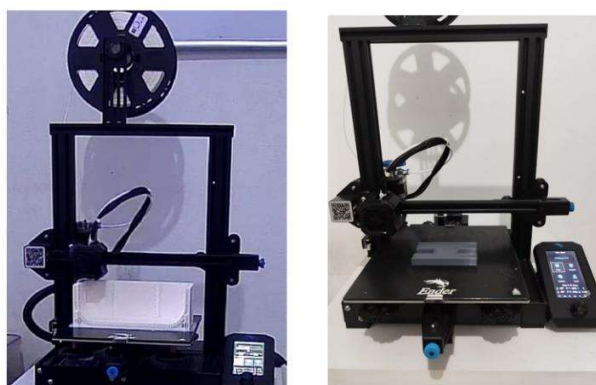
Fonte: Acervo do autor.

#### 4.2.2 Fabricação do módulo de vedação e movimento

Após o projeto, foram iniciadas as fabricações do módulo de vedação e movimento em PLA, em uma impressora 3D, a Ender 3 – V2 da Creality, conforme mostrado na Figura 4.11. Após a fabricação, a caixa foi imersa em uma solução de resina epóxi para a selagem total de suas paredes, para garantir que não haja escape de gás através de microfuros existentes. A base responsável pelo movimento do sensor também foi fabricada em PLA pela impressora 3D, conforme mostrado na Figura 4.12.

Após a fabricação, a montagem completa do módulo de vedação e movimento foi finalizada. Um manômetro foi instalado na caixa de vedação de gases, para monitorar e controlar a pressão em seu interior, conforme podemos observar na Figura 4.13.

Figura 4.11 Fabricação do modulo de vedação e movimento. (a) impressão da caixa de vedação de gases, (b) impressão de parte do componente responsável pelo movimento do sensor.

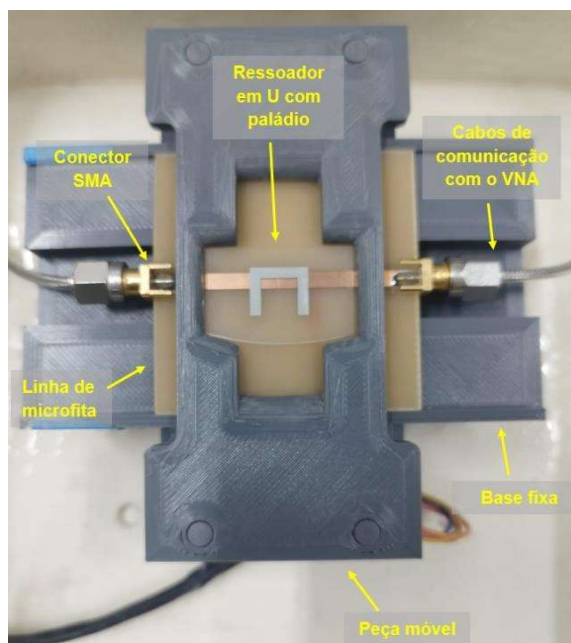


(a)

(b)

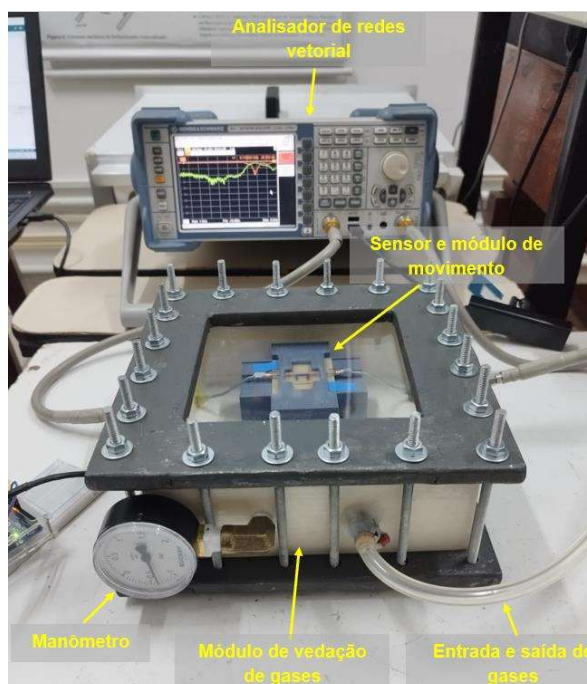
Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.12 Sensor/módulo de movimento.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.13 Módulo de vedação e movimento concluídos.



Fonte: Acervo do autor.

Com a conclusão da fabricação do aparato experimental, foram realizados testes para verificar a ausência de vazamento de gases. Após essa etapa, foram

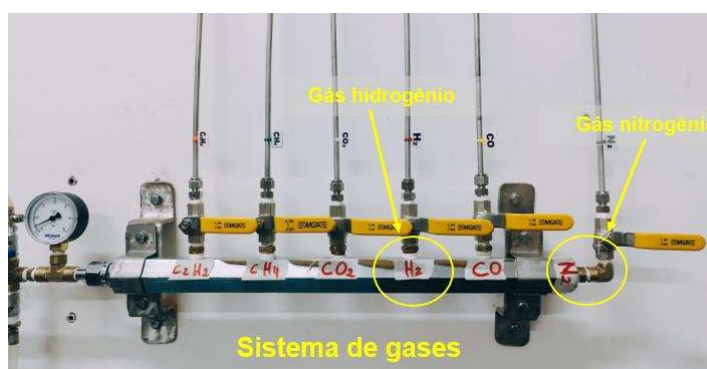


conduzidas as primeiras medições utilizando o Analisador de Redes Vetorial ZVL (9 kHz – 6,0 GHz) da ROHDE & SCHWARZ. Conforme ilustrado na Figura 4.14 é possível observar a configuração completa do sistema de detecção, composto pelo analisador de redes vetorial, sistema de gases, computador, Arduino e o conjunto sensor/módulo de vedação e movimento.

Figura 4.14 (a) Sistema de detecção do laboratório LSI1 do grupo de Fotônica da UFPE, (b) sistema de gases que se conecta à entrada e saída de gases.



(a)



(b)

Fonte: Acervo do autor.

### 4.3 SIMULAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Diversos *softwares* comerciais voltados para o projeto de circuitos de RF/micro-ondas utilizam ferramentas gráficas denominadas CAD (do inglês, *Computer-Aided Design*), que permitem o desenho da estrutura dos circuitos em 2D ou 3D, além de possibilitar a simulação eletromagnética (EM) de onda completa [58].

A simulação eletromagnética de onda completa resolve as Equações de Maxwell, considerando as condições de contorno aplicadas à estrutura de RF/micro-ondas a ser analisada. Para isso, diferentes métodos numéricos são empregados nos simuladores comerciais, como o Método dos Momentos (do inglês *Method of Moments* – MoM), o Método dos Elementos Finitos (do inglês *Finite-Element Method* – FEM), o Método da Diferença Finita no Domínio do Tempo (do inglês *Finite-Difference Time-Domain* – FDTD) e o Método da Equação Integral (do inglês *Integral Equation* – IE) [58].

Esses simuladores dividem a estrutura em pequenas células em 2D ou 3D e resolvem as Equações de Maxwell em cada uma delas. O resultado eletromagnético da estrutura completa é obtido pela superposição dos resultados calculados em cada célula individual. Essas subdivisões compõem a malha de simulação do *software*, e quanto mais refinada for essa malha (com células menores), mais precisos serão os resultados, porém, com maior demanda de tempo de simulação e maior utilização de recursos computacionais, como a memória [58].

O *software* utilizado para as simulações nesta tese é o *CST Microwave Studio*, do pacote *CST Studio Suite*, amplamente empregado no projeto de dispositivos de micro-ondas e estruturas de microfita. Este *software* oferece recursos como modelos pré-configurados, ferramentas para cálculo de impedância e comprimento de onda, além de uma biblioteca extensa com diversos substratos comerciais voltados para aplicações em micro-ondas, entre outras funcionalidades [58].

#### 4.3.1 Simulação no *CST Microwave Studio*

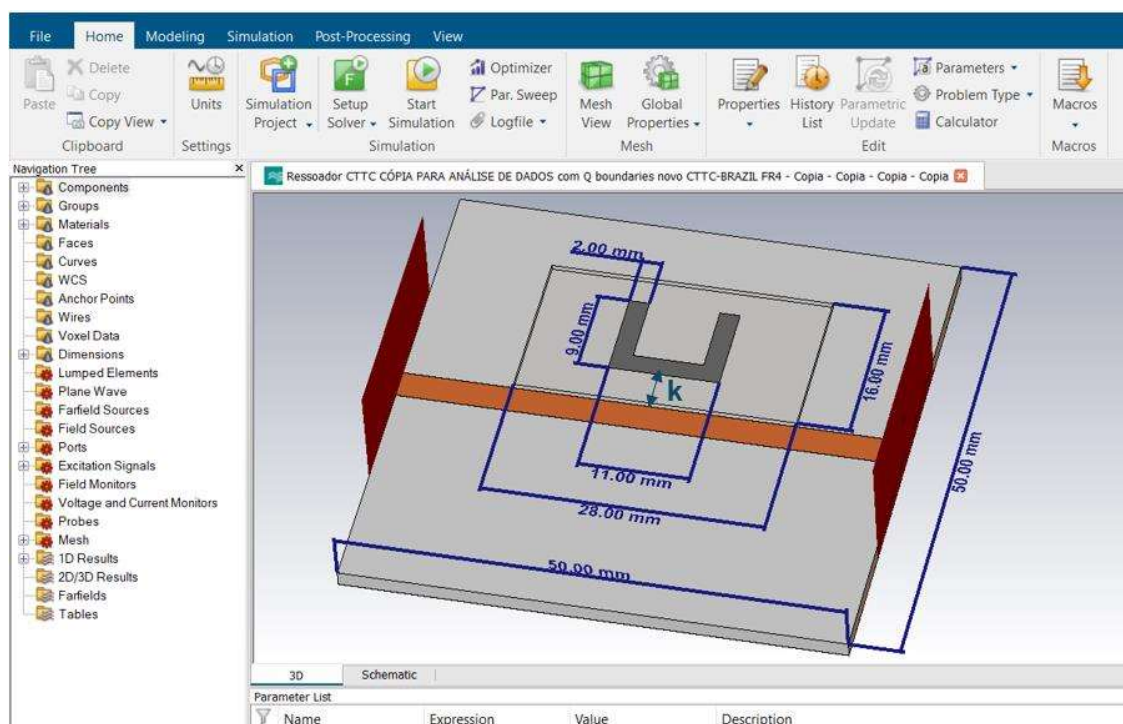
Conforme discutido no projeto do sensor em microfita reconfigurável na Seção 4.1, além da determinação dos melhores parâmetros do dispositivo por meio de simulações, conforme ilustra a Figura 4.15, o processo de otimização para sensores de hidrogênio envolve a análise do efeito do deslizamento do ressoador, em relação à faixa de cobre da microfita, representado pelo deslocamento  $K$ . Esse



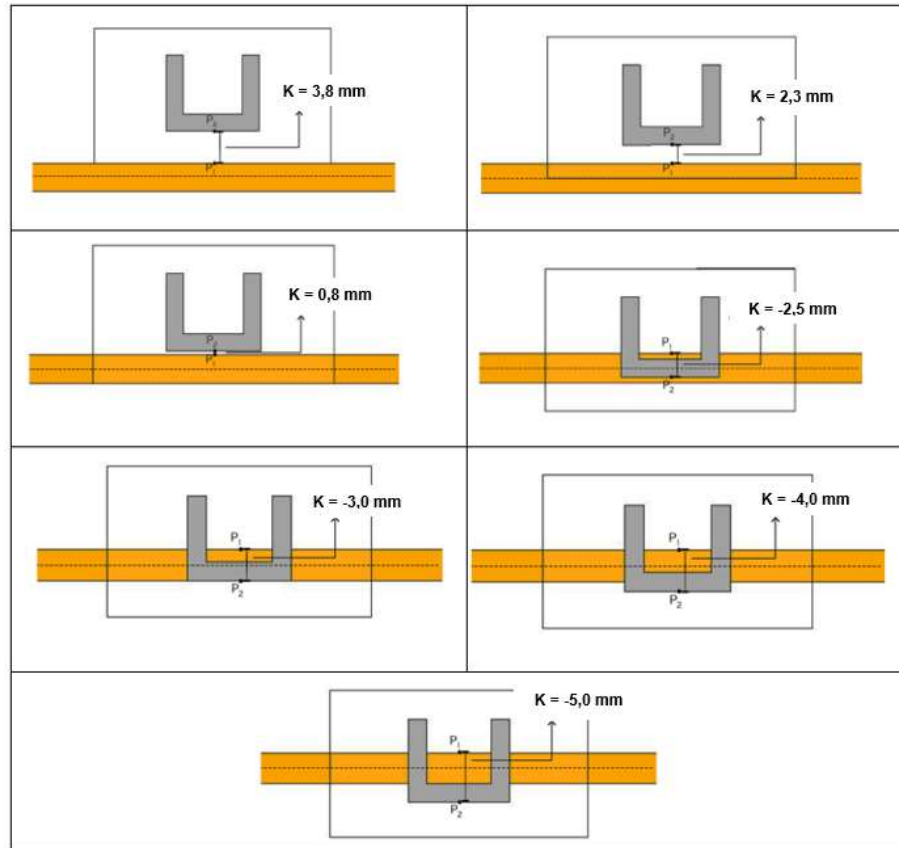
deslocamento é avaliado com base na posição do ponto 2 (P2) em relação ao ponto 1 (P1), conforme ilustrado na Figura 4.2. O valor de  $K$  variou de -5 a 5 mm, com passos de 0,1 mm, e as melhores respostas de simulação foram obtidas para os seguintes valores de  $K = 3,8$  mm; 2,3 mm; 0,8 mm; -2,5 mm; -3,0 mm; -4,0 mm e -5,0 mm.

Na Figura 4.16, são apresentadas as posições assumidas pelos diferentes valores de  $K$ , enquanto os resultados das simulações estão ilustrados na Figura 4.17. Para a simulação do paládio sensibilizado pelo hidrogênio, foi considerada uma variação de condutividade ( $\sigma$ ) de 13,5% quando o  $Pd$  é exposto a 3% de  $H_2$ , conforme os experimentos de Tabib-Azar e B. Sutapun [43]. Com essa variação de condutividade definida, foi possível analisar a resposta do sinal em dB, ao longo da faixa de frequência de 1 a 5 GHz, avaliando parâmetros essenciais, como a variação da frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) e a perda por inserção do sinal de transmissão ( $S_{21}$ ). A detecção do hidrogênio foi investigada por meio de simulações, cujos resultados foram comparados com as medições experimentais realizadas em laboratório. Os detalhes dessas análises serão discutidos no Capítulo 5.

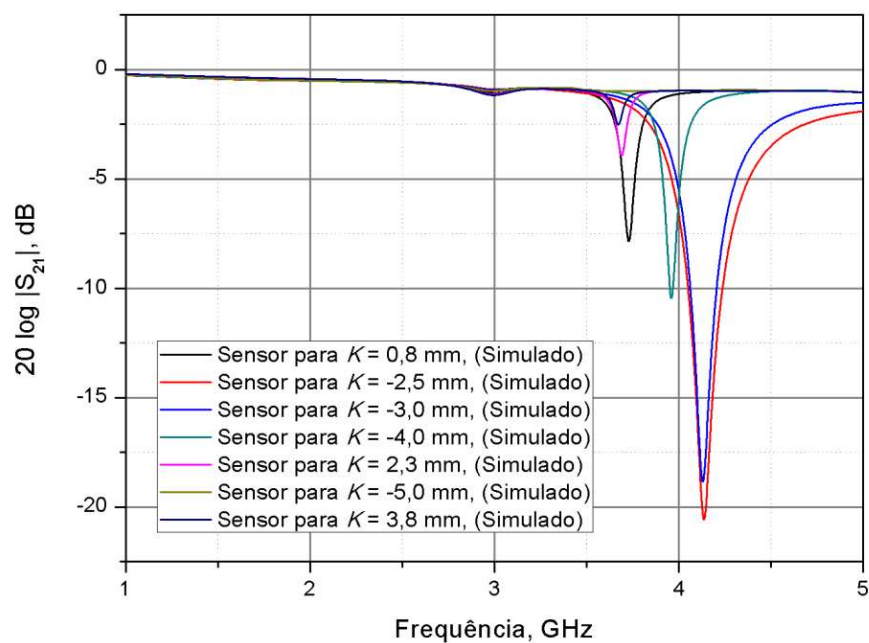
Figura 4.15 Otimização do dispositivo sensor no CST Microwave Studio.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.16 Posições assumidas para  $K$ .

Fonte: Acervo do autor.

Figura 4.17 Transmitância do dispositivo para diversos valores de  $K$  (Simulação no CST).

Fonte: O autor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a análise dos dados experimentais do sensor, incluindo a comparação com os resultados obtidos por simulação. Na Seção 5.1, são analisados os dados provenientes da simulação. Na Seção 5.2, são examinados os dados obtidos experimentalmente em laboratório.

### 5.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DO SENSOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL

Na Subseção 4.3.1 são apresentadas as simulações realizadas para o dispositivo sensor em microfita reconfigurável. A Figura 4.16 mostra as posições analisadas, destacando aquelas que apresentaram maior eficiência na detecção de hidrogênio:  $K = 3,8 \text{ mm}$ ;  $2,3 \text{ mm}$ ;  $0,8 \text{ mm}$ ;  $-2,5 \text{ mm}$ ;  $-3,0 \text{ mm}$ ;  $-4,0 \text{ mm}$  e  $-5,0 \text{ mm}$ .

Foi adotado um modelo que incorpora a variação da condutividade do paládio, conforme estudos previamente estabelecidos na literatura em [43]. Na análise, foram considerados a variação da frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) e a perda por inserção do sinal de transmissão ( $\Delta S$ ).

Com base nos parâmetros que se deseja analisar,  $\Delta f$  e  $\Delta S$ , uma comparação do espectro, medido antes e após a exposição do dispositivo ao hidrogênio, foi realizada por meio do cálculo de [12]:

$$\Delta S \equiv 10 \log (T_h) - 10 \log (T_0) = 10 \log \left( \frac{T_h}{T_0} \right), \quad (5.1)$$

em que  $T_h$  e  $T_0$  representam o quadrado do módulo do parâmetro  $S_{21}$  (coeficiente de transmissão do sinal da porta 1 para a porta 2) [12],

$$T \equiv |S_{21}|^2, \quad (5.2)$$

para o paládio hidrogenado, que foi sensibilizado pelo hidrogênio,  $T_h$  e para o paládio puro, que não foi sensibilizado pelo hidrogênio,  $T_0$ .

Outro parâmetro analisado, a fim de testar a sensibilidade do paládio ao hidrogênio, é o deslocamento da frequência do dispositivo para cada valor de  $K$ . Esse deslocamento de frequência de ressonância é definido por [47]:

$$\Delta f \equiv |f_h - f_0|, \quad (5.3)$$

em que  $f_h$  e  $f_0$ , representam a ressonância do dispositivo exposto e não exposto ao hidrogênio, respectivamente. Utilizando as Equações (5.1) e (5.3), os resultados da simulação dos dispositivos foram comparados. Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os valores da variação da frequência de ressonância e da perda por inserção, para todas as posições analisadas após a exposição ao hidrogênio, referente às espessuras do paládio  $t_{Pd} = 500$  nm e  $t_{Pd} = 800$  nm. Esses valores foram selecionados considerando que a espessura da camada de  $Pd$  fabricada, pode variar entre 500 e 800 nm.

Tabela 5.1 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para  $t_{Pd} = 500$  nm.

$K$ , mm	$\Delta S$ , dB	$\Delta f$ , MHz
3,8	0,0127	0
2,3	0,0203	0
0,8	0,0579	0,8
-2,5	0,0977	1,6
-3,0	0,0873	0,8
-4,0	0,0382	1,6
-5,0	-0,0074	0

Fonte: O autor.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.1, a variação da frequência de ressonância para o dispositivo com  $K = -2,5$  mm e  $t_{Pd} = 500$  nm é de 1,6 MHz, sendo essa, a condição que apresentou os melhores resultados de simulação, quando analisada em conjunto com a variação da perda por inserção ( $\Delta S$ ). Na Figura 5.1 é possível visualizar os dois espectros para  $K = -2,5$  mm, correspondentes ao paládio exposto ao hidrogênio ( $\sigma = 8,04 \times 10^6$  S/m) e o paládio

não exposto ao hidrogênio ( $\sigma = 9,3 \times 10^6 \text{ S/m}$ ), em que  $\sigma$  representa a condutividade do paládio [43].

Figura 5.1 Ressonâncias para  $K = -2,5 \text{ mm}$ .

