



Ricardo Cavalcanti Costa

**CARACTERIZAÇÃO DIELÉTRICA DO *CARICA PAPAYA*  
UTILIZANDO SENSOR *DGS MATRIOSKA***

Orientador: Joabson Nogueira de Carvalho, Dr.

João Pessoa – PB  
Março de 2024

Ricardo Cavalcanti Costa

**CARACTERIZAÇÃO DIELÉTRICA DO *CARICA PAPAYA*  
UTILIZANDO SENSOR *DGS 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. Joabson Nogueira de Carvalho

João Pessoa - PB

Março de 2024

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

C838c	Costa, Ricardo Cavalcanti.  Caracterização dielétrica do Carica papaya utilizando sensor DGS matrioska / Ricardo Cavalcanti Costa. – 2024. 41 f. : il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba – IFPB / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), 2024. Orientação : Prof. D.r Joabson Nogueira.de Carvalho  1.Sensor DGS. 2. Mamão papaya. 3.Geometria matrioska. 4. Permissividade elétrica. I. Título.  CDU 621.382(043)
-------	---



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU***  
**MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**RICARDO CAVALCANTI COSTA**

**CARACTERIZAÇÃO DIELÉTRICA DO CARICA PAPAYA UTILIZANDO SENSOR DGS MATRIOSKA**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB - Campus João Pessoa.

Aprovado em 27 de março de 2024.

**Membros da Banca Examinadora:**

**Dr. Joabson Nogueira de Carvalho**

IFPB – PPGEE

**Dr. Alfrêdo Gomes Neto**

IFPB - PPGEE

**Dr. Jefferson Costa e Silva**

IFPB – PPGEE

**Dr. Gustavo Araújo Cavalcante**

IFPB - PPGEE

João Pessoa/2024

Documento assinado eletronicamente por:

- **Joabson Nogueira de Carvalho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/03/2024 13:31:57.
- **Alfredo Gomes Neto, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 28/03/2024 17:11:41.
- **Jefferson Costa e Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 30/03/2024 09:33:03.
- **Gustavo Araujo Cavalcante, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 01/04/2024 09:25:30.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 20/03/2024. 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 549791  
Verificador: 18435bd5aa  
Código de Autenticação:



## DEDICATÓRIA

Ao meu Deus, que me deu toda a disposição, coragem e esperança para enfrentar os obstáculos e minha família que ficou ao meu lado me ajudando nos momentos difíceis.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela força necessária para superar todos os obstáculos e contratemplos ao longo deste tempo de conclusão deste trabalho.

A minha esposa, Luana, meus pais, Silvio e Girlene e amigos, que me deram forças para concluir o trabalho, sempre com uma mão amiga e palavras de conforto e esperança.

Ao professor Joabson por ter sido meu orientador e por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência, que me ajudou a ter ânimo para concluir o trabalho.

Ao GTEMA, pela disponibilização de materiais e equipamentos que serviram como meio para a elaboração deste trabalho científico.

## EPÍGRAFE

*“Não vos preocupeis, pois, com o dia de amanhã:  
o dia de amanhã terá as suas preocupações  
próprias. A cada dia basta o seu cuidado.”*

*(Mateus 6,34, Bíblia Sagrada Ave-Maria)*

## RESUMO

Este trabalho mostra o desenvolvimento de um sensor planar DGS tipo Matrioska, aplicado na caracterização eletromagnética de uma amostra de mamão papaia durante a fase de maturação dos frutos. O mamão papaia e demais frutos do mesmo grupo, como banana, abacate, manga, pêra e maracujá, são frutas climatéricas, que continuam o processo de maturação mesmo após sua colheita. Nesta fase, uma série de transformações físicas e químicas ocorrem no fruto, resultando na variação das propriedades eletromagnéticas do fruto, especificamente a permissividade elétrica e a condutividade. Nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento de um sensor e seu emprego na determinação da variação da permissividade elétrica do mamão através da variação da frequência de ressonância da estrutura. As medições foram realizadas durante um período de 10 dias, que compreendeu desde o fruto imaturo, completamente verde, sem sinal de amarelecimento, até o estágio de senescência, quando ocorre a ruptura da fibra do fruto e conseqüentemente sua perda. Os resultados mostraram uma grande variação da permissividade do fruto ao longo do processo de maturação, que pode representar que a permissividade pode ser um indicador do nível de maturação em substituição a variação da cor da casca.

**Palavras-chave:** DGS; mamão papaia; permissividade elétrica; sensor.

## **ABSTRACT**

This work shows the development of a Matrioska-type planar DGS sensor, applied to the electromagnetic characterization of a papaya sample during the fruit maturation phase. Papaya and other fruits from the same group, such as banana, avocado, mango, pear and passion fruit, are climacteric fruits, which continue the maturation process even after harvest. At this stage, a series of physical and chemical transformations occur in the fruit, resulting in the variation of the fruit's electromagnetic properties, specifically electrical permittivity and conductivity. This dissertation presents the development of a sensor and its use in determining the variation of the electrical permittivity of papaya through the variation of the structure's resonance frequency. The measurements were carried out over a period of 10 days, which ranged from the immature fruit, completely green, with no sign of yellowing, to the senescence stage, when the fruit fiber ruptured and consequently lost. The results showed a large variation in the permissiveness of the fruit throughout the maturation process, which may represent that the permissiveness can be an indicator of the level of ripeness rather than the variation in skin color.

**Keywords:** DGS; papaya; electrical permittivity; sensor.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estádios de maturação do mamão.	16
Figura 2 – Exemplo de estrutura DGS com geometria halteres.	17
Figura 3 – Geometria do anel matrioska.	17
Figura 4 – Exemplo de estrutura DGS com geometria matrioska.	18
Figura 5 – Exemplo de bonecas matrioska.	20
Figura 6 – Configuração da geometria matrioska.	21
Figura 7 – Geometria matrioska com dois anéis concêntricos, um anel matrioska.	21
Figura 8 – Sensor DGS com geometria matrioska.	22
Figura 9 – DGS matrioska.	23
Figura 10 – Dimensões do sensor DGS com geometria matrioska.	23
Figura 11 – Estrutura do sensor DGS matrioska simulado	24
Figura 12 – S21 [dB] versus frequência simulada para diversos valores de permissividade.	25
Figura 13 – Estrutura do sensor DGS matrioska utilizado nas medições.	25
Figura 14 – VNA Lite utilizado para fazer as medições de frequência de ressonância do sensor	26
Figura 15 – Conjunto de Provas Dielétricas 85070E, acoplado ao Analisador de Redes Vetorial E5071C.	26
Figura 16 – Curva de calibração do sensor.	27
Figura 17 – Gráfico de comparação dos valores medidos e simulados da frequência de ressonância da água destilada e álcool isopropílico.	28
Figura 18 – Medição de peso do mamão.	29
Figura 19 – Medição do comprimento ao redor do mamão.	30
Figura 20 – Medição do comprimento de ponta a ponta do mamão.	30
Figura 21 – Comparação no período de 10 dias para os 10 mamões de peso, comprimento ao redor e ponta a ponta.	31
Figura 22 – Gráfico exemplo da medição do mamão 1 no 1º dia para a 1ª e 2ª frequência de ressonância.	33
Figura 23 – Média para cada um dos dez mamões para a 1ª frequência de ressonância ao longo dos dez dias.	35
Figura 24 – 1ª frequência de ressonância para cada mamão ao longo dos dez dias.	35
Figura 25 – Média para cada um dos dez mamões para a 2ª frequência de ressonância ao longo dos dez dias.	37
Figura 26 – 2ª frequência de ressonância para cada mamão ao longo dos dez dias.	37

