



Maura Lúcia Rodríguez Alexandre

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE PARA
GRÃOS DE FEIJÃO UTILIZANDO DGS BASEADA NA
GEOMETRIA MATRIOSKA**

**João Pessoa
2026**

Maura Lúcia Rodríguez Alexandre

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE PARA
GRÃOS DE FEIJÃO UTILIZANDO DGS BASEADA NA
GEOMETRIA MATRIOSKA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto

Coorientador: Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

João Pessoa
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

A382d	Alexandre, Maura Lúcia Rodríguez Desenvolvimento de um sensor de umidade para grãos de feijão utilizando DGS baseada na geometria matrioska. / Maura Lúcia Rodríguez Alexandre. – 2026. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica– PPGEE. Orientador: Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto Dr. Coorientador: Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho 1. Geometria Matrioska. 2. Estrutura de Defeito no Plano Terra (DGS). 3. Sensor de Umidade. 4. Teor de Umidade de Grãos. 5. Grãos de Feijão. I. Título. CDU 621.317.39
-------	---

Bibliotecária responsável Ivanise Andrade Melo de Almeida – CRB15/96

MAURA LÚCIA RODRÍGUEZ ALEXANDRE

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE PARA GRÃOS DE FEIJÃO UTILIZANDO DGS
BASEADA NA GEOMETRIA MATORSKA**

DISSERTAÇÃO de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), linha de pesquisa “ELETROMAGNETISMO APLICADO”, em cumprimento aos requisitos necessários para a obtenção do Título de **MESTRE em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 08/06/2026.

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. ALFRÊDO GOMES NETO

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Orientador Interno

Prof. Dr. JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Coorientador Externo

Profa. Dra. ANDRÉCIA PEREIRA DA COSTA

Universidade Federal do Pará (UFPA)

Examinadora Externa

ADAILDO GOMES DASSUNÇÃO JÚNIOR

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador Interno

Prof. Dr. JEFFERSON COSTA E SILVA

Instituto Federal da Paraíba (IFPB)

Examinador Interno

Documento assinado eletronicamente por:

- **Alfredo Gomes Neto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 08/06/2026 18:34:20.
- **Jefferson Costa e Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/06/2026 12:31:39.
- **Adaildo Gomes D Assuncao Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/06/2026 12:34:50.
- **ANDRÉCIA PEREIRA DA COSTA**, PRESTADOR DE SERVIÇO, em 09/06/2026 12:47:18.
- **Joabson Nogueira de Carvalho**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 11/06/2026 06:31:54.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/05/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 880311
Verificador: ed149b9379
Código de Autenticação:



AGRADECIMENTOS

Este trabalho é, antes de tudo, um testemunho de fé, amor e gratidão, e dedico-o: À minha filha, Rita Letícia, que, mesmo ainda no ventre, já se revela a minha maior força e a realização que transcende os melhores sonhos. Que você seja a materialização da minha persistência.

À memória de meus amados avós: José Francisco, Maria Alexandre e Dona Rita. E a minha mãe: Maria do Rosário. Que me inspiraram com seu legado e valores.

A Deus e à Virgem Maria, meu amparo e sustento inabalável em cada passo desta jornada.

Ao meu pai, Carlos Túrcios, por ser a minha inspiração em valores morais e a bússola para minha carreira profissional. À minha madrastra, Carminha, pela amizade, por ser uma companheira de oração e por me acolher com genuíno amor filial.

Ao meu esposo, Allison Cassimiro, por ser o meu pilar de sustentação, por compartilhar noites de estudo e por todo o apoio incondicional. Meu companheiro e amigo fiel nas alegrias e, principalmente, nas adversidades, cuja dedicação e carinho são o meu maior conforto.

Aos meus sogros, Dona Lúcia, pela amizade e por exercer um papel materno essencial em minha vida. Senhor Anacleto, pelo respeito e cuidado constantes. Aos meus queridos irmãos e cunhados, pelo apoio e carinho fraterno.

A todo o Grupo GTEMA do IFPB. Em especial, ao meu orientador, Professor Alfredo Gomes, por me nortear com excelência e dedicação ao longo da pesquisa. A admiração profissional que já existia desde os tempos de aluna apenas se aprofundou ao me tornar sua orientanda, e o senhor é uma inspiração constante. Ao meu orientador, Professor Joabson Nogueira, por seu inestimável apoio e dedicação.

Agradeço aos professores Jefferson e Adaildo que aceitaram fazer parte da banca examinadora.

Aos demais professores e colegas que compartilharam e enriqueceram esta caminhada no Mestrado.

RESUMO

Com o objetivo de monitorar o teor de umidade de grãos de feijão, este trabalho apresenta um sensor de RF (radiofrequência), baseado na variação da frequência de ressonância de uma DGS-matryoshka. As equações de projeto são descritas, e um protótipo foi fabricado e utilizado para medir o teor de umidade de 14 amostras de grãos de feijão. A preparação das amostras e o procedimento de medição são detalhados. Os resultados alcançados são discutidos, obtendo-se uma taxa de $-10,44 \text{ MHz}/\Delta U$. Ao utilizar um VNA (Analisador de Redes Vetorial) portátil de baixo custo, o sensor proposto torna-se adequado tanto para aplicações em laboratório quanto em campo. Embora seja necessária uma análise estatística mais rigorosa, incluindo um maior número de amostras, os resultados iniciais são promissores e sustentam a continuação desta pesquisa.

Palavras-chave: *grãos de feijão; teor de umidade; sensor; matryoska.*

ABSTRACT

Aiming to monitor the moisture content of bean grains, this paper presents an RF sensor, based on the variation of the resonance frequency of a DGS-matryoshka. The design equations are described, and a prototype was manufactured and used to measure the moisture content of fourteen bean grain samples. Sample preparation and measurement procedure are detailed. The results achieved are discussed, obtaining a rate of $-10.44 \text{ MHz}/\Delta U$. By utilizing a low-cost portable VNA, the proposed sensor is suitable for both laboratory and field applications. While a more rigorous statistical analysis is necessary, including a larger number of samples, the initial results are promising and support the continuation of this research.

Keywords: bean grains; moisture content; sensor; matryoshka.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de estrutura DGS – geometria halteres, [17].....	18
Figura 2 – Sensor DGS com geometria halteres, [17].....	19
Figura 3 – Geometria matrioska, [17].....	19
Figura 4 – Sensor de umidade para grãos de feijão utilizando DGS baseada na geometria matrioska.....	20
Figura 5 – DGS de única célula. [18].....	22
Figura 6 – DGS de múltiplas células. [19].....	22
Figura 7 – DGS em guia de ondas coplanares. [29].....	23
Figura 8 – DGS em linhas acopladas. [30].....	23
Figura 9 – Unidade DGS em forma de haltere (<i>dumbell</i>) [27]	24
Figura 10 – Parâmetros S da DGS em forma de haltere (<i>dumbell</i>) [27].....	24
Figura 11 – Diferentes formas de halteres, [28].....	25
Figura 12 – Circuito equivalente da DGS halteres, [20].....	26
Figura 14 – Bonecas russas matrioska [31]	27
Figura 15 – Geometria matrioska passo a passo [18]	28
Figura 16 – Dimensões da geometria matrioska, [16].....	28
Figura 17 – Sensor DGS com geometria matrioska, [33].....	29
Figura 18 –Dimensões do sensor da DGS com geometria matrioska, [33].....	30
Figura 19 – Dimensões do sensor de umidade DGS com geometria matrioska (Vista superior).....	31
Figura 20 – Dimensões do sensor de umidade DGS com geometria matrioska (Vista inferior).....	32
Figura 21 – Sensor DGS com geometria matrioska [33].....	33
Figura 22 – Balança eletrônica, modelo SF-400 [34].....	35
Figura 23 – LiteVNA [35].....	36
Figura 24 – Ilustração do sensor posicionado com o lado da DGS em paralelo à embalagem.....	36
Figura 25 – Ilustração Esquema de hidratação, secagem, pesagem e medição da resposta em frequência para os grãos de feijão.....	37
Figura 26 – <i>Layout</i> de medição com o sensor de umidade dos grãos de feijão baseado na geometria matrioska.....	38
Figura 27 – Gráfico das frequências de ressonância (f_{res}) medida e simulada em vazio do sensor de umidade de grãos de feijão baseado em geometria matrioska.....	39
Figura 28 – Gráfico da variação da massa normalizada dos grãos de feijão em função do tempo (etapa 1).....	40
Figura 29 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra I.....	40
Figura 30 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra II.....	41

Figura 31 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra III.....	41
Figura 32 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra IV.....	42
Figura 33 – Gráfico da variação da frequência de ressonância e dos grãos de feijão em função do tempo...	43
Figura 34 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra I.....	44
Figura 35 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra II.....	45
Figura 36 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra III.....	46
Figura 37 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra IV.....	47
Figura 38 – Gráfico da média da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para as Amostras I, II, III e IV.....	48
Figura 39 – Curva da frequência de ressonância média e sua interpolação linear.....	48
Figura 40 – Gráfico da variação da massa normalizada dos grãos de feijão em função do tempo (etapa2).....	50
.....	
Figura 41 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra I.....	51
Figura 42 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra II.....	51
Figura 43 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra III.....	52
Figura 44 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra IV.....	52
Figura 45 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra V.....	53
Figura 46 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra VI.....	53
Figura 47 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra VII.....	54
Figura 48 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra VIII.....	54
Figura 49 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra IX.....	55
Figura 50 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra X.....	55
Figura 51 – Gráfico da variação da frequência de ressonância e dos grãos de feijão em função do tempo...	57
Figura 52 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra I.....	57
Figura 53 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra II.....	58
Figura 54 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra III.	59
Figura 55 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra IV.....	59
Figura 56 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra V.....	60

Figura 57 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra VI.....	61
Figura 58 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra VII... ..	61
Figura 59 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra VIII.....	62
Figura 60 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra IX.....	63
Figura 61 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para a Amostra X.....	63
Figura 62 – Gráfico da média da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para as Amostras I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X.....	64
Figura 63 – Curva de frequência de ressonância média e sua interpolação linear.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela I – Dimensões da geometria matrioska.....	32
Tabela II – Classificação das amostras – Primeira Etapa.....	34
Tabela III – Classificação das amostras – Segunda Etapa.....	34
Tabela IV – Valores das frequências de ressonância (f_{res}) medido e simulado em vazio.....	39
Tabela V – Variação de Massa.....	40
Tabela VI – Variação de massa normalizada.....	43
Tabela VII – Variação de frequência de ressonância.....	44
Tabela VIII – Valores de massa de água frequência de ressonância (Amostra I).....	45
Tabela IX – Valores de massa de água frequência de ressonância (Amostra II).....	46
Tabela X – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra III).....	47
Tabela XI – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra IV).....	48
Tabela XII – Variação de Massa das amostras I a V.....	49
Tabela XIII – Variação de Massa das amostras VI a X	49
Tabela XIV – Variação de Massa Normalizada das amostras I a V.....	50
Tabela XV – Variação de Massa Normalizada das amostras VI a X.....	50
Tabela XVI – Variação de frequência de ressonância das amostras I a V.....	56
Tabela XVII – Variação de frequência de ressonância das amostras VI a X	56
Tabela XVIII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra I).....	58
Tabela XIX – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra II).....	58
Tabela XX – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra III).....	59
Tabela XXI – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra IV).....	60
Tabela XXII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra V).....	61
Tabela XXIII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra VI).....	62
Tabela XXIV – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra VII).....	62
Tabela XXV – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra VIII).....	63
Tabela XXVI – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra IX).....	64
Tabela XXVII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra X).....	65
Tabela XXVIII – Exemplo do procedimento adotado considerando a totalidade dos valores medidos.....	65

LISTA DE SIGLAS

ANSYS	<i>Ansys High Frequency Structure Simulator</i> (Simulador de Estrutura de
HFSS	Alta Frequência da Ansys)
CNA	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
Cepea	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
DGS	<i>Defected Ground Structure</i> , (Estrutura com Defeito no Plano Terra)
dB	Decibel
EM	Eletromagnético
FR-4	Material laminado epóxi reforçado com fibra de vidro
f_{res}	Frequência de Ressonância
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
GHz	Giga Hertz
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet das Coisas
MUT	<i>Material Under Test</i> (Material Sob Teste)
MHz	Mega Hertz
pH	Potencial hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
RF	Rádio frequência
SMA	<i>SubMiniature version A</i>
S11, S21	Coeficiente de Reflexão e Coeficiente de Transmissão
ΔU	Incremento de umidade
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> , (Analisador de Redes Vetorial)
5G	5ª geração de tecnologia de redes móveis

LISTA DE SÍMBOLOS

w	Largura da linha de microfita
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa (Constante dielétrica)
h	Espessura do substrato dielétrico
C	Capacitância
L	Indutância
LC	Circuito indutor-capacitor
RLC	Circuito resistor-indutor-capacitor
R	Resistência
X_{LC}	Reatância do circuito paralelo capacitor-indutor
Z_0	Impedância característica da linha de transmissão
L_{eff}	Comprimento efetivo do anel matrioska
w_{ma}	Espessura da linha do anel matrioska
w_{mai}	Comprimento do lado do i -ésimo anel concêntrico
w_{xmal}	Comprimento ao longo da direção x do anel concêntrico 1
w_{ymal}	Comprimento ao longo da direção y do anel concêntrico 1
ϵ_{reff}	Permissividade elétrica relativa efetiva (Constante dielétrica efetiva)
$f_{res-calc}$	Frequência de ressonância calculada
$Port1$	Porta 1
$Port2$	Porta 2
h_t	Espessura do MUT
$\tan(\delta)$	Tangente de perdas do dielétrico
C_s	Comprimento do sensor DGS matrioska
L_s	Largura do sensor DGS matrioska
θ	Ângulo de reflexão
T	Espessura do cobre

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	CIRCUITOS EQUIVALENTES DE UMA DGS.....	24
2.2	GEOMETRIA MATRIOSKA	27
2.3	SENSOR DGS COM GEOMETRIA MATRIOSKA.....	29
3.	CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DO SENSOR	31
3.1	PROJETO DO SENSOR DGS COM GEOMETRIA MATRIOSKA.....	31
3.2	FABRICAÇÃO DO SENSOR DGS COM GEOMETRIA MATRIOSKA	33
4.	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS, PROCESSO EXPERIMENTAL, DADOS COLETADOS E RESULTADO DAS MEDIÇÕES	34
4.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	34
4.2	ANALISADOR DE REDE VETORIAL LITEVNA	35
4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	36
4.4	DADOS COLETADOS E RESULTADOS DAS MEDIÇÕES	38
	4.4.1 PRIMEIRA ETAPA.....	38
	4.4.2 SEGUNDA ETAPA.....	49
5	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia na indústria de alimentos é uma área multidisciplinar que abrange diversas áreas do conhecimento, como a química, física, biologia, engenharia e tecnologia da informação, entre outras. O propósito principal é assegurar a qualidade dos alimentos desde a produção até o consumo final, utilizando ferramentas como o controle de processos, monitoramento de matérias-primas, supervisão de equipamentos etc. Ainda, a indústria alimentícia se empenha em desenvolver novos produtos e processos que supram as demandas do mercado e da sociedade, a exemplo, alimentos mais saudáveis e sustentáveis.

Nos últimos anos, a indústria de alimentos tem investido em inovações tecnológicas para melhorar a produção e a qualidade dos produtos. Entre essas inovações estão o uso de sensores e dispositivos para monitoramento de parâmetros como umidade, temperatura e pH, a aplicação de nanotecnologia para melhorar a textura e a estabilidade dos alimentos, e o uso de inteligência artificial e *big data* para otimizar a produção e logística. O advento do 5G e o desenvolvimento de dispositivos IoT (*Internet of Things*) de baixo consumo de energia possibilitam a conexão de milhões de sensores e equipamentos a sistemas de produção informatizados, otimizando ainda mais os processos [1], [2].

Um setor importante dentro da indústria alimentícia é o de grãos, onde a determinação precisa da umidade é essencial para garantir a qualidade do produto final. A umidade é um dos principais fatores que influenciam a estabilidade, durabilidade, capacidade de armazenamento e processamento dos grãos. Um teor inadequado de umidade pode acarretar diversos problemas, como [3]-[5]:

- Deterioração e perda de qualidade: a umidade excessiva favorece o crescimento de fungos, bactérias e insetos, causando deterioração, mofo e aquecimento dos grãos, além de endurecimento, rachaduras e germinação prematura, o que diminui o valor comercial.
- Armazenamento inadequado: grãos com teores de umidade superiores aos níveis recomendados apresentam maior susceptibilidade a problemas de conservação, como aglomeração, incremento da atividade de insetos e risco de combustão espontânea, o que pode ocasionar perdas econômicas substanciais.
- Processamento ineficiente: a umidade inadequada pode comprometer os processos industriais, incluindo moagem e extração de óleos. Grãos

excessivamente secos apresentam dificuldades de processamento, resultando em menor rendimento, enquanto grãos com umidade excessiva podem induzir obstruções e falhas nos equipamentos.