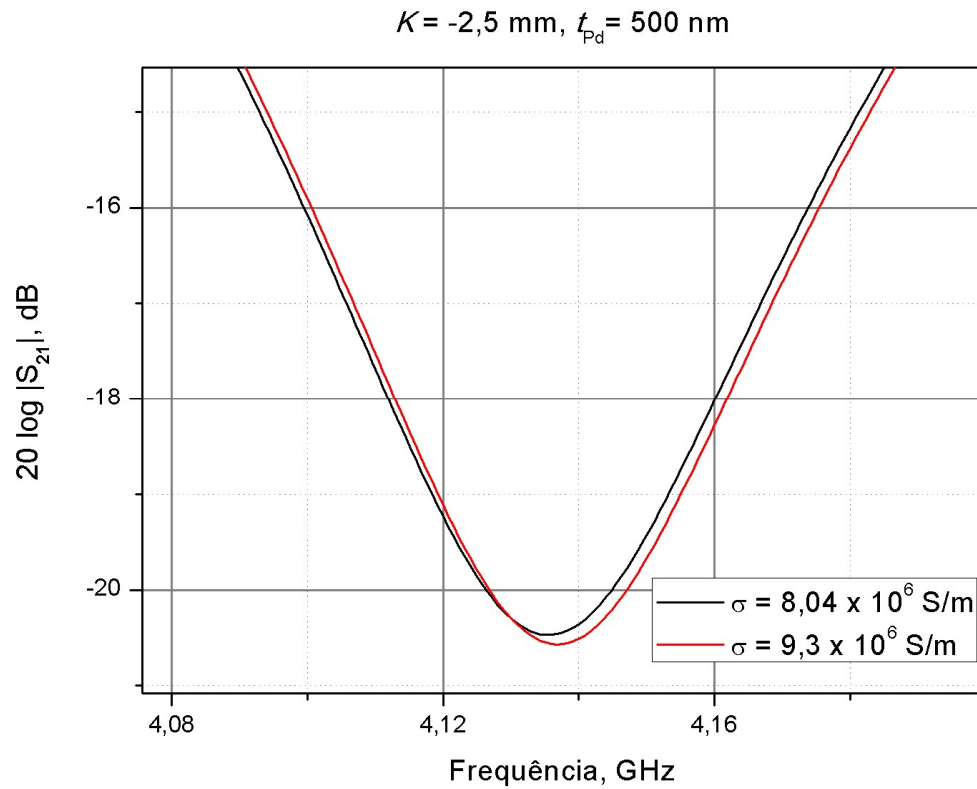


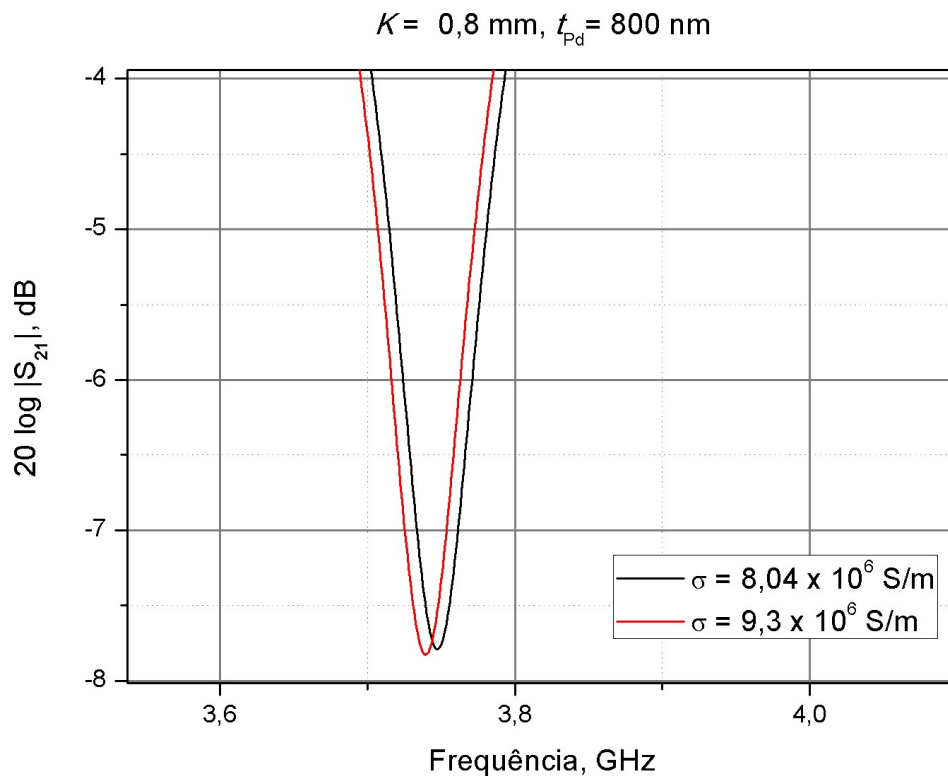
Tabela 5.2 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para  $t_{\text{Pd}} = 800 \text{ nm}$ .

$K, \text{ mm}$	$\Delta S, \text{ dB}$	$\Delta f, \text{ MHz}$
3,8	0,0114	0,8
2,3	0,0111	0
0,8	0,0349	8,0
-2,5	0,07	0
-3,0	0,0969	0,8
-4,0	0,0558	0,8
-5,0	0,0332	0

Fonte: O autor.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 5.2, a variação da frequência de ressonância para o dispositivo com  $K = 0,8 \text{ mm}$  e  $t_{Pd} = 800 \text{ nm}$  é de  $8,0 \text{ MHz}$ , sendo essa, a condição que apresentou os melhores resultados de simulação, quando analisada em conjunto com a variação da perda por inserção ( $\Delta S$ ). Na Figura 5.2 é possível visualizar os dois espectros para  $K = 0,8 \text{ mm}$ , correspondentes ao paládio exposto ao hidrogênio ( $\sigma = 8,04 \times 10^6 \text{ S/m}$ ) e ao paládio não exposto ao hidrogênio ( $\sigma = 9,3 \times 10^6 \text{ S/m}$ ), em que  $\sigma$  representa a condutividade do paládio [43].

Figura 5.2 Ressonâncias para  $K = 0,8 \text{ mm}$ .



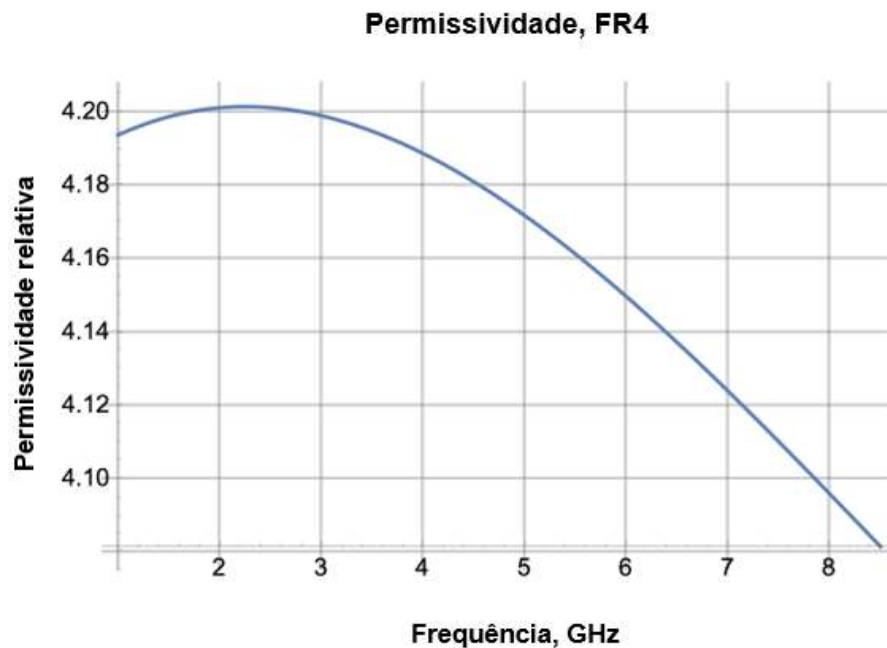
Fonte: O autor.

Outro parâmetro relevante analisado foi a permissividade relativa do FR-4. Esse substrato foi selecionado devido ao seu baixo custo e à sua ampla disponibilidade no mercado. Análises adicionais sobre esse material podem ser encontradas em [59], nesse artigo, Holzman e colaboradores medem uma PCB, da fabricante NELCO (Melville, NY). Por meio da Equação (5.4) fornecida em [59], foi gerado no MATLAB [60] um gráfico que permitiu conduzir o estudo da permissividade desse substrato, em função da frequência:

$$\varepsilon_r = 0,0002462xf^3 - 0,006278xf^2 + 0,02455xf + 4,1742. \quad (5.4)$$

Como observado na Figura 5.3, a permissividade do FR-4 vai diminuindo com o aumento da frequência.

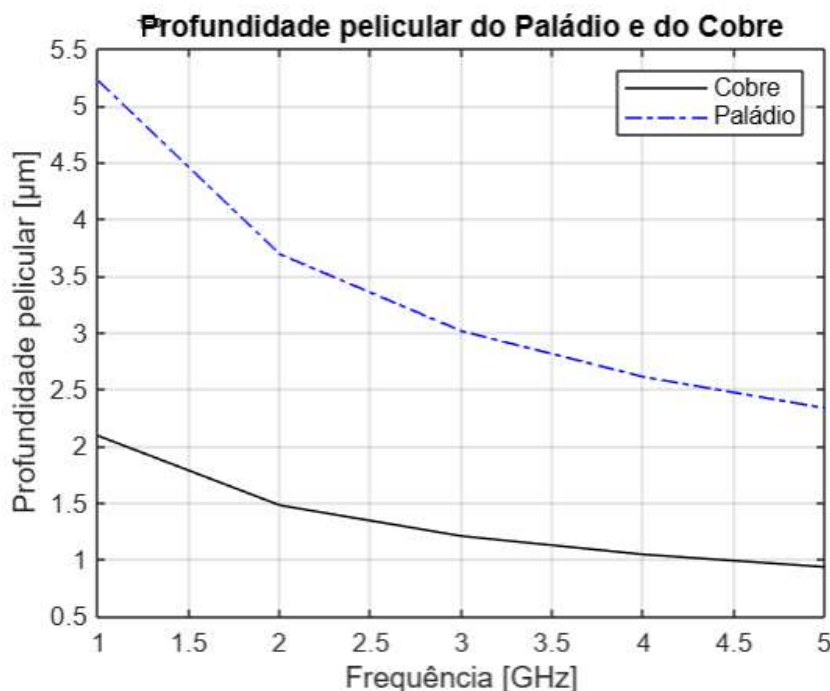
Figura 5.3 Relação permissividade x frequência.



Fonte: O autor.

Outro parâmetro importante a ser destacado é a profundidade do efeito pelicular (do inglês *skin depth*) dos metais existentes no dispositivo, como cobre (*Cu*) e paládio (*Pd*), conforme ilustrado na Figura 5.4. As espessuras desses metais foram definidas com base na profundidade pelicular de cada um. Para se obter uma atenuação na camada de paládio, é necessário que a espessura seja menor ou igual ao menor valor da profundidade pelicular do material [48], [61]. Os cálculos podem ser obtidos por meio da Equação (3.) ou utilizando o algoritmo disponível no Apêndice F, desenvolvido em MATLAB.

Figura 5.4 Variação da profundidade pelicular nos metais.



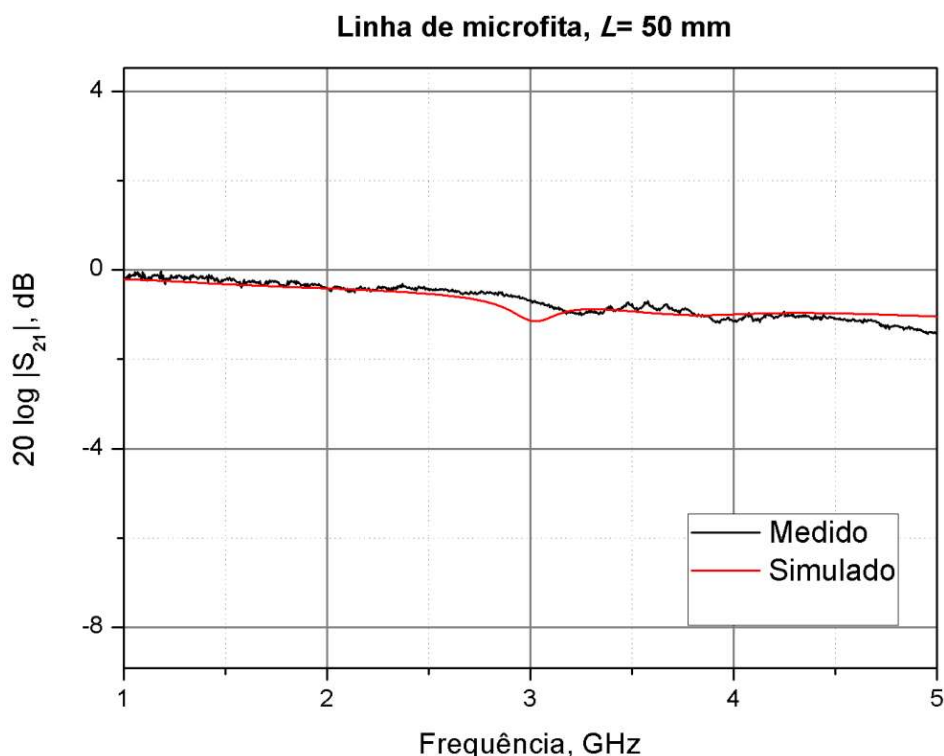
Fonte: O autor.

## 5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DO SENSOR DE MICROFITA RECONFIGURÁVEL

Foram realizadas medições na linha de microfita de cobre do FR-4, para verificar o casamento de impedância da estrutura com o analisador de redes vetorial, comparando os resultados de simulação por *software* com os valores obtidos por medição em laboratório. Na Figura 5.5, observa-se que os resultados medidos e simulados estão em boa concordância, por todo o espectro analisado. Além disso verifica-se que, para frequências acima de 2 GHz, o dispositivo apresenta mais perdas, o que pode ser atribuído pela diminuição da permissividade do substrato FR-4 com o aumento da frequência, conforme evidenciado na Figura 5.3. Outro fator importante é que quanto maior a tangente de perdas ( $\tan \delta$ ), maior a atenuação do sinal, reduzindo a eficiência da transmissão e limitando o desempenho da microfita, especialmente em frequências mais altas.



Figura 5.5 Perda por inserção variando com a frequência.



Fonte: O autor.

Antes do início das medições, foram realizados diversos testes para verificar se os gases estavam efetivamente sendo retidos pelo módulo de vedação e para avaliar a eficiência do sistema. Esses testes foram essenciais para assegurar a hermeticidade do sistema. Para garantir que não tivesse a presença do oxigênio no sistema, foi colocada uma pressão positiva de 1,2 atm. Dentro do tempo das medições o vazamento foi desprezível, mantendo-se assim, a pressão constante dentro da caixa. Após a confirmação dessa condição, foi seguido um determinado protocolo para medição do dispositivo para cada posição  $K$ .

Inicialmente, o experimento foi conduzido em três ciclos, sob uma pressão constante de 1,2 atm e temperatura de 25°C. O dispositivo sensor foi submetido à exposição aos gases  $N_2$  e  $H_2$  seguindo dois protocolos específicos de medição: um protocolo completo de 3 minutos e outro de 5 minutos. Inicialmente, foram realizadas análises preliminares com duração de 3 minutos, com o objetivo de avaliar a capacidade do sensor em detectar hidrogênio em um intervalo de tempo reduzido, considerando que a eficiência de um sensor está diretamente relacionada à sua capacidade de operação em menor tempo possível. Na ocorrência de detecção de hidrogênio, realizava-se uma medição adicional a fim de avaliar a estabilidade da

resposta do sensor ou eventuais melhorias em sua capacidade de detecção. Caso não houvesse alteração na resposta durante a análise de 3 minutos, uma nova medição seria conduzida com um tempo de exposição prolongado, a fim de avaliar se o sensor seria capaz de identificar o gás em um período maior. A Figura 5.6 mostra o fluxograma do processo de medição.

### **1° CICLO**

- A câmara de vedação de gases é submetida ao vácuo por 5 minutos;
- O sensor é exposto ao nitrogênio ( $N_2$ ) por 3 e 5 minutos (medição a cada 1 min);
- O sensor é exposto ao hidrogênio ( $H_2$ ) por 3 e 5 minutos (medição a cada 1 min).

### **2° CICLO**

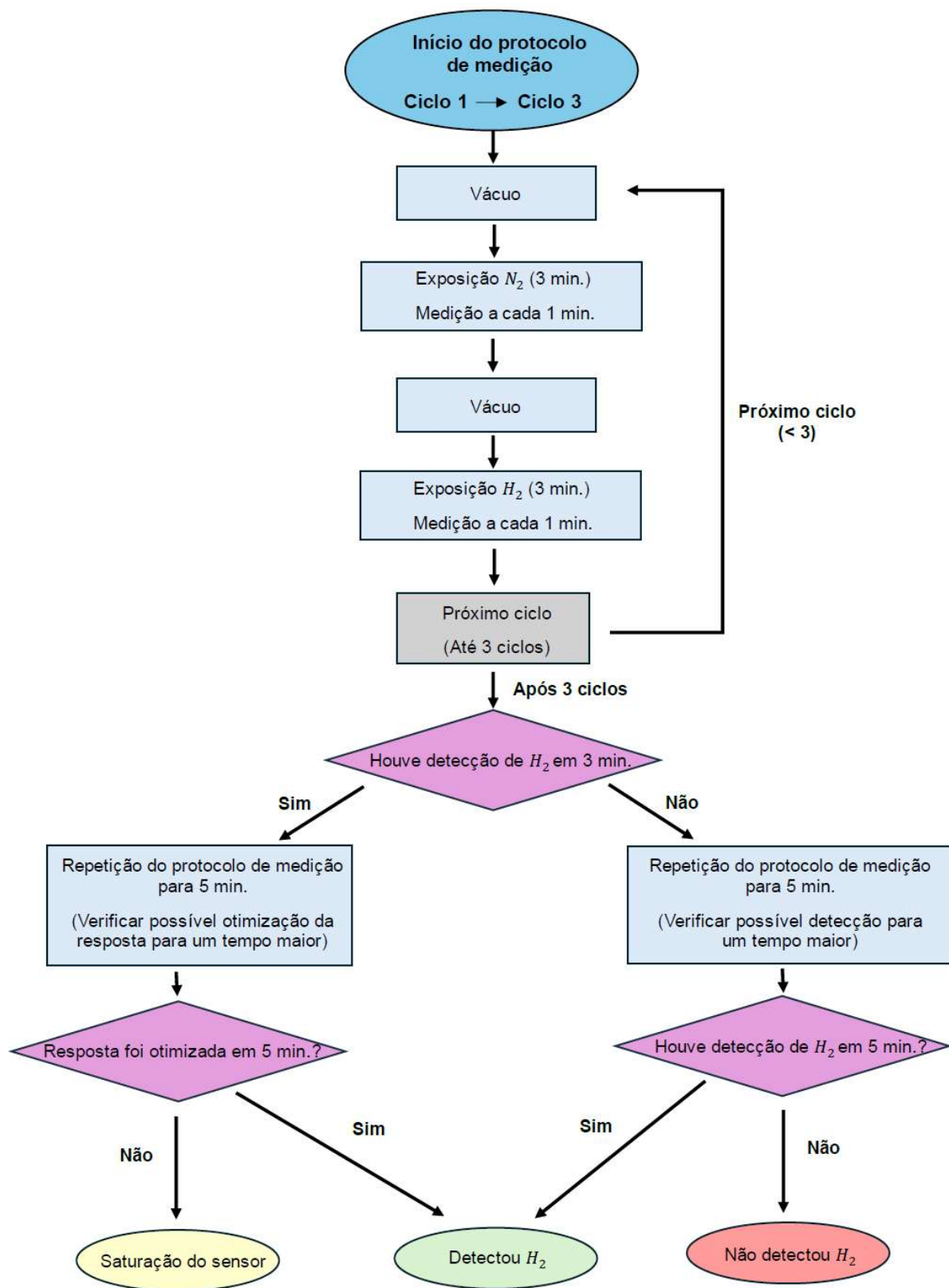
- A câmara de vedação de gases é submetida ao vácuo por 5 minutos;
- O sensor é exposto ao nitrogênio ( $N_2$ ) por 3 e 5 minutos (medição a cada 1 min);
- O sensor é exposto ao hidrogênio ( $H_2$ ) por 3 e 5 minutos (medição a cada 1 min).

### **3° CICLO**

- A câmara de vedação de gases é submetida ao vácuo por 5 minutos;
- O sensor é exposto ao nitrogênio ( $N_2$ ) por 3 e 5 minutos (medição a cada 1 min);
- O sensor é exposto ao hidrogênio ( $H_2$ ) por 3 e 5 minutos (medição a cada 1 min).

Após cada exposição aos gases (hidrogênio ou nitrogênio), o dispositivo sensor, que opera em uma faixa de frequência de 1 a 5 GHz, é submetido a uma medição no Analisador de Redes Vetorial (VNA), com o objetivo de identificar variações em parâmetros fundamentais, como a variação da frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) e a perda por inserção do sinal de transmissão ( $S_{21}$ ).

Figura 5.6 Fluxograma de medição.

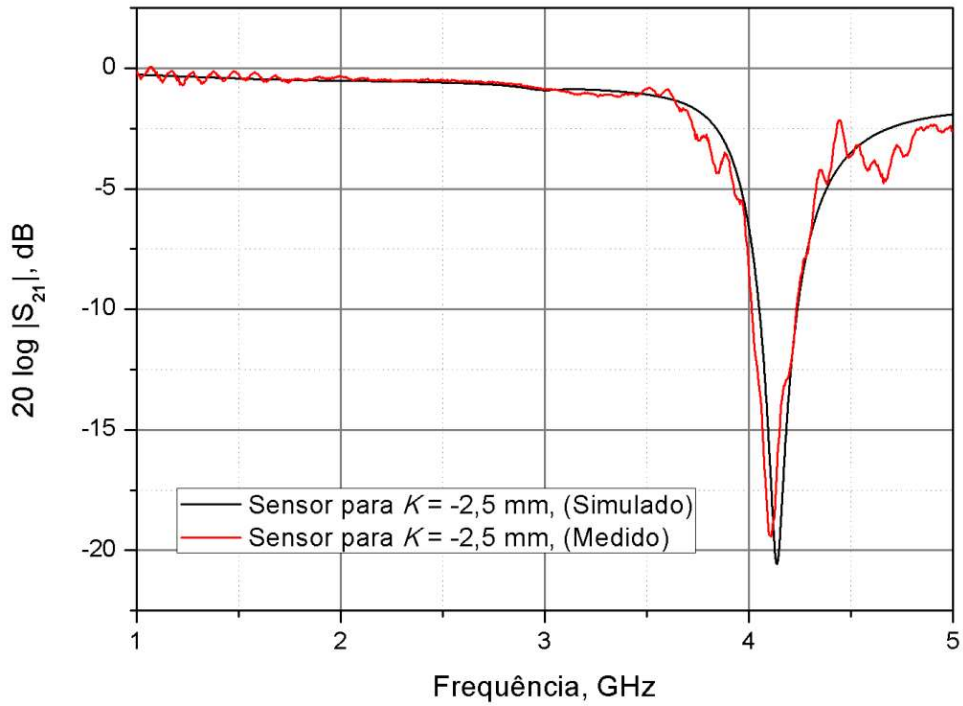


Fonte: Acervo do autor.