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Dimensões do sensor DGS matrioska (mm).	23
Tabela 2 – Relação entre frequência de ressonância do DGS em GHz e a constante dielétrica relativa.	27
Tabela 3 – Comparação dos resultados medidos e simulados da frequência de ressonância e os valores de tangente de perdas medido e simulado para a água destilada e álcool isopropílico.	28
Tabela 4 – Tabela das medições diárias de peso dos mamões.	30
Tabela 5 – Tabela das medições diárias de comprimento ao redor dos mamões.	31
Tabela 6 – Tabela das medições diárias de comprimento ponta a ponta dos mamões.	31
Tabela 7 – 1ª Frequência de ressonância de cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias.	33
Tabela 8 – Média e desvio padrão para a 1ª frequência de ressonância para os 10 mamões em 10 dias.	34
Tabela 9 – Permissividade elétrica relativa para cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias.	34
Tabela 10 – Média e desvio padrão da permissividade elétrica relativa para os 10 mamões em 10 dias.	34
Tabela 11 – 2ª Frequência de ressonância de cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias.	36
Tabela 12 – Média e desvio padrão para a 2ª frequência de ressonância para os 10 mamões em 10 dias.	36

**LISTA DE SIGLAS**

DGS	<i>Defected Ground Structure</i> , Estrutura com Defeito no Plano Terra
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
MUT	<i>Material Under Test</i> , Material em teste
FR-4	Material laminado epóxi reforçado com fibra de vidro
IBRAF	Instituto Brasileiro de Frutas
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i> , Analisador de rede vetorial
HFSS	<i>High Frequency Simulation Software</i> , Software de simulação de alta frequência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$f_{res}$	Frequência de ressonância
$L_{eff}$	Comprimento efetivo
$\epsilon_{reff}$	Permissividade elétrica relativa efetiva
$\epsilon_r$	Permissividade elétrica relativa
W	Largura da linha de microfita
h	Espessura do substrato
$\theta$	Ângulo da curva da linha de microfita em formato de U com o eixo vertical
tg ( $\delta$ )	Tangente de perda
$W_{ma}$	Espessura da linha do anel matrioska
$W_{ma1}$	Comprimento do lado do anel matrioska quadrado 1
$W_{ma2}$	Comprimento do lado do anel matrioska quadrado 2
$g$	Largura da fenda
$W_{ma1-avg}$	Comprimento médio do lado do anel matrioska quadrado 1
$W_{ma2-avg}$	Comprimento médio do lado do anel matrioska quadrado 2
$W_{xma1}$	Comprimento ao longo da direção x do anel matrioska 1
$W_{xma2}$	Comprimento ao longo da direção x do anel matrioska 2
$W_{yma1}$	Comprimento ao longo da direção y do anel matrioska 1
$W_{yma2}$	Comprimento ao longo da direção y do anel matrioska 2
°C	Graus Celsius
cm	Centímetros
g	Gramas
GHz	Gigahertz

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1. Objetivos	18
1.1.1. Objetivo geral	18
1.1.2. Objetivos específicos	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>20</b>
2.1. Geometria matrioska	20
2.2. Sensor DGS com geometria matrioska	22
<b>3. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS</b>	<b>24</b>
3.1. Medição da permissividade do mamão papaia	29
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>40</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O mamão papaia, cujo nome científico é *Carica Papaya*, está entre as frutas tropicais mais produzidas no mundo. Esta espécie é nativa da América Latina, sendo cultivada em regiões tropicais e semitropicais, sendo produzida em toda bacia amazônica superior [1] e nos estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte e Minas Gerais [2]. O Brasil é um dos maiores produtores de mamão no mundo, correspondendo em torno de mais de 1 milhão de toneladas por ano, que representa cerca de 25 % da produção global, dado de 2022, pelo Instituto Brasileiro de Frutas (IBRAF). O país, além de produzir para o mercado interno, exporta também para diversos outros países. Em 2022, no *ranking* de exportações de frutas, o mamão foi a sétima fruta mais exportada pelo Brasil e os principais importadores foram os países europeus [3].

O mamão é consumido normalmente *in natura*, entretando, a polpa do fruto maduro é utilizada na indústria de alimentos para a produção de néctares, conservas, geleias e sucos. As perdas do fruto no Brasil possuem faixas de variação entre 10% e 40% devido à refrigeração não apropriada e problemas no transporte. No momento do processamento do mamão, em torno de 50% não é aproveitada [1].

O ciclo vital do fruto possui diferentes fases: o crescimento, a maturação, o amadurecimento e senescência. O crescimento do mamão ocorre por meio de diferentes processos fisiológicos e metabólicos através da inibição dos mecanismos de oposição ao crescimento, a produção de energia necessária ao processo e o estímulo dos mecanismos biossintéticos [4]. A maturação ocorre antes do desenvolvimento final do fruto e neste estágio ele se torna apto para o consumo e é nesse estágio que são, geralmente, colhidos. O amadurecimento é caracterizado pelo início dos processos degradativos, em que são alterados a pigmentação, a textura, o sabor e o aroma. Na senescência é o estágio final do fruto e é caracterizado pelo envelhecimento e morte dos tecidos do mamão [4].

O mamão é um fruto climatérico, pois apresenta elevada taxa respiratória e produção de etileno, um hormônio de maturação e envelhecimento, posterior a colheita [5]. Na temperatura ambiente, o fruto completa o seu ciclo de amadurecimento em alguns dias, sendo considerado como um fruto de vida curta após a colheita [4]. Ao longo de seu amadurecimento ocorrem diferentes transformações, que levam ao seu amolecimento, à degradação, à síntese de compostos e outros [6].

Com o amadurecimento do fruto ocorre a degradação da clorofila (pigmento que

dá a coloração verde), síntese de carotenoides (grupo de pigmentos de aparência laranja, vermelha e amarela), que levam às mudanças de coloração da casca [4]. O mamão apresenta diferentes estádios de maturação, que faz variar o peso, o comprimento, a coloração e até as suas características dielétricas como a frequência de ressonância quando medidas por um sensor de microfita.

A Figura 1 ilustra os diferentes estádios de maturação do mamão com a escala de cores para cada um dos estádios.