Portanto, a medição precisa da umidade de grãos e sementes é essencial para o armazenamento, processamento e comercialização. Existem diversas técnicas para medir a umidade, incluindo [6]-[9]:

- Método de secagem em estufa: uma técnica tradicional que envolve pesar uma amostra, secá-la a uma temperatura controlada e calcular a umidade com base na perda de peso. Embora confiável, é um método demorado e requer equipamentos especializados.
- Medidores portáteis de umidade: dispositivos eletrônicos que permitem medições rápidas e não destrutivas, utilizando princípios como capacitância, resistência elétrica ou micro-ondas. São fáceis de usar e fornecem resultados imediatos.
- Sistemas de medição em linha: integrados às linhas de produção, fornecem medições contínuas da umidade durante o processamento, utilizando sensores como micro-ondas ou infravermelho para obter leituras em tempo real.

O agronegócio representa uma relevante parcela do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, cerca de 29,4% no PIB total do país em 2025, segundo a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) e o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (CEAPE), [10].

O cultivo de *Phaseolus vulgaris* L. (Feijão-comum) apresenta notável importância no agronegócio brasileiro, ocupando o quarto lugar em termos de área cultivada entre os grãos. Essa leguminosa, de elevada relevância socioeconômica, constitui um pilar da segurança alimentar nacional, sendo a principal fonte de proteína vegetal para a população. Em escala global, Myanmar e Índia lideram a produção de feijão, enquanto o Brasil ocupa a terceira posição, com uma produção anual estimada em 3 milhões de toneladas, distribuída em três safras anuais, abrange desde sistemas de produção de subsistência até sistemas altamente tecnológicos, garantindo o abastecimento do mercado interno. Contudo, a produção nacional,

em geral, não supre a demanda interna, exigindo a importação de grãos de países latino-americanos e norte-americanos [11], [12].

A colheita do feijão é sazonal, variando conforme a região de cultivo, enquanto o consumo é contínuo ao longo do ano. A manutenção da qualidade dos grãos durante o armazenamento prolongado demanda técnicas eficientes de secagem e acondicionamento. A crescente exigência do consumidor torna as alterações na qualidade dos grãos, como endurecimento e alterações cromáticas, fatores determinantes na escolha do produto. A umidade dos grãos e do ambiente, a temperatura do armazenamento, bem como a qualidade inicial da matéria-prima, são os principais fatores que influenciam a deterioração dos grãos durante o armazenamento. O controle rigoroso desses parâmetros é crucial para a gestão da taxa respiratória dos grãos, processo biológico que resulta na perda de massa, produção de calor e modificações na composição química [11], [12].

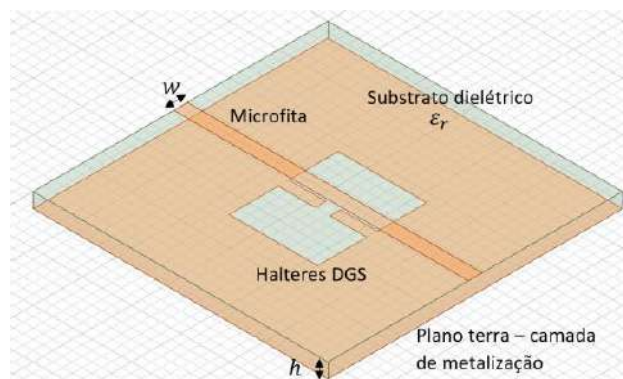
Comumente, os grãos de feijão são colhidos com teores de umidade superiores aos limites ótimos para o armazenamento, influenciados predominantemente pelas condições climáticas da região de cultivo. A secagem pós-colheita é crucial para reduzir o teor de umidade dos grãos, mitigando o risco de desenvolvimento de microrganismos, a intensificação do metabolismo e a ocorrência de reações bioquímicas que comprometem a qualidade do produto. Entretanto, a capacidade operacional das unidades de armazenamento pode limitar a secagem eficiente de todo o volume de grãos colhido. A secagem é uma etapa fundamental na cadeia produtiva, sendo essencial para garantir a qualidade dos grãos durante o armazenamento. A secagem inadequada pode resultar em danos irreversíveis ao produto, comprometendo suas características físico-químicas e biológicas. A secagem eficiente dos grãos depende do controle de diversos parâmetros, incluindo a umidade inicial e final dos grãos, a temperatura e umidade relativa do ar de secagem, a taxa de secagem e o tempo de exposição ao fluxo de ar [12].

Nos anos 1980 iniciou-se o conceito de agricultura de precisão, sendo este, uma estratégia de gestão que permite tomar decisões a fim de melhorar a produtividade agrícola, assim como tornar essa atividade mais sustentável [13]. A otimização da gestão agrícola demanda a monitoração precisa de diversos parâmetros, como temperatura, umidade e nutrição das plantas. Da mesma forma, a otimização da qualidade e da vida útil de grãos de feijão, um alimento básico em diversas culturas, depende do monitoramento rigoroso de parâmetros como umidade.

Neste contexto, o desenvolvimento de um sensor de umidade específico para grãos de feijão visa fornecer informações precisas sobre o estado de conservação dos produtos armazenados.

A exploração de técnicas de medição usando sensores baseados em estruturas planares, se mostra promissora. Essas estruturas, com dimensões reduzidas, são usadas em filtros [14], antenas [15], sensores [16], entre outros dispositivos. No Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, (GTEMA), do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) tem sido investigada a aplicação de estruturas com defeito no plano terra (DGS, do inglês *Defected Ground Structure*). Nessa técnica, o plano terra de uma estrutura planar é intencionalmente modificado para obter uma resposta em frequência específica, Figura 1 [17], [18].

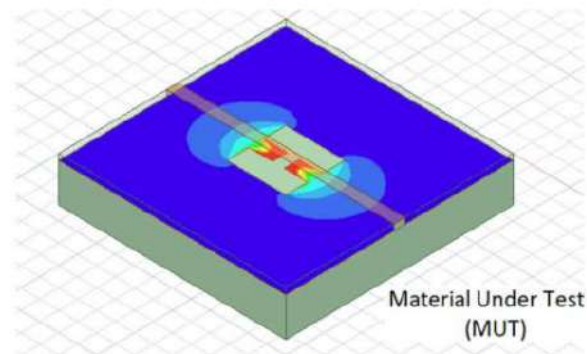
Figura 1 – Exemplo de estrutura DGS – geometria halteres.



Fonte: [17]

A geometria da parte removida constitui um dos parâmetros de projeto mais versáteis em estruturas DGS, possibilitando a customização da resposta em frequência [18], [19]. A inserção de um material sob teste (MUT- *Material Under Test*) na região da DGS resulta em uma interação com os campos eletromagnéticos, conforme ilustrado na Figura 2, modificando a resposta em frequência da estrutura. Essa característica permite a utilização de DGS como sensores [17].

Figura 2 –Ilustração da interação dos campos eletromagnéticos com o material, sensor DGS com geometria haltere.



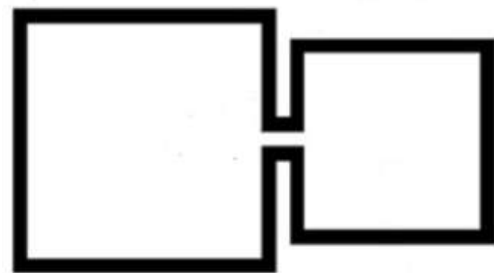
Fonte: [17]

A geometria matrioska, investigada no GTEMA-IFPB, apresenta destacadas propriedades como miniaturização e alta seletividade de frequência. Proposta inicialmente em [21], [22], tem sido uma opção atrativa para o desenvolvimento de dispositivos. Caracterizada por anéis concêntricos interconectados, essa geometria oferece um aumento no comprimento elétrico sem expansão da área física da estrutura, Figura 3. Visando explorar as potencialidades da geometria matrioska em aplicações de sensoriamento, esta dissertação apresenta o desenvolvimento de um sensor de umidade para grãos de feijão, utilizando uma DGS baseada na geometria matrioska, como apresentado na Figura 4.

Figura 3 - Geometria matrioska.



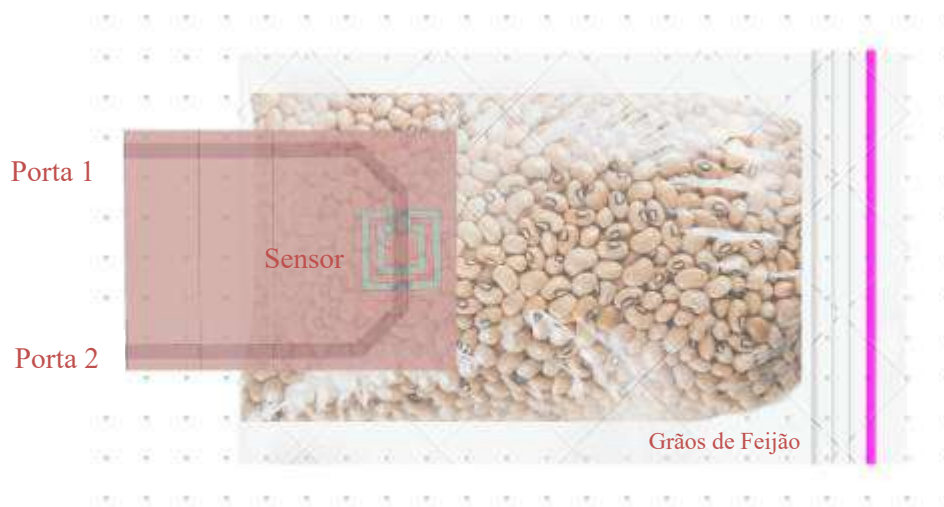
a) Anel matrioska



b) Anel matrioska expandido

Fonte: [17]

Figura 4 – Sensor de umidade para grãos de feijão utilizando DGS baseada na geometria matrioska.



Fonte: Elaborado pela própria autora. (2025)

A agricultura de precisão representa uma abordagem inovadora na produção agrícola, fundamentada na integração de tecnologias avançadas, tais como sensores, sistemas de posicionamento global (GPS), veículos aéreos não tripulados (VANTs), redes de sensores sem fio, Internet das Coisas (IoT), sistemas de informação geográfica (SIG) e ferramentas de análise de dados. A essência dessa abordagem reside na coleta, transmissão e análise de informações em tempo real relacionadas às condições do solo, das culturas e do ambiente, possibilitando a tomada de decisões mais precisas e eficientes quanto à irrigação, fertilização, monitoramento da umidade e controle de pragas e doenças. Nesse contexto, observa-se um crescente interesse da comunidade científica no desenvolvimento de sensores capazes de responder a estímulos físicos, químicos ou biológicos específicos. Esses dispositivos, ao interagirem com o ambiente, geram sinais que podem ser convertidos em grandezas físicas mensuráveis, permitindo a medição, o monitoramento e o controle de diversos parâmetros de interesse agrícola, contribuindo para o aumento da produtividade, a otimização do uso de recursos e a sustentabilidade dos sistemas de produção [23], [24].

Várias metodologias analíticas foram elaboradas, com foco em técnicas não intrusivas e atributos não prejudiciais em relação ao material sob teste, MUT [25]. Neste contexto o desenvolvimento de sensores de umidade dos grãos de feijão tem uma grande relevância.

Uma gama de sensores de umidade para grãos está acessível no mercado, com potencial para aperfeiçoar o cultivo e assegurar a qualidade do produto. Contudo, em oposição aos esforços de órgãos governamentais e consultores particulares na divulgação da tecnologia, a

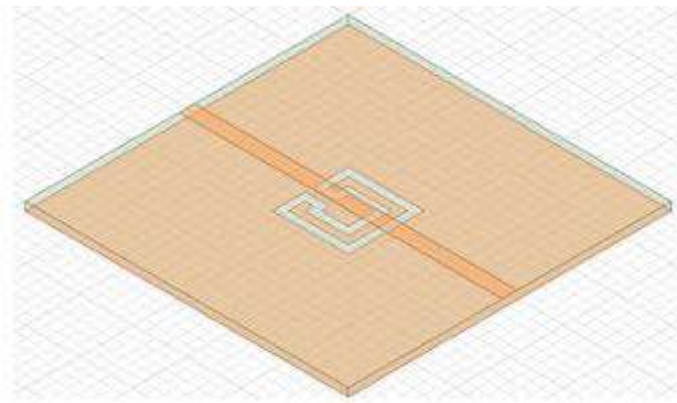
utilização desses sensores por parte dos agricultores continua restrita. Os impedimentos operacionais abrangem preço alto, quantidade de dados e dificuldade na interpretação, contato impróprio entre grão e sensor, volumes pequenos de medição, ausência de portabilidade e obstáculos na instalação. A verificação da umidade dos grãos de feijão na agricultura é presentemente controlada por um número limitado de tecnologias, com poucos métodos verdadeiramente inovadores sendo comercializados ou empregados nas últimas duas décadas [26].

A simplicidade de produção e o baixo custo das estruturas planares com defeito no plano terra (DGS), têm impulsionado o desenvolvimento de sensores DGS baseados na geometria matrioska [17]. Considerando a importância da medição precisa da umidade em grãos de feijão na agricultura, se justifica o desenvolvimento um sensor de umidade utilizando DGS com geometria matrioska. Entre as vantagens do sensor proposto, destacam-se o fato de ser não-invasivo, não destrutivo, de baixo custo, portátil e de não requerer o contato direto com os grãos de feijão. Dessa forma, pretende-se aplicar as DGS matrioska no contexto das aplicações agrícola.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

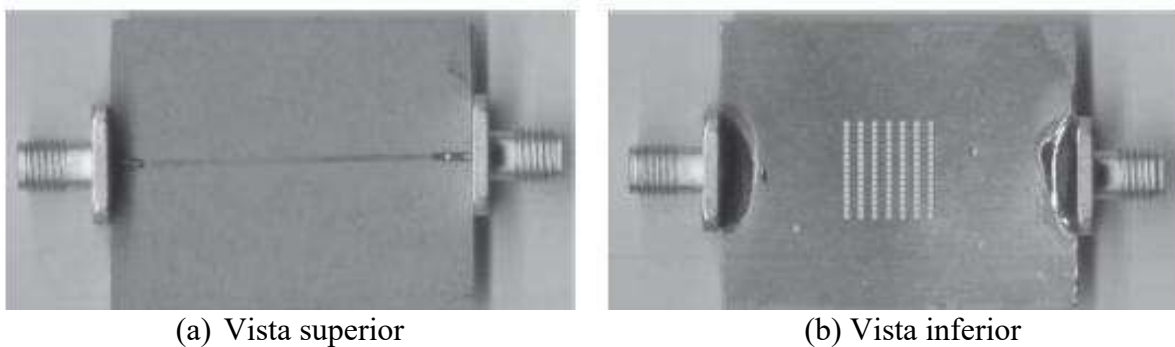
A técnica DGS tem sido amplamente empregada em diversas aplicações devido à sua configuração simples, flexível e de fácil implementação. Sua estrutura pode ser constituída por um único defeito gravado no plano de terra, conforme observado na Figura 5, ou por múltiplos defeitos distribuídos ao longo desse plano, como visto na Figura 6. Essa versatilidade permite adequar a resposta eletromagnética da estrutura às necessidades específicas de cada aplicação.

Figura 5 – DGS de uma única célula.



Fonte: [18].

Figura 6 – DGS de múltiplas células.

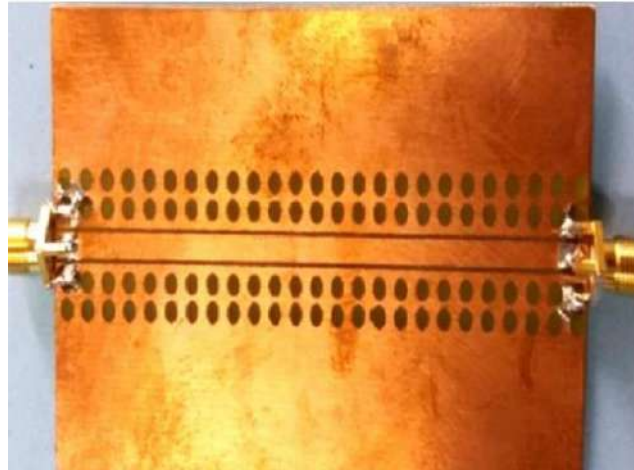


Fonte: [19].