### 5.2.1 Resultados experimentais de medição para $K = -2,5$ mm

A primeira posição de  $K$  a ser medida foi a de  $-2,5$  mm, a Figura 5.7 apresenta a comparação entre a perda por inserção  $S_{21}$  medida em laboratório e os resultados obtidos por simulação de *software*.

Figura 5.7 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado.



Fonte: O autor.

Para determinar se o espectro medido de  $\Delta S$  era decorrente de algum efeito externo não relacionado à absorção de hidrogênio, como um ruído causado por blindagem inadequada ou interferências oriundas da soldagem dos conectores que fazem a ligação entre o sensor e o analisador de redes vetorial, foram analisadas as incertezas associadas às medições, isto é, o erro experimental.

Nesse intuito, foram realizadas cinco medições consecutivas no dispositivo com a célula exposta ao nitrogênio a 1,2 atm e 25 °C. Cada medição foi feita com um intervalo de tempo de 5 minutos em relação à anterior, preservando as mesmas condições de operação em todo o processo.

A partir dessa sequência de cinco medições, calculou-se o parâmetro  $\Delta S_{21} \equiv \Delta S'_{21}$ , representando a diferença entre quaisquer dois espectros  $S_{21}$  do dispositivo.

Essa combinação resulta em 10 espectros distintos para  $\Delta S'$ , os quais permitem avaliar a resposta do sistema sem influências externas. Esses espectros foram obtidos por meio da relação:

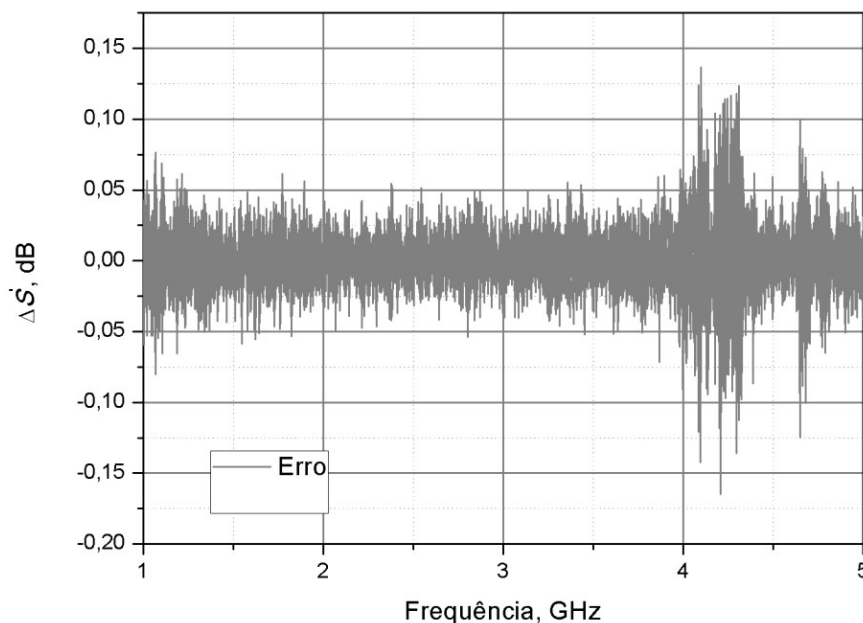
$$\Delta S' \equiv 10 \log \frac{T_i}{T_j}, \quad (5.5)$$

em que  $i, j = 1, 2, 3, 4$  e  $5$ , sendo  $i \neq j$ . Os índices  $i$  e  $j$  correspondem à ordem em que as medições foram realizadas, permitindo a comparação entre diferentes instantes da sequência. Dessa forma,  $\Delta S'$  expressa a diferença relativa entre dois espectros obtidos sob as mesmas condições experimentais, sendo útil para avaliar a estabilidade do sistema e verificar a presença de eventuais flutuações não relacionadas ao processo de detecção. As dez combinações possíveis são:

$$\Delta S'_{21}, \Delta S'_{31}, \Delta S'_{41}, \Delta S'_{51}, \Delta S'_{32}, \Delta S'_{42}, \Delta S'_{52}, \Delta S'_{43}, \Delta S'_{53}, \Delta S'_{54}, \quad (5.6)$$

A análise dos resultados, apresentada na Figura 5.8, demonstra que a variação máxima entre os espectros permaneceu entre  $-0,2$  dB e  $0,15$  dB, indicando baixo nível de erro nas medições.

Figura 5.8 Análise do erro para a posição de  $K = -2,5$  mm.



Fonte: O autor.

Após as medições consecutivas com nitrogênio, para análise de erro, terem sido realizadas, para garantir que não houvesse interferência do gás na medição com hidrogênio a 4%, o sistema foi submetido ao vácuo por 5 minutos a  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , removendo completamente o nitrogênio. Como resultado, o recipiente ficou livre de qualquer contaminante gasoso, criando um ambiente controlado para a introdução do hidrogênio. Antes de seguir o protocolo pré-determinado de 5 minutos, foram realizadas medições preliminares de 3 minutos para a análise da detecção de hidrogênio, conduzidas de forma consecutiva com um intervalo de 1 minuto entre cada medição. Essa análise foi realizada com o objetivo de verificar se o sensor era capaz de detectar o hidrogênio em um intervalo de tempo menor, considerando que a função de um sensor é operar com máxima eficiência no menor tempo possível.

Primeiramente foi observada uma variação em MHz para o dispositivo a cada ciclo, conforme pode ser visto na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min.

Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	4	0,108
2	4	0,053
3	8	0,049

Fonte: O autor.

A partir dessa observação preliminar, foi notada uma variação na frequência de ressonância para o dispositivo sensor. A partir desse fato, o sensor foi medido novamente e iniciou-se o protocolo de 5 min para o dispositivo na posição  $K = -2,5$  mm, e verificou-se uma variação ao final de cada ciclo de 5 min, conforme pode ser visto na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 Resultados de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 5 min.

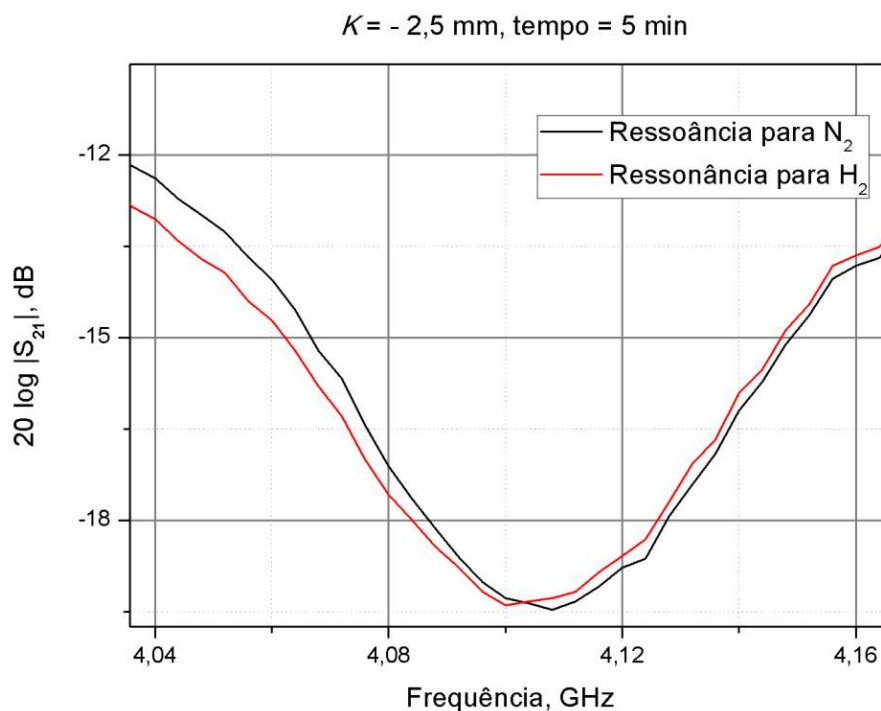
Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	8	0,074
2	8	0,008
3	4	0,000

Fonte: O autor.

Comparando as duas medições para  $K = -2,5$  mm e analisando os resultados obtidos, observou-se que o sensor, ao ser inicialmente exposto ao hidrogênio por um período preliminar de 3 minutos, foi capaz de detectar a presença do gás. Com base nesse resultado, foi realizada uma análise adicional com um tempo de exposição prolongado de 5 minutos, seguindo o protocolo pré-definido, a fim de verificar se um maior tempo de contato resultaria em uma variação mais significativa. No entanto, observou-se uma redução na variação da frequência de ressonância, sugerindo a possibilidade de saturação do sensor.

Na Figura 5.9, observa-se a resposta da perda por inserção e da frequência da mínima transmitância do dispositivo medido em laboratório, após a exposição pelos gases nitrogênio e hidrogênio para o 1º ciclo e tempo = 5 min. Na Figura 5.10 pode-se observar o gráfico com o espectro de frequência analisado, a dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ) em relação à frequência. Nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, pode-se observar com mais detalhes, a variação do sinal  $\Delta S$  por todo o espectro após exposição do dispositivo ao gás hidrogênio, ao final de cada ciclo com tempo = 5 min.

Figura 5.9 Perda por inserção do dispositivo para  $K = -2,5$  mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1º ciclo e tempo = 5 min.



Fonte: O autor.

Figura 5.10 Dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro)  $\Delta S'$  em relação à frequência.

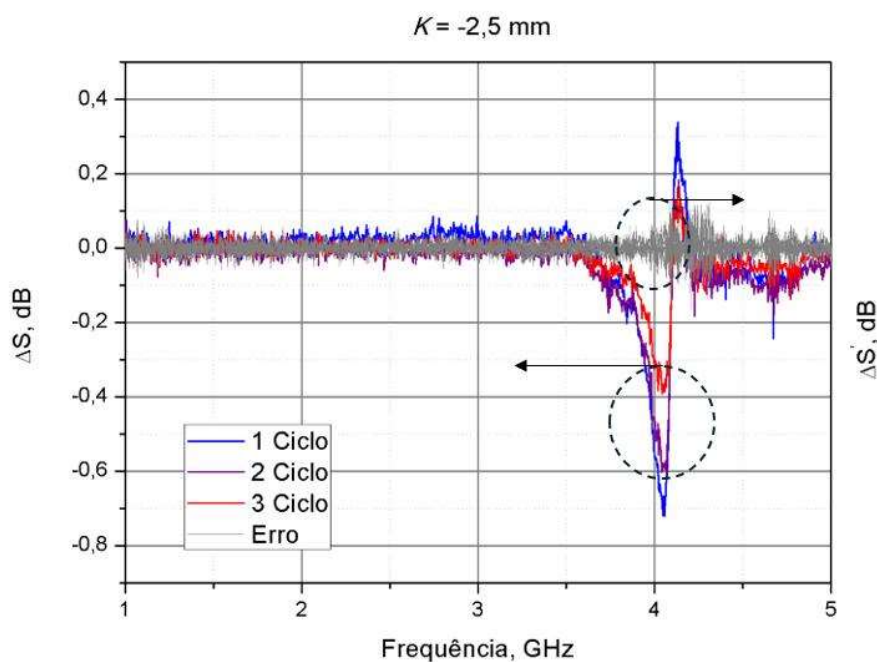


Figura 5.11 Variação da perda por inserção por todo espectro para o 1º ciclo.

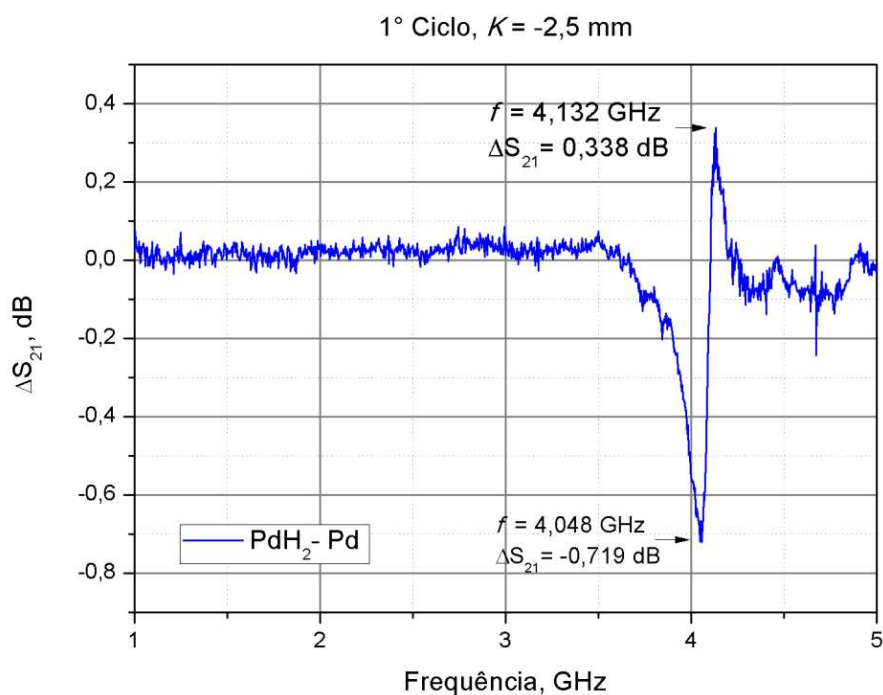
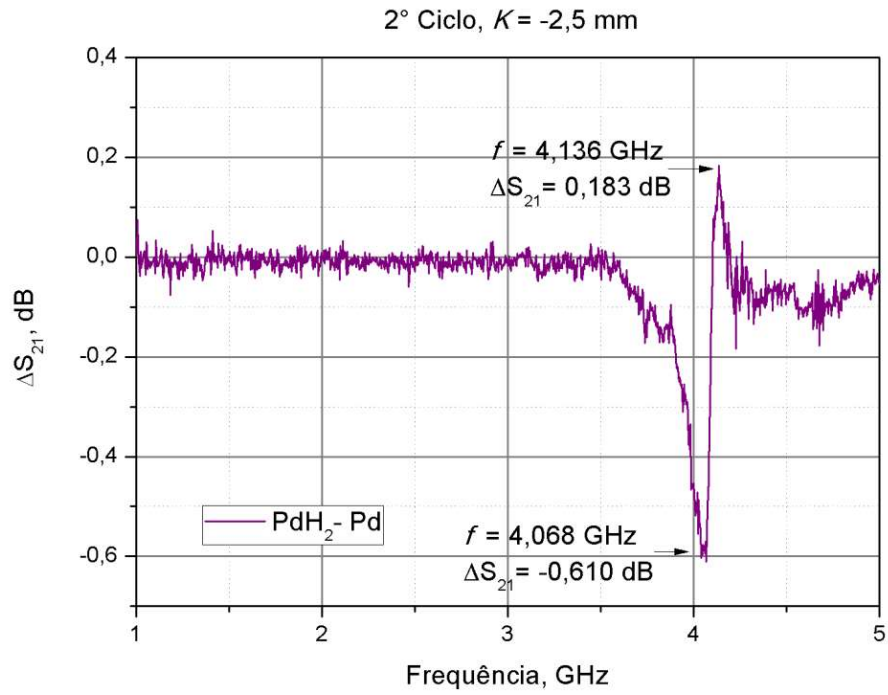


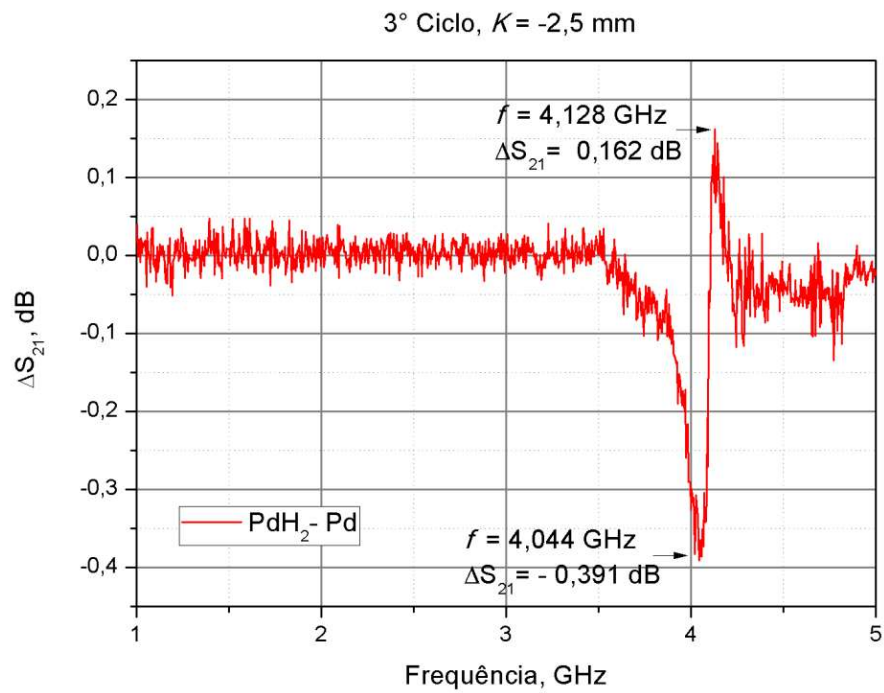


Figura 5.12 Variação da perda por inserção por todo espectro para o 2° ciclo.



Fonte: O autor.

Figura 5.13 Variação da perda por inserção por todo espectro para o 3° ciclo.

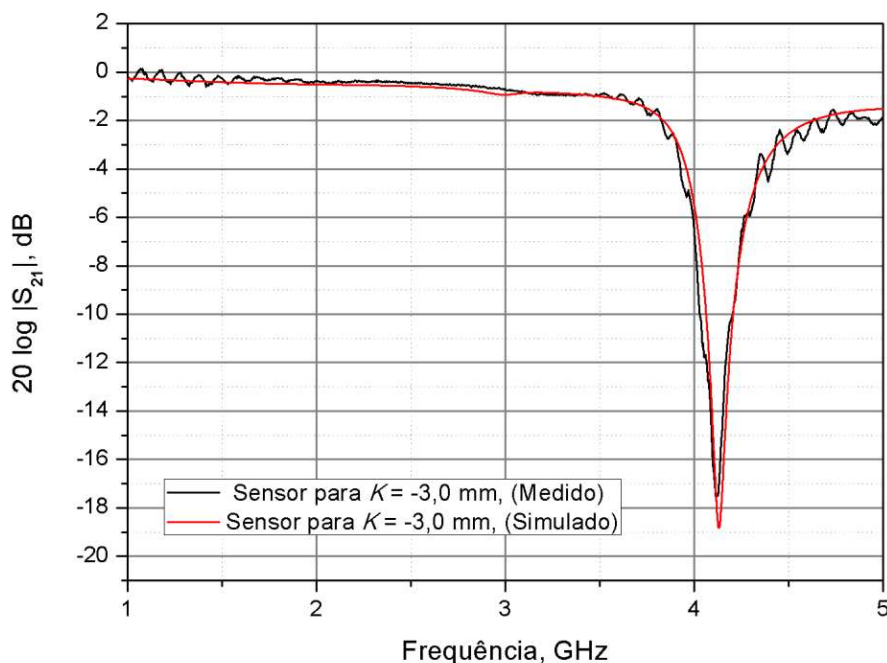


Fonte: O autor.

### 5.2.2 Resultados experimentais de medição para $K = -3,0$ mm

A segunda posição de  $K$  a ser medida foi a de  $-3,0$  mm. A Figura 5.14 apresenta a comparação entre a perda por inserção  $S_{21}$  medida em laboratório e os resultados obtidos por simulação de *software*.

Figura 5.14 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado para  $K = -3,0$  mm.



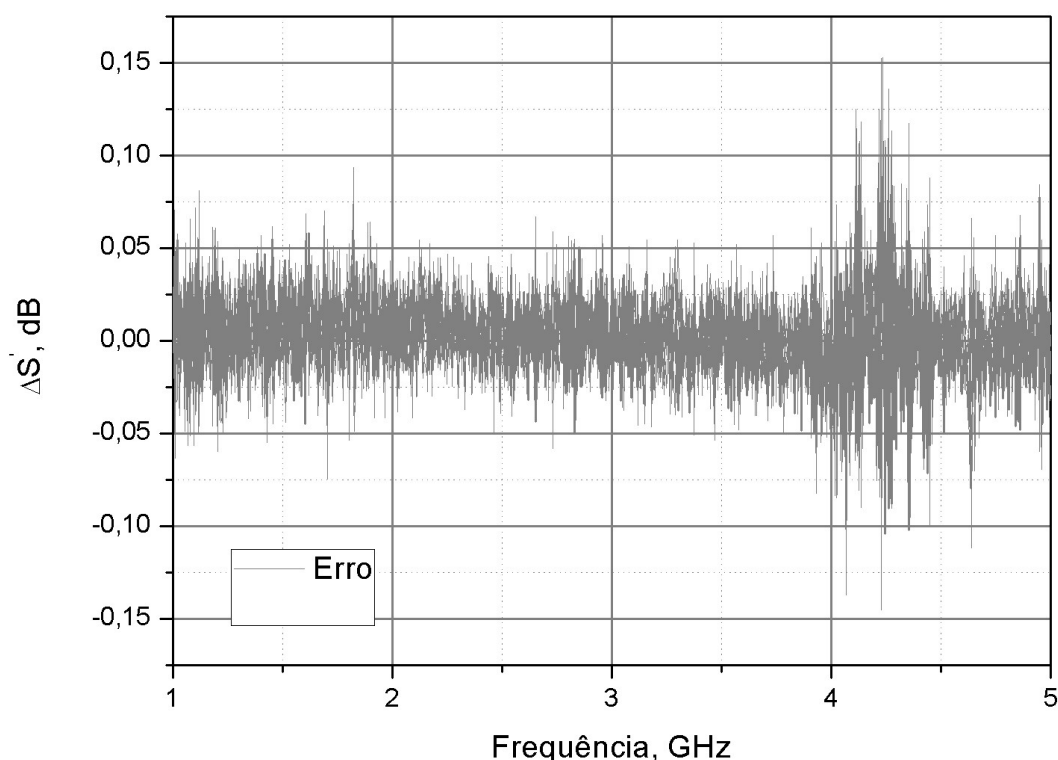
Fonte: O autor.