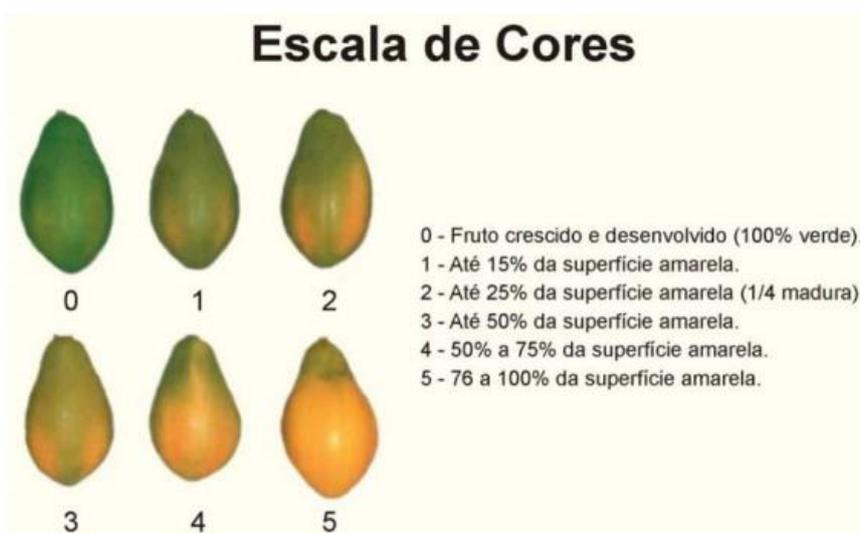


Figura 1 – Estádios de maturação do mamão. Fonte: [7]

Nesta dissertação de mestrado é investigada a permissividade elétrica do mamão papaia durante o processo de maturação. Para tanto, foi desenvolvido um sensor do tipo DGS, que são estruturas com modificação no plano terra, baseados na geometria matrioska. O emprego desse tipo de dispositivo, quando colocado a janelas do DGS em contato com o fruto, altera a frequência de ressonância da estrutura em função da variação da permissividade elétrica do fruto. Dessa forma, é possível obter a variação da permissividade do mamão ao longo do período de maturação verificando o deslocamento da frequência de ressonância da estrutura.

As estruturas DGS são formadas a partir da retirada de uma parte do plano terra de uma linha de transmissão planar. A geometria da parte removida é um dos critérios mais flexíveis no projeto de estruturas DGS, no qual a sua resposta em frequência pode ser ajustada [8]. A Figura 2 ilustra este exemplo de estrutura DGS com geometria

halteres com linha de microfita, que é a fita condutora de largura  $w$ , impresso sobre uma das faces de um substrato dielétrico de permissividade relativa  $\epsilon_r$ , espessura  $h$  e um plano condutor na outra face.

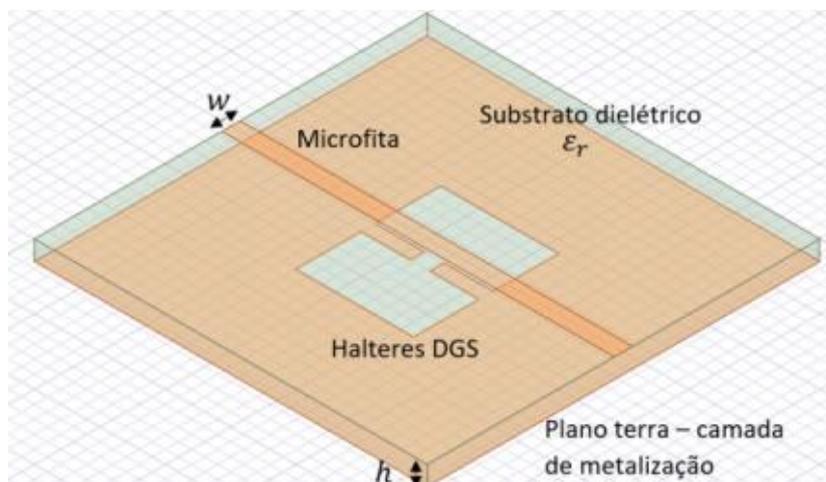


Figura 2 – Exemplo de estrutura DGS com geometria halteres. Fonte: [8]

Dentre as geometrias estudadas no Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), está a geometria matrioska, que possui características de miniaturização e seletividade. Essa geometria apresenta anéis concêntricos interligados, que aumenta seu comprimento efetivo, sem ocupar uma área maior do que a área do anel mais externo [8], como é ilustrada na Figura 3.



Figura 3 – Geometria do anel matrioska. Fonte: [8]

a) Anel matrioska [8]

b) Anel matrioska expandido [8]

A partir dessa geometria matrioska é possível construir sensores DGS matrioska, cujo parâmetro de interesse a ser calculado é a frequência de ressonância, que no caso dessa dissertação é aplicado para o mamão. A Figura 4 ilustra a estrutura do sensor DGS com geometria matrioska.

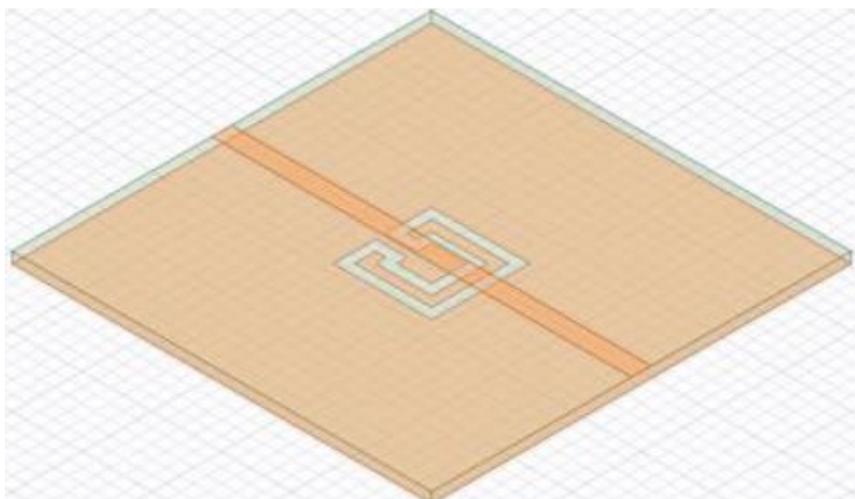


Figura 4 – Exemplo de estrutura DGS com geometria matrioska. Fonte: [8]

A geometria matrioska foi escolhida por apresentar características de seletividade numa ampla faixa de valores de permissividade, como é esperado que ocorra com o mamão, desde seu estado inicial (fruta mais seca, com menor permissividade), até o estado de senescência, com as fibras com alto teor de água.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Esta dissertação tem como objetivo geral caracterizar a variação da permissividade elétrica do mamão papaia através do sensor com estrutura DGS baseado na geometria matrioska.

### 1.1.2 Objetivos específicos

A fim de que o objetivo geral fosse alcançado, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Revisar a bibliografia referente ao trabalho e compreender os conceitos das características dielétricas do mamão e dos sensores DGS;
- ✓ Entender as características da geometria matrioska, com suas equações iniciais;
- ✓ Compreender o princípio da frequência de ressonância do sensor medida para cada mamão;
- ✓ Comparar as medições da 1ª e 2ª frequência de ressonância dos mamões medidos;
- ✓ Calcular a média e o desvio padrão da 1ª e 2ª frequência de ressonância para cada dia dos mamões envolvidos;
- ✓ Analisar os resultados medidos das frequências de ressonância, média e desvio padrão;
- ✓ Caracterizar dieletricamente o mamão papaia por meio da medição de permissividade elétrica relativa ao longo do período de amadurecimento do mamão;
- ✓ Divulgar os resultados obtidos por meio da publicação de artigos em congressos e/ou periódicos específicos da área; e
- ✓ Elaborar e defender a dissertação do mestrado.

No capítulo seguinte são apresentadas as concepções básicas da geometria matrioska, sua origem, equações básicas e seus parâmetros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho estuda as características dielétricas do mamão papaia e para tanto, necessita de um aprofundamento nas características do sensor DGS com geometria matrioska para melhor entendimento de seus resultados. O tópico a seguir descreve um pouco dessa geometria.