A DGS foi primeiramente investigada em filtros em linhas de microfita, nos quais foram observados atributos de rejeição de banda de frequência, bem como a atenuação de harmônicas de ordem elevada [29]. Atualmente, a DGS tem sido aplicada em diversas

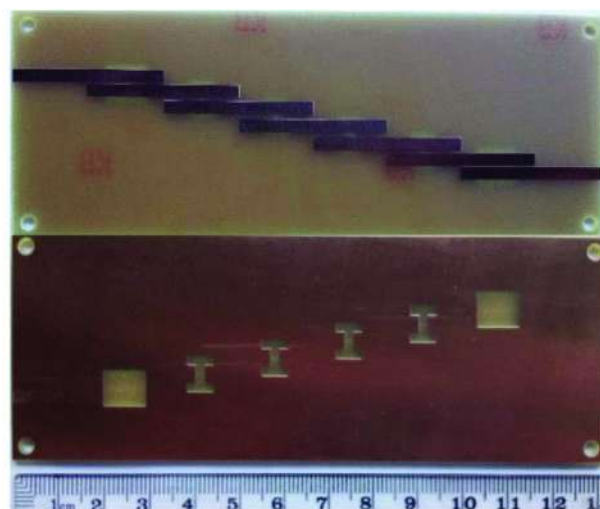
estruturas planares, incluindo guias de onda coplanares (Coplanar Waveguides – CPW), ilustrado na Figura 7, e linhas acopladas, apresentada na Figura 8, entre outras configurações.

Figura 7 – DGS em guia de ondas coplanares.



Fonte: [29]

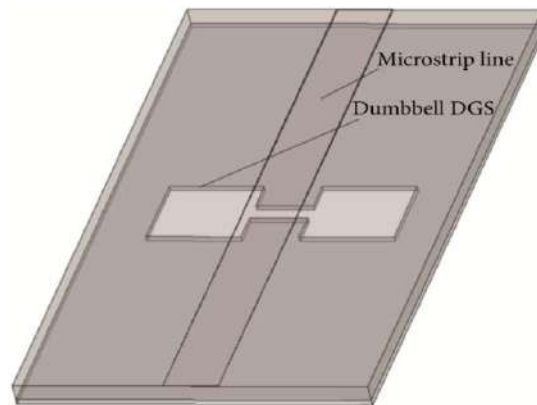
Figura 8 – DGS em linhas acopladas.



Fonte: [30]

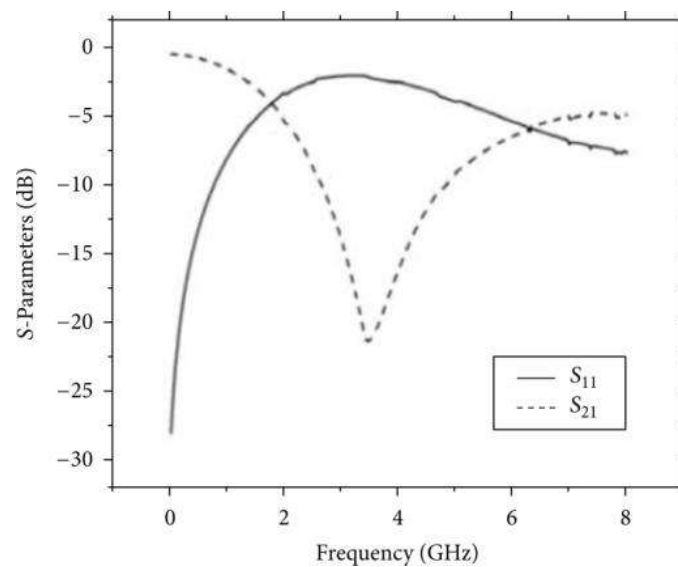
A inserção de defeitos na superfície metalizada do plano terra ocasiona perturbações na distribuição de corrente, provocando modificações nas capacitâncias e a indutâncias, além de introduzir a resistência de ranhura [27]. Essa ação leva à constituição de um circuito LC, o qual apresenta uma frequência de ressonância, como ilustrado nas Figuras 9 e 10.

Figura 9 – Unidade DGS em forma de haltere (*dumbbell*)



Fonte: [27]

Figura 10 – Parâmetros S da DGS em forma de haltere (*dumbbell*)



Fonte: [27]

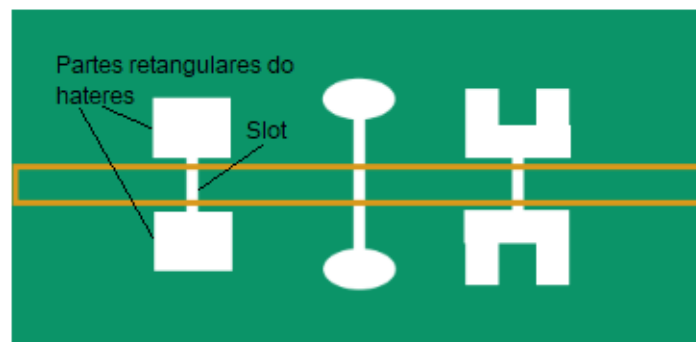
2.1 Circuitos equivalentes de uma DGS

O estudo da DGS apresenta desafios significativos, tanto no projeto quanto na compreensão de seu funcionamento, requerendo assim, ferramentas computacionais, sendo os programas de simulação eletromagnética (EM) comercialmente disponíveis recursos essenciais

nesse processo. Geralmente, a resposta em frequência, como os parâmetros S, é obtida por meio de simulação EM de onda completa. Os parâmetros do circuito equivalente podem ser extraídos dos resultados da simulação e ajustados para corresponder à resposta passa-baixa de um filtro protótipo, como o filtro de Butterworth de um polo.

Embora a análise de onda completa forneça resultados precisos para a caracterização eletromagnética da DGS, ela não oferece uma interpretação física direta dos mecanismos responsáveis pelo seu funcionamento. Por exemplo, em uma DGS com geometria do tipo halteres, as regiões retangulares provocam um aumento no percurso da corrente elétrica no plano de terra, resultando em um acréscimo da indutância efetiva da estrutura. Por sua vez, a região estreita que conecta essas áreas atua como um elemento capacitivo, promovendo o acúmulo de cargas elétricas e aumentando a capacitância efetiva da linha de microfita, conforme ilustrado na Figura 11 [20].

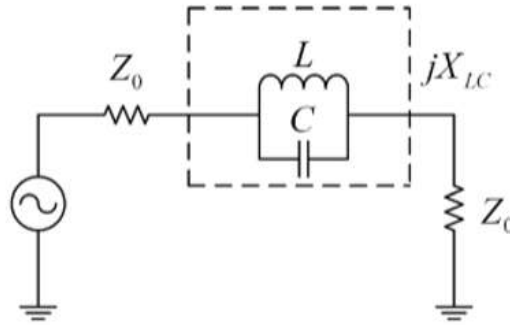
Figura 11 – Diferentes formas de halteres



Fonte: [28]

Dessa forma, as duas regiões retangulares e o slot de conexão podem ser modelados, respectivamente, por uma indutância equivalente (L) e uma capacitância equivalente (C). Consequentemente, a estrutura pode ser representada por um circuito ressonante LC em paralelo, cuja frequência de ressonância está associada à interação entre esses elementos equivalentes, conforme ilustrado na Figura 12.

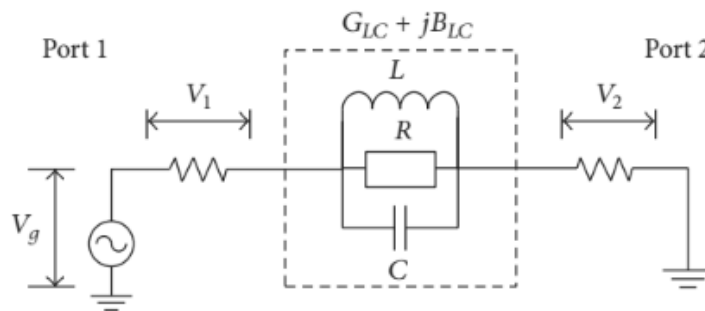
Figura 12 - Circuito equivalente do DGS halteres



Fonte: [20]

Especificamente, a área retangular gravada está diretamente relacionada à indutância efetiva do dispositivo. Um aumento nessa área resulta em um aumento da indutância, o que, por sua vez, leva a uma diminuição da frequência de ressonância. Por outro lado, o aumento da distância do *gap* gravado resulta numa diminuição da capacitância efetiva e em um deslocamento da frequência de ressonância para valores mais altos. Para uma análise mais precisa, a DGS pode ser modelada como um circuito ressonante RLC paralelo. Neste modelo, um resistor (R) é adicionado ao circuito LC para representar as perdas associadas à radiação, condutores e dielétrico. A representação deste circuito RLC paralelo é mostrada na Figura 13 [20].

Figura 13 – Circuito RLC equivalente aos DGS halteres



Fonte: [20]

2.2 Geometria matrioska

A geometria matrioska, inspirada nas bonecas russas de mesmo nome, consiste em uma série de anéis concêntricos, cada uma apresentando dimensões progressivamente decrescentes em relação à forma anterior, Figura 14. Entretanto, diferentemente dos anéis concêntricos convencionais, na geometria matrioska os anéis concêntricos são interligados, o que aumenta o seu comprimento elétrico efetivo, Figura 15.

Figura 14 – Bonecas russas matrioska.



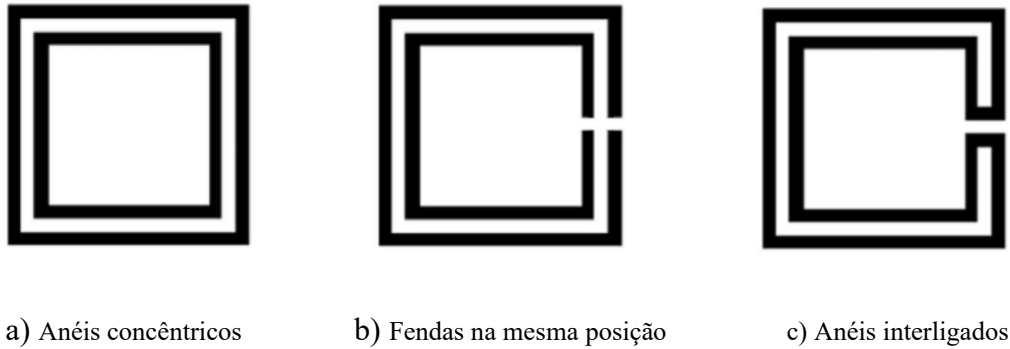
Fonte: [31]

A otimização do número de anéis concêntricos, bem como a geometria individual de cada elemento, possibilita a adaptação da resposta da DGS para aplicações específicas, abrangendo desde filtros de micro-ondas até antenas miniaturizadas. Sendo flexível a quantidade de anéis que pode ser considerada, dependendo das dimensões e das técnicas de fabricação utilizadas.

Para ilustrar o processo de obtenção da geometria Matrioska, consideram-se inicialmente dois anéis concêntricos, conforme mostrado na Figura 15(a). Em seguida, são inseridas fendas em posições correspondentes em ambos os anéis, conforme apresentado na

Figura 15(b). Por fim, os anéis são interconectados, resultando na formação da geometria Matrioska, ilustrada na Figura 15(c).

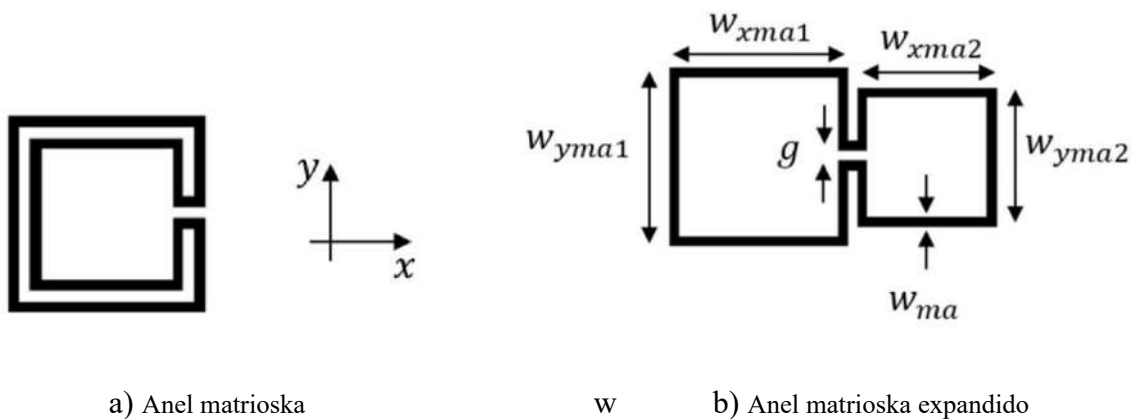
Figura 15 - Geometria matrioska passo a passo.



Fonte: [18]

Equações iniciais de projeto foram obtidas a partir das dimensões da estrutura, Figura 16. Normalmente, $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Com base nos resultados apresentados em trabalhos anteriores [18], e considerando uma primeira aproximação para o sensor sem a presença de um material sob teste (MUT), isto é, utilizando o ar como meio dielétrico, a frequência de ressonância pode ser estimada a partir das equações (1) a (3).

Figura 16 – Dimensões da geometria matrioska.



Fonte: [18]

$$f_{res}(GHz) = \frac{0,3}{L_{eff} \times \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (1)$$

Com o comprimento efetivo, L_{eff} , calculado pela seguinte equação:

$$L_{eff} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma2-avg}) \quad (2)$$

$$w_{mai-avg} = w_{mai} - \frac{w_{ma}}{2}, i = 1,2 \quad (3)$$

ϵ_{reff} , é a constante dielétrica efetiva para a linha de microfita com largura w_{ma} , sobre um substrato de espessura h e constante dielétrica ϵ_r . A constante dielétrica efetiva pode ser calculada usando um dos softwares disponíveis [32].

Enfatize-se que (1)-(3) são para o sensor em vazio, ou seja, sem o MUT. Logo, essas equações são equações iniciais de projeto, para, quando necessário, uma posterior otimização numérica.

2.3 Sensor DGS com geometria matrioska

No sensor DGS proposto, o anel matrioska é centrado sob a linha de microfita conforme ilustrado na Figura 17. A largura da microfita é w , a espessura do substrato h , e sua constante dielétrica ϵ_r . A região DGS é formada pela retirada da geometria matrioska da camada de metalização do plano terra. Com a colocação do material sob teste, MUT, em contato com a região DGS, ocorre uma variação da frequência de ressonância, sendo essa variação aproveitada para formar o sensor.

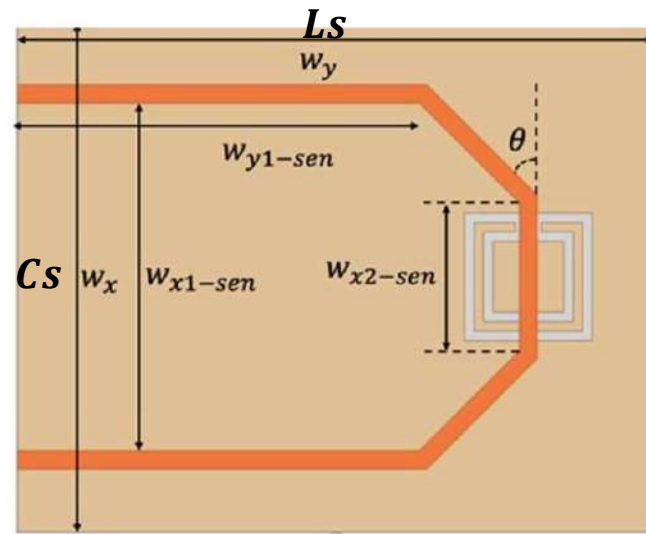
Figura 17 – Sensor DGS com geometria matrioska.



Fonte: [33]

O sensor DGS matrioska foi projetado em formato de U, comumente utilizados nos sensores comerciais. O ângulo $\theta = 45^\circ$ foi numericamente otimizado, Figura 18.

Figura 18 – Dimensões do sensor DGS com geometria matrioska.