Repetiu-se o mesmo processo utilizado para  $K = -2,5$  mm para determinar se o espectro medido de  $\Delta S$  era devido a algum efeito externo, não relacionado a absorção de hidrogênio. Calculado o parâmetro das incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ), de acordo com a Equação 5.5, a análise do erro pode ser verificada na Figura 5.15, a partir dessa análise pode-se verificar que o erro ficou entre  $-0,15$  dB e  $0,15$  dB.

Após as medições consecutivas com nitrogênio para análise de erro terem sido realizadas, para garantir que não houvesse interferência do gás na medição com hidrogênio a 4%, o sistema foi submetido ao vácuo por 5 min a  $T = 25^\circ\text{C}$ , removendo completamente o nitrogênio. Criando assim, um ambiente controlado para a introdução do hidrogênio.

Antes de seguir o protocolo pré-determinado de 5 minutos, foram realizadas medições preliminares de 3 minutos para a análise da detecção de hidrogênio, conduzidas de forma consecutiva com um intervalo de 1 minuto entre cada medição. Na Tabela 5.5 pode-se observar que não houve variação significativa dos parâmetros estudados.

Figura 5.15 Análise do erro para a posição de  $K = -3,0$  mm.



Fonte: O autor.

Tabela 5.5 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min.

Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	0	0,009
2	0	0,004
3	0	0,000

Fonte: O autor.

Analisando a Tabela 5.5, verifica-se que o sensor não forneceu resultados significativos nas análises preliminares, ainda assim, optou-se por seguir o protocolo de 5 minutos para avaliar se um tempo de exposição maior manteria os resultados obtidos ou resultaria em alguma alteração, conforme pode ser visto na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 Resultados de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 5 min.

Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	0	0,041
2	0	0,011
3	0	0,010

Fonte: O autor.

Comparando as duas medições para  $K = -3,0$  mm e analisando os resultados obtidos, observou-se que não houve variação nos parâmetros analisados nesse estudo, sugerindo a possibilidade de saturação do sensor, desde a segunda medição para  $K = -2,5$  mm.

Na Figura 5.16, pode-se observar a resposta da perda por inserção e da frequência da mínima transmitância do dispositivo medido em laboratório, após a exposição pelos gases nitrogênio e hidrogênio para o 1º ciclo e tempo = 5 min. A Figura 5.17 ilustra o gráfico por todo o espectro de frequência, a dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ) em relação à frequência. Nesse gráfico é possível observar que o sinal  $\Delta S$  coincide com o gráfico do erro, indicando que o dispositivo não operou conforme o esperado e não detectou a presença de hidrogênio.

Figura 5.16 Perda por inserção do dispositivo para  $K = -3,0$  mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1º ciclo e tempo = 5 min.

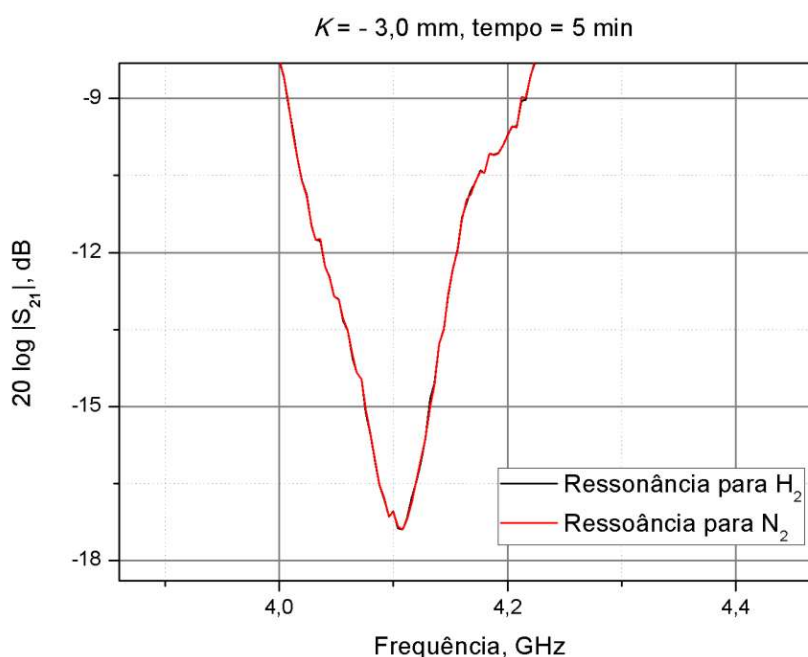
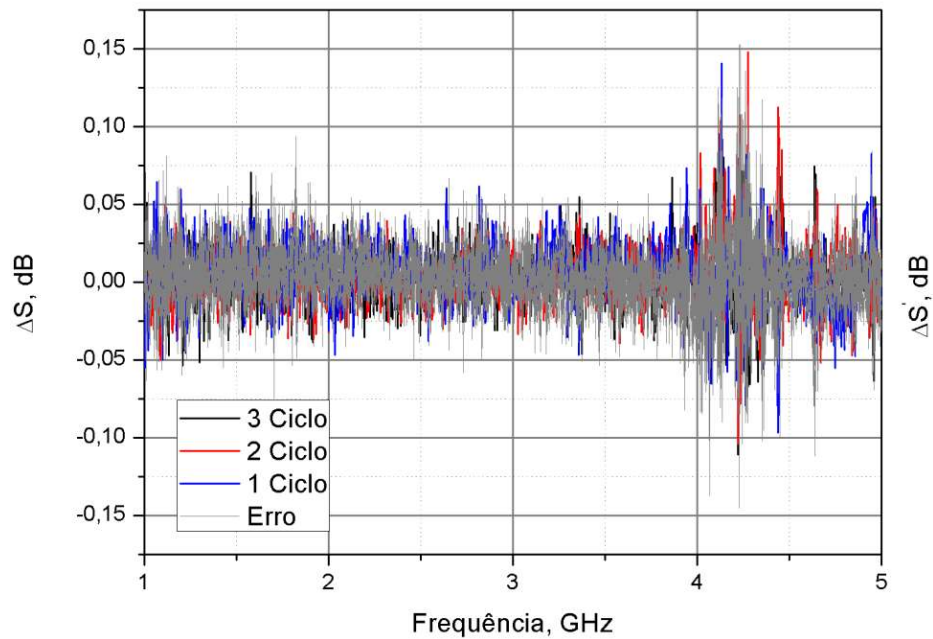


Figura 5.17 Dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro)  $\Delta S'$  em relação à frequência para  $K = -3,0$  mm.

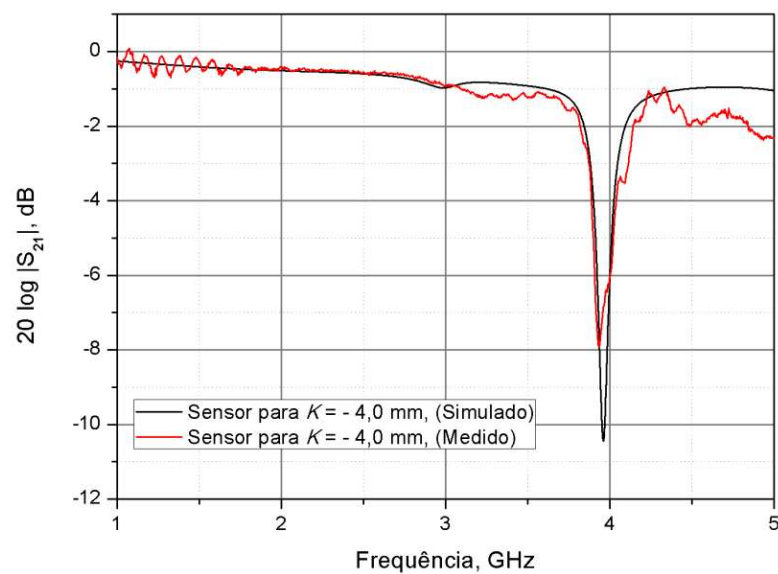


Fonte: O autor.

### 5.2.3 Resultados experimentais de medição para $K = -4,0$ mm

A terceira posição de  $K$  a ser medida foi a de  $-4,0$  mm. A Figura 5.18 apresenta a comparação entre a perda por inserção  $S_{21}$  medida em laboratório e os resultados obtidos por simulação de *software*.

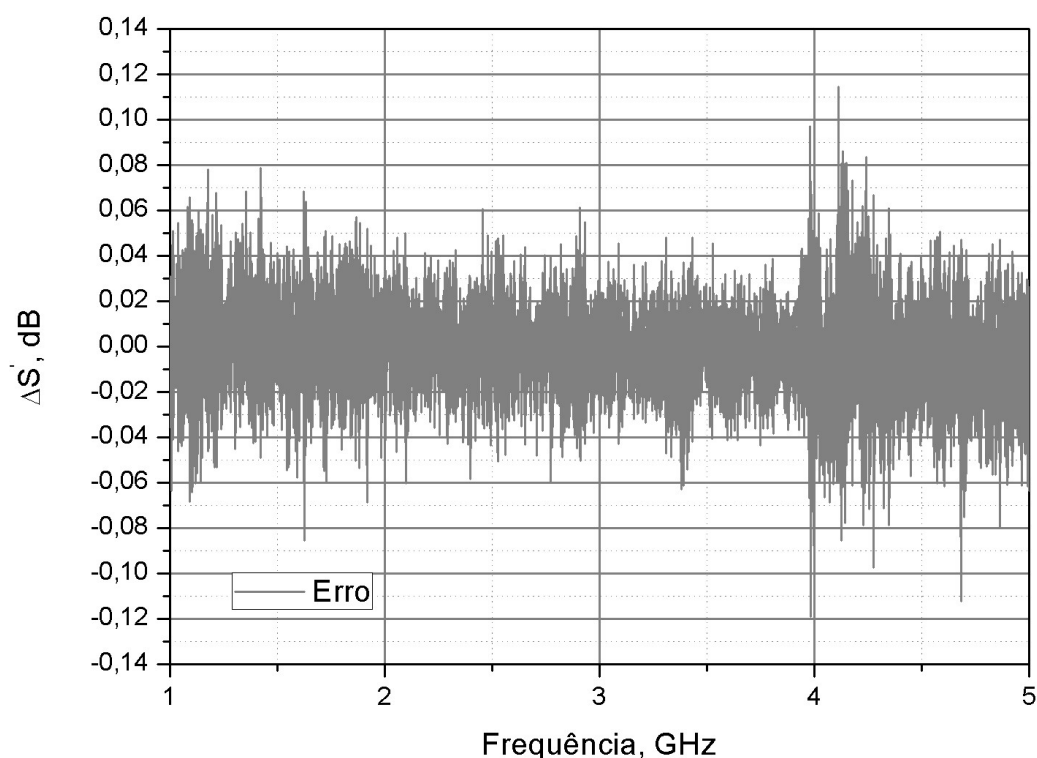
Figura 5.18 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado para  $K = -4,0$  mm.



Fonte: O autor.

Repetiu-se o mesmo processo utilizado para  $K = -2,5$  e  $-3,0$  mm para determinar se o espectro medido de  $\Delta S$  era devido a algum efeito externo não relacionado a absorção de hidrogênio. Em seguida, calculou-se o parâmetro das incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ), cuja análise, apresentada na Figura 5.19, indica que o erro variou entre  $-0,12$  dB e  $0,12$  dB.

Figura 5.19 Análise do erro para a posição de  $K = -4,0$  mm.



Fonte: O autor.

Após as medições consecutivas com nitrogênio para análise de erro terem sido realizadas, para garantir que não houvesse interferência do nitrogênio na medição com hidrogênio a 4%, foi realizado o processo de vácuo no sistema por 5 min a  $25^{\circ}\text{C}$ , removendo o gás. Criando assim, um ambiente controlado para a introdução do hidrogênio.

Antes de seguir o protocolo pré-determinado de 5 minutos, foram realizadas medições preliminares de 3 minutos para a análise da detecção de hidrogênio, conduzidas de forma consecutiva com um intervalo de 1 minuto entre cada medição.

A partir da Tabela 5.7 verifica-se que não foram observados resultados significativos nas análises preliminares, ainda assim, optou-se por seguir o protocolo

de 5 minutos para avaliar se um tempo de exposição maior manteria os resultados obtidos ou resultaria em alguma alteração, conforme pode ser visto na Tabela 5.8.

Tabela 5.7 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min.

Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	0	0,006
2	0	0,005
3	0	0,014

Fonte: O autor.

Tabela 5.8 Resultados de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 5 min.

Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	0	0,071
2	0	0,048
3	0	0,023

Fonte: O autor.

Comparando as duas medições para  $K = -4,0$  mm e analisando os resultados obtidos, observou-se que o sensor, ao ser inicialmente exposto ao hidrogênio por um período preliminar de 3 minutos, não detectou a presença do gás, mantendo esse resultado quando exposto por um maior período de tempo ao hidrogênio, em uma segunda medição. Observou-se que como não houve variação nos parâmetros analisados nesse estudo, o sensor poderia estar saturado desde a segunda medição para  $K = -2,5$  mm.

Na Figura 5.20, pode-se observar a resposta da perda por inserção e da frequência da mínima transmitância do dispositivo medido em laboratório, após a exposição pelos gases nitrogênio e hidrogênio para o 1º ciclo e tempo = 5 min. A Figura 5.21 ilustra o gráfico por todo o espectro de frequência, a dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ) em relação à frequência. Nesse gráfico é possível observar que o sinal  $\Delta S$  coincide com o gráfico do erro, indicando que o dispositivo também não operou conforme o esperado e não detectou a presença de hidrogênio.

Figura 5.20 Perda por inserção do dispositivo para  $K = -4,0$  mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1º ciclo e tempo = 5 min.

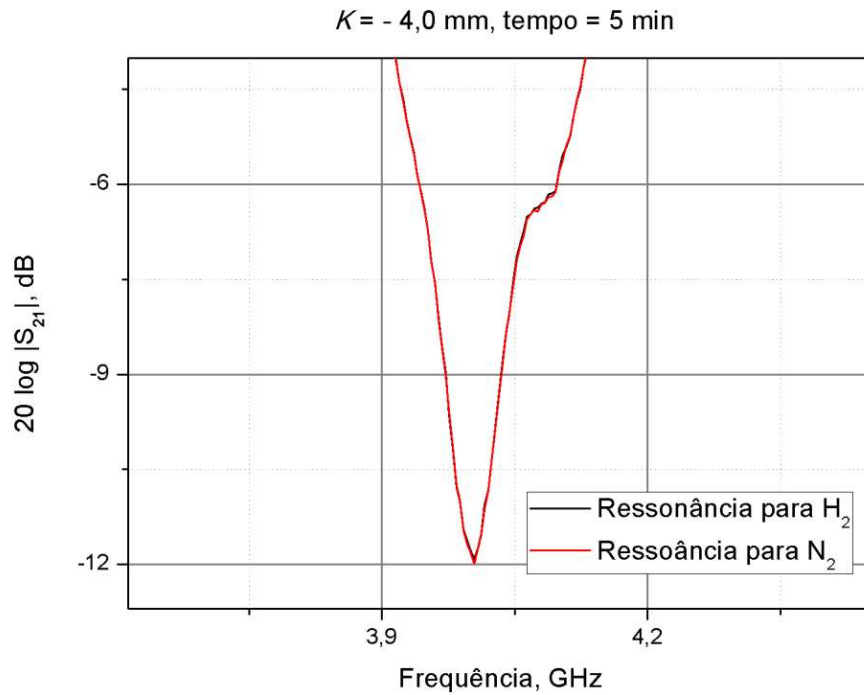
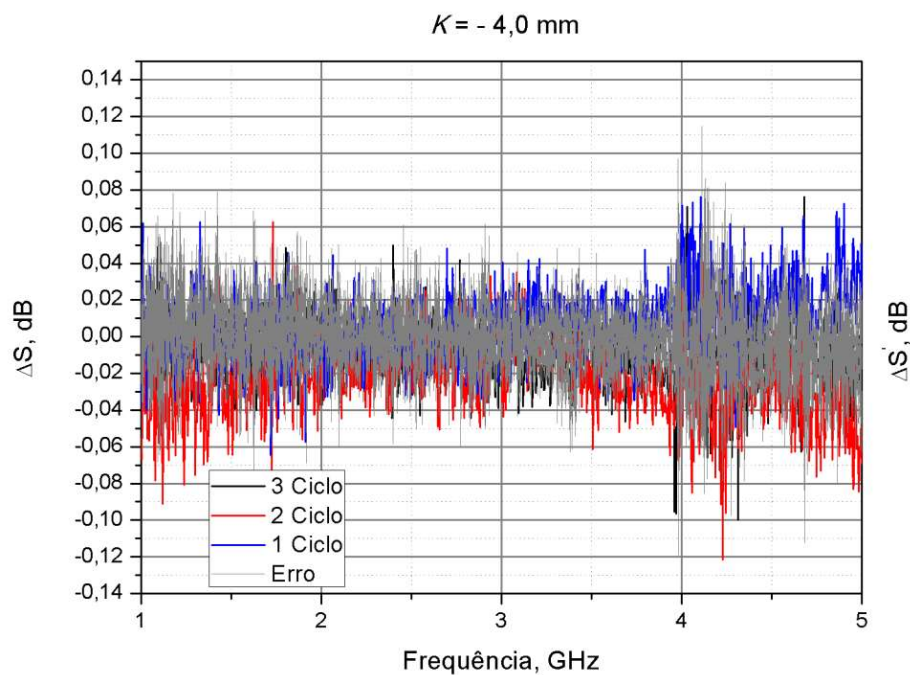


Figura 5.21 Dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro)  $\Delta S'$  em relação à frequência para  $K = -4,0$  mm.

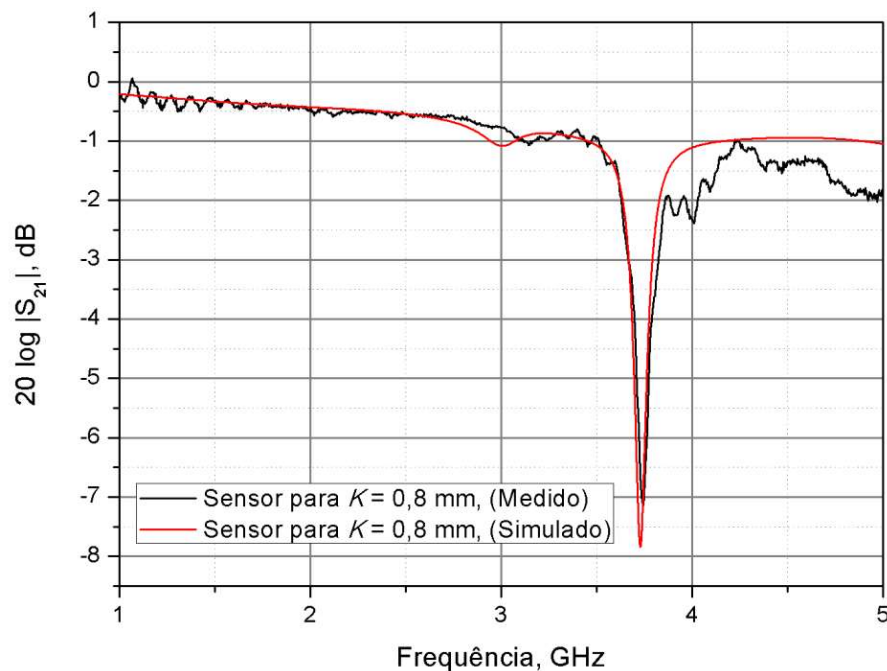




#### 5.2.4 Resultados experimentais de medição para $K = 0,8$ mm

A quarta posição de  $K$  a ser medida foi a de 0,8 mm. A Figura 5.22 apresenta a comparação entre a perda por inserção  $S_{21}$  medida em laboratório e os resultados obtidos por simulação de *software*.

Figura 5.22 Perda por inserção do dispositivo medido e simulado para  $K = 0,8$  mm.

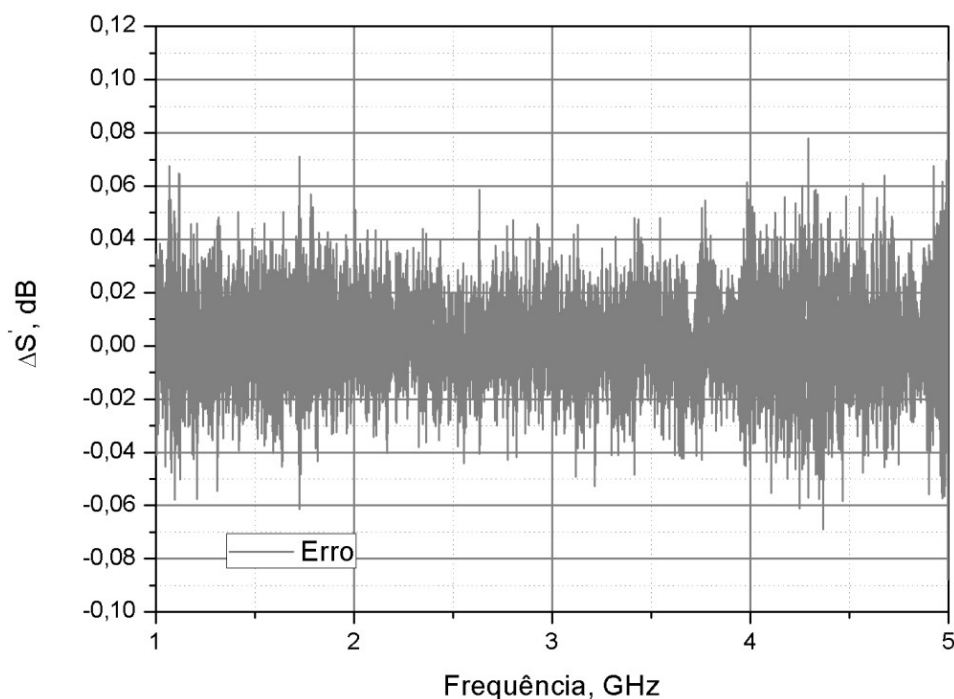


Fonte: O autor.