### 2.1. Geometria matrioska

A geometria matrioska é assim denominada, pois foi associada às bonecas russas matrioskas [8]. Essas estruturas são constituídas por uma série de bonecas postas uma dentro das outras, expandindo-se da maior (mais externa) até a menor (mais interna) em várias bonecas, ocupando somente o volume delimitado pela boneca mais externa, como é ilustrado na Figura 5 a seguir [9].



Figura 5 – Exemplo de bonecas matrioska. Fonte: [9]

De maneira similar, o sensor é constituído por anéis concêntricos, de modo que, os anéis permanecem interligados, formando um único anel, sendo essa configuração responsável por aumentar o seu comprimento efetivo [9]. A Figura 6 ilustra essa configuração.

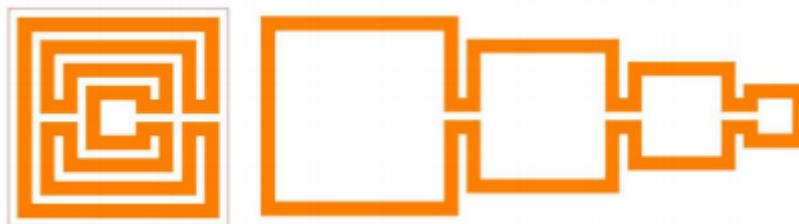


Figura 6 – Configuração da geometria matrioska. Fonte: [9]

- a) Matrioska com 4 anéis      b) Matrioska com os anéis expandidos

As dimensões do anel matrioska são ilustradas na Figura 7.

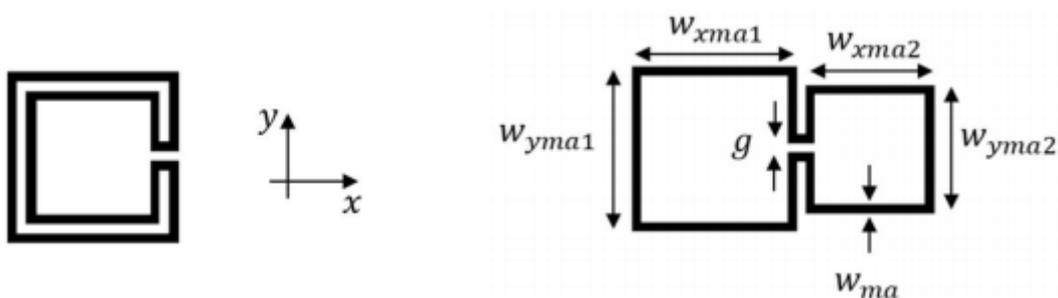


Figura 7 – Geometria matrioska com dois anéis concêntricos, um anel matrioska. Fonte: [8]

- a) Anel matrioska      b) Anel matrioska expandido

Comumente,  $W_{xma1} = W_{yma1} = W_{ma1}$  e  $W_{xma2} = W_{yma2} = W_{ma2}$ . Neste caso, a frequência de ressonância pode ser calculada por [8]:

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

No qual, o comprimento efetivo,  $L_{eff}$ , é calculado pela equação a seguir:

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

e,

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

$\epsilon_{reff}$  é a permissividade elétrica relativa efetiva para a linha de microfita com largura  $W$ , sobre um substrato de espessura  $h$  e permissividade elétrica relativa  $\epsilon_r$ . As equações (1)-(3) são para o sensor em vazio e elas são equações iniciais de projeto, podendo ser posteriormente otimizadas numericamente. A permissividade elétrica relativa efetiva pode ser calculada utilizando programas computacionais, como o disponível em [10].

## 2.2. Sensor DGS com geometria matrioska

Conforme ilustrado na Figura 8, o sensor DGS com geometria matrioska funciona com a colocação do material sob teste, MUT, que para esta dissertação é o mamão, em contato com a região DGS, com o anel matrioska centrado sob a linha de microfita. A largura da linha de microfita é  $w$ , a espessura do substrato  $h$  e sua permissividade elétrica relativa  $\epsilon_r$ , que estão ilustradas na Figura 9. As dimensões utilizadas do sensor DGS matrioska, estão ilustradas na Figura 10.

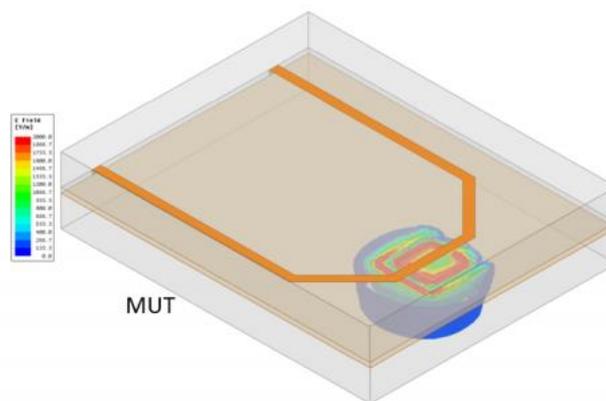


Figura 8 – Sensor DGS com geometria matrioska. Fonte: [11]

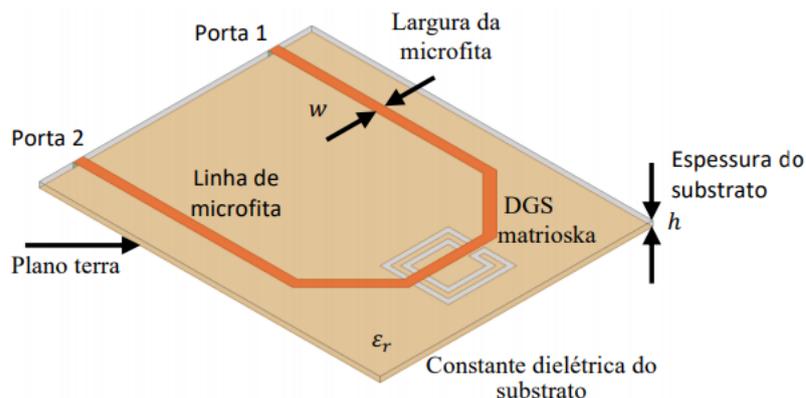


Figura 9 – DGS matrioska. Fonte: [11]

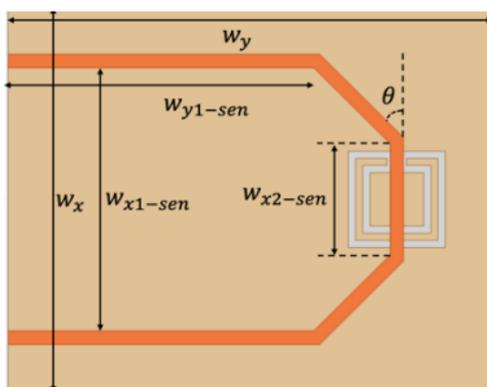


Figura 10 – Dimensões do sensor DGS com geometria matrioska. Fonte: [11]

O sensor DGS matrioska utilizado foi com o formato de U, ângulo  $\theta = 45^\circ$ , substrato do sensor de FR-4, constante dielétrica relativa de  $\epsilon_r = 4,4$ , tangente de perdas  $\text{tg}(\delta) = 0,02$ , espessura do substrato  $h = 1,6\text{mm}$  e largura da microfita  $w = 2,8\text{mm}$ . As dimensões do sensor DGS matrioska foram especificadas na Tabela 1, no qual as mesmas foram medidas com uma fita métrica.