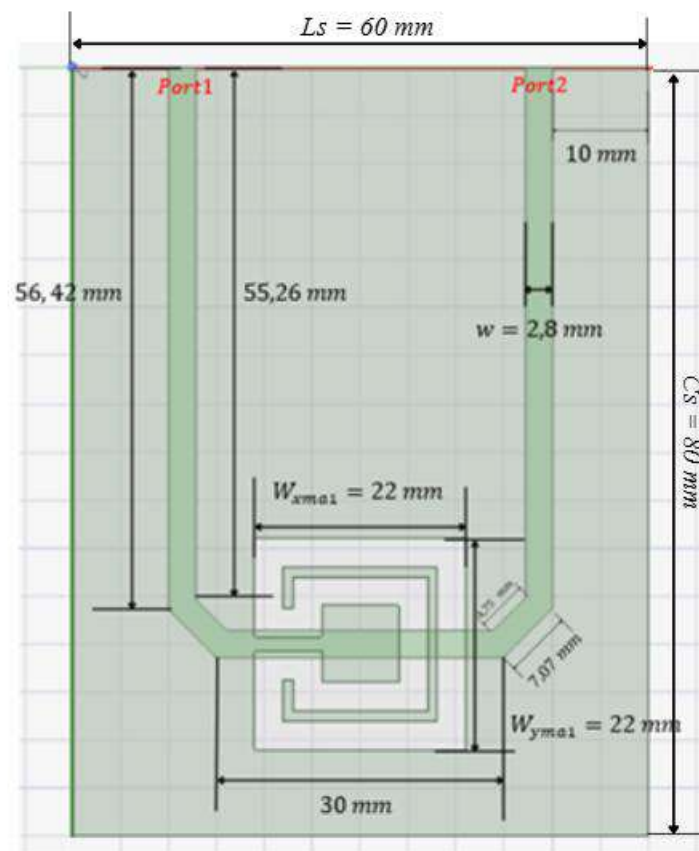
Fonte: [33]

3. CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DO SENSOR

3.1 Projeto do sensor DGS baseado na geometria matrioska

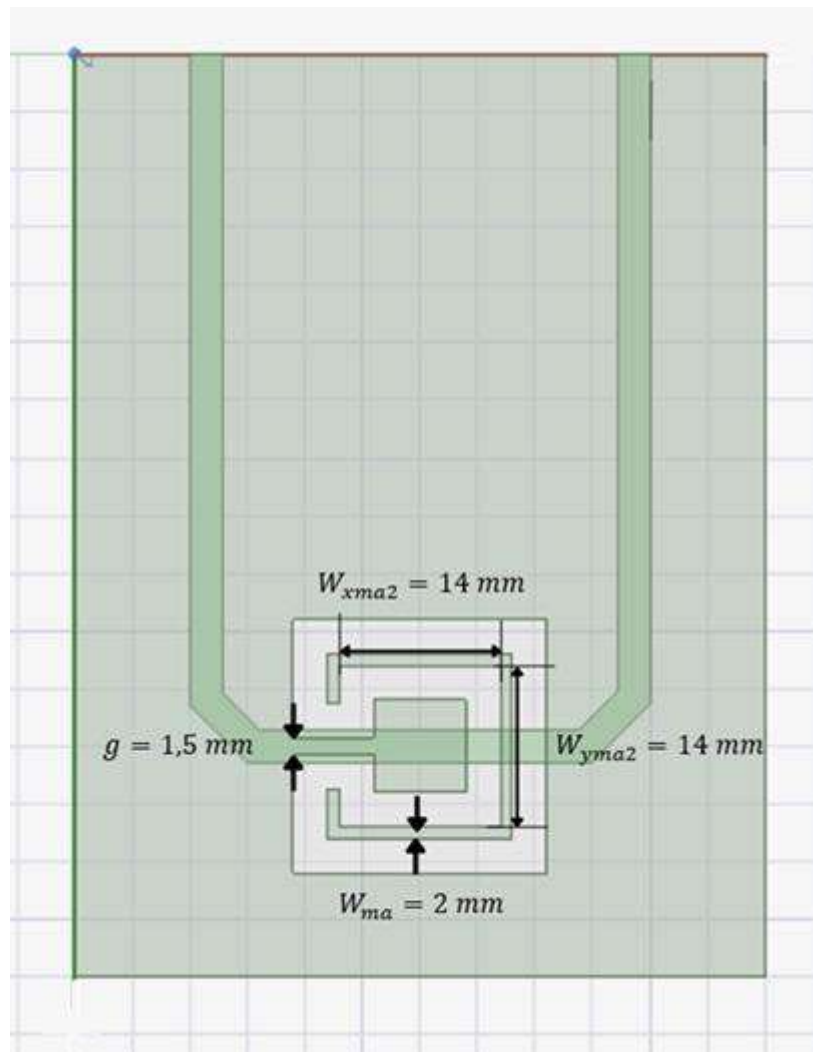
A estrutura proposta para o sensor DGS do tipo matrioska foi simulada utilizando o programa computacional ANSYS Electronics Desktop® [17]. A DGS proposta possui as dimensões apresentadas na Tabela I e Figura 19 e Figura 20.

Figura 19 – Dimensões do sensor de umidade DGS baseado na geometria matrioska (Vista superior).



Fonte: Elaborado pela própria autora. (2025)

Figura 20 - Dimensões do sensor de umidade DGS baseado na geometria matrioska (Vista inferior).



Fonte: Elaborado pela própria autora. (2025)

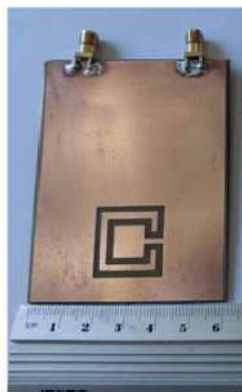
Tabela I. Dimensões da geometria matrioska

W_{xma1}	W_{yma1}	W_{xma2}	W_{yma2}	W_{ma}	g	θ
22 mm	22 mm	14 mm	14 mm	2 mm	1,5mm	45°

3.2 Fabricação do sensor DGS baseado na geometria matrioska

O sensor DGS baseado na geometria matrioska utilizado no experimento, foi confeccionado em FR-4, material que apresenta um baixo custo, com constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, tangente de perda $\tan(\delta) = 0,02$, espessura do substrato $h = 1,6 \text{ mm}$, espessura do cobre $T = 0,035 \text{ mm}$ comprimento do sensor $C_s = 80 \text{ mm}$ e Largura do sensor $L_s = 60 \text{ mm}$, com largura de microfita $w = 2,8 \text{ mm}$ e a largura de fenda $W_{ma} = 2 \text{ mm}$. As dimensões da geometria matrioska estão informadas na Tabela I. O sensor foi fabricado por técnica de impressão UV, seguida de corrosão em percloreto de ferro. Dois conectores coaxiais SMA foram soldados nas linhas de microfita com impedância característica $Z_0 = 50 \Omega$, Figura 21.

Figura 21 – Sensor DGS com geometria matrioska.



a) Vista inferior do sensor.



b) Vista superior do sensor.

Fonte: [33]

4. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Preparação das amostras

Para a realização das medições da primeira etapa, foram selecionadas quatro amostras de feijão carioca, classe A, comercializado sob o nome Kicaldo®. As amostras foram classificadas em diferentes estágios de umidade, desde o estágio seco (casca marrom clara e grão duro) até estágios de umidade mais elevados. Note que neste caso, considerou-se como seco o feijão como ele é comercializado. A massa das amostras foi medida, conforme detalhado na Tabela II.

TABELA II. Classificação das Amostras – Primeira Etapa

AMOSTRA	MASSA (g)	ESTÁGIO DE UMIDADE
I	343	Seco
II	319	Seco
III	232	Seco
IV	253	Seco

Com o objetivo de reduzir a variabilidade e obter uma maior precisão dos resultados, optou-se por aumentar a quantidade de mostras e foi realizado uma segunda etapa de medições. Foram selecionadas dez amostras de feijão carioca, classe A, comercializado sob o nome Kicaldo®. Analogamente à primeira etapa, as amostras foram classificadas em diferentes estágios de umidade, desde o estágio seco (casca marrom clara e grão duro) até estágios de umidade mais elevados. Note que neste caso, considerou-se como seco o feijão como ele é comercializado. A massa das amostras foi medida, conforme detalhado na Tabela III.

TABELA III. Classificação das Amostras – Segunda Etapa

AMOSTRA	MASSA (g)	ESTÁGIO DE UMIDADE
I	252	Seco
II	213	Seco
III	241	Seco
IV	259	Seco
V	235	Seco
VI	253	Seco
VII	240	Seco
VIII	270	Seco
IX	281	Seco
X	289	Seco

Os grãos de feijão foram separados por gramatura, pesados e acondicionados em embalagens plásticas transparentes do tipo ZipLock®. As amostras foram submetidas a diferentes tempos de submersão em água, conforme descrito no desenvolvimento deste estudo.

No processo de mensurar a massa das amostras foi utilizada uma balança eletrônica da marca FuauFas®, modelo SF-400, que registra massas de 1 g a 10 kg, para a medição de 5 kg o erro admitido é de $\pm 0,1$ g. [34] Figura 22.

Figura 22 – Balança eletrônica, modelo SF-400.

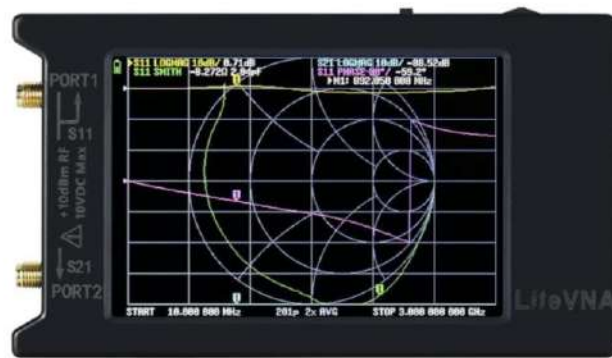


Fonte: [34]

4.2 Analisador de rede vetorial LiteVNA

Para medir a frequência de ressonância, utilizou-se o LiteVNA™, Zeenko, modelo ZN406, que é um analisador de rede vetorial portátil, de faixa de medição variando entre 50kHz-6,3GHz, podendo executar medições de S11, S21. Para armazenamento dos dados, resultantes do acoplamento entre o sensor DGS baseado na geometria matrioska e as amostras de grãos de feijão [35]. Figura 23. Destaque-se aqui duas vantagens desse tipo de dispositivo: portabilidade (pode ser utilizado com bateria) e baixo custo (em 12/01/2026, aproximadamente R\$ 1.400,00, já considerando frete e impostos).

Figura 23 – LiteVNA.



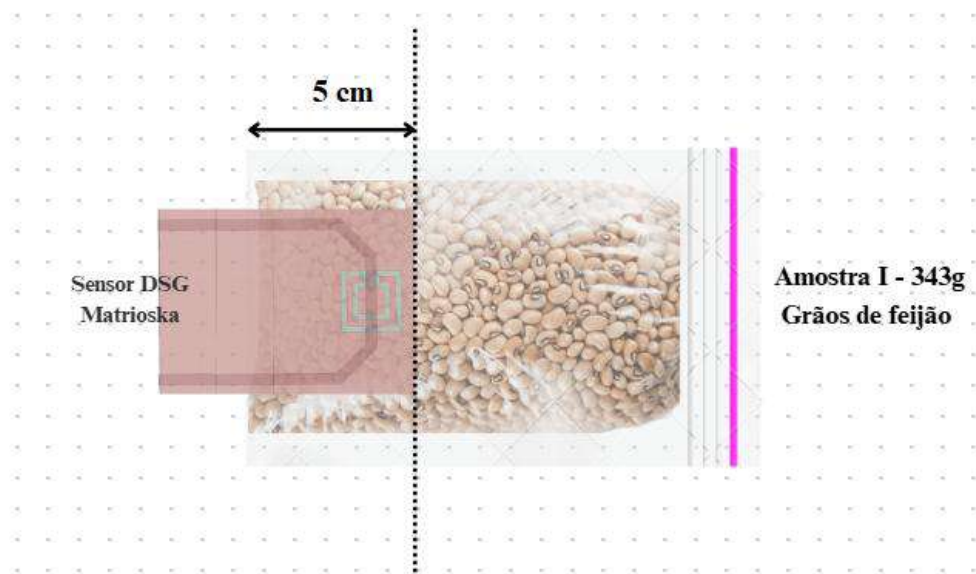
Fonte: [35]

4.3 Procedimento experimental

Após a realização dos primeiros testes no Laboratório de Medidas em Telecomunicações, no Campus João Pessoa, no IFPB, foi elaborado e desenvolvido um procedimento de medição em um espaço de experimentação personalizado pela mestranda na cidade de Campina Grande – PB.

A amostra com massa 343g em estágio de umidade seco, ou seja, como comercializada, foi colocada na bancada para a medição da frequência de ressonância. O sensor foi posicionado com o lado da DGS em paralelo à embalagem, estabelecendo contato com a superfície plástica da embalagem do tipo ZipLock®, Figura 24. Esse procedimento padronizou as medições das demais amostras, garantindo a consistência dos resultados.

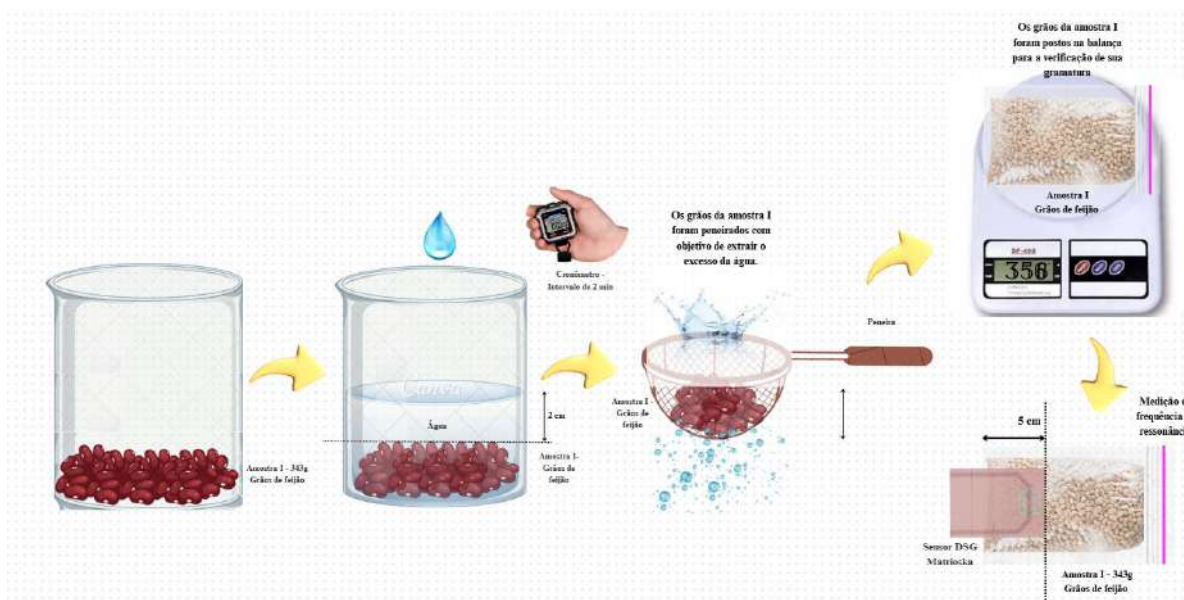
Figura 24 – Ilustração do sensor posicionado com o lado da DGS em paralelo à embalagem.



Fonte: Elaborado pela própria autora. (2025)

Em seguida, os grãos da amostra foram depositados no recipiente plástico, foi adicionado água a uma altura de 2 cm acima dos grãos de feijão para garantir que estes ficassem submersos em água durante um tempo cronometrado de 2 minutos. Logo após, os grãos da amostra I foram peneirados para que se retirasse o excesso de água, depois os grãos foram repostos na embalagem plástica Ziplock® para mensurar novamente sua massa, e por fim, com aplicação do sensor DGS sob a embalagem plástica, verificou-se o novo valor da frequência de ressonância, conforme ilustrado no layout da Figura 25.

Figura 25 – Ilustração Esquema de hidratação, secagem, pesagem e medição da f_{res} dos grãos de feijão.



Fonte: Elaborado pela própria autora. (2025)

É importante ressaltar que, a partir de 10 minutos, os grãos de feijão tiveram um acréscimo da umidade de aproximadamente 20% em sua massa. Esse acréscimo da umidade já é maior do que o teor de umidade ideal para comercialização e segurança alimentar, que varia entre 13% e 15%, em concordância com a norma principal que define os limites de umidade para a comercialização do feijão é a Instrução Normativa N° 12/2008 do Ministério da Agricultura (MAPA) [36], grãos acima desse percentual são considerados fora do padrão ou desclassificados, pois a umidade excessiva acelera a deterioração e o surgimento de mofo. Por esta razão, convencionou-se que o tempo de submersão dos grãos em água fosse em intervalos de 2 minutos, variando de 0 a 12 minutos. Essa abordagem visa avaliar a influência do aumento do teor de umidade em relação à variação da frequência de ressonância. O processo com a

mesma configuração foi repetido para as amostras II, III, IV garantindo assim a consistência dos resultados. Na Figura 26, está exposto o *layout* utilizado para realização das medições.