Repetiu-se o mesmo processo utilizado para  $K = -2,5$ ,  $-3,0$  e  $-4,0$  mm para determinar se o espectro medido de  $\Delta S$  era devido a algum efeito externo não relacionado a absorção de hidrogênio. A análise do erro pode ser verificada na Figura 5.23, a partir dessa análise pode-se verificar que o erro ficou entre - 0,07 dB e 0,08 dB.

Após as medições consecutivas com nitrogênio para análise de erro terem sido realizadas, para garantir que não houvesse interferência do nitrogênio na medição com hidrogênio a 4%, foi realizado o processo de vácuo no sistema por 5 min a 25°C. Criando assim, um ambiente controlado para a introdução do hidrogênio.

Figura 5.23 Análise do erro para a posição de  $K = 0,8$  mm.



Fonte: O autor.

Para essa posição, foram conduzidas exclusivamente as medições preliminares de 3 minutos para a análise da detecção de hidrogênio. Dado que, já havia sido identificado um possível estado de saturação do sensor, por esse motivo, medições adicionais com um tempo de exposição prolongado foram consideradas desnecessárias. Na Tabela 5.9 pode-se observar que não houve variação significativa dos parâmetros estudados.

Tabela 5.9 Resultados preliminares de variação na frequência de ressonância do dispositivo, para tempo = 3 min.

Ciclo	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
1	0	0,015
2	0	0,007
3	0	0,001

Fonte: O autor.

Na Figura 5.24, pode-se observar a resposta da perda por inserção e da frequência da mínima transmitância do dispositivo medido em laboratório, após a exposição pelos gases nitrogênio e hidrogênio para o 1º ciclo e tempo = 3 min. A Figura 5.25 ilustra o gráfico por todo o espectro de frequência, a dependência do

sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ) em relação à frequência. Nesse gráfico é possível observar que o sinal  $\Delta S$  coincide com o gráfico do erro, indicando que o dispositivo também não operou conforme o esperado e não detectou a presença de hidrogênio.

Figura 5.24 Perda por inserção do dispositivo para  $K = 0,8$  mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1º ciclo e tempo = 3 min.

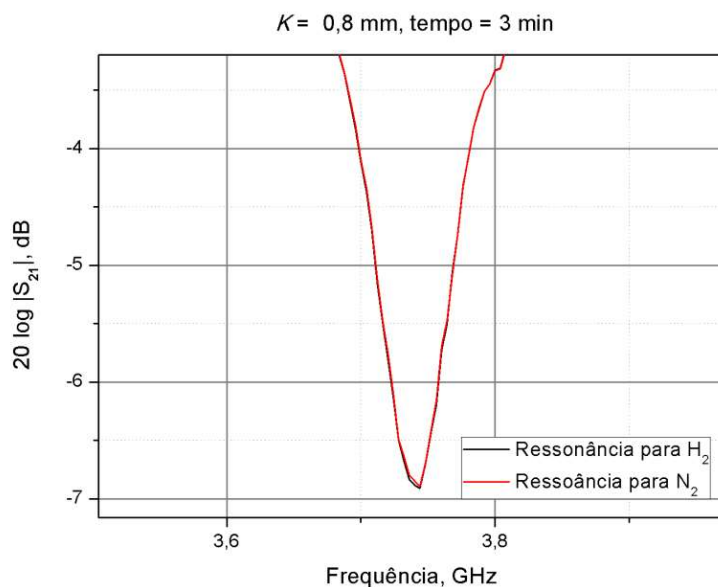
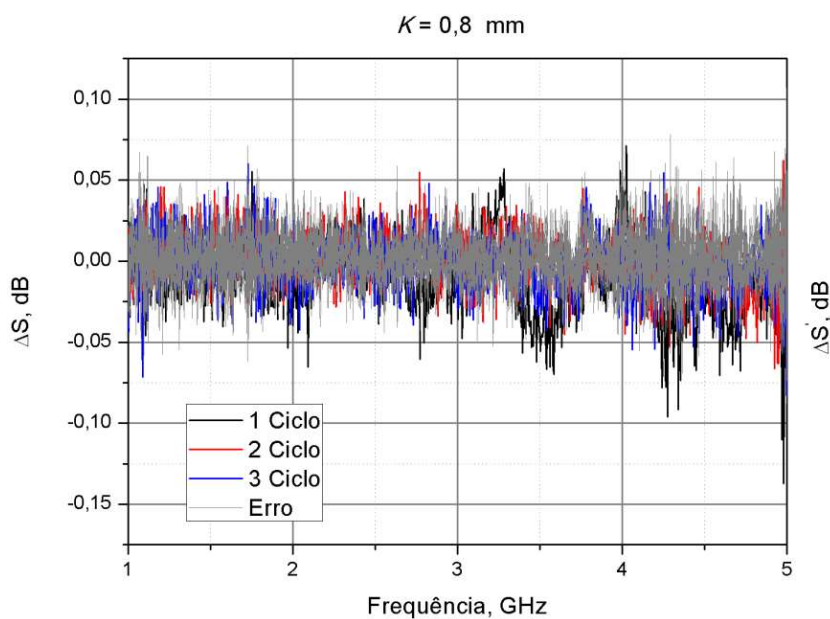


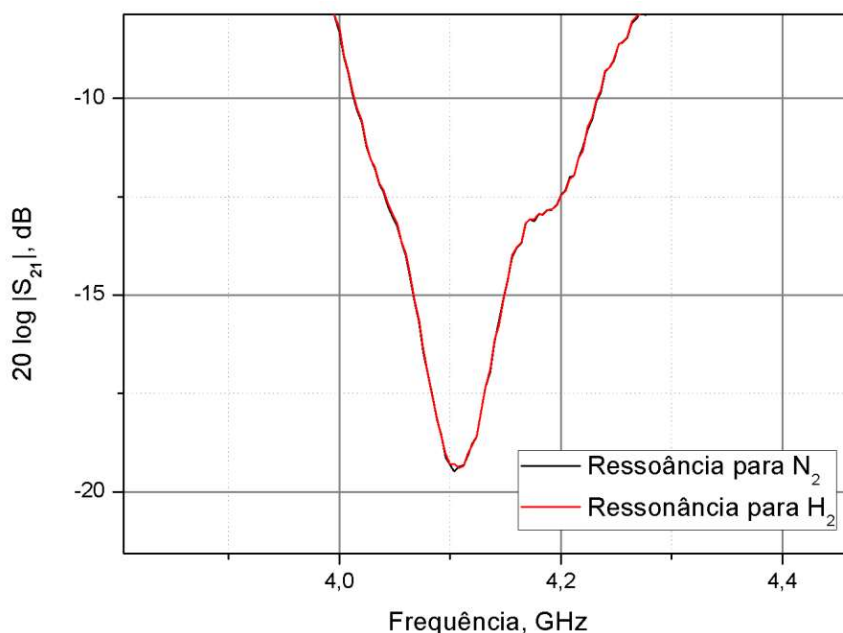
Figura 5.25 Dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro)  $\Delta S'$  em relação à frequência para  $K = 0,8$  mm.



Após a conclusão das medições, a fim de confirmar a saturação do sensor, foi realizada apenas uma medida (1 Ciclo) para o dispositivo, na posição  $K = -2,5$  mm,  $P = 1,2$  atm e a  $25$  °C, com um tempo maior de exposição de 30 min e verificou-se que o dispositivo não apresentou variação de frequência,  $\Delta f = 0$  MHz e apresentou uma variação na perda por inserção desprezível,  $\Delta S = 0,009$  dB. Na Figura 5.26 é possível visualizar a resposta da perda por inserção e da frequência da mínima transmitância do dispositivo medido em laboratório, após a exposição pelos gases nitrogênio e hidrogênio para o 1° ciclo e tempo = 30 min. Os gráficos possuem concordância, mostrando que não há deslocamento de frequência.

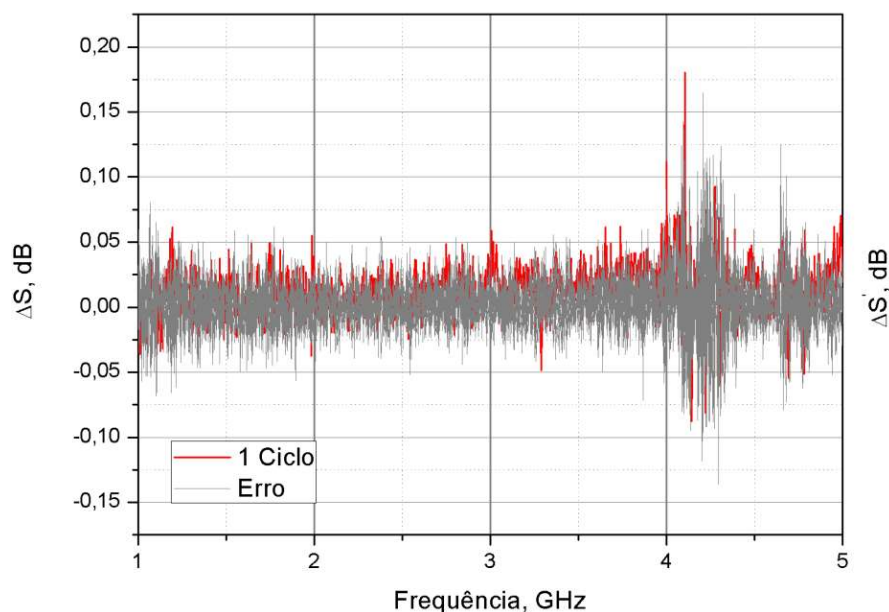
A Figura 5.27 ilustra o gráfico por todo o espectro de frequência, a dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro,  $\Delta S'$ ) em relação à frequência. Nesse gráfico é possível observar que o sinal  $\Delta S$  coincide com o gráfico do erro, indicando que o dispositivo também não operou conforme o esperado e não detectou a presença de hidrogênio.

Figura 5.26 Perda por inserção do dispositivo para  $K = -2,5$  mm, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (medido em laboratório), para o 1° ciclo e tempo = 30 min.



Fonte: O autor.

Figura 5.27 Dependência do sinal  $\Delta S$  e do parâmetro de incertezas (o erro)  $\Delta S'$  em relação à frequência para  $K = -2,5$  mm, tempo=30 min.



Fonte: O autor.

Neste trabalho, foram conduzidos experimentos para as posições que apresentaram alguma resposta à detecção de hidrogênio por simulação em *software*, conforme indicado nas Tabelas 5.1 e 5.2. A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o sensor detectou a presença de hidrogênio em ambas as medições para  $K = -2,5$  mm. No entanto, na segunda medição, observou-se um efeito de saturação, impossibilitando a detecção do gás nas demais posições analisadas ( $K = -4,0$ ,  $-3,0$  e  $0,8$  mm). A ocorrência da saturação está relacionada à formação irreversível de hidreto de paládio, fenômeno já discutido na literatura [9], [40].

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este estudo apresentou o desenvolvimento de um modelo de estrutura ressonante de microfita reconfigurável para a detecção de hidrogênio, desde sua concepção teórica até a fabricação e testes experimentais. A otimização do dispositivo foi realizada por meio de simulações no *software CST Studio Suite*, permitindo o ajuste preciso dos parâmetros da linha de microfita e do ressoador. Além disso, foi projetado e fabricado um módulo dedicado à vedação de gases e ao controle do movimento do sensor, utilizando o *software Autodesk Fusion*, garantindo a confiabilidade das medições experimentais.

Os resultados das simulações demonstraram o funcionamento adequado do modelo proposto, possibilitando a fabricação do sensor reconfigurável. O dispositivo permite a variação da posição do ressoador em relação à linha de microfita, considerando as configurações  $K = 3,8; 2,3; 0,8; -2,5; -3,0; -4,0$  e  $-5,0$  mm. As medições experimentais foram conduzidas sob condições controladas de pressão e temperatura ( $P = 1,2$  atm e  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ), conforme o protocolo estabelecido neste trabalho. Os testes indicaram que a configuração  $K = -2,5$  mm apresentou o melhor desempenho na detecção de hidrogênio, registrando uma variação de frequência de 8 MHz após 5 minutos de exposição ao gás. No entanto, observou-se que o sensor atingiu a saturação após a segunda medição nesta posição, comprometendo sua eficácia nas medições subsequentes. Esse comportamento foi confirmado por um novo teste na posição otimizada, com um tempo de exposição ampliado para 30 minutos. Esses resultados ressaltam a necessidade de estudos adicionais sobre o fenômeno da saturação, a fim de compreender melhor as limitações do sensor e avaliar como a exposição prolongada ao hidrogênio pode afetar sua sensibilidade ao longo do tempo.

Além da aplicação direta na detecção de hidrogênio na frequência aqui projetada, sua estrutura reconfigurável possibilita a sua adaptação para diferentes frequências de operação, incluindo faixas específicas para RFID, ampliando seu espectro de utilização. Ademais, o dispositivo pode ser empregado na detecção de outros gases perigosos, como o DMMP, tornando-se uma ferramenta versátil para monitoramento ambiental e segurança. Sua integração a drones permite a realização de inspeções automatizadas em ambientes industriais, contribuindo para

a identificação precoce de vazamentos de hidrogênio e aumentando a segurança operacional.

Dessa forma, este trabalho representa uma contribuição significativa para o desenvolvimento de sensores ressonantes para a detecção de hidrogênio em tempo real, demonstrando sua aplicabilidade prática e potencial de uso. A possibilidade de reprojeta-lo para diferentes frequências e gases, reforça sua relevância tecnológica, tornando-o uma alternativa promissora para a detecção de gases em diversos setores industriais.

### **Trabalhos futuros**

- Fabricar mais amostras dos ressoadores cobertos com paládio, para que sejam utilizados em novos testes;
- Expor o dispositivo a concentrações diferentes de hidrogênio, inclusive testando o limiar de saturação do dispositivo;
- Projetar e desenvolver outras estruturas de micro-ondas, incluindo dispositivos sintonizados, como: diferentes configurações de ressoadores, antenas e acopladores, que operem na faixa de frequência de 1 GHz a 60 GHz. O objetivo é obter estruturas com alta sensibilidade e resposta rápida em temperatura ambiente, empregando diferentes materiais dielétricos de baixa tangente de perdas;
- Fabricação de dispositivos ressonantes baseados em tecnologia RFID para a detecção de hidrogênio em frequências de micro-ondas. No Apêndice B são apresentadas as simulações de novas configurações de sensores que trabalham a uma frequência de 2,45 GHz e 5,8 GHz e que podem ser usadas em aplicações de tecnologias RFID, sendo assim capazes de detectar a presença de  $H_2$  em uma atmosfera com diversos gases.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. de M. V. M. Souza, “Tecnologia do hidrogênio”, 1ª ed. Synergia Editora, 2009.
- [2] Zhijie Li, Shengnan Yan, Zhonglin Wu, Hao Li, Junqiang Wang, Wenzhong Shen, Zhiguo Wang, YongQing Fu, “Hydrogen gas sensor based on mesoporous In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with fast response/recovery and ppb level detection limit”. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, n. 50, pp. 22746–22755, dez. 2018
- [3] R. S. El-Emam, H. Ozcan, e C. Zamfirescu, “Updates on promising thermochemical cycles for clean hydrogen production using nuclear energy”, *Journal of Cleaner Production*, v. 262, jul. 2020
- [4] T. S. Uyar e D. Beşikci, “Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities”, *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 4, pp. 2453–2456, jan. 2017.
- [5] S. R. O. de Souza, “Modelamento de dispositivos de micro-ondas utilizando algoritmos genéticos”, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.
- [6] M. Aleixandre, P. Corredera, M. L. Hernanz, e J. Gutierrez-Monreal, “Development of fiber optic hydrogen sensors for testing nuclear waste repositories”, *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 107, n. 1, pp. 113–120, 2005.
- [7] S. Öztürk e N. Kiliç, “Pd thin films on flexible substrate for hydrogen sensor”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 674, pp. 179–184, 2016.
- [8] A. V. Tchouvelev, S. P. de Oliveira, e N. P. Neves, “Regulatory framework, safety aspects, and social acceptance of hydrogen energy technologies”, in *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies: Hydrogen Production and Practical Applications in Energy Generation*. Elsevier, 2018. pp. 303–356.
- [9] J. Noh, J. M. Lee, e W. Lee, “Low-dimensional palladium nanostructures for fast and reliable hydrogen gas detection”, *Sensors*, v. 11, n. 1, pp. 825–851, 2011.



- [10] S. C. Oliveira e E. Fontana, "Otimização de sensores de hidrogênio baseados em excitação de plásmons de superfície em filmes finos de paládio e ouro-paládio," *Anais do XII Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica—MOMAG*, Belo Horizonte, Brasil, pp. 1–5, 2006.
- [11] Santos, K. S. dos, "Detecção de hidrogênio na faixa de frequências de microondas e construção de um sensor em microfita", Dissertação (Mestrado) – Universidade de Pernambuco, Recife, 2018.
- [12] Keila Silva dos Santos; Gustavo Oliveira Cavalcanti; Antonio Azevedo; Crislane Priscila do Nascimento Silva; Marcos Tavares De Melo; Ignacio Llamas-Garro, "Hybrid Microstrip Device for Hydrogen Detection at Microwave Frequencies" *IEEE Sensors Journal*, v. 23, n. 7, pp. 6810-6821, 2023.
- [13] R. K. Joshi, S. Krishnan, M. Yoshimura, e A. Kumar, "Pd nanoparticles and thin films for room temperature hydrogen sensor", *Nanoscale Research Letters*, v. 4, n. 10, pp. 1191–1196, 2009.
- [14] E. Fontana, "Thickness optimization of metal films for the development of surface-plasmon-based sensors for nonabsorbing media", *Applied Optics*, v. 45, n. 29, pp. 7632–7642, 2006.
- [15] M. Tabib-Azar, D. Akinwande, G. Ponchak, e S. R. LeClair, "Novel physical sensors using evanescent microwave probes", *Review of Scientific Instruments*, v. 70, n. 8, pp. 3381–3386, 1999.
- [16] E. Czerwosz, P. Dłuzewski, M. Kozłowski, S. Krawczyk, e J. Rymarczyk, "Preparation and properties of carbon-palladium multilayer for hydrogen detection", *Vacuum*, v. 128, pp. 265–271, 2016.
- [17] W. Dong, V. Ledentu, P. Sautet, A. Eichler, e J. Hafner, "Hydrogen adsorption on palladium: a comparative theoretical study of different surfaces", *Surface Science*, v. 411, n. 1, pp. 123–136, 1998.
- [18] R. Caputo e A. Alavi, "Where do the H atoms reside in PdHx systems?", *Molecular Physics*, v. 101, n. 11, pp. 1781–1787, 2003.
- [19] C. Lee and W. Liu, "A high-performance Pd nanoparticle (NP)/WO<sub>3</sub> thin-film-based hydrogen sensor", *IEEE Electron Device Letters*, v. 40, n. 7, pp. 1194–1197, jul. 2019.
- [20] Y. Chou, C. Chen, W. Liu, e H. Chen, "A new Pd-InP Schottky hydrogen sensor fabricated by electrophoretic deposition with Pd nanoparticles", *IEEE Electron Device Letters*, v. 26, n. 2, pp. 62–65, fev. 2005.

- [21] K. Chen, J. Niu, e W. Liu, "Study of a new hydrogen gas sensor synthesized with a sputtered cerium oxide thin film and evaporated palladium nanoparticles", *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 68, n. 8, pp. 4077–4083, ago. 2021.
- [22] Y. Yang, J. Niu, e W. Liu, "Study of a palladium nanoparticle/indium oxide-based hydrogen gas sensor", *IEEE Transactions on Electron Devices*, v. 69, n. 1, pp. 318–324, jan. 2022.
- [23] P. Lin, J. Niu, e W. Liu, "Hydrogen sensing properties of an aluminum-doped zinc oxide layer decorated with palladium nanoparticles", *IEEE Electron Device Letters*, v. 43, n. 2, pp. 280–283, fev. 2022
- [24] C. Lueng, P. J. Metaxas, e M. Kostylev, "Sensitivity enhancement of a Pd/Co bilayer film for hydrogen gas sensing using a perpendicular-to-plane ferromagnetic resonance configuration", *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 52, n. 7, jul. 2016.
- [25] T. T. Daniel, S. Raveesh, K. Saikia, e R. P. Paily, "Magnetosemiconductor resistor for hydrogen detection", *IEEE Sensors Journal*, v. 21, n. 7, pp. 9038–9045, abr. 2021.
- [26] G. O. Cavalcanti, E. Fontana, e A. Azevedo, "Hydrogen detection using surface plasmon resonance on palladium-siloxane films", in *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, pp. 461–463, Nov. 2011.
- [27] C. Yu, L. Liu, X. Chen, Q. Liu, e Y. Gong, "Fiber-optic Fabry–Pérot hydrogen sensor coated with Pd-Y film", *Photonic Sensors*, v. 5, n. 2, pp. 142–145, jun. 2015.
- [28] S. Saad e L. Hassine, "Hydrogen detection with FBG sensor technology for disaster prevention", *Photonic Sensors*, v. 3, n. 3, pp. 214–223, set. 2013.
- [29] G. Wang, J. Dai, e M. Yang, "Fiber-optic hydrogen sensors: A review", *IEEE Sensors Journal*, 1 jun. 2021.
- [30] Bruno P. Santos, Lucas A. M. Silva, Clayson S. F. S. Celes, João B. Borges Neto, Bruna S. Peres, Marcos Augusto M. Vieira, Luiz Filipe M. Vieira, Olga N. Goussevskaya e Antonio A. F. Loureiro, "Internet das Coisas: da Teoria à Prática", *Minicursos SBRC - Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, v. 31, 2016.