Tabela 1 – Dimensões do sensor DGS matrioska (mm). Fonte: O Autor.

$W_x$	$W_y$	$W_{x1-sen}$	$W_{y1-sen}$	$W_{x2-sen}$	$W_{xma1} = W_{yma1}$	$W_{xma2} = W_{yma2}$	$g$
60	80	34,4	55	28	22	14	1,5

### 3. RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS

As equações (1) a (3) foram empregadas para construir um sensor DGS tipo Matrioska com frequência de ressonância abaixo de 1 GHz na faixa onde ocorreu a variação da permissividade do mamão. Este valor foi escolhido para possibilitar a medição de pelo menos duas frequências de ressonância com o uso do LiteVNA 64. Os valores das permissividades relativas variam entre 20 (para o mamão verde) até 60 (para o mamão completamente maduro), conforme medidas realizadas no Laboratório, com uso do Analisador de Redes Vetorial E5071C e Conjunto de Provas Dielétricas 85070E. As dimensões finais do DGS são mostradas na Tabela 1.

O sensor DGS Matrioska com as dimensões mostradas na Tabela 1 foi simulado no software ANSYS *Electronics Desktop* [12], Figura 11, usando o módulo HFSS. O substrato utilizado foi o FR-4, com constante dielétrica ( $\epsilon_r$ ) = 4,4 e tangente de perda ( $tg(\delta)$ ) = 0,02, espessura ( $h$ ) = 1,6 mm. Foram realizadas simulações para vários valores de permissividade elétrica relativa do MUT. Os resultados são mostrados na Figura 12, indicando a variação da frequência de ressonância em função da variação da permissividade relativa, com a frequência de ressonância aumentando com a diminuição da permissividade do MUT.

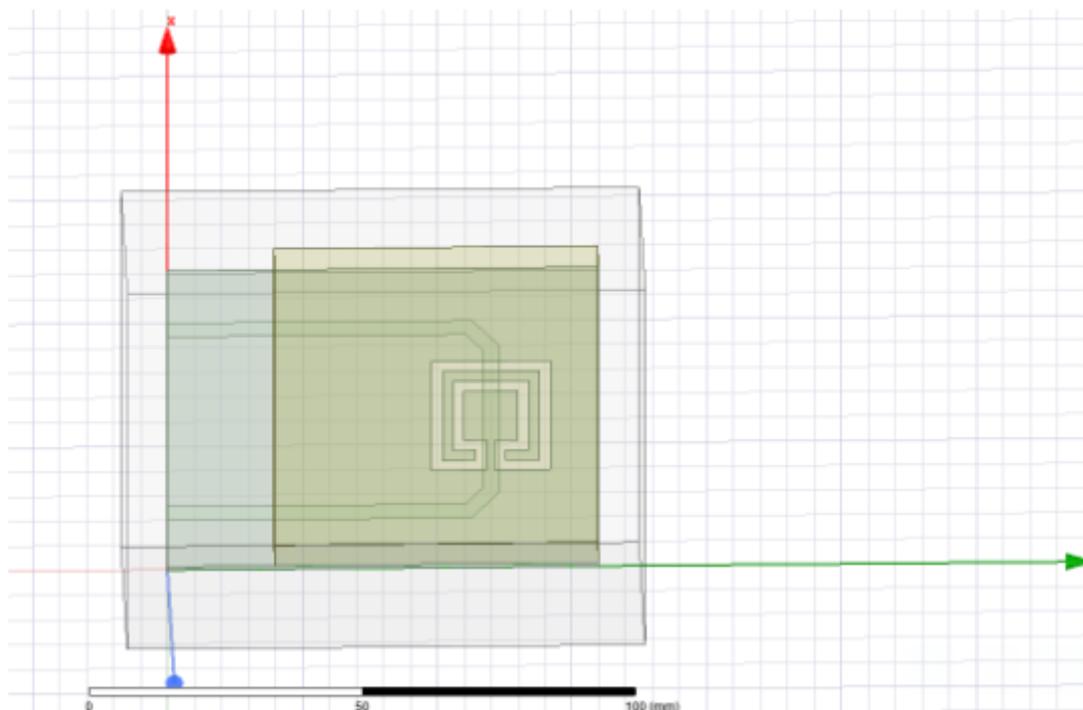


Figura 11 – Estrutura do sensor DGS matrioska simulado. Fonte: O Autor.

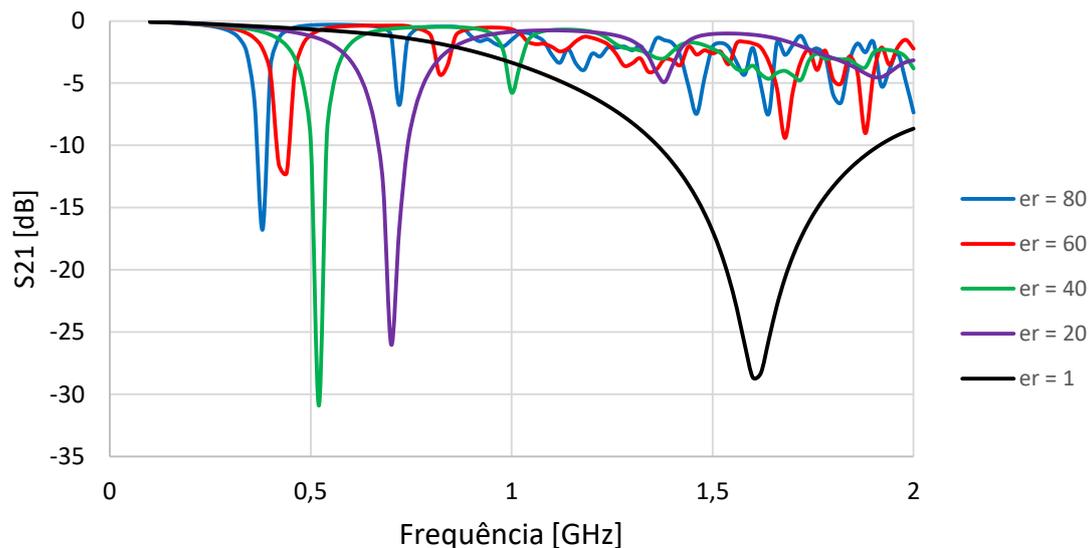


Figura 12 –  $S_{21}$  [dB] versus frequência simulada para diversos valores de permissividade. Fonte: O Autor.

Um sensor DGS Matrioska foi construído, com as dimensões mostradas na Tabela 1, Figura 13. Em seguida, foi realizada a etapa de calibração do sensor desenvolvido. Nesta etapa, foram utilizadas amostras de água destilada a 25° C e álcool isopropílico 99,8%. Foram obtidas diversas amostras, com diferentes concentrações de álcool e água destilada. Esses materiais foram escolhidos devido à alta variação de permissividade dielétrica em seus limites inferior e superior. Para cada amostra foi medida a frequência de ressonância do DGS, Figura 14, e também a permissividade relativa e tangente de perdas medidas com o uso do Analisador de Redes Vetorial E5071C e o Conjunto de Provas Dielétricas 85070E, Figura 15.