Figura 26 – *Layout* de medição com sensor de umidade dos grãos de feijão baseado na geometria matrioska



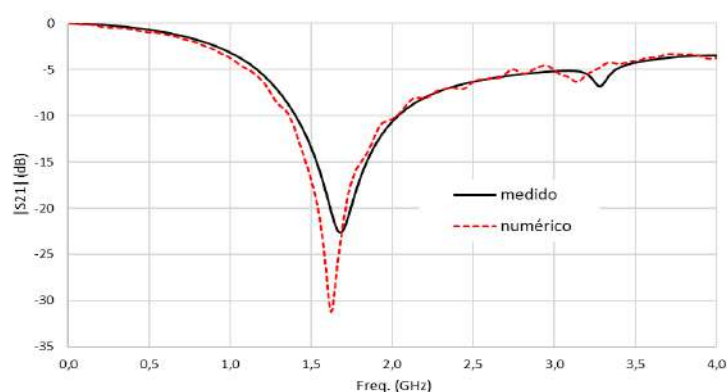
Fonte: Elaborado pela própria autora

4.4 Dados coletados e resultados das medições

4.4.1 Primeira etapa

Inicialmente, realizou-se a aferição do sensor de umidade dos grãos de feijão baseado na geometria matrioska em vazio sensor, como mostra o resultado da medição. Como pode ser observado na Figura 27 e na Tabela III, os valores medidos e simulados no *software* ANSYS HFSS, apresentam uma boa concordância.

Figura 27 – Respostas em frequência medida e simulada para o sensor em vazio.



Fonte: Elaborado pela própria autora. (2025)

Tabela III – Valores das frequências de ressonância (f_{res}), medido e simulado, para o sensor em vazio.

	Freq. Res. Medida	Freq. Res. Simulada
Sensor	1600 MHz	1620 MHz

No procedimento de medição, a configuração da instrumentação levou em consideração que, em um curto período após o início do experimento (10 minutos), os grãos de feijão apresentaram um aumento de massa significativo de até 20%. Considerando a umidade inicial dos grãos de feijão, pode-se afirmar que o valor ótimo do teor de umidade de comercialização (13% a 15%) foi ultrapassado. Com base nessas constatações, o tempo de submersão para próxima etapa experimental foi definido em intervalos de 2 minutos (0 a 12 minutos). Os resultados subsequentes, referentes às amostras I a IV após hidratação, secagem, medição e reidratação, estão apresentados na Tabela IV.

Tabela IV – Variação de Massa

Tempo(min)	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra IV
0	343	319	232	236
2	356	333	241	241
4	367	341	247	249
6	378	350	254	259
8	389	358	262	267
10	402	368	270	277
12	413	376	276	281

Em seguida, calcula-se a massa normalizada, que é a massa da amostra após hidratação, dividida pela sua massa inicial, (Equação 4). As variações de massa normalizadas do grão estão expostas na Tabela V.

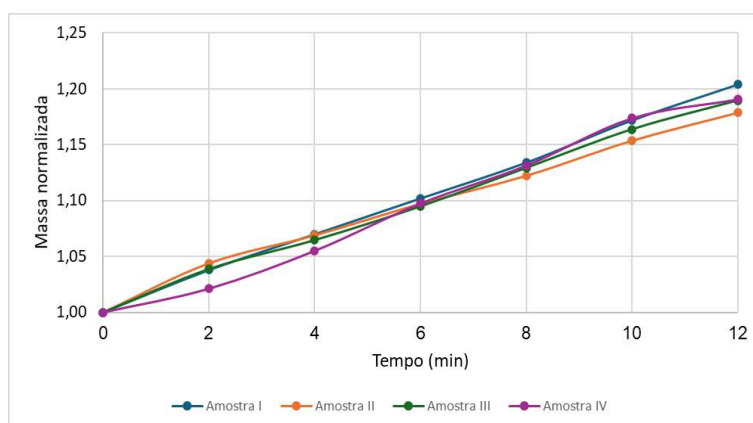
$$Massa\ Normalizada = \frac{Massa\ da\ amostra}{Massa\ inicial\ da\ amostra} \quad (4)$$

Tabela V – Variação de Massa Normalizada

Tempo(min)	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra IV
0	1,000	1,000	1,000	1,000
2	1,038	1,044	1,039	1,021
4	1,070	1,069	1,065	1,055
6	1,102	1,097	1,095	1,097
8	1,134	1,122	1,129	1,131
10	1,172	1,154	1,164	1,174
12	1,204	1,179	1,190	1,191

Na Figura 28, apresenta-se o gráfico da variação da massa normalizada dos grãos de feijão em função do tempo. Observa-se que, independentemente do valor inicial da massa, o comportamento da amostra com o tempo é praticamente o mesmo. Cite-se ainda que esse valor corresponde, aproximadamente, ao quanto aumentou o teor de umidade dos grãos de feijão em relação ao teor de umidade inicial.

Figura 28 – Gráfico da variação da massa normalizada dos grãos de feijão em função do tempo.

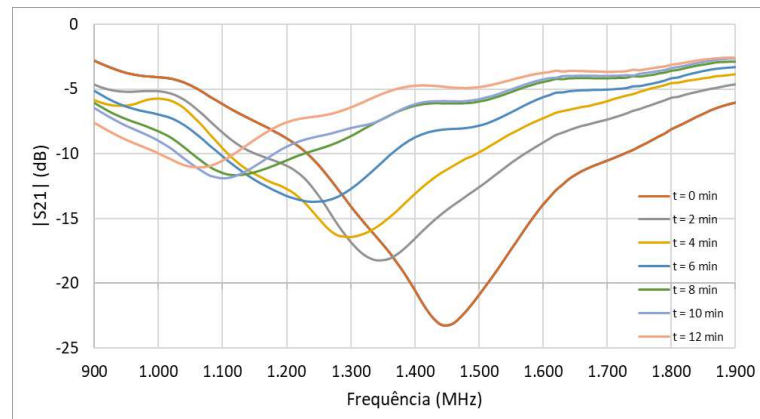


Fonte: Elaborado pela própria autora

Os resultados das medições, respostas em frequência e, conseqüentemente, determinação das frequências de ressonância (f_{res}), das amostras I a IV, para diferentes

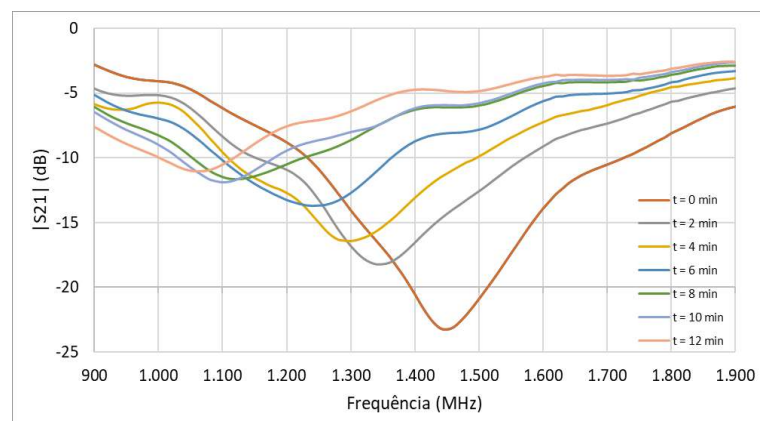
instantes de tempo, são apresentadas nas Figuras 29 a 32. Desses resultados verifica-se que é possível determinar diferentes frequências de ressonância, para diferentes teores de umidade, indicando a viabilidade do sensor proposto.

Figura 29 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra I.



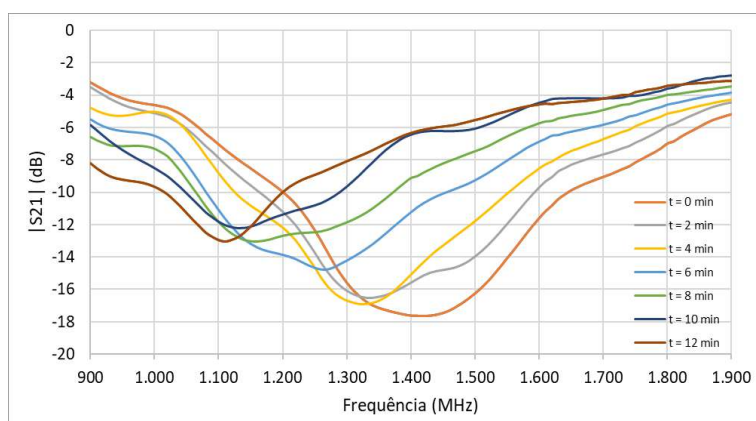
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 30 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra II.



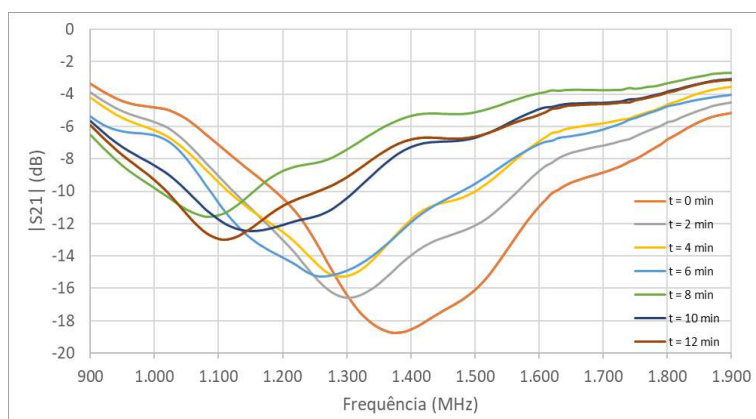
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 31 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra III.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 32 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra IV.



Fonte: Elaborado pela própria autora

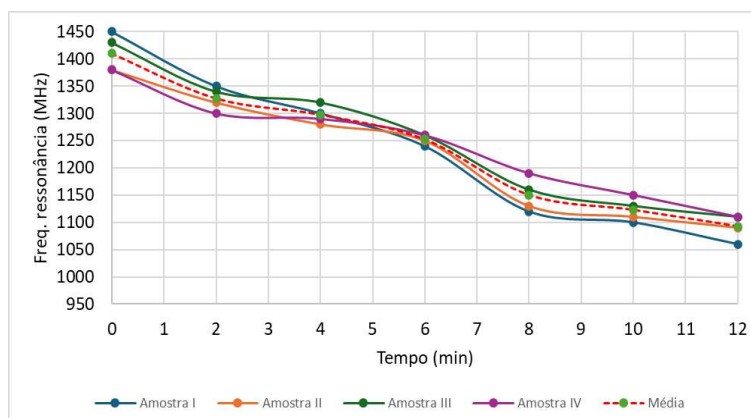
De posse das medições realizadas, houve o tratamento dos dados para análise da variação da frequência de ressonância (f_{res}) e do incremento da umidade dos grãos de feijão, conforme relacionadas na Tabela VI.

Tabela VI – Variação de Frequência de Ressonância

TEMPO (MIN)	AMOSTRA I		AMOSTRA II		AMOSTRA III		AMOSTRA IV	
	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)
0	1450	343	1380	319	1430	232	1380	236
2	1350	356	1320	333	1340	241	1300	241
4	1300	367	1280	341	1320	247	1290	249
6	1240	378	1250	350	1260	254	1260	259
8	1120	389	1130	358	1160	262	1190	267
10	1100	402	1110	368	1130	270	1150	277
12	1060	413	1090	376	1110	276	1110	281

A variação da frequência de ressonância (f_{res}) dos grãos de feijão em função do tempo, ou seja, do incremento de umidade dos grãos, é visualizada na Figura 33. A média da frequência de ressonância obtida neste estudo também foi calculada.

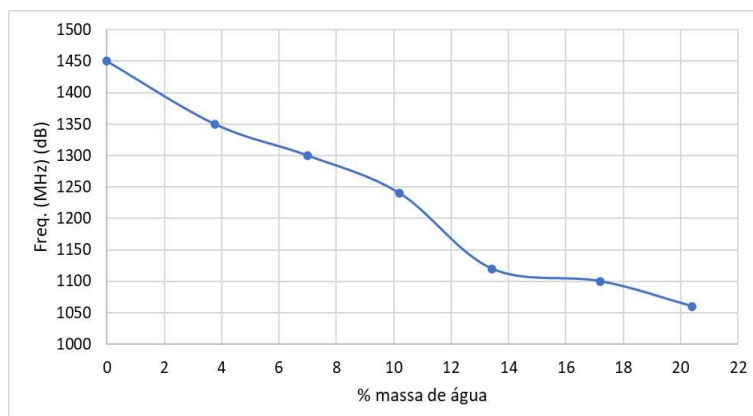
Figura 33 – Gráfico da variação da frequência de ressonância dos grãos de feijão em função do tempo.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Na Figura 34, são apresentados os resultados da frequência de ressonância em função do incremento da umidade da amostra I. Foram obtidos sete pontos desde a amostra em estado seco (considerado secos os grãos retirados da embalagem plástica de comercialização) até o estado de estágio de umidade após 12 minutos de submersão em água. Esses valores são apresentados na Tabela VII.

Figura 34 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra I.



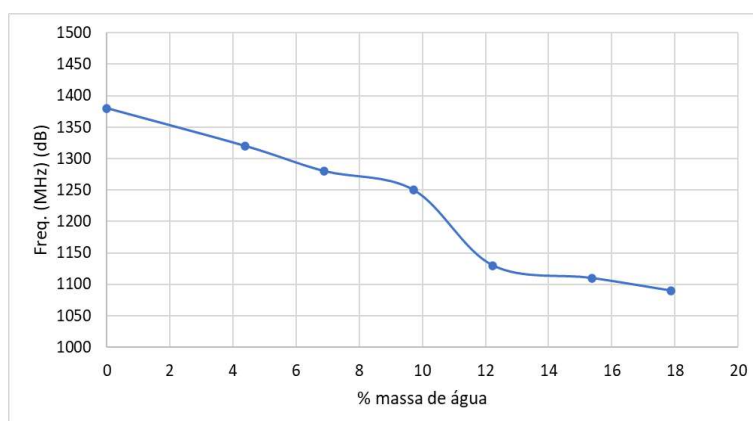
Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela VII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra I)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	343	0,00	1450
2	356	3,76	1350
4	367	7,00	1300
6	378	10,20	1240
8	389	13,41	1120
10	402	17,20	1100
12	413	20,40	1060

Analogamente, nas Figura 35, 36 e 37 apresentados os resultados obtidos para a frequência de ressonância em função do incremento da umidade, para as amostras II, III e IV, respectivamente. De maneira similar, esses resultados são resumidos nas Tabelas VIII, IX e X.

Figura 35– Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra II.

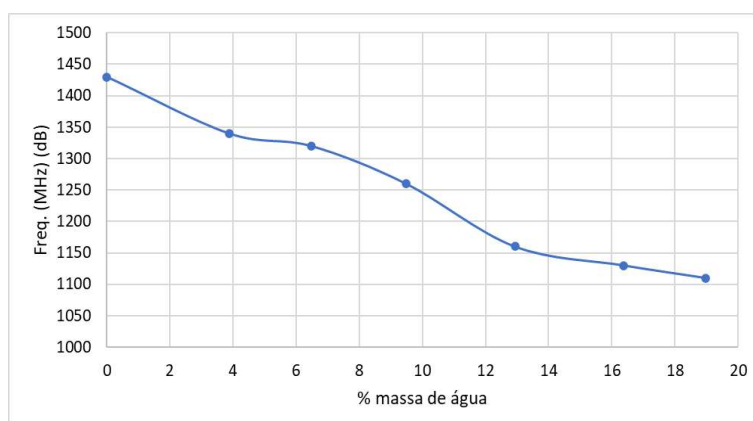


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela VIII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra II)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	319	0,00	1380
2	333	4,38	1320
4	341	6,89	1280
6	350	9,72	1250
8	358	12,23	1130
10	368	15,36	1110
12	376	17,87	1090

Figura 36 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra III.

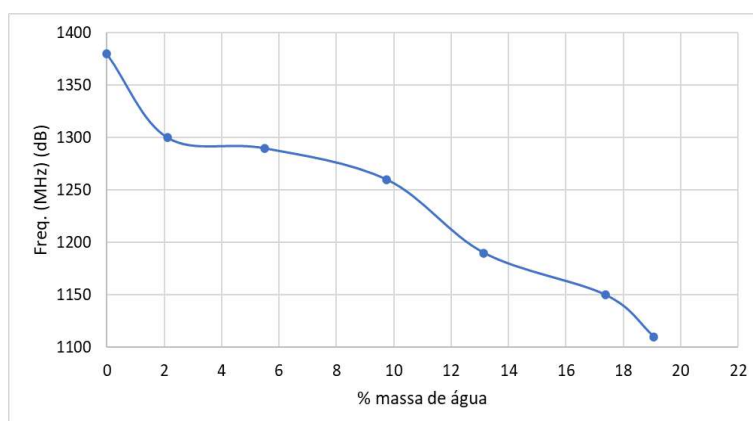


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela IX – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra III)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	232	0,00	1430
2	241	3,87	1340
4	247	6,47	1320
6	254	9,48	1260
8	262	12,93	1160
10	270	16,37	1130
12	276	18,97	1110

Figura 37 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra IV.