- [31] Ojaroudi, N. "Design of microstrip antenna for 2.4/5.8 GHz RFID applications". In: *German microwave conference (GeMiC)*, Aachen, Alemanha, pp. 1–4, 2014.
- [32] Ngai, E.W.T., Moon, K.K.L., Riggins, F.J., Yi, C.Y., 2008. "RFID research: An academic literature review (1995–2005) and future research directions", *International Journal of Production Economics*, v. 112, n. 2, pp. 510–520, 2008.
- [33] Yu, Y.; Ni, J.; Xu, Z. "Dual-band dipole antenna for 2.45 GHz and 5.8 GHz RFID tag application", *Advanced Electromagnetics*, v. 4, n. 1, pp. 31–35, 2015.
- [34] CST Studio Suite. Disponível em: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- [35] D. R. Lide, CRC "Handbook of Chemistry and Physics", 86th ed. 2006.
- [36] Jewell, L. L.; Davis, B. H. "Review of absorption and adsorption in the hydrogen-palladium system", *Applied Catalysis A: General*, 17 ago. 2006.
- [37] K. Baba, U. Miyagawa, K. Watanabe, Y. Sakamoto, e T. B. Flanagan, "Electrical resistivity changes due to interstitial hydrogen in palladium-rich substitutional alloys", *Journal of Materials Science*, v. 25, n. 9, pp. 3910–3916, 1990.
- [38] A.L. Cabrera e R. Aguayo-Soto, "Hydrogen absorption in palladium films sensed by changes in their resistivity", *Catalysis Letters*, v. 45, pp. 79–83, 1997.
- [39] G. O. Cavalcanti, "Caracterização precisa de filmes metálicos e novas propostas de transdutores ópticos por ressonância de plasmôns de superfície.", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- [40] P. Tripodi, D. Di Gioacchino, e J. D. Vinko, "AC electrical resistance measurements of PdH<sub>x</sub> samples versus composition x", *Journal of Alloys and Compounds*, v. 486, n. 1–2, pp. 55–59, 2009.
- [41] M. Ndoye, H. El Matbouly, Y. N. Sama, D. Deslandes, e F. Domingue, "Sensitivity evaluation of dielectric perturbed substrate integrated resonators for hydrogen detection", *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 251, pp. 198–206, 2016.

- [42] A. Benleulmi, N. Y. Sama, P. Ferrari, and F. Domingue, "Substrate integrated waveguide phase shifter for hydrogen sensing", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, v. 26, n. 9, pp. 744–746, set. 2016.
- [43] M. Tabib-Azar and B. Sutapun, "Novel hydrogen sensors using evanescent microwave probes", *Review of Scientific Instruments*, v. 70, n. 9, pp. 3707–3713, 1999.
- [44] Y. S. Yi, D. C. Wu, P. Birar, and Z. Yang, "Ring Resonator-Based Optical Hydrogen Sensor", *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 7, pp. 2042–2047, abr. 2017.
- [45] Fontana, E. "Tratado de eletromagnetismo", Campinas: Editora Unicamp, 2021.
- [46] D. N. Gugliandolo G., Mirzaei A., Bonyani M., Neri G., Latino M., "Electrical Characterization of Microstrip Resonators Based on Nanostructured Sensing Materials", In: LEONE, A. et al. (Org.). *Sensors and Microsystems: Proceedings of the 19th AISEM 2017 National Conference*. v. 457. Cham: Springer, 2017. pp. 29–34.
- [47] K. S. Dos Santos, G. O. Cavalcanti, Z. Brito-Brito, I. Llamas-Garro, e E. Fontana, "Reconfigurable U-Shaped Microwave Resonator for the Construction of a Hydrogen Sensor", *2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Castelldefels, Espanha, pp. 133-135, 2023.
- [48] D. M. Pozar, "Microwave Engineering", 4º ed. John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [49] J. A. J. Ribeiro, "Engenharia de micro-ondas fundamentos e aplicações", 1ª ed. 2008.
- [50] Jia-Sheng Hong e M.J. Lancaster, "Microstrip Filters for RF / Microwave Applications", 1º ed. Wiley-Interscience, 2001.
- [51] S. M. Wentworth, "Eletromagnetismo Aplicado, Abordagem antecipada das linhas de transmissão", 1ª ed. Bookman, 2008.
- [52] Silva, C. P. do N. "Interferômetro e sensor multibanda baseados na curva fractal de Hilbert", Tese de Doutorado – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.
- [53] I. Bahl, "Lumped Elements for RF and Microwave Circuits", 1º ed. Artech House, 2003.

- [54] D. E. H. Fooks e D. R. A. Zakarevicius, "Microwave engineering using microstrip circuits", Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.
- [55] Rohde&Schwarz, "R&S®ZVL Vector Network Analyzers". [Online]. Disponível em: [https://www.rohde-schwarz.com/us/product/zvl-productstartpage\\_63493-9014.html](https://www.rohde-schwarz.com/us/product/zvl-productstartpage_63493-9014.html). Acesso em: 15 jan. 2025.
- [56] "Microstrip Line Calculator". [Online]. Disponível em: <http://www.emtalk.com/mscalc.php>. Acesso: 16 jan. 2025.
- [57] J. R. Aguilar, M. Beadle, P. T. Thompson, e M. W. Shelley, "The Microwave and RF Characteristics of FR4 Substrates", *Low Cost Antenna Technol.*, pp. 0–5, 1998.
- [58] Coutinho, M. de S. "Sensor planar de loop retangular para caracterização de grãos vegetais", Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- [59] E. L. Holzman, "Wideband measurement of the dielectric constant of an FR4 substrate using a parallel-coupled microstrip resonator", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 54, n. 7, pp. 3127–3130, jul. 2006.
- [60] MATLAB, "Matrix Laboratory". [Online]. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- [61] B. P. Ricobom e M. Bonfim, "Análise do caminho de retorno de uma corrente elétrica em um plano terra", *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 4308, pp. 4308–4311, 2015.

## APÊNDICE A – PRODUÇÃO CIENTÍFICA DURANTE O DOUTORADO

Keila Silva dos Santos; Gustavo Oliveira Cavalcanti; Antonio Azevedo; Crislane Priscila do Nascimento Silva; Marcos Tavares De Melo; Ignacio Llamas-Garro, “Hybrid Microstrip Device for Hydrogen Detection at Microwave Frequencies”, *IEEE Sensors Journal*, v. 23, n. 7, pp. 6810-6821, 2023.

*Resumo:* This article describes the analysis, design, and construction of a microstrip device capable of detecting hydrogen at microwave frequencies. The proposed structure is a hybrid microstrip line, 10-cm-long, having part of the copper (Cu) line replaced by a strip of palladium (Pd) film 10-nm-thick. A simple formulation has been developed to estimate the device's insertion loss, as well as the spectral dependence of the  $S_{21}$  parameter. For a device having a 2-cm-long Pd section, exposed to 1.6% hydrogen at a 0.4-bar pressure in nitrogen gas, detection was accomplished by measuring the changes produced on one of the resonances of the scattering parameter  $S_{21}$  in the frequency region around 3.2 GHz. The experimental results, corroborated by the theoretical modeling of the device's response, indicated that, if on one hand, a Pd thickness much smaller than the skin depth, yields a negligible change in attenuation due to hydrogen absorption, on the other, it favors the phase of the  $S_{21}$  parameter to become a highly sensitive function of Pd conductivity, in turn facilitating hydrogen detection. This finding opens the possibility of constructing simple hydrogen sensors by incorporating ultrathin Pd films into planar microwave circuits.

K. S. Dos Santos, G. O. Cavalcanti, Z. Brito-Brito, I. Llamas-Garro, e E. Fontana, “Reconfigurable U-Shaped Microwave Resonator for the Construction of a Hydrogen Sensor”, *2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Castelldefels, Espanha, pp. 133-135, 2023.

*Resumo:* This paper describes the design, parameter optimization and simulation of a resonant device using the CST Studio Suite for the development of a sensor capable of detecting hydrogen at microwave frequencies. The device is reconfigurable as it comprises a U-shaped resonator that can slide relative to a static stripline. As a result of this strategy, it is possible to investigate a configuration that yields the best response for hydrogen detection, taking into account the frequency variation and insertion loss induced by hydrogen gas on the palladium present in the device.

Santos, K. S.; Cavalcanti, G. O.; Fontana, E.; Silva, C. P. N.; Melo, M. T.; Costa, A. A.. “Sensor em Microfita para Detecção de Hidrogênio em Frequências de Micro-ondas”, MOMAG, 2020, Evento Online. 19° SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 14° CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.

*Resumo:* Este artigo descreve a construção de um dispositivo capaz de detectar hidrogênio usando estruturas simples de micro-ondas. Como o uso de hidrogênio está crescendo em diversas áreas, devido à grande liberação de energia na sua queima, é importante que esse gás seja detectado em tempo hábil, uma vez que ele possui baixo limite explosivo. A estrutura escolhida para a construção do sensor foi a linha de microfita, que antes de ser construída foi otimizada em um ambiente de simulação virtual. Após a fabricação, a detecção foi realizada pela observação da variação na amplitude do sinal propagado em estruturas híbridas de micro-ondas em microfita composta de segmentos longitudinais de cobre e paládio. Observou-se uma variação de 18% na amplitude do sinal transmitido pela microfita quando exposta a uma concentração de 4% de hidrogênio em 96% de nitrogênio.

## APÊNDICE B – DISPOSITIVOS RFID PARA DETECÇÃO DE HIDROGÊNIO EM FREQUÊNCIAS DE MICRO-ONDAS

São apresentadas novas propostas de estruturas ressonantes, projetadas para 2,45 GHz e 5,8 GHz, que podem ser utilizadas em aplicações de tecnologias RFID, que sejam capazes de detectar a presença de hidrogênio. Na Seção B.1, são analisados e definidos os parâmetros das estruturas ressonantes. Na Seção B.2 são apresentados os resultados de simulação dos dispositivos sensores.

### B.1 MODELAGEM DOS SENSORES RFID

A proposta dessas novas abordagens é otimizar dispositivos ressonantes de diferentes configurações, visando maior sensibilidade na detecção de  $H_2$  nas frequências de 2,45 GHz e 5,8 GHz, utilizadas em aplicações de RFID. A detecção do hidrogênio será analisada por meio da variação de parâmetros fundamentais, como a alteração da frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) e na perda por inserção do sinal de transmissão ( $\Delta S$ ). Não há na literatura dispositivos de micro-ondas que utilizem estruturas ressonantes como sensoriamento de gases, utilizando frequências aplicadas em RFID, para detecção de hidrogênio.

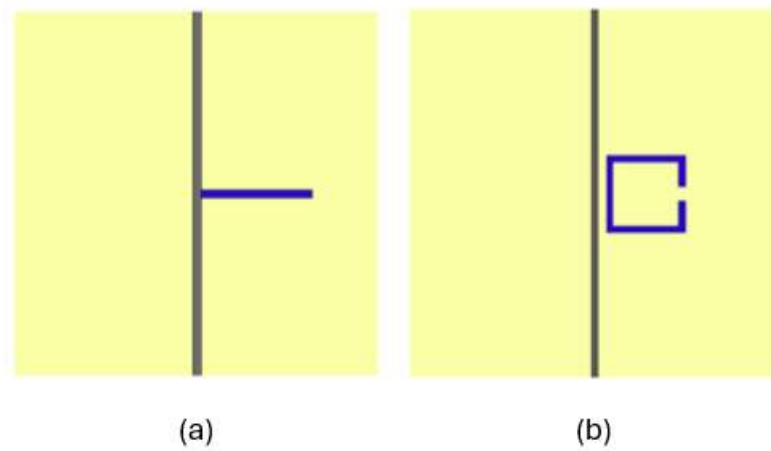
Devido a tecnologia RFID ser aplicada com sucesso em diversas áreas, surgiu o interesse em ampliá-la para projetos e fabricação de sensores que realizem a identificação de gases como o hidrogênio, em frequências de micro-ondas. Foram projetados e escolhidos dispositivos ressonantes para estudo teórico e prático em um *software* de simulação.

#### B.1.1 Modelagem do sensor no simulador que emprega onda completa

As configurações escolhidas para sensoriamento foram: ressoador em T e quadrado de malha aberta, ilustrados na Figura B.1. Para modelagem desses dispositivos no *software* foram utilizados os parâmetros de uma pastilha de quartzo, pois será o material utilizado para fabricação dos sensores. Os metais presentes no dispositivo são a prata (linha de transmissão), paládio (usado no ressoador, como metal catalisador para detecção do gás) e alumínio (plano terra), na Figura B.2



Figura B.1 Dispositivos ressonantes. (a) Ressorador em T, (b) ressoador quadrado de malha aberta.



Fonte: Acervo do autor.

Figura B.2 Corte transversal dos dispositivos.



Fonte: Acervo do autor.

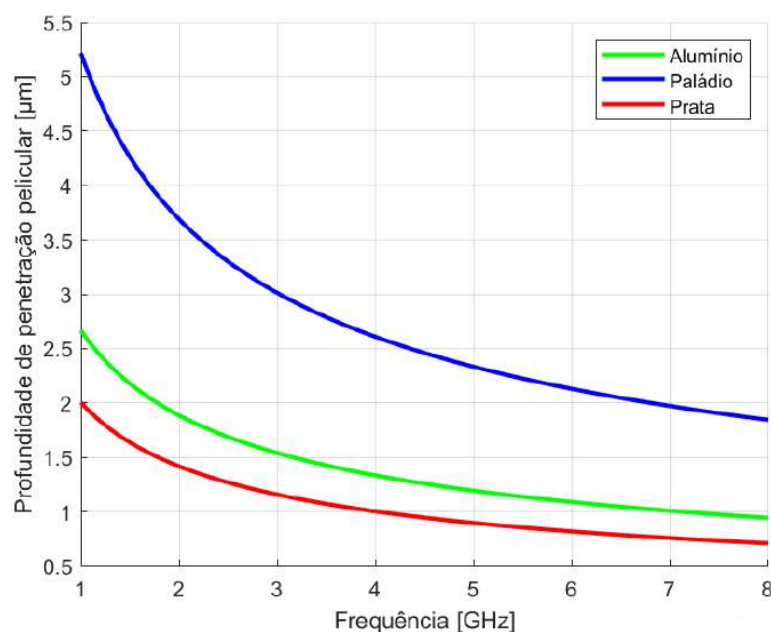
Foi estudado o efeito pelicular de cada material para o projeto do dispositivo, conforme ilustra a Figura B.3, para os valores nas frequências de operação em RFID,  $f = 2,45$  e  $5,8$  GHz. Seus valores podem ser encontrados na Tabela B.1.

Para o projeto, foram considerados os parâmetros de uma pastilha de quartzo, pois será a partir desse material que serão fabricados os sensores. A pastilha de quartzo possui os seguintes dados:

- Permissividade relativa  $\epsilon_r = 3,75$ ;
- Diâmetro 100 mm;
- Espessura do substrato  $500 \mu m$ ;

- Deposição de prata em apenas um lado da pastilha, com espessura 1000 nm.

Figura B.3 Profundidade pelicular x frequência.



Fonte: O autor.

Tabela B.1 Profundidade pelicular para o alumínio, paládio e prata nas frequências de 2,45 e 5,8 GHz.

Frequência, GHz	2,45	5,8
Alumínio	1704 nm	1108 nm
Paládio	3334 nm	2167 nm
Prata	1281 nm	833 nm

Fonte: O autor.

Para verificar as características dos ressoadores acoplados à linha de transmissão principal, foram feitos cálculos para que a linha de transmissão principal possuisse uma impedância característica de  $Z_0 = 50 \, \Omega$  e para que ressoassem em  $f_0 = 2,45 \, \text{GHz}$  e  $5,8 \, \text{GHz}$ . Na Figura B.4 e Figura B.5, pode-se observar todos os parâmetros dos dispositivos, que são:

- **yres** = comprimento do ressoador na horizontal;
- **xres** = comprimento do ressoador na vertical;

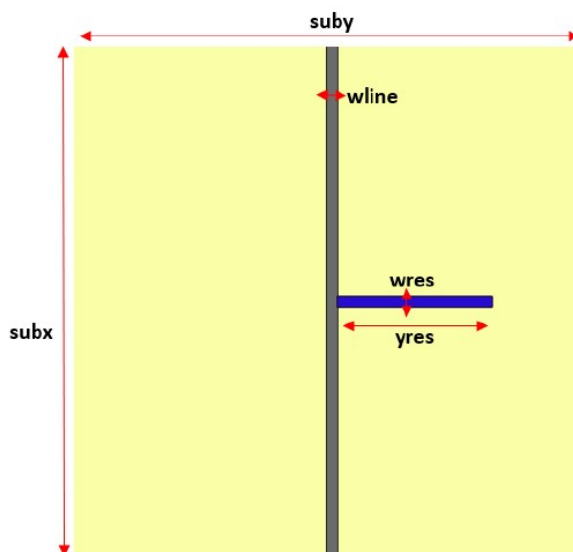
- **g** = gap do ressoador;
- **d** = distância de acoplamento do ressoador à linha de transmissão;
- **wres** = largura do ressoador;
- **wline** = largura da linha de transmissão da microfita;
- **subx** = comprimento do substrato na vertical;
- **suby** = comprimento do substrato na horizontal.

Existem ainda 3 parâmetros que não puderam ser visualizados na figura 2D, que são as espessuras:

- **tres** = espessura do metal do ressoador;
- **tline** = espessura do metal da linha de transmissão principal;
- **tgnd** = espessura do plano terra.

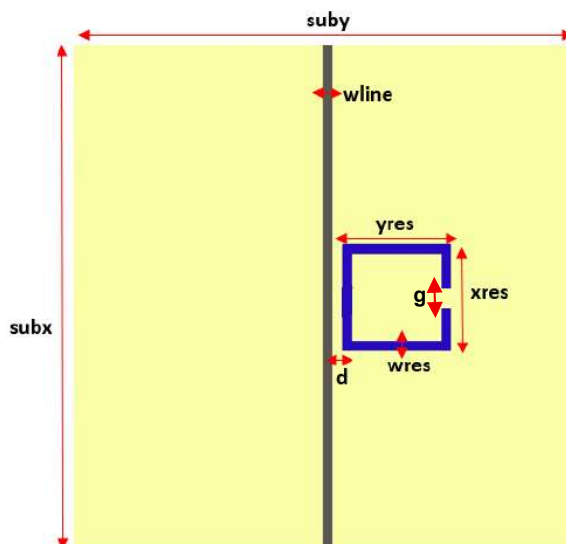
O tamanho dos dispositivos foi determinado de acordo com o tamanho da pastilha de quartzo 100 mm. A Figura B.6 ilustra a quantidade de dispositivos que podem ser feitos em cada pastilha, de acordo com o tamanho de **subx** e **suby**.

Figura B.4 Ressorador em  $T\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ , com seus parâmetros. A linha de transmissão composta por prata (representada pela cor cinza) e o ressoador em T por paládio (representado pela cor azul).



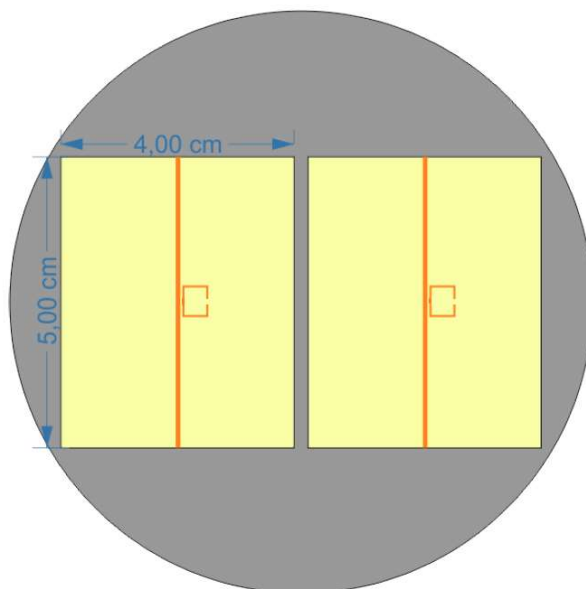
Fonte: Acervo do autor.

Figura B.5 Ressorador em T ( $\frac{\lambda}{2}$ ), com seus parâmetros. A linha de transmissão composta por prata (representada pela cor cinza) e o ressoador em quadrado de malha aberta, por paládio (representado pela cor azul).



Fonte: Acervo do autor.

Figura B.6 Dois dispositivos com tamanho máximo de 50 x 40 mm cada.



Fonte: Acervo do autor.

## B.2 SIMULAÇÃO DOS DISPOSITIVOS SENSORES RFID

Nesta seção, são apresentadas as simulações dos dispositivos ressonantes, considerando o paládio como metal catalisador para a detecção de  $H_2$ . As análises englobam tanto o paládio puro quanto sua forma sensibilizada com hidrogênio a 3%, conforme descrito no estudo de Tabib-Azar e Sutapun [43]. Para otimizar os resultados, foi utilizado o recurso *optimizer* do *software CST Studio Suite*.

As simulações avaliaram a influência dos parâmetros gerais de cada dispositivo, bem como a variação da espessura do paládio, considerando a profundidade pelicular do metal. O objetivo é identificar as melhores respostas em termos de variação de frequência ( $\Delta f$ ) e perda por inserção do sinal de transmissão ( $\Delta S$ ). Foram realizadas simulações para espessuras de paládio  $t_{res} = 100$  nm e 500 nm.

### B.2.1 Ressorador em T ( $f_0 = 2,45$ GHz)

A Tabela B.2 apresenta os resultados do ressoador na frequência de ( $f_0 = 2,45$  GHz), para as espessuras ( $t_{res} = 100$  e 500 nm). O dispositivo apresenta os seguintes parâmetros gerais:

**Para  $t_{res} = 100$  e 500 nm:**

- **subx** = 40 mm;
- **suby** = 35 mm;
- **wline** = 1,07 mm;
- **wres** = 1,07 mm;
- **tline** = 1000 nm;
- **d** = 0 mm;
- **yres** = 17,75 mm.