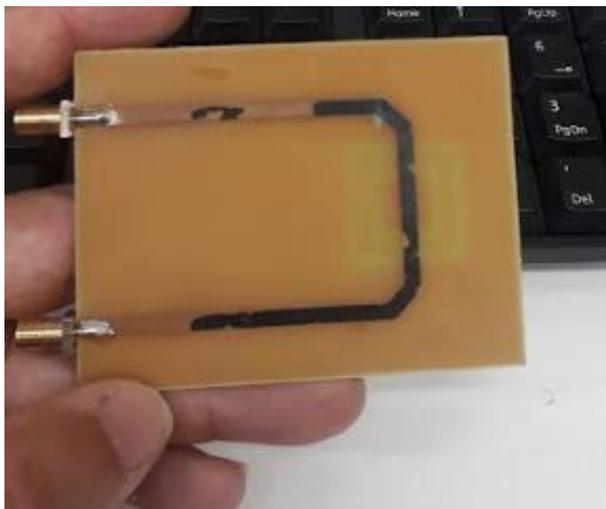


Figura 13 – Estrutura do sensor DGS matrioska utilizado nas medições. Fonte: O Autor.



Figura 14 – VNA Lite utilizado para fazer as medições de frequência de ressonância do sensor. Fonte: O Autor.

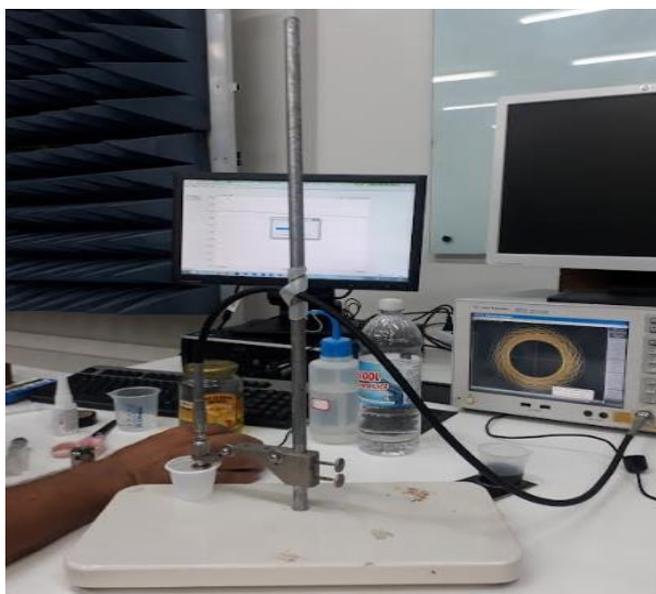


Figura 15 – Conjunto de Provas Dielétricas 85070E, acoplado ao Analisador de Redes Vetorial E5071C. Fonte: O Autor.

Com os valores medidos de frequência de ressonância e permissividade relativa para a mistura de água destilada e o álcool, foi traçada a curva de calibração do sensor, que relaciona a frequência de ressonância do DGS com a permissividade relativa da amostra, Figura 16. Os pontos do gráfico indicam de forma discreta os valores que relacionam a frequência de ressonância do DGS e a constante dielétrica relativa e a linha contínua indica a linha de tendência polinomial referente aos pontos. A Tabela 2 mostra de forma tabelada a relação entre os valores de frequência de ressonância do DGS em GHz e a constante dielétrica relativa.

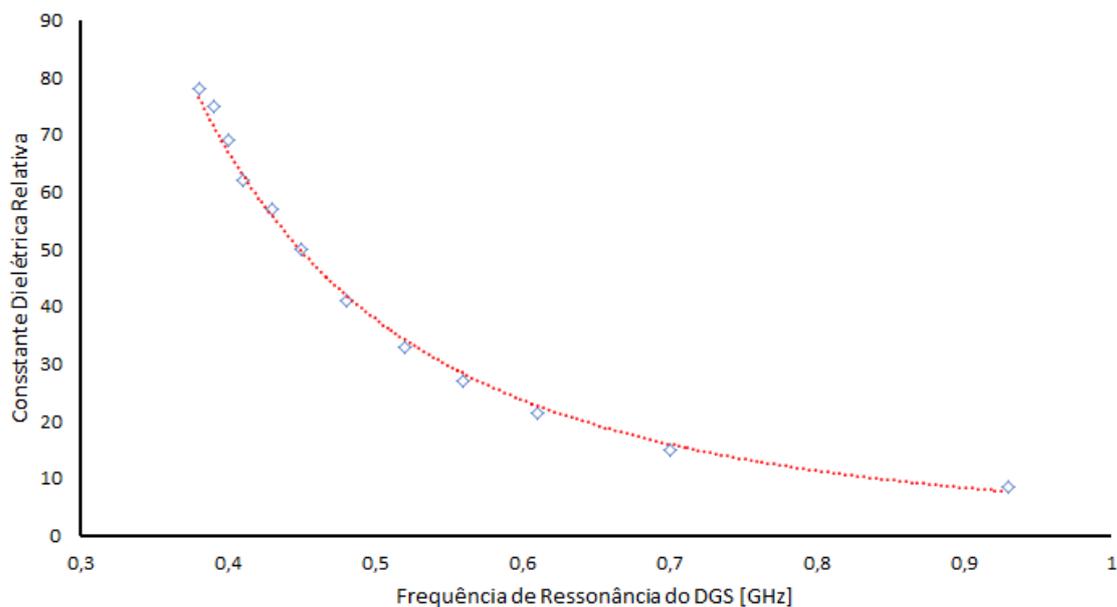


Figura 16 – Curva de calibração do sensor. Fonte: O Autor.

Tabela 2 – Relação entre frequência de ressonância do DGS em GHz e a constante dielétrica relativa.

Fonte: O Autor.

Frequência de ressonância do DGS (GHz)	Constante dielétrica relativa
0,38	78,0
0,39	75,0
0,40	69,0
0,41	62,0
0,43	57,0
0,45	50,0
0,48	41,0
0,52	33,0
0,56	27,0
0,61	21,5
0,70	15,0
0,93	8,5

Os valores para água destilada e do álcool isopropílico foram usados para verificar a precisão do sensor em valores limites. Foram medidos os valores de permissividade relativa, tangente de perdas e frequência de ressonância do DGS para estes materiais. A simulação incluiu os valores de tangente de perdas de cada amostra, que foram obtidos por meio dos valores medidos pelo Conjunto de Provas Dielétricas 85070E. Os valores podem ser vistos na Figura 17.