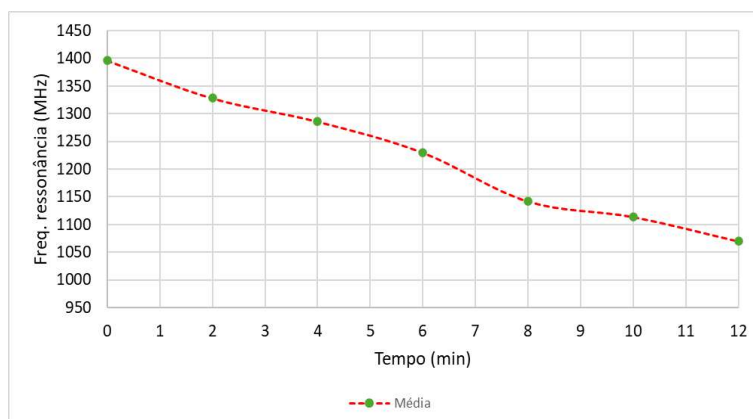
Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XI – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra IV)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	236	0,00	1380
2	241	2,12	1300
4	249	5,51	1290
6	259	9,76	1260
8	267	13,14	1190
10	277	17,37	1150
12	281	19,06	1110

Na Figura 38, são mostrados os resultados dos valores médios das medições das umidades das amostras I, II, III e IV para o sensor em suas respectivas frequências de ressonância.

Figura 38 – Gráfico da média da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostras I, II, III e IV.

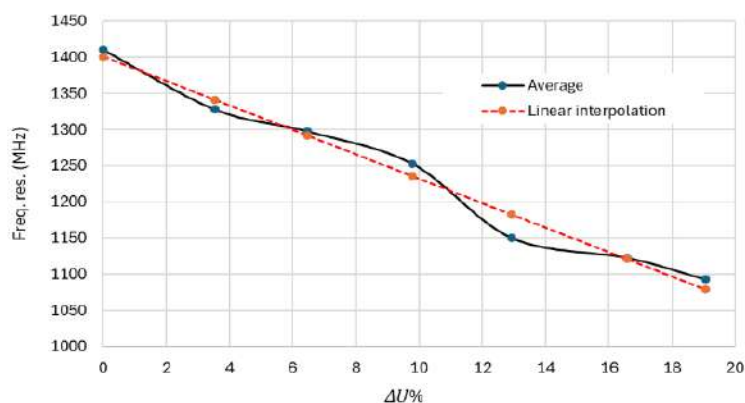


Fonte: Elaborado pela própria autora

A Figura 39 apresenta a curva de frequência de ressonância média em função do incremento da umidade, juntamente com sua interpolação linear, que é representada pela Equação 5.

$$freq.res. (MHz) = -16,88 \times \Delta U\% + 1400,60 \quad (5)$$

Figura 39 – Curva de frequência de ressonância média e sua interpolação linear.



Fonte: Elaborado pela própria autora

4.4.2 Segunda etapa

Com o objetivo de reafirmar os resultados preliminares obtidos, foram realizadas novas medições utilizando a mesma metodologia inicial explicitada na seção 4.3 Procedimento Experimental desta Dissertação.

No procedimento de medição, conforme justificado anteriormente, foi definido intervalos de 2 minutos (0 a 12 minutos). Os resultados obtidos, referentes às amostras I a X, estão apresentados na Tabela XII e na Tabela XIII.

Tabela XII – Variação de Massa das amostras I a V

Tempo(min)	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra IV	Amostra V
0	252	213	241	259	235
2	263	227	258	275	254
4	275	235	268	283	262
6	287	242	279	294	271
8	293	249	285	306	279
10	304	257	293	311	287
12	313	265	300	319	294

Tabela XIII – Variação de Massa das amostras VI a X

Tempo(min)	Amostra VI	Amostra VII	Amostra VIII	Amostra IX	Amostra X
0	253	240	270	281	289
2	271	246	293	305	315
4	279	261	301	313	321
6	289	268	309	319	328
8	297	274	321	326	334
10	305	281	328	331	339
12	312	289	335	338	346

Em seguida, foi calculada a massa normalizada e os resultados apresentados na Tabela IX.

Tabela XIV – Variação de Massa Normalizada das amostras I a V

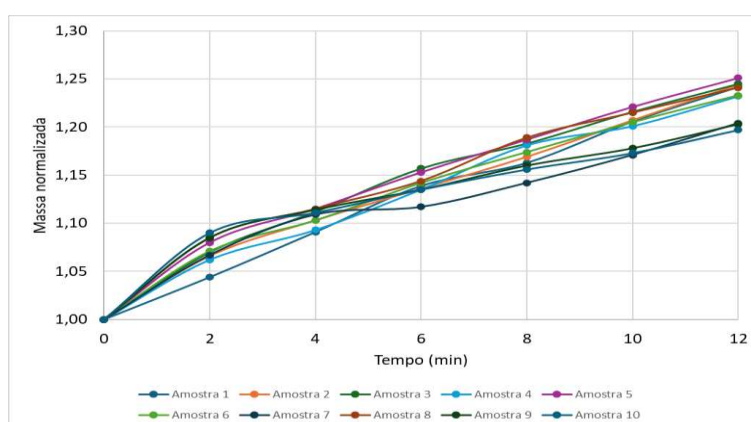
Tempo(min)	Amostra I	Amostra II	Amostra III	Amostra IV	Amostra V
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	1,044	1,066	1,070	1,062	1,080
4	1,091	1,103	1,112	1,093	1,115
6	1,139	1,136	1,157	1,135	1,153
8	1,163	1,169	1,183	1,181	1,187
10	1,206	1,207	1,216	1,201	1,221
12	1,242	1,244	1,245	1,232	1,251

Tabela XV – Variação de Massa Normalizada das amostras VI a X

Tempo(min)	Amostra VI	Amostra VII	Amostra VIII	Amostra IX	Amostra X
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	1,071	1,067	1,085	1,085	1,090
4	1,103	1,109	1,115	1,114	1,111
6	1,142	1,117	1,144	1,135	1,135
8	1,174	1,142	1,189	1,160	1,156
10	1,205	1,171	1,215	1,178	1,173
12	1,233	1,204	1,241	1,203	1,197

Na Figura 40 apresenta-se o gráfico da variação da massa normalizada dos grãos de feijão em função do tempo.

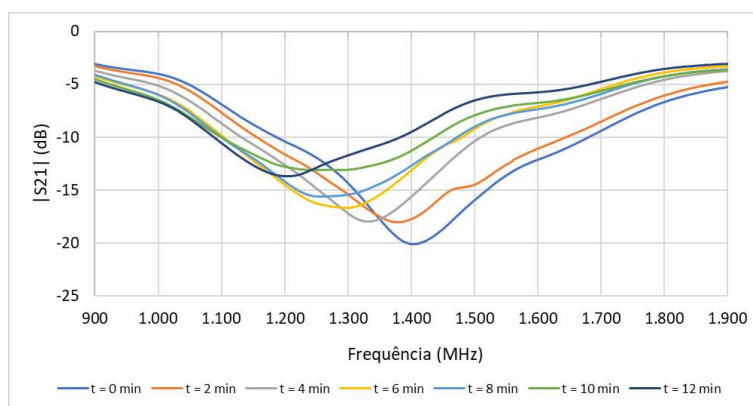
Figura 40 – Gráfico da variação da massa normalizada dos grãos de feijão em função do tempo.



Fonte: Elaborado pela própria autora

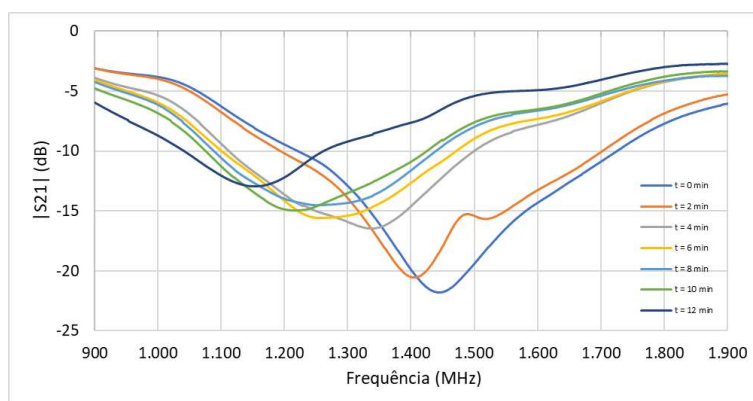
Os resultados das medições, para as respostas em frequência e, consequentemente, determinação das frequências de ressonância (f_{res}), das amostras I a X, etapa 2, são apresentadas nas Figuras 41 a 50. Assim como na etapa 1, desses resultados verifica-se que é possível determinar diferentes frequências de ressonância, para diferentes teores de umidade, indicando a viabilidade do sensor proposto.

Figura 41 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra I.



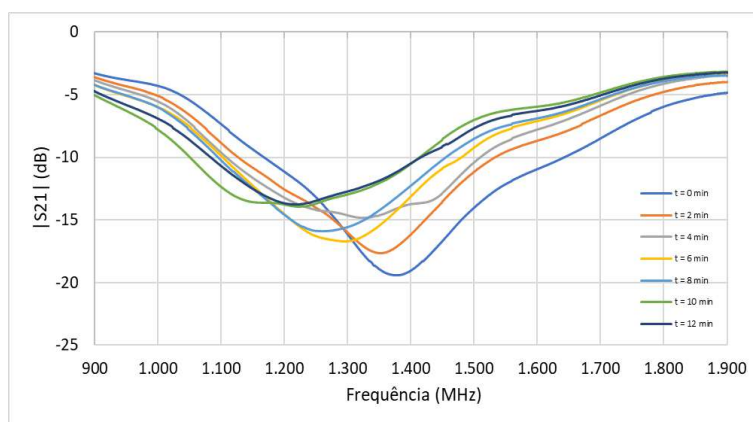
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 42 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra II.



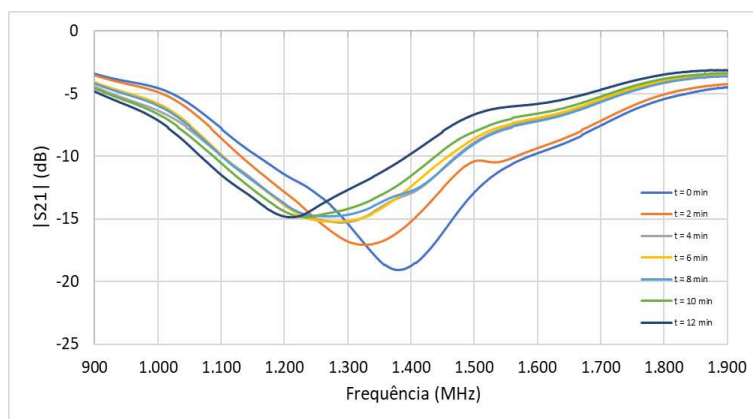
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 43 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra III.



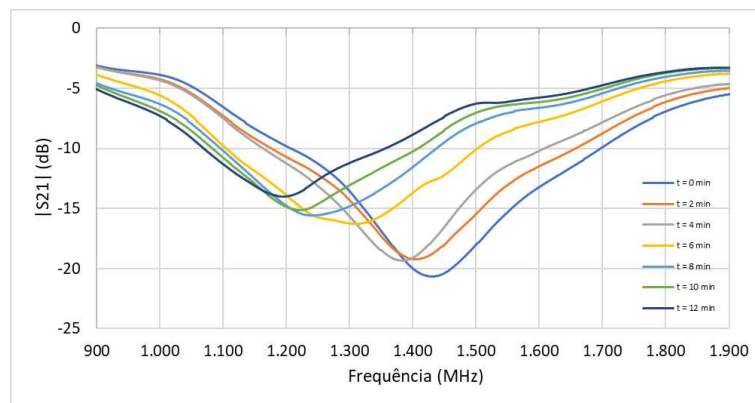
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 44 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra IV.



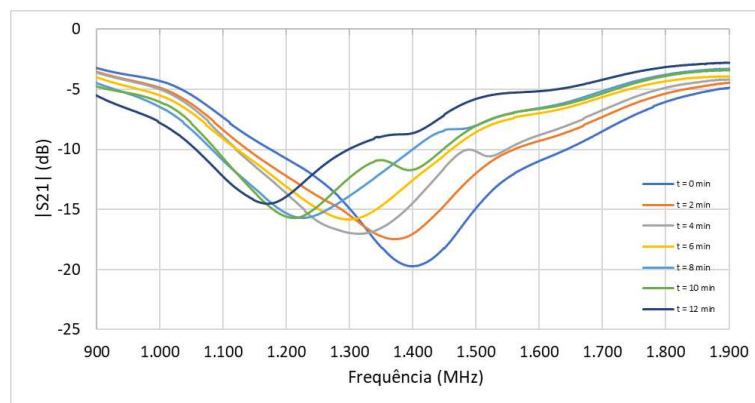
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 45 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra V.



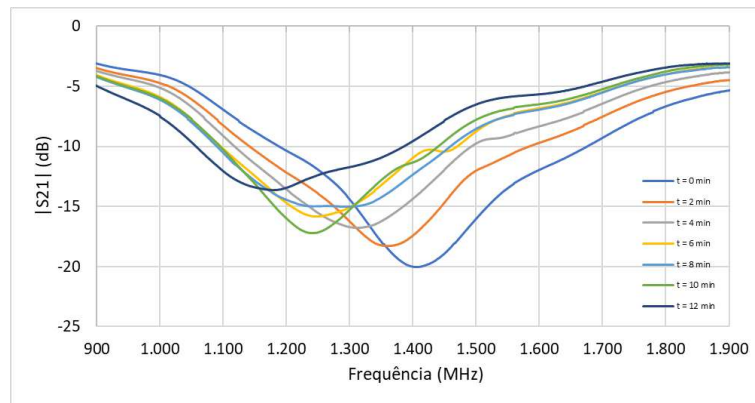
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 46 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra VI.



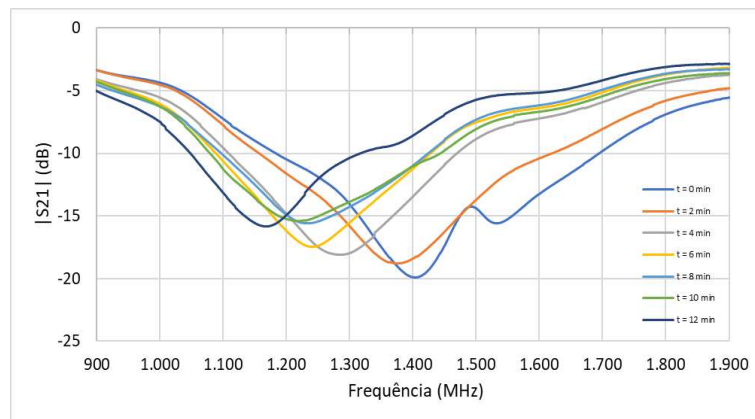
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 47 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra VII.



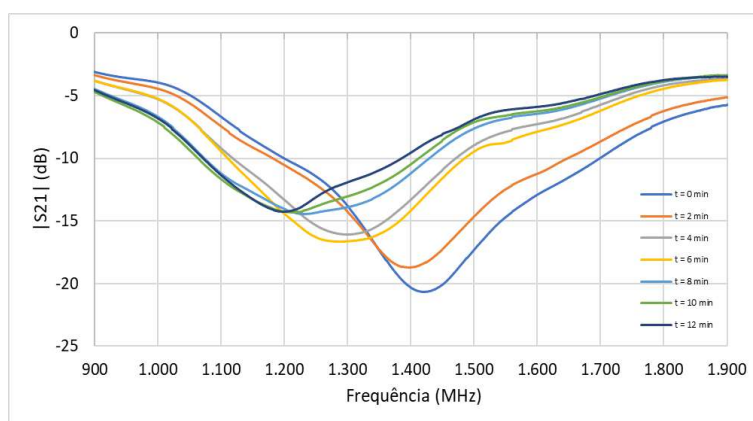
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 48 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra VIII.



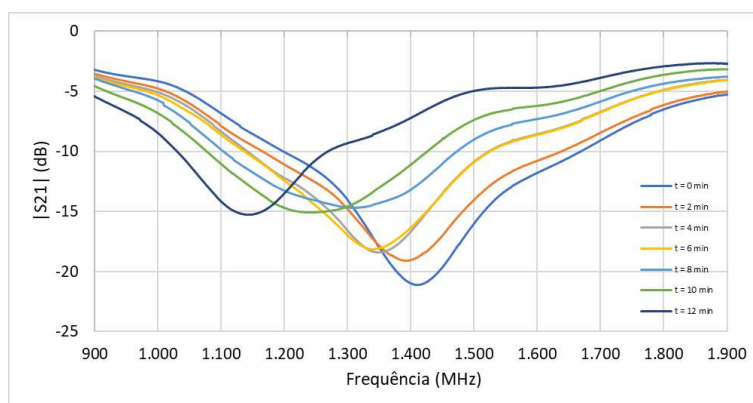
Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 49 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra IX.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Figura 50 – Resposta em frequência para diferentes instantes de tempo, amostra X.