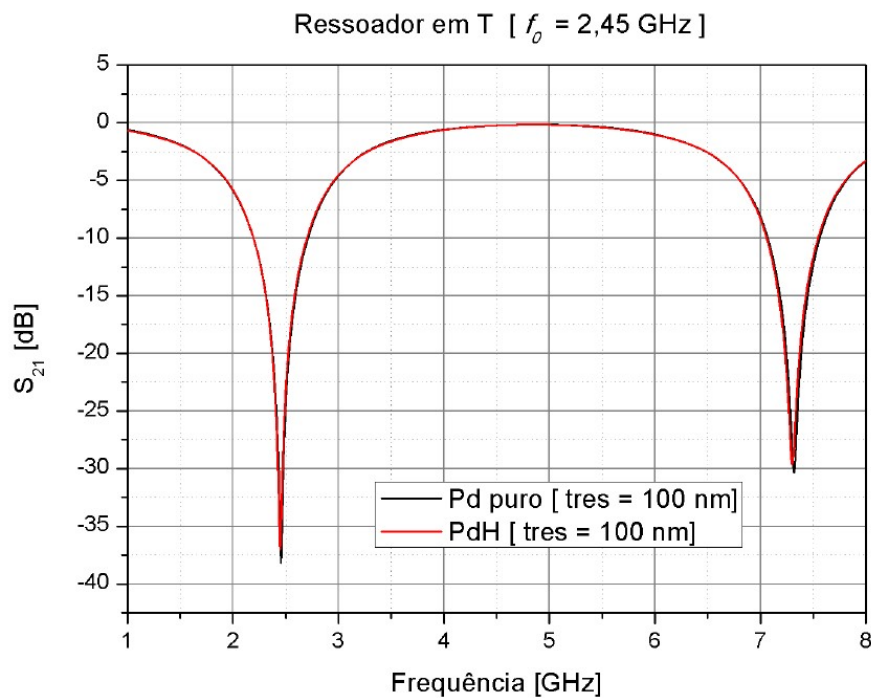
Com esses resultados, nota-se que o dispositivo com  $t_{res} = 100$  nm, se mostrou mais eficiente na detecção, conforme ilustra a Figura B.7.

Tabela B.2 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para  $t_{res} = 100$  e  $500$  nm,  $f_0 = 2,45$  GHz.

$t_{res}$ , nm	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
100	6,0	1,172
500	4,0	0,879

Fonte: O autor.

Figura B.7 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST).



### B.2.2 Ressorador em T ( $f_0 = 5,8$ GHz)

A Tabela B.3 apresenta os resultados do ressonador na frequência de ( $f_0 = 5,8$  GHz), para as espessuras ( $t_{res} = 100$  e  $500$  nm). O dispositivo apresenta os seguintes parâmetros gerais:

**Para  $t_{res} = 100$  e  $500$  nm:**

- **subx** = 40 mm;
- **suby** = 30 mm;

- **wline** = 1,07 mm;
- **wres** = 1,07 mm;
- **tline** = 1000 nm;
- **d** = 0 mm;
- **yres** = 7,41 mm.

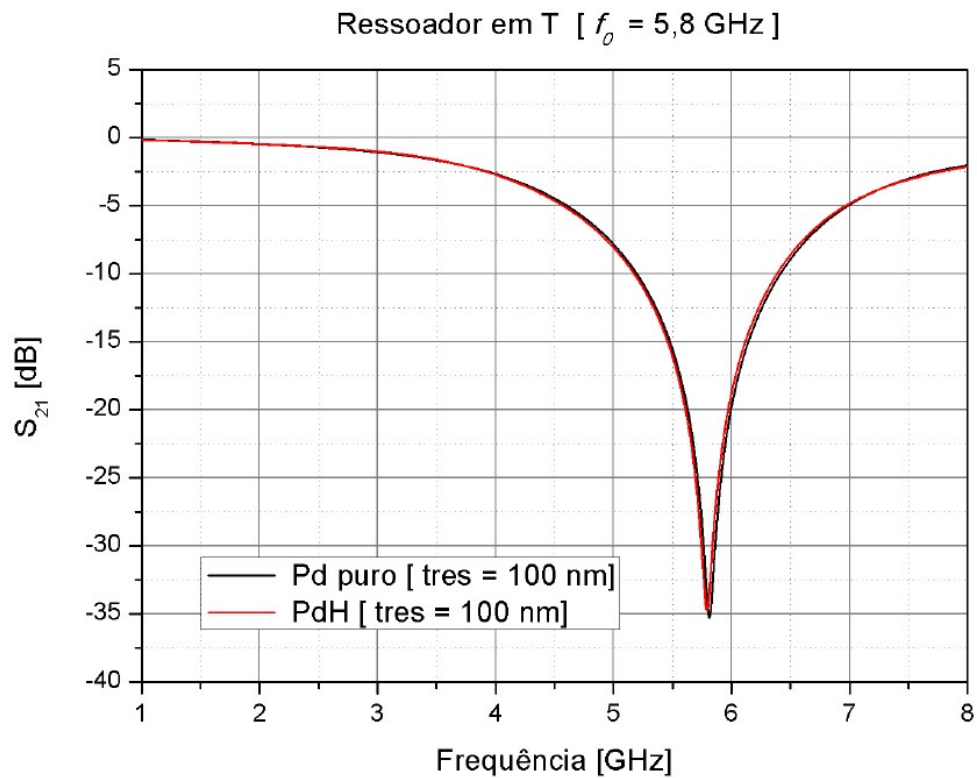
Tabela B.3 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para  $t_{res} = 100$  e 500,  $f_0 = 5,8$  GHz.

$t_{res}$ , nm	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
100	21,0	0,534
500	17,0	0,630

Fonte: O autor.

Com esses resultados, nota-se que o dispositivo com  $t_{res} = 100$  nm, se mostrou mais eficiente na detecção para uma  $f_0 = 5,8$  GHz, conforme ilustra a Figura B.8.

Figura B.8 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST).



Fonte: O autor.

### B.2.3 Ressorador quadrado de malha aberta ( $f_0 = 2,45$ GHz)

A Tabela B.4 apresenta os resultados do ressoador na frequência de ( $f_0 = 2,45$  GHz) para as espessuras ( $t_{res} = 100$  e  $500$  nm). O dispositivo apresenta os seguintes parâmetros gerais:

- **subx** = 50 mm;
- **suby** = 40 mm;
- **wline** = 1,07 mm;
- **wres** = 1,07 mm;
- **tline** = 1000 nm;
- **d** = 0,1 mm;
- **g** = 0,1 mm;
- **xres** = 10,2 mm;
- **yres** = 10,1 mm.

Tabela B.4 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para  $t_{res} = 100$  e  $500$ ,  $f_0 = 2,45$  GHz.

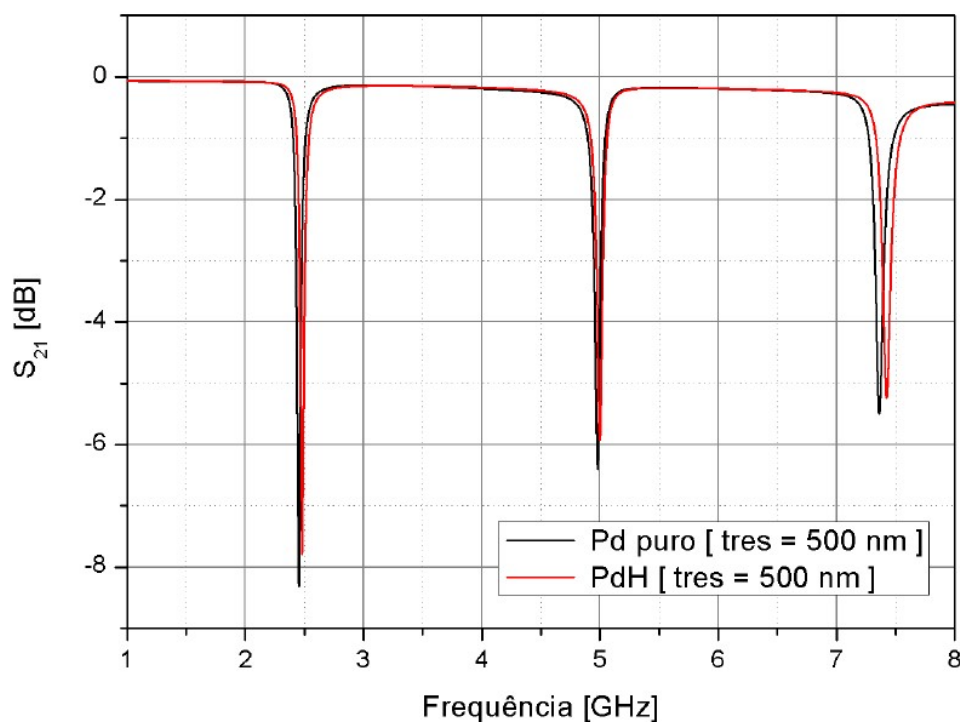
$t_{res}$ , nm	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
100	3,0	0,307
500	29,0	0,517

Fonte: O autor.

Com esses resultados, nota-se que o dispositivo com  $t_{res} = 500$  nm, se mostrou mais eficiente na detecção para uma  $f_0 = 2,45$  GHz, conforme ilustra a Figura B.9.



Figura B.9 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST).



Fonte: O autor.

#### B.2.4 Ressorador quadrado de malha aberta ( $f_0 = 5,8$ GHz)

A Tabela B.5 apresenta os resultados do ressoador na frequência de ( $f_0 = 5,8$  GHz), para as espessuras (tres = 100 e 500 nm). O dispositivo apresenta os seguintes parâmetros gerais:

- **subx** = 35 mm;
- **suby** = 35 mm;
- **wline** = 1,07 mm;
- **wres** = 0,5 mm;
- **tline** = 1000 nm;
- **d** = 0,12 mm;
- **g** = 0,3 mm;
- **xres** = 4,42 mm;
- **yres** = 4,75 mm.

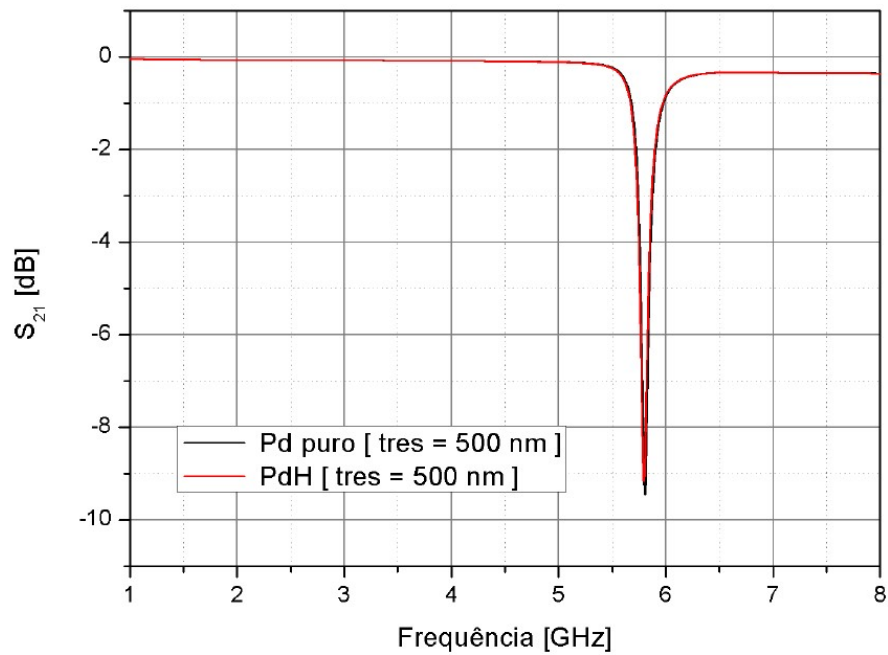
Tabela B.5 Resultados para análise de detecção de hidrogênio, para  $t_{res} = 100$  e  $500$  nm,  $f_0 = 5,8$  GHz.

$t_{res}$ , nm	$\Delta f$ , MHz	$\Delta S$ , dB
100	8	0,230
500	10,0	0,274

Fonte: O autor.

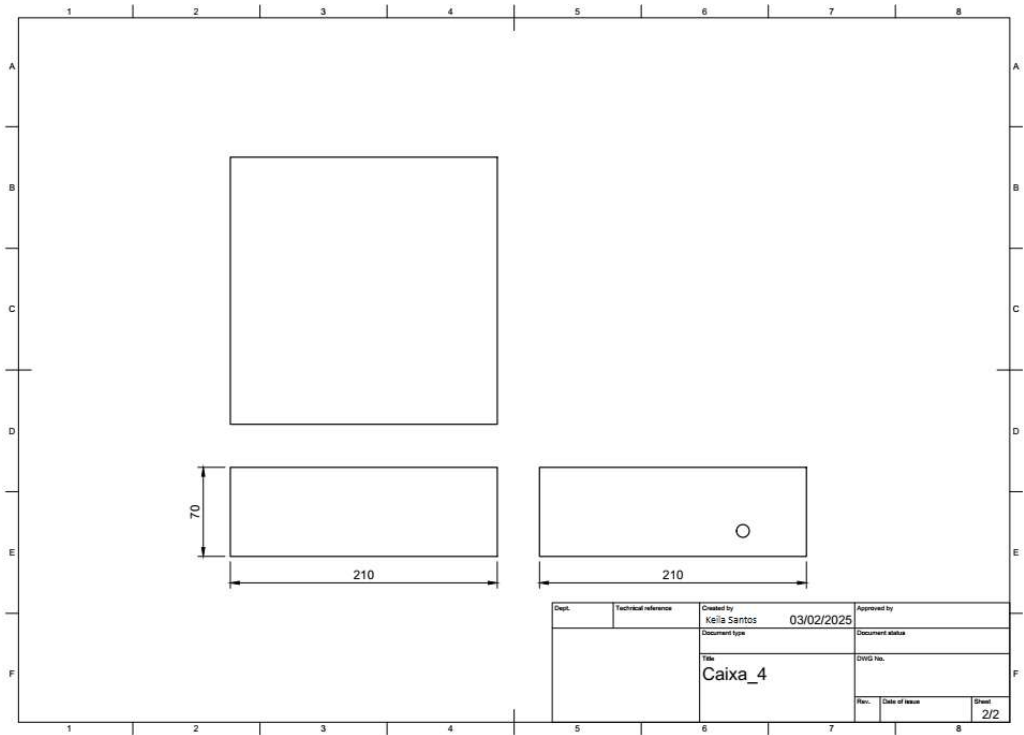
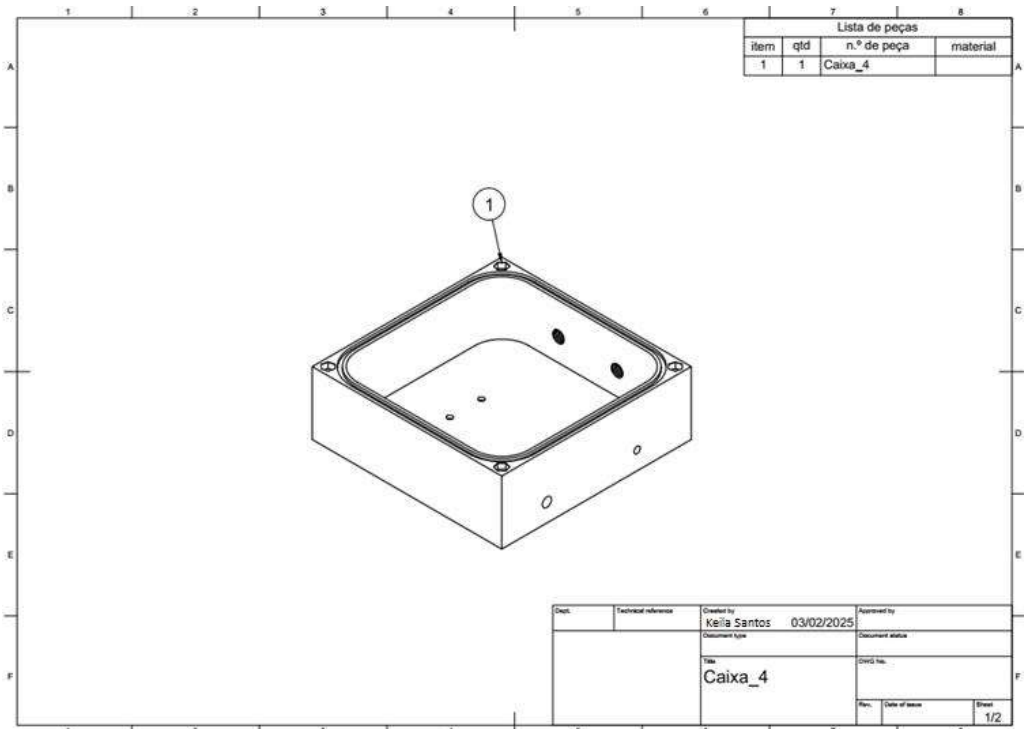
Com esses resultados, nota-se que o dispositivo com  $t_{res} = 500$  nm, se mostrou mais eficiente na detecção para uma  $f_0 = 5,8$  GHz, conforme ilustra a Figura B.10.

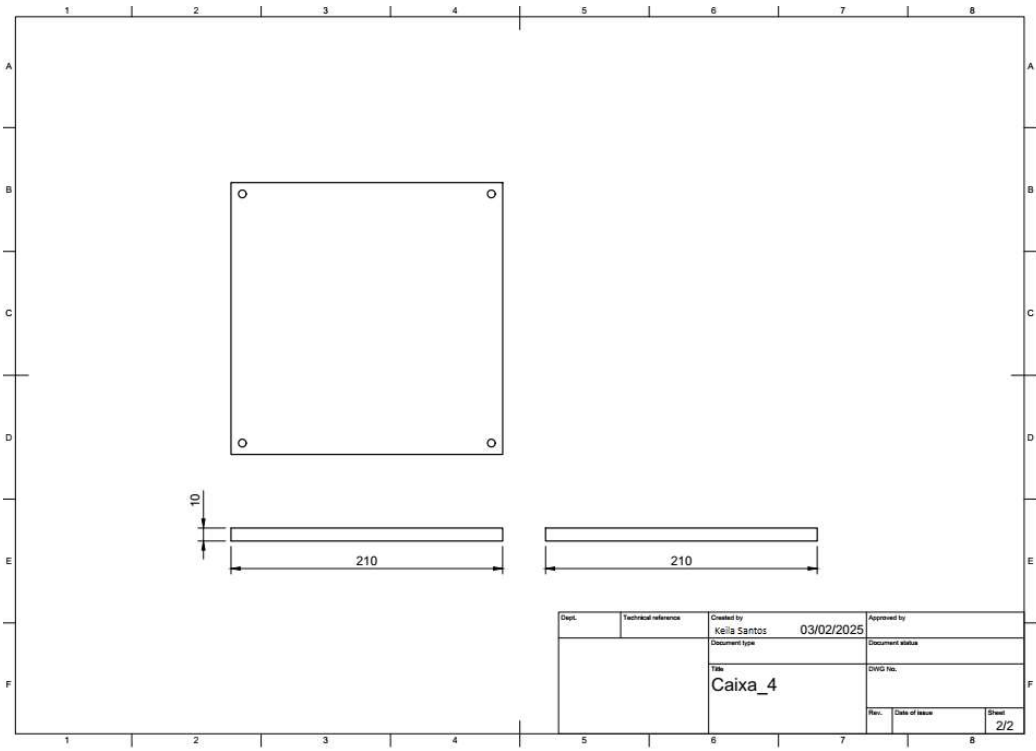
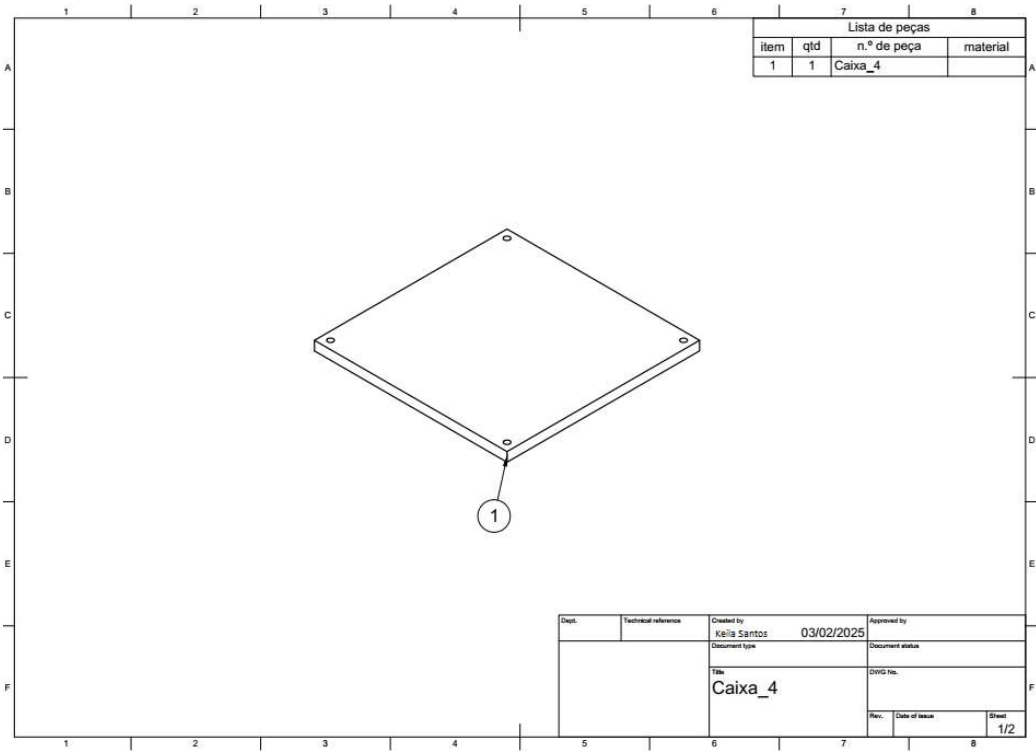
Figura B.10 Perda por inserção do dispositivo, exposto ao nitrogênio e hidrogênio (simulado no CST).