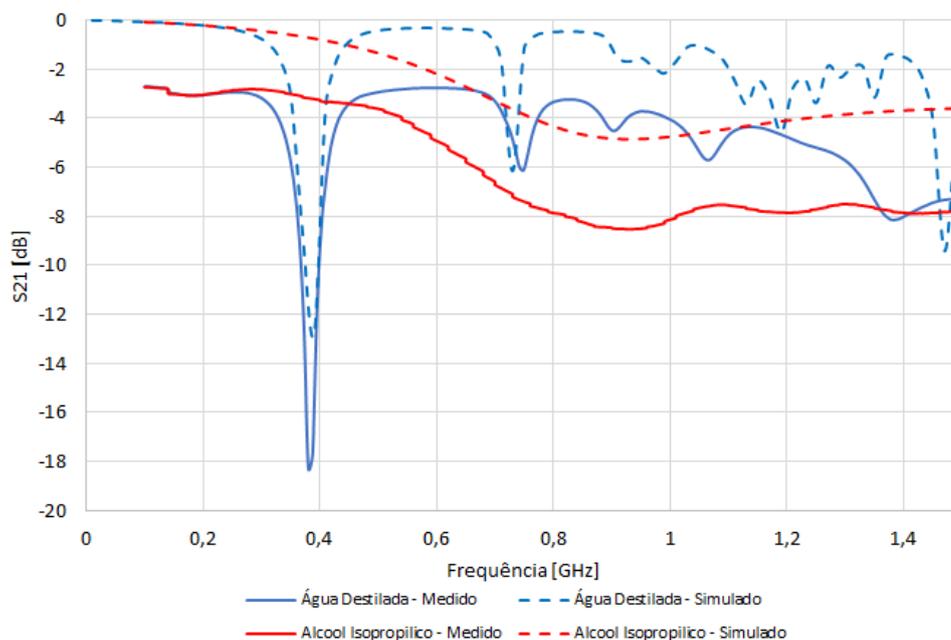


Figura 17 – Gráfico de comparação dos valores medidos e simulados da frequência de ressonância da água destilada e álcool isopropílico. Fonte: O Autor.

Os valores obtidos foram comparados, Tabela 3, mostrando uma excelente aproximação entre os valores medidos e simulados para os valores limites para o DGS projetado.

Tabela 3 – Comparação dos resultados medidos e simulados da frequência de ressonância e os valores de tangente de perdas medido e simulado para a água destilada e álcool isopropílico. Fonte: O Autor.

	Medido	Simulado	Medido e Simulado	Diferença	%
	fr [GHz]	fr [GHz]	Tang. perdas		
<b>Água Destilada a 25°</b>	0,38	0,39	0,0155	0,01	2,63
<b>Alcool Isopropílico 99,8%</b>	0,93	0,94	1,088	0,01	1,07

### 3.1. Medição da permissividade do mamão papaia

Após os resultados iniciais de caracterização e validação do sensor DGS matrioska com dois anéis concêntricos, foram realizadas as medições da variação da permissividade elétrica do mamão papaia durante a fase de maturação. As medidas foram realizadas de forma indireta, com o uso do sensor DGS construído. A variação da frequência de ressonância foi relacionada à permissividade do mamão.

Uma amostra de 10 frutos no estágio verde, sem sinais de amarelidão da casca, foram adquiridos e colocados em ambiente ventilado naturalmente, de forma a analisar o processo natural de maturação dos frutos. As medições diárias para os mamões *carica papaya* para cada dia aconteceram sempre no mesmo horário (por volta das 15 horas), em uma temperatura média de 28°C. As medições realizadas incluíram: peso, comprimento ao redor do mamão, comprimento de ponta a ponta, 1ª e 2ª frequência de ressonância. Também foram calculados para cada dia a média e o desvio padrão da 1ª e 2ª frequência de ressonância dos mamões. As Figuras 18, 19, 20 ilustram as medições de peso, comprimento ao redor do mamão e comprimento de ponta a ponta, respectivamente. As Tabelas 4, 5 e 6 mostram os valores dos pesos, dos comprimentos ao redor e dos comprimentos de ponta a ponta dos dez mamões ao longo dos dez dias e a Figura 21 ilustra um gráfico de comparação das medidas dos mamões ao longo do período citado.



Figura 18 – Medição de peso do mamão. Fonte: O Autor.



Figura 19 – Medição do comprimento ao redor do mamão. Fonte: O Autor.



Figura 20 – Medição do comprimento de ponta a ponta do mamão. Fonte: O Autor.

Tabela 4 – Tabela das medições diárias de peso dos mamões. Fonte: O Autor.

	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia
-----	Peso									
Mamão	(g)									
1	316	313	310	305	303	298	292	283	273	266
2	397	393	389	384	378	373	364	355	347	339
3	322	318	315	312	308	305	299	294	290	283
4	336	332	330	327	323	317	309	301	293	283
5	311	307	303	299	293	286	278	269	258	246
6	352	348	346	342	337	334	328	322	317	309
7	333	329	326	325	319	316	309	304	299	292
8	326	323	319	314	309	301	291	282	264	250
9	362	357	353	349	342	336	328	318	309	300
10	302	299	294	290	283	274	262	253	243	234

Tabela 5 – Tabela das medições diárias de comprimento ao redor dos mamões. Fonte: O Autor.

-----	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia
-----	c.redor									
Mamão	(cm)									
1	26,0	25,8	25,2	25,1	24,8	24,5	24,1	23,8	23,2	23,0
2	28,0	27,5	27,3	27,2	27,1	26,5	26,0	25,6	25,3	25,0
3	26,5	26,3	26,2	26,1	26,0	25,7	25,3	24,8	24,4	23,7
4	26,8	26,6	26,5	26,2	26,1	25,6	25,5	25,1	24,5	24,4
5	24,2	24,0	23,5	23,2	23,0	22,8	22,2	21,7	21,5	21,2
6	27,0	26,8	26,7	26,4	26,3	26,2	25,8	25,6	25,2	25,0
7	24,3	24,2	24,0	23,8	23,7	23,4	23,3	22,8	22,6	22,4
8	26,6	26,1	25,5	25,5	25,2	24,7	24,5	24,0	23,1	23,0
9	27,4	26,8	26,4	26,2	26,1	25,6	25,5	25,0	24,7	24,3
10	25,4	24,7	24,2	23,8	23,6	23,4	23,0	22,7	22,5	22,2

Tabela 6 – Tabela das medições diárias de comprimento ponta a ponta dos mamões. Fonte: O Autor.

-----	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia
-----	c.ponta									
Mamão	(cm)									
1	33,2	33,0	32,8	32,7	32,4	32,1	31,7	31,4	30,6	29,6
2	35,0	34,6	34,6	34,5	34,4	34,1	34,0	33,5	33,2	33,1
3	32,2	31,6	31,3	31,8	31,4	31,0	30,8	30,2	30,2	30,1
4	31,6	31,5	31,5	31,5	31,4	30,5	30,0	29,9	28,9	28,3
5	35,5	35,2	35,0	34,8	34,5	34,2	33,3	32,6	32,0	31,5
6	34,4	33,8	33,3	33,3	33,0	32,5	32,4	32,3	32,1	31,7
7	35,8	35,3	35,1	34,9	34,8	34,4	34,0	33,5	33,4	33,0
8	31,9	31,5	31,3	31,3	31,2	30,9	30,6	30,2	28,9	28,8
9	35,5	35,1	34,3	34,0	33,6	33,0	32,6	32,1	31,6	31,2
10	33,5	32,7	32,4	32,2	31,8	31,2	30,7	30,2	30,0	29,5