Fonte: Elaborado pela própria autora

De maneira análoga à etapa 1, foi realizada a análise da variação da frequência de ressonância (f_{res}) e do incremento da umidade dos grãos de feijão, conforme relacionadas nas Tabelas XVI e XVII.

Tabela XVI – Variação de Frequência de Ressonância das amostras de I a V.

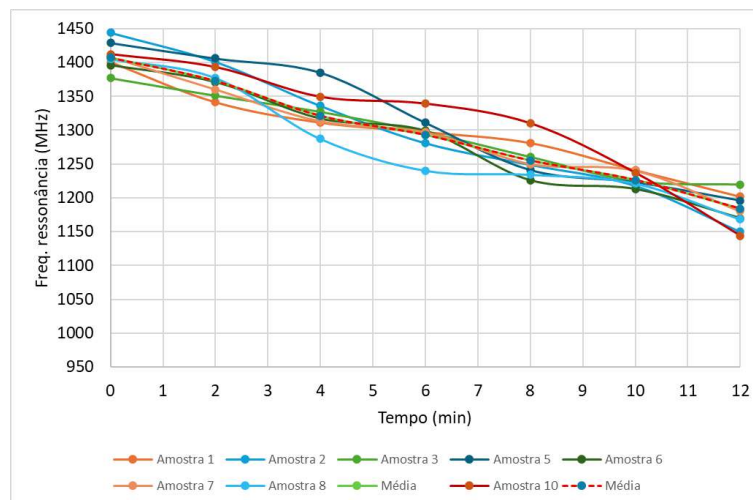
TEMPO (MIN)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHz)	MASSA (g)
0	1396	253	1408	240	1405	270	1422	281	1412	289
2	1371	271	1360	246	1377	293	1399	305	1393	315
4	1317	279	1313	261	1287	301	1300	313	1349	321
6	1299	289	1297	268	1240	309	1288	319	1339	328
8	1226	297	1250	274	1234	321	1232	326	1310	334
10	1213	305	1240	281	1221	328	1214	331	1237	339
12	1170	312	1180	289	1168	335	1198	338	1144	346

Tabela XVII – Variação de Frequência de Ressonância das amostras de VI a X.

TEMPO (MIN)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHZ)	MASSA (g)	FREQ. (MHz)	MASSA (g)
0	1400	252	1444	213	1377	241	1380	259	1429	236
2	1341	263	1401	227	1351	258	1331	275	1406	254
4	1311	275	1336	235	1327	268	1288	283	1385	262
6	1297	287	1281	242	1297	279	1282	294	1311	271
8	1281	293	1249	249	1260	285	1269	306	1241	279
10	1241	304	1218	257	1224	293	1232	311	1223	287
12	1202	313	1150	265	1219	300	1211	319	1196	294

A variação da frequência de ressonância (f_{res}) dos grãos de feijão em função do tempo, ou seja, do incremento de umidade dos grãos, é visualizada na Figura 51. A média da frequência de ressonância obtida neste estudo também foi calculada.

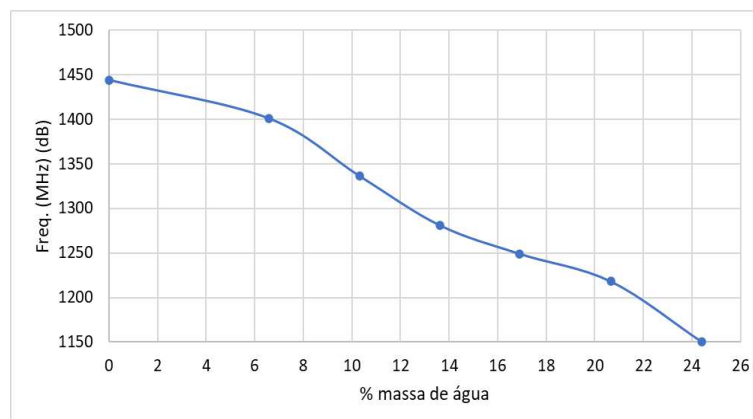
Figura 51 – Gráfico da variação da frequência de ressonância e dos grãos de feijão em função do tempo.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Nas Figura 52-61 são apresentados os resultados das frequências de ressonância em função do incremento da umidade das amostras I a X. Foram obtidos sete pontos desde a amostra em estado seco (considerado secos os grãos retirados da embalagem plástica de comercialização) até o estado de estágio de umidade após 12 minutos de submersão em água. Respostas em frequência e, conseqüentemente, determinação das frequências de ressonância (f_{res}), das amostras I a X, para diferentes instantes de tempo.

Figura 52 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra I.

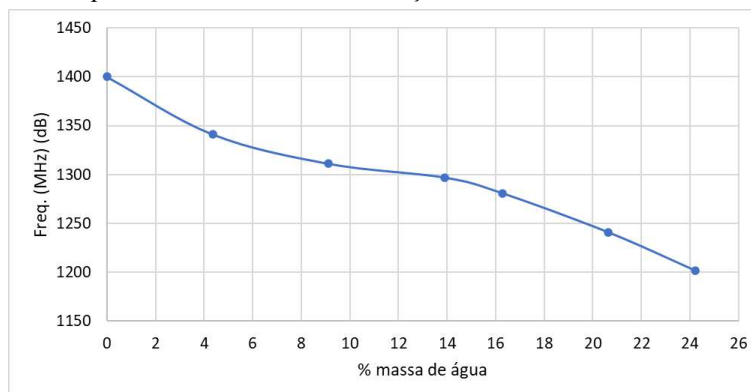


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XVIII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra I)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	213	0,00	1444
2	227	6,57	1401
4	235	10,33	1336
6	242	13,62	1281
8	249	16,90	1249
10	257	20,66	1218
12	265	24,41	1150

Figura 53 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra II.

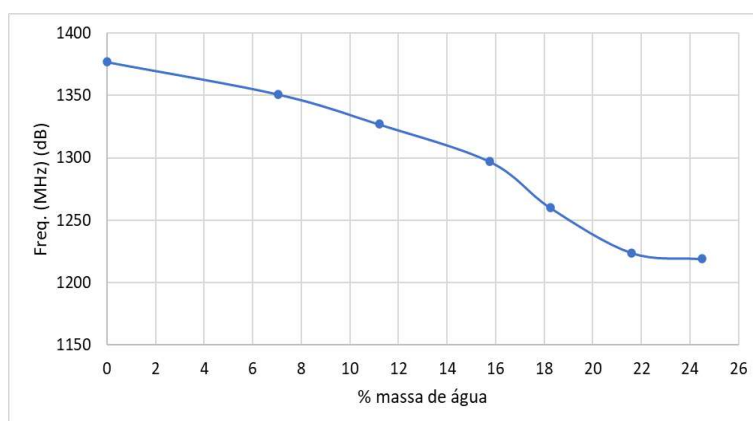


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XIX – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra II)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	252	0,00	1400
2	263	4,37	1341
4	275	9,13	1311
6	287	13,89	1281
8	293	16,27	1297
10	304	20,63	1241
12	313	24,21	1202

Figura 54 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra III.

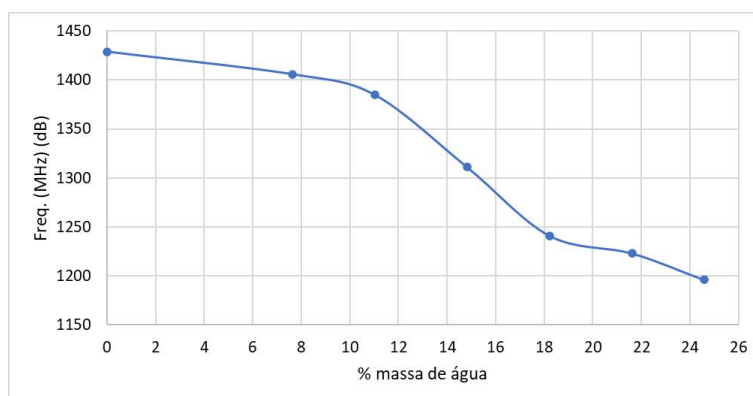


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XX – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra III)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	241	0,00	1377
2	258	7,05	1351
4	268	11,20	1327
6	279	15,77	1297
8	285	18,26	1260
10	293	21,58	1224
12	300	24,48	1219

Figura 55 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra IV.

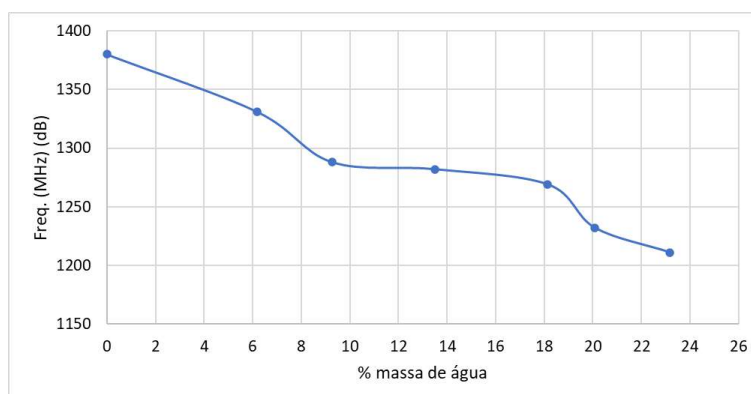


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XXI – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra IV)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	236	0,00	1429
2	254	6,18	1406
4	262	9,27	1385
6	271	13,51	1311
8	279	18,15	1241
10	287	20,08	1223
12	294	23,17	1196

Figura 56 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra V.

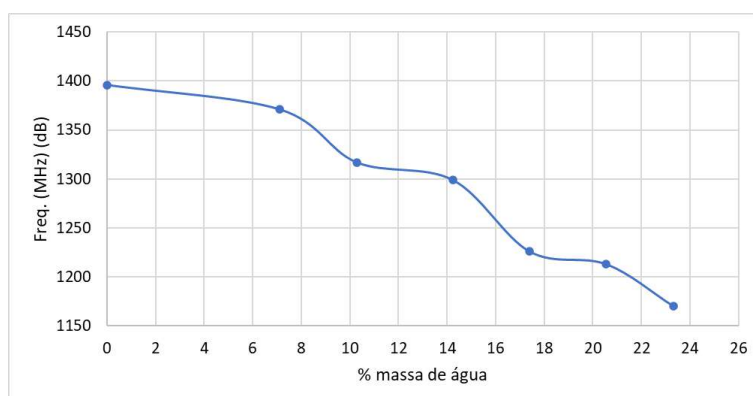


Fonte: Elaborado pela própria autora

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	259	0,00	1380
2	275	6,18	1331
4	283	9,27	1288
6	294	13,51	1282
8	306	18,15	1269
10	311	20,08	1232
12	319	23,17	1211

Tabela XXII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra V)

Figura 57 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra VI.

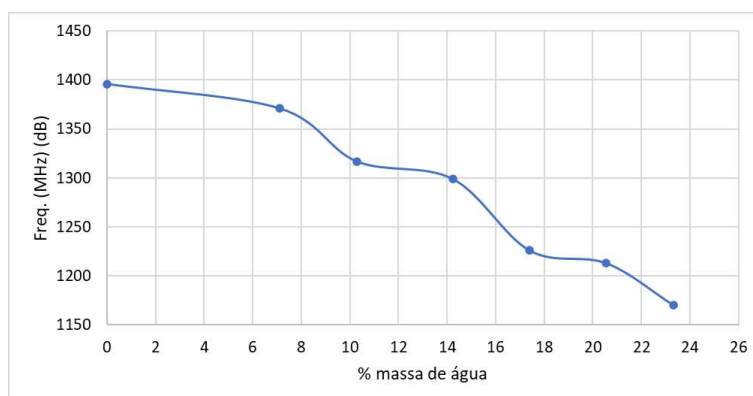


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XXIII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra VI)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	253	0,00	1396
2	271	7,11	1371
4	279	10,28	1317
6	289	14,23	1299
8	297	17,39	1226
10	305	20,55	1213
12	312	23,32	1170

Figura 58 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra VII.

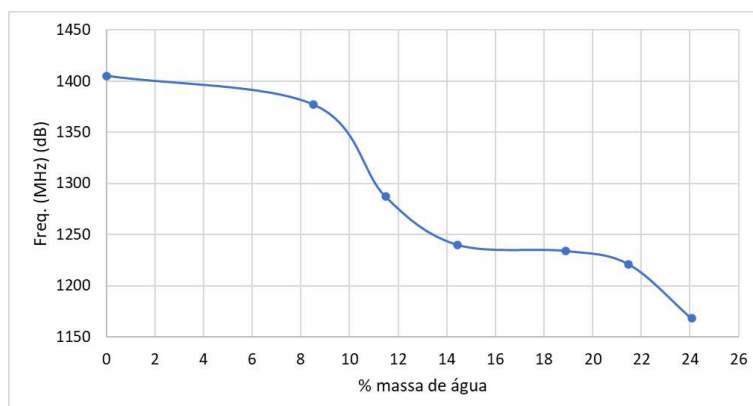


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XXIV – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra VII)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	240	0,00	1408
2	256	6,67	1360
4	261	8,75	1313
6	268	11,67	1297
8	274	14,17	1250
10	281	17,08	1240
12	289	20,42	1180

Figura 59 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra VIII.

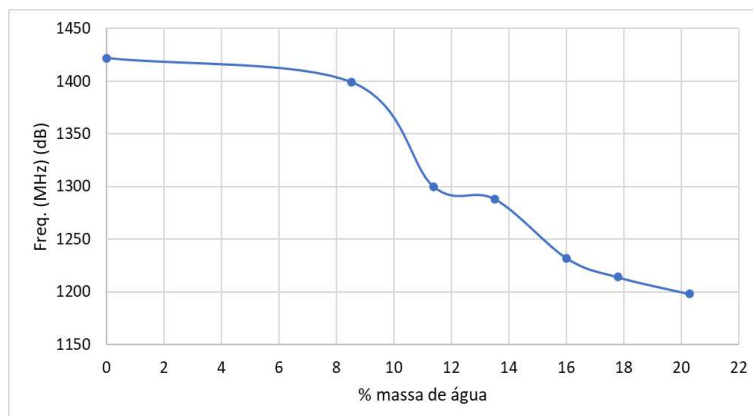


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XXV – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra VIII)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	270	0,00	1405
2	293	7,11	1377
4	301	10,28	1287
6	309	14,23	1240
8	321	17,39	1234
10	328	20,55	1221
12	335	23,32	1168

Figura 60 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra IX.

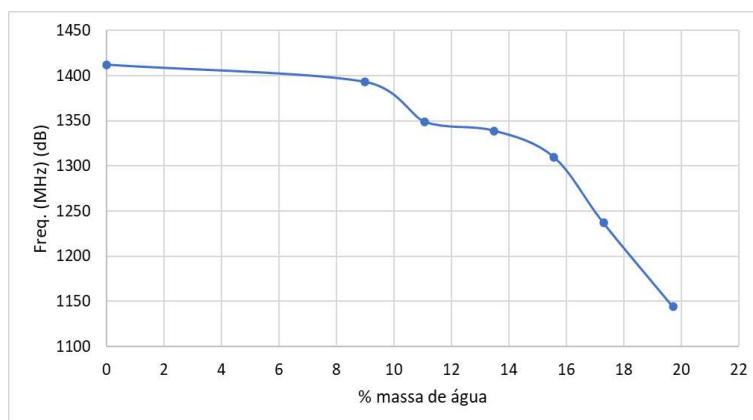


Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XXVI – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra IX)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	281	0,00	1422
2	305	8,54	1399
4	313	11,39	1300
6	319	13,52	1288
8	326	16,01	1232
10	331	17,79	1214
12	338	20,28	1198

Figura 61 – Gráfico da frequência de ressonância em função do incremento da umidade (%) para Amostra X.