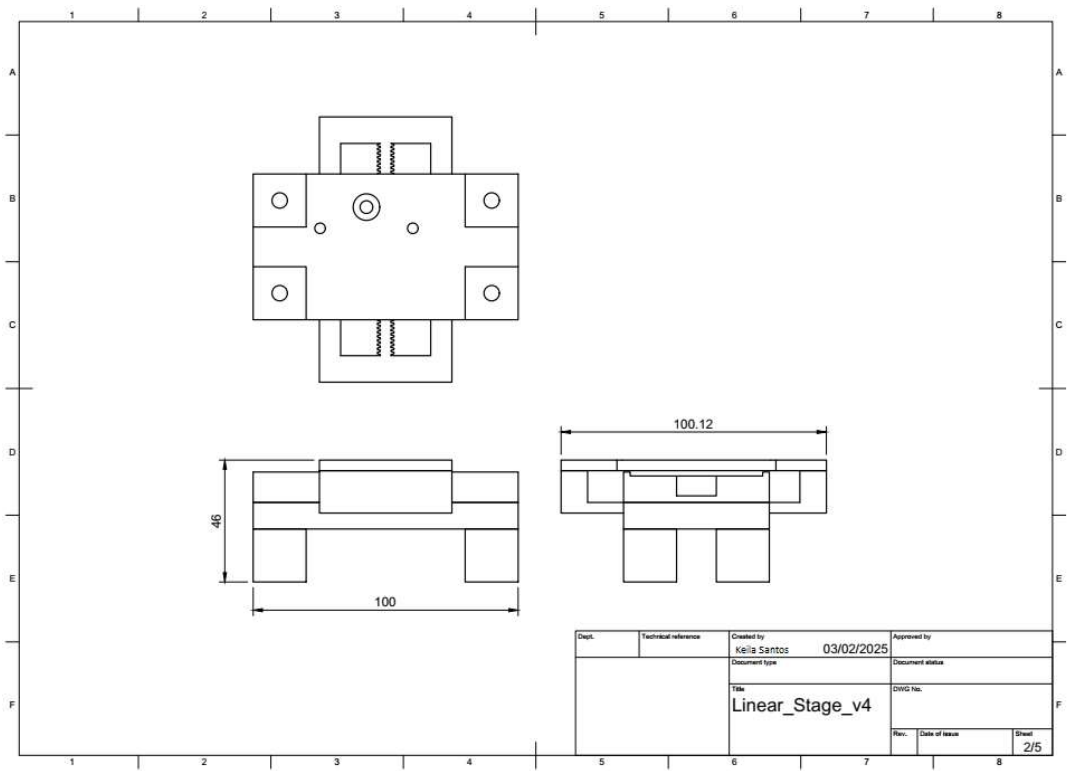
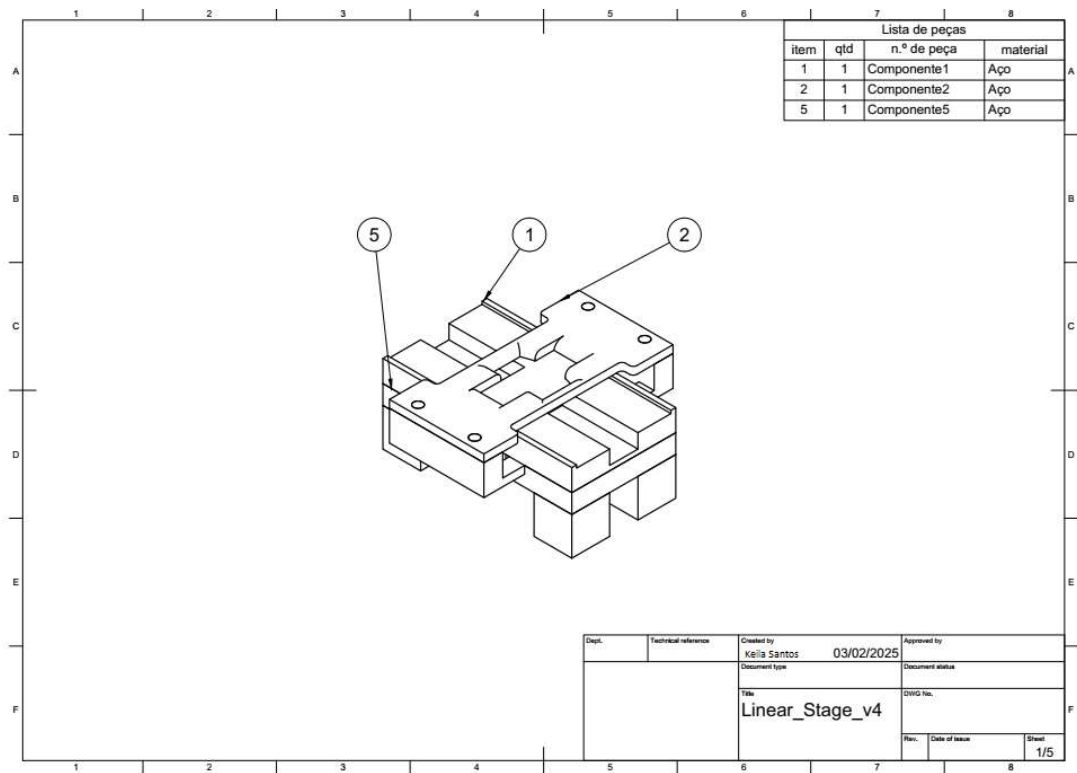
Fonte: O autor.

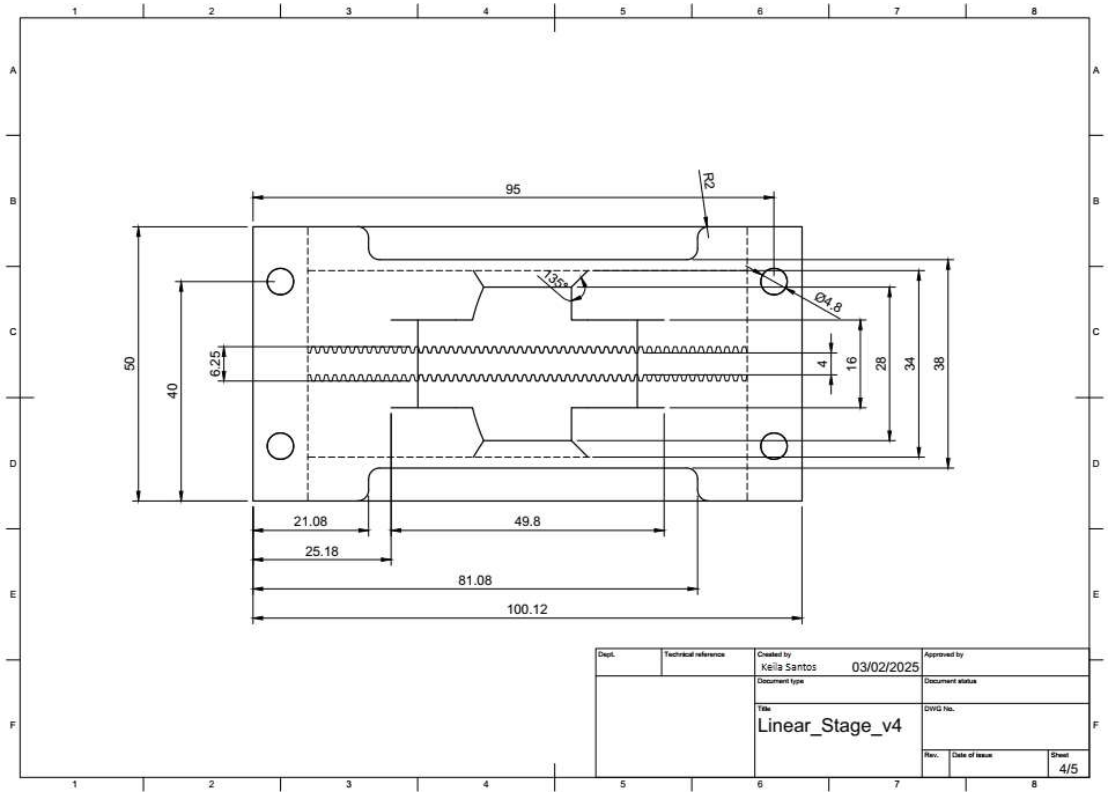
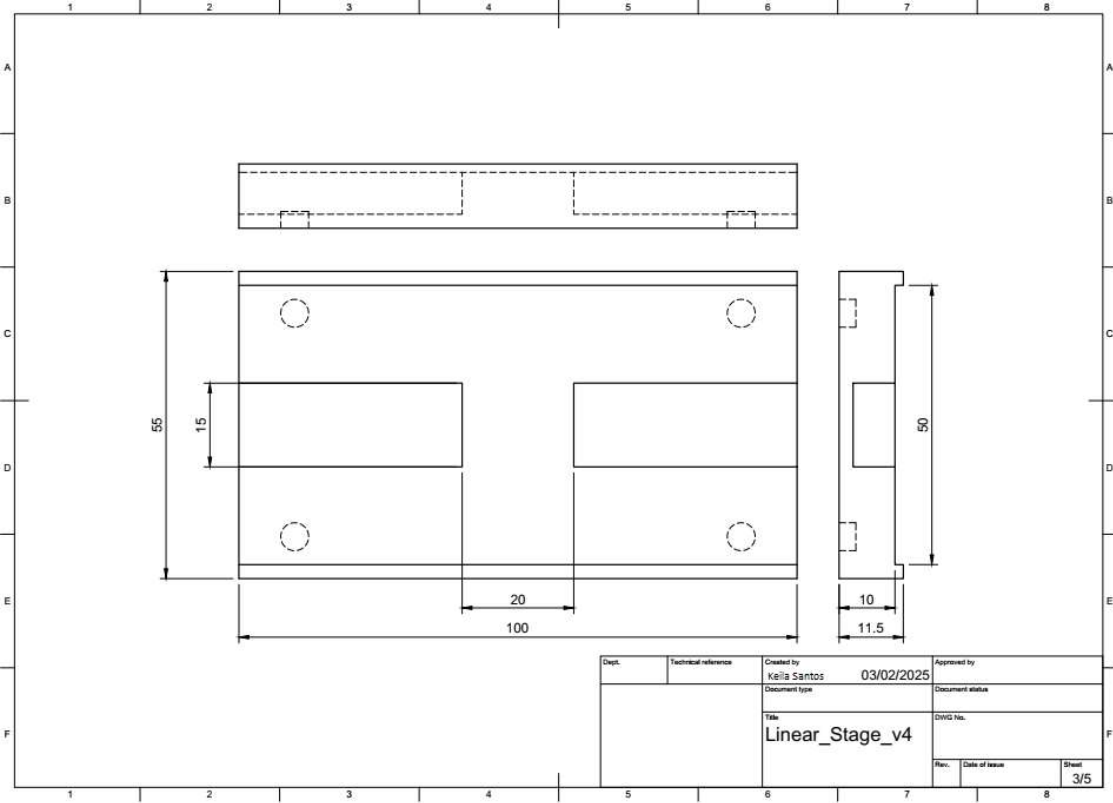
APÊNDICE C – VISTAS E COTAS DO MÓDULO DE VEDAÇÃO DE GASES

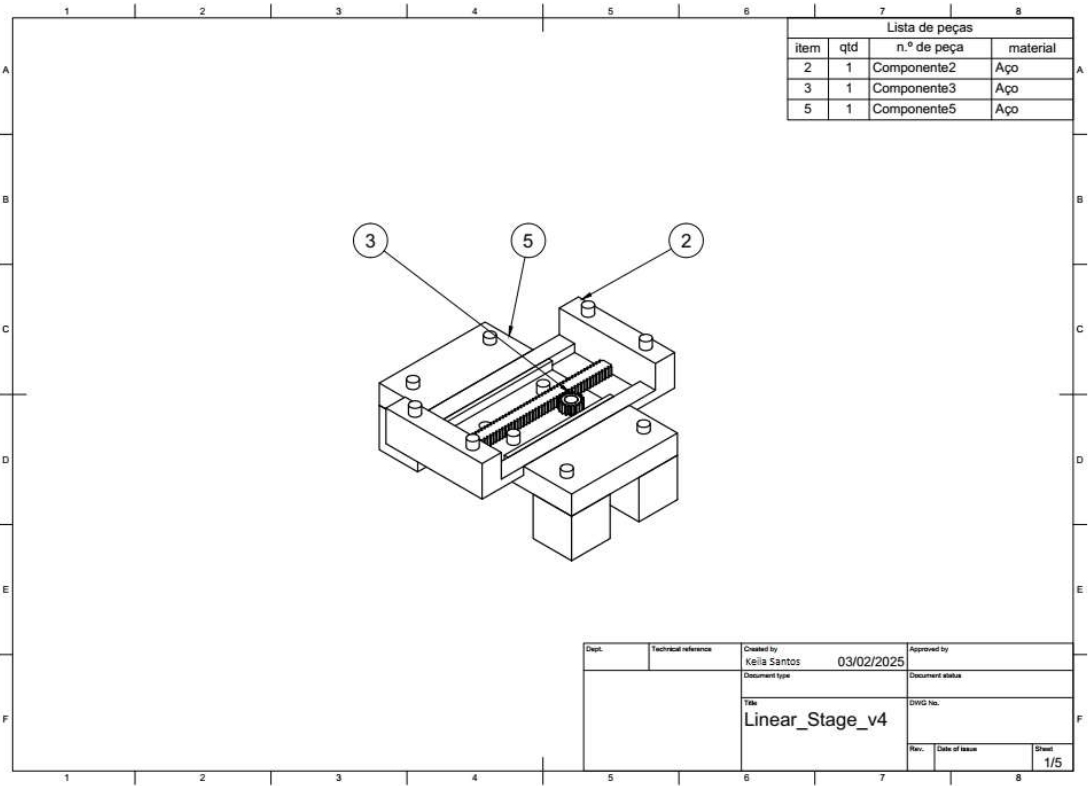
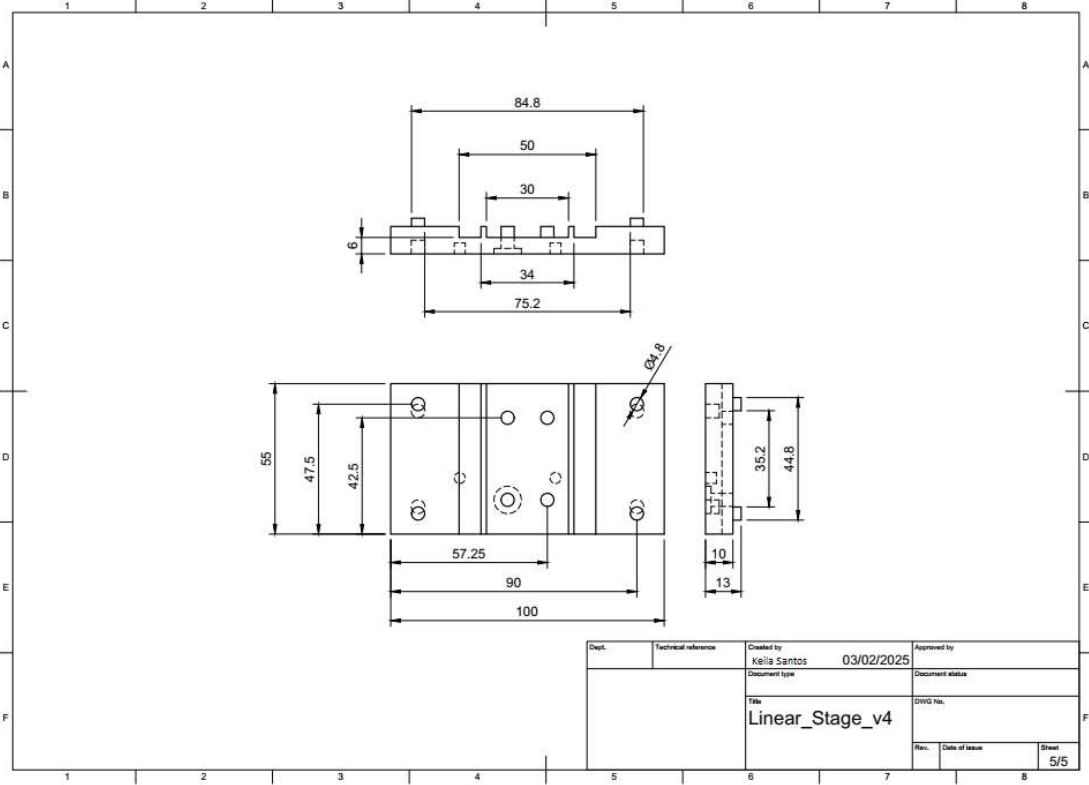


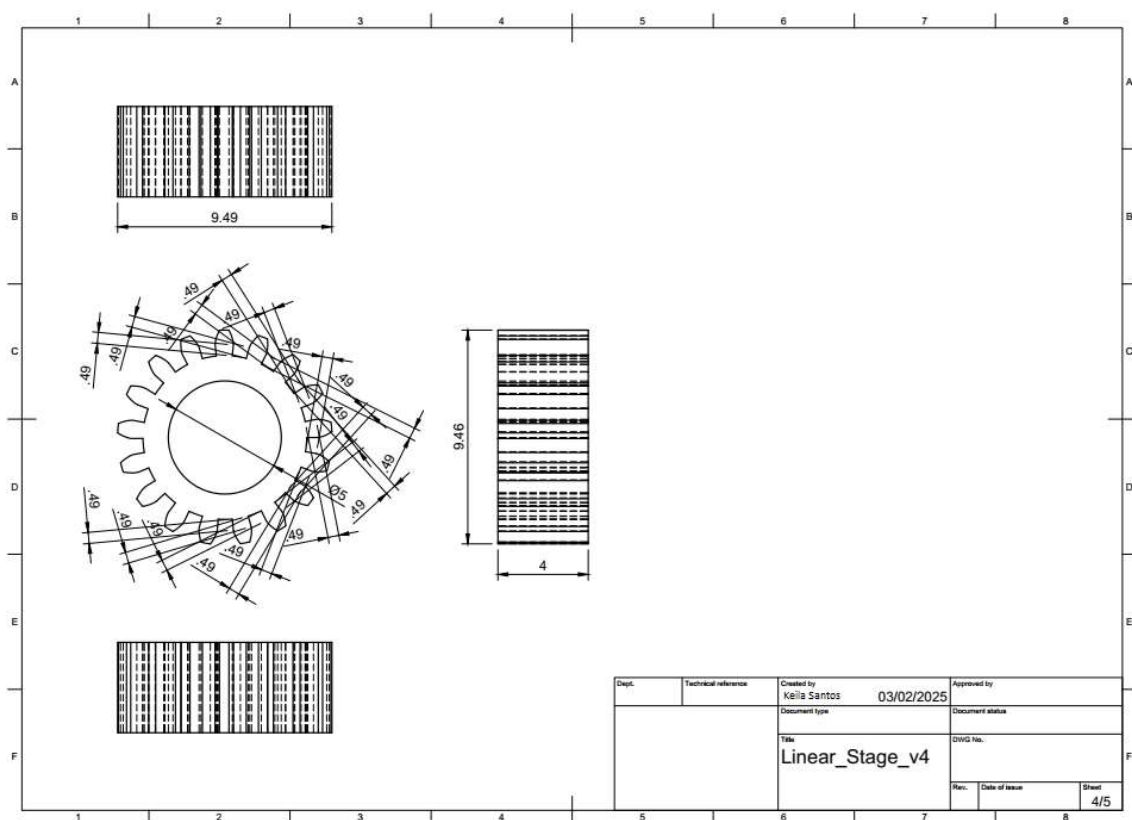


APÊNDICE D – VISTAS E COTAS DO MÓDULO DE MOVIMENTO











## APÊNDICE E – CÓDIGO DO ARDUINO

```
#include <Stepper.h>
```

```
const int passosPorRev = 2048; // Número de passos por revolução do motor
const int motorPin1 = 8;      // Define os pinos de controle do motor
const int motorPin2 = 9;
const int motorPin3 = 10;
const int motorPin4 = 11;
const float mmPorPasso = 0.013; // Cada passo corresponde a 0.0138889 mm
```

```
Stepper meuMotor(passosPorRev, motorPin1, motorPin3, motorPin2,
motorPin4); // Inicializa o objeto do motor
```

```
void setup() {
    meuMotor.setSpeed(5); // Define a velocidade do motor em RPM
    Serial.begin(9600); // Inicializa a comunicação serial
}
```

```
void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        float distanciaMm = Serial.parseFloat(); // Lê a distância em milímetros da
        porta serial
    }
}
```

```
int direcao = 1; // 1 para frente, -1 para trás
```

```
if (distanciaMm < 0) {
    direcao = -1; // Se a distância é negativa, muda a direção para trás
    distanciaMm = -distanciaMm; // Transforma a distância em positiva
}
```

```
int passosDesejados = distanciaMm / mmPorPasso; // Calcula o número de
passos necessários
```

```
Serial.print("Movendo ");  
Serial.print(distanciaMm);  
Serial.print(" mm (");  
Serial.print(passosDesejados);  
Serial.println(" passos)...");  
  
for (int i = 0; i < passosDesejados; i++) {  
    meuMotor.step(direcao); // Move o motor na direção especificada  
    delay(5);              // Delay para controlar a velocidade dos passos  
}  
  
Serial.println("Movimento concluído.");  
}  
}
```

## APÊNDICE F – CÁLCULO DO EFEITO PELICULAR

```

clc
clear
% Efeito pelicular variando com a frequência.
%variáveis :
% miCu= permeabilidade do cobre (F/m)
% condCu = condutividade do cobre (S/m)
% f = frequência em (Hz)
% SCu = profundidade pelicular
% n = fator exponencial para frequência
%variáveis paládio:
% mipd = permeabilidade do paládio
% condPd = condutividade do paládio
% SPd = profundidade pelicular do paládio
%inicialização das variáveis do Cobre
miCu = 4e-7*pi;
condCu= 5.8e7;
n=9;
%cálculos para Frequência
for i= 1:1:5;
    f(i)= i*10^n;
end
f; %escreve os valores de F
%cálculo da profundidade pelicular do Cobre
SCu= 1./sqrt(pi*f*miCu*condCu);
%inicialização das variáveis do Paládio
miPd = 4e-7*pi;
condPd= 9.3e6;
%cálculo da profundidade pelicular do Paládio
SPd = 1./sqrt(pi*f*miPd*condPd)
%gráfico da profundidade pelicular do Cu x Pd
figure(1)
plot(f,SCu,'k-',f,SPd,'b-.')
title('Profundidade pelicular do Paládio e do Cobre')
legend('Cobre','Paládio')
xlabel('Frequência [GHz]')
ylabel('Profundidade pelicular [µm]')
grid on

```

# ANEXO A – PROJETO ORIGINAL DA MICROFITA RECONFIGURÁVEL

Rascunho feito pelo professor Eduardo Fontana, Ph.D. (*in memoriam*).