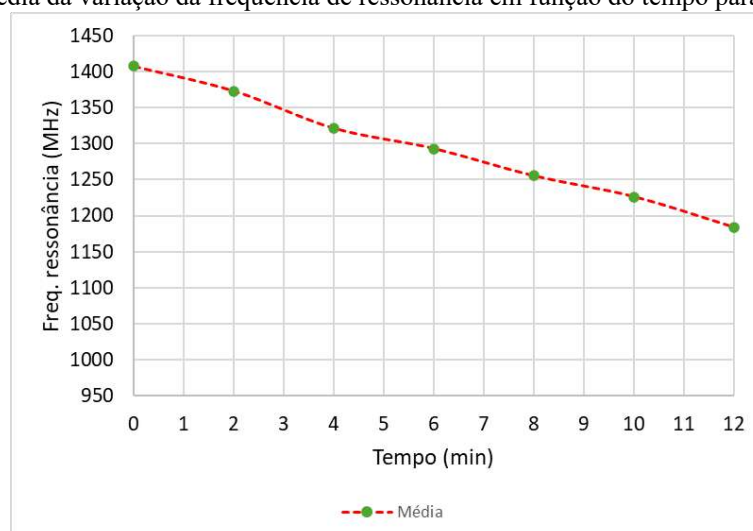
Fonte: Elaborado pela própria autora

Tabela XXVII – Valores de massa de água e frequência de ressonância (Amostra X)

TEMPO (MIN)	MASSA TOTAL (g)	INCREMENTO DA UMIDADE DOS GRÃOS %	FREQ. (MHZ)
0	289	0,00	1412
2	315	9,00	1393
4	321	11,07	1349
6	328	13,49	1339
8	334	15,57	1310
10	339	17,30	1237
12	346	19,72	1144

Na Figura 62 é mostrado o resultado do valor médio da medição da frequência de ressonância em função tempo, considerando as das amostras I–X.

Figura 62 – Média da variação da frequência de ressonância em função do tempo para amostras I–X.

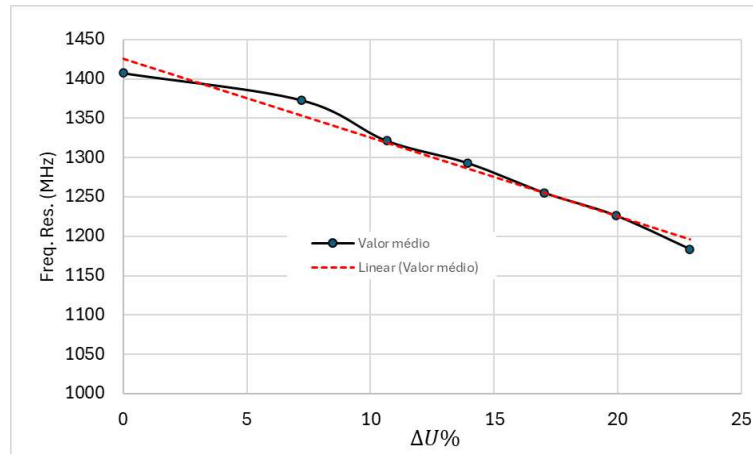


Fonte: Elaborado pela própria autora

A Figura 63 apresenta a curva de frequência de ressonância média em função do incremento da umidade dos grãos de feijão, juntamente com sua interpolação linear, que é representada pela Equação (6).

$$freq.res. (MHz) = -10,00 \times \Delta U\% + 1425,20 \quad (6)$$

Figura 63 – Média da variação da frequência de ressonância em função do incremento da umidade para amostras I–X.



Fonte: Elaborado pela própria autora

Embora as Equações (5) e (6) apresentem coeficientes de inclinação diferentes, provavelmente essa diferença decorre do menor número de amostras da etapa 1.

Um resultado bastante interessante é obtido considerando a totalidade dos valores medidos e não apenas os valores médios. Nesse caso se o incremento da umidade é o mesmo para diferentes medições, considera-se o valor médio frequência de ressonância. Por exemplo, o incremento de umidade de 14,2% foi medido em três amostras, apresentando uma frequência de ressonância média de 1274,5 MHz, como exemplificado na Tabela XXVIII.

Tabela XXVIII – Exemplo do procedimento adotado considerando a totalidade dos valores medidos.

$\Delta U\%$	FREQ. RES. MEDIDA (MHZ)	FREQ. RES. CONSIDERADA (MHZ)
14,2	1299	1274,5
14,2	1250	
14,4	1240	
15,3	1311	1311
15,6	1310	1310
15,7	1297	1297

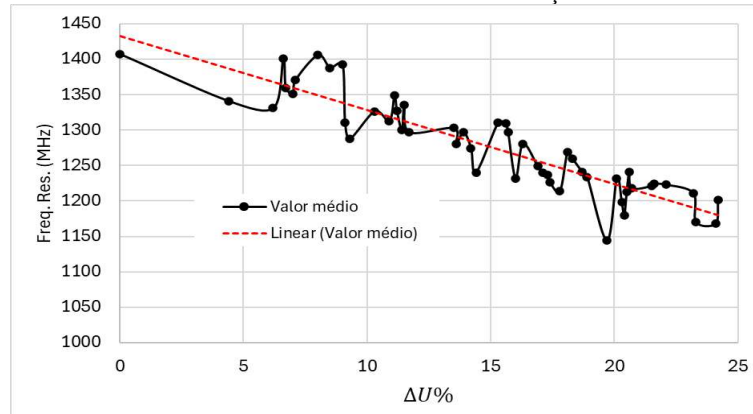
Fonte: Elaborado pela própria autora

Na Figura 65 é apresentado o resultado obtido considerando a totalidade dos valores medidos. Para esse resultado a curva de interpolação é dada pela Equação (7).

$$freq.res. (MHz) = -10,44 \times \Delta U\% + 1432,60 \quad (7)$$

Note que as Equações (6) e (7) são bastante semelhantes, o que indica uma consistência dos dados medidos e indica a viabilidade do sensor proposto.

Figura 65 – Variação da frequência de ressonância em função do incremento da umidade para amostras I–X, considerando a totalidade das medições.



Fonte: Elaborado pela própria autora

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou, o desenvolvimento e a avaliação de um sensor de radiofrequência (RF) inovador, aplicado ao monitoramento do teor de umidade de grãos de feijão. A proposta central deste trabalho se pautou na busca por uma solução que conjugasse simplicidade de projeto e baixo custo de fabricação.

O sensor proposto é baseado na variação da frequência de ressonância de uma estrutura DGS matrioska, para a qual as equações de projeto foram descritas. A partir dessas equações, um protótipo foi fabricado e empregado na medição do teor de umidade de quatorze amostras distintas de grãos de feijão, quatro para a primeira etapa do estudo, e dez para a segunda etapa do estudo. Uma contribuição significativa deste trabalho foi a descrição detalhada e transparente do protocolo de preparação das amostras, essencial para a reprodutibilidade dos resultados.

A análise dos dados medidos resultou em uma taxa média de $-10.44 \text{ MHz}/\Delta U$, um resultado promissor, que valida a aplicação do sensor para o propósito estabelecido. Embora o estudo tenha se limitado a grãos de feijão, é razoável concluir e prever que o comportamento monotônico das curvas de resposta em frequência se manterá para diferentes tipos de grãos (por exemplo, arroz, soja ou milho), embora com sensibilidades distintas.

Ao demonstrar a funcionalidade em conjunto com um Analisador de Redes Vetoriais (VNA) portátil de baixo custo, o sensor proposto se revela altamente versátil, adequado não apenas para aplicações controladas em laboratório, mas também para monitoramento eficiente em campo. Adicionalmente, seu princípio de medição permite o acoplamento a sistemas de processamento industrial, estabelecendo-o como um eficiente meio de mensuração em escala.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se:

- Avaliação do funcionamento do sensor para outros grãos, como milho, soja, arroz e sementes de algodão.
- Análise da sensibilidade do sensor para outras frequências de ressonância em vazio.
- Utilização de mais de uma DGS-matrioska como elemento sensor.

TRABALHOS PUBLICADOS

1-Alexandre, M. L. R.; Cohen, M. V. R.; Silva, J. C. E.; Carvalho, J. N.; Gomes Neto, A. .
“Sensor RF para Monitoramento do Teor de Umidade em Grão de Feijão”. In: *2025 6th Simpósio de Pesquisa Inovação e Pós-Graduação do Instituto Federal da Paraíba - SIMPIF*, João Pessoa - PB, 2025.

2- Alexandre, M. L. R.; Cohen, M. V. R.; Silva, J. C. E.; Carvalho, J. N.; Gomes Neto, A. .
“Sensor RF para Monitoramento do Teor de Umidade em Grão de Feijão”. In: *2025. IMOC*, IEEE, Campina Grande - PB, 2025.

PREMIAÇÕES

1-Primeiro Melhor Trabalho no *Simpósio de Pesquisa Inovação e Pós-Graduação do Instituto Federal da Paraíba - SIMPIF*, João Pessoa - PB, 2025. In: *2025 6th* .“Sensor RF para Monitoramento do Teor de Umidade em Grão de Feijão”. Alexandre, M. L. R.; Cohen, M. V. R.; Silva, J. C. E.; Carvalho, J. N.; Gomes Neto, A.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Raj, M. Prahadeeswaran, “Revolutionizing agriculture: a review of smart farming technologies for a sustainable future,”. *Discover Applied Sciences*, vol. 7, 937, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07561-6>
- [2] A. N. Jasim and L. C. Fourati, “Agriculture 4.0 from IoT, Artificial Intelligence, Drone, & Blockchain Perspectives,” *2023 15th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, Baghdad & Anbar, Iraq, 2023, pp. 262-267, doi: 10.1109/DeSE58274.2023.10099927.
- [3] “Grãos: armazenamento de milho, soja, feijão e café.” / Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. – Brasília: Senar, 2018. 100 p.; il. – (Coleção SENAR 216)
- [4] S. A. Bragatto, W. D. Barrella, “Otimização do Sistema de Armazenagem de Grãos: Um estudo de caso,” *Revista Produção – online*, vol. 1, no. 1, outubro, 2001. <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v1i1.587>.
- [5] R. A. Kin. **Avaliação de métodos para determinação de umidade em grãos: Arroz (*Oryza sativa* L.), Feijão (*Faseolus vulgaris*) e Milho (*Zea mays*).** Universidade Federal do Pampa, Departamento de Agronomia, 2015. Orientação: Leomar Hackbart da Silva.
- [6] G. de M. Araújo, **Dissertação: Sistema de baixo custo para determinação do teor de água e massa específica aparente de feijão e milho.** Universidade Federal de Viçosa, MG, 2018. Orientação: Daniel Marçal de Queiroz.
- [7] Omar Flor, Héctor Palacios, Franyelit Suárez, Katherine Salazar, Luis Reyes, Mario González and Karina Jiménez, “New Sensing Technologies for Grain Moisture,” *Agriculture*, vol. 12(3), 386, 2022, <https://doi.org/10.3390/agriculture12030386>.
- [8] Marrari Automação, “Grãos: Importância da medição precisa de umidade na qualidade”,. 02/08/2024. Disponível em <https://www.marrari.com.br/graos-e-sementes-pt/medicao-precisa-da-umidade-de-graos/>, consultado em: 27/03/2025.
- [9] Reni Saath, Gustavo Soares Wenneck, Rayssa Gabriella Moi de Souza, Lydyanne Sayuri Marques Mashiba, Maria Catharina Polo Fracini, Jamilly França, Raissa Presotto Bertolo, Gabriela Cristina Ghuidotti, “Determination of water content in grains with microwave oven,” *Colloquium Agrariae*, 19(1):192-197, July 2023 doi:10.5747/ca.2023.v19.h523.
- [10] CEPEA – Centro de Estudos Avançados Em Economia Aplicada. Documento: “Série Histórica do PIB do agronegócio brasileiro”, 2025. Link: <https://www.cepea.org.br/br/pib-do-agronegocio-brasileiro.aspx>. Acessado: 29 de outubro de 2025.
- [11] CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, Documento: “Acompanhamento da safra brasileira, Grãos, Safra 2025/26 (1º Levantamento)”, 2025. Link:

https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/1o-levantamento-safra-2025-26/e-book_boletim-de-safras-1o-levantamento_2025.pdf. Acessado: 29 de outubro de 2025.

- [12] Angélica A. Demito, **Efeitos da umidade e da temperatura de armazenamento sobre parâmetros de avaliação de propriedades tecnológicas e nutricionais de grãos de feijão carioca**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2019.
- [13] L. C. Miranda, W. R. Silva, C. Cavariani. “Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. I. Monitoramento físico.” *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2097-2108, 1999.
- [14] J. Lloret, J. M. Jimenez, L. Garcia, S. Sendra, “A Wireless Sensor Network Deployment for Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture” *Sensors*, 2021, no. 21, 7243. [doi:10.3390/s21217243](https://doi.org/10.3390/s21217243)
- [15] J. S. Hong and M. J. Lancaster, “Microstrip Filters for RF Microwave Applications”, John Wiley, New York, 2001.
- [16] C. A. Balanis, **Antenna Theory: Analysis and Design**, 3rd Edition, New York, USA: J. Wiley and Sons, Inc; 2005.
- [17] D. F. Mamedes; A. Gomes Neto; J. Bornemann; J. C. e Silva; F. A. T Abreu. “A Sensor Using a Matryoshka Geometry Defected Ground Structure,” In: *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2022, Madrid.
- [18] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, S. S. Camilo Filho, D. A. Santos, B. L. C. de Albuquerque, “A Defected Ground Structure Based on Matryoshka Geometry”, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 21, no. 2, June 2022. doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2256115
- [19] M. K. Khandelwal, B. K. Kanaujia, S. Kumar, "Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, Article ID 2018527, 22 pages, 2017. doi.org/10.1155/2017/2018527
- [20] Li H. Weng, Yu-C. Guo, Xiao-W. Shi, and Xiao-O. Chen, "An Overview on Defected Ground Structure", *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 7, pp. 173-189, 2008. [doi:10.2528/PIERB08031401](https://doi.org/10.2528/PIERB08031401).
- [21] H. de P. A. Ferreira, **Matrioska: Uma Proposta de Geometria para FSS Multibandas**, Dissertação de Mestrado, Orientador: Dr. Alfredo Gomes Neto.– Instituto Federal da Paraíba - IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2014.
- [22] A. Gomes Neto, A. G. DAssunção, J. C. e. Silva, A. N. d. Silva, H. d. P. A. Ferreira and I. S. S. Lima, "A proposed geometry for multi-resonant frequency selective

- surfaces," 2014 44th *European Microwave Conference*, Rome, Italy, 2014, pp. 897-900, doi: 10.1109/EuMC.2014.6986580.
- [23] A. C. de C. Bernardi; J. de M. Naime; A. V. Resende; L.H. Bassoi; R. Y. Inamasu, "Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar." – Brasília, DF : Embrapa, 2014. Link: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1002959/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar> . Acessado: 29 de outubro de 2025.
- [24] D. M. de Queiroz, A. L. de F. Coelho, D. Sárvio M. Valente, J.K. Schueller, "Sensors applied to Digital Agriculture: A review. Revista Ciência Agronômica", v. 51, *Special Agriculture 4.0*, e20207751, 2020. Centro de Ciências Agrárias - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, www.ccarevista.ufc.br.
- [25] Y. Liu, J. Zhang, H. Yuan, M. Song, Y. Zhu, W. Cao, X. Jiang, J. Ni, "Non-Destructive Quality-Detection Techniques for Cereal Grains: A Systematic Review," *Agronomy*, 2022, 12, 3187. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123187>.
- [26] G. de M. Araújo, **Sistema de baixo custo para determinação do teor de água e massa específica aparente de feijão e milho**. Dissertação (Mestrado). Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, MG, 2018.
- [27] B. K. Kanaujia, M. K. Khandelwal and S. Kumar, "Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, Article ID 2018527, 22 pages, 2017. doi: 10.1155/2017/2018527,
- [28] Breed, G.. (2008). "An Introduction to Defected Ground Structures in Microstrip Circuits". High Freq Electron. Ed. 7th.
- [29] R. C. Mahajan, V. Parashar, V. Vyas, M. Sutaone, "Design and implementation of defected ground surface with modified co-planar waveguide transmission line,". *SN Appl. Sci.* 1, 251 (2019). doi: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0245-6>
- [30] B. P. Stošić, M. Nedelchev, N. S. Dončov and A. Kolev, "Wave Digital Model of Edge Coupled Filter Based on Halfwave Coupled Resonator with Dumbbell-Shaped DGS," *2019 14th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, Nis, Serbia, 2019, pp. 29-32, doi: 10.1109/TELSIKS46999.2019.9002355.
- [31] Alicia Enterman "The Matryoshka Doll in Russian Culture", 15 December 2009. Disponível em: <https://www.macalester.edu/russian-studies/about/resources/miscellany/matryoshka/> . Consultado em 11/01/2026.
- [32] <http://www.hp.woodshot.com>. Consultado em 07/05/2025.
- [33] B. L. C. de Albuquerque, **Desenvolvimento de Sensor de Umidade do Solo utilizando DGS baseado na Geometria Matrioska**. Dissertação (Mestrado) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE). Orientador: Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto. Instituto Federal da Paraíba, 2023.

- [34] https://www.amazon.com.br/Balan%C3%A7a-Cozinha-Digital-Praticidade_sf-400-Pesa/dp/B0DZRN7PJ2. Consultado em 04/08/2025.
- [35] <https://www.amazon.com/LiteVNA-64-Analyzer-50KHz-6-3GHz-Portable-Vector/dp/B09T2LYY65>. Consultado em 04/08/2025.
- [36] <https://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=294660055>. Consultado em 02/09/2025.