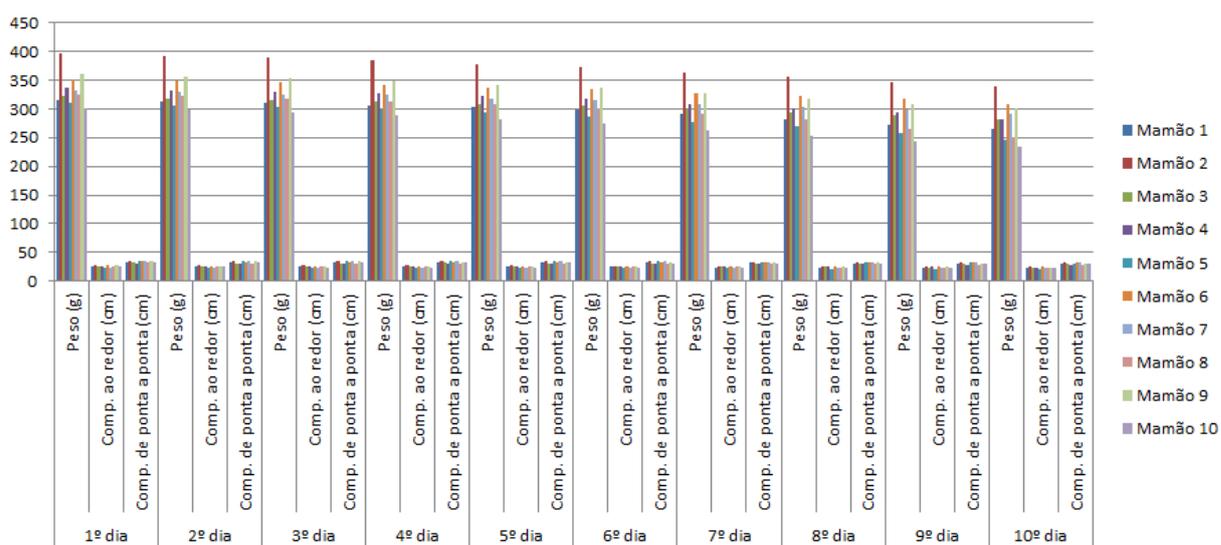


Figura 21 – Comparação no período de 10 dias para os 10 mamões de peso, comprimento ao redor e ponta a ponta. Fonte: O Autor.

Foi observado ao longo do período que os mamões apresentaram uma diminuição gradativa do peso, do comprimento ao redor dos mamões e do comprimento ponta a ponta, o que denota que, durante o amadurecimento dos mamões, há uma variação nas suas propriedades físicas.

Posteriormente, através do VNA Lite e do sensor, foram medidas para os mamões, a 1ª e 2ª frequência de ressonância. A partir dos valores obtidos foram determinados a média e o desvio padrão. A Figura 22 ilustra um exemplo medido para a 1ª medição do 1º mamão, evidenciando a 1ª e 2ª frequência de ressonância. A Tabela 7 mostra os resultados da 1ª frequência de ressonância de cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias. A Tabela 8 agrupa a média e o desvio padrão para a 1ª frequência de ressonância das frutas no intervalo do período. A Tabela 9 mostra os valores de permissividade elétrica relativa referente a cada frequência de ressonância medida na Tabela 7 e a Tabela 10 agrupa a média e o desvio padrão para a permissividade elétrica relativa das frutas a cada dia. As Figuras 23, 24, 25 e 26 evidenciam respectivamente, a média para cada um dos dez mamões para a 1ª frequência de ressonância ao longo dos dez dias, a 1ª frequência de ressonância para cada mamão ao longo do período, a média para cada um dos dez mamões para a 2ª frequência de ressonância ao longo dos dez dias e a 2ª frequência de ressonância para cada mamão no decorrer do tempo. A Tabela 11 mostra os resultados da 2ª frequência de ressonância dos mamões nos dias já citados anteriormente e a Tabela 12 refere-se à média e desvio padrão para a 2ª frequência de ressonância dos mamões no intervalo de tempo estabelecido.

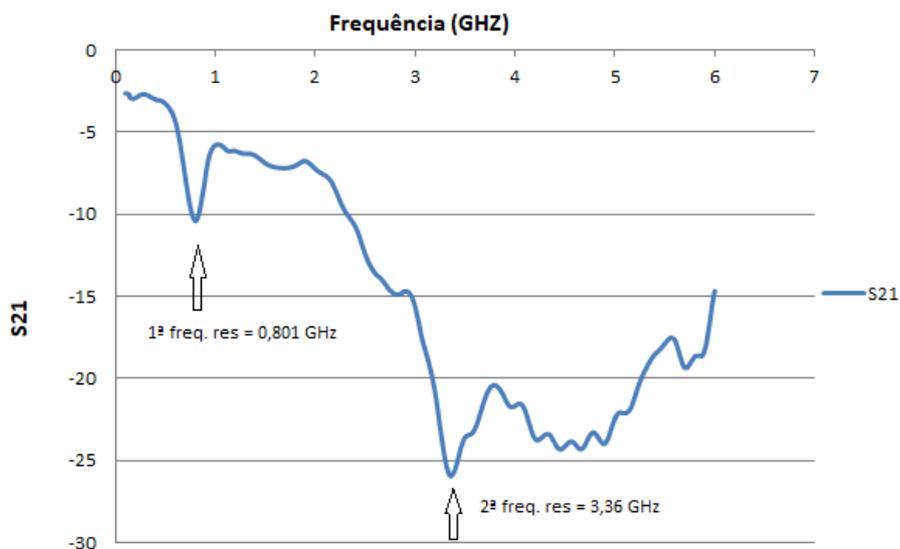


Figura 22 – Gráfico exemplo da medição do mamão 1 no 1º dia para a 1ª e 2ª frequência de ressonância .

Fonte: O Autor.

Tabela 7 – 1ª Frequência de ressonância de cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias.

Fonte: O Autor.

	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia
Mamão	1ª res.									
-----	GHz									
1	0,801	0,734	0,653	0,579	0,565	0,520	0,491	0,469	0,461	0,454
2	0,756	0,675	0,609	0,565	0,535	0,506	0,498	0,469	0,461	0,454
3	1,221	0,675	0,668	0,616	0,602	0,587	0,579	0,557	0,528	0,506
4	0,808	0,756	0,742	0,572	0,543	0,535	0,520	0,513	0,484	0,469
5	1,133	0,742	0,616	0,543	0,498	0,491	0,447	0,439	0,417	0,417
6	1,169	0,948	0,720	0,624	0,587	0,565	0,543	0,520	0,491	0,476
7	1,155	0,889	0,852	0,779	0,638	0,616	0,594	0,557	0,543	0,498
8	0,823	0,683	0,646	0,550	0,535	0,528	0,506	0,491	0,461	0,454
9	0,838	0,697	0,557	0,498	0,491	0,476	0,469	0,461	0,461	0,454
10	0,705	0,609	0,579	0,535	0,528	0,520	0,513	0,498	0,491	0,491

Tabela 8 – Média e desvio padrão para a 1ª frequência de ressonância para os 10 mamões em 10 dias.

Fonte: O Autor.

Dia	Média	Desvio Padrão
1	0,940750	0,201343353
2	0,740888	0,103568507
3	0,664188	0,087486968
4	0,586013	0,077150161
5	0,552088	0,046128973
6	0,534388	0,043346210
7	0,515950	0,045885962
8	0,497513	0,039859887
9	0,479813	0,036171767
10	0,467275	0,026431371

Tabela 9 – Permissividade elétrica relativa para cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias.

Fonte: O Autor.

Mamão	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia
	$\epsilon_r$									
1	11,275	14,107	19,044	25,929	27,610	34,163	39,583	44,524	46,533	48,397
2	13,078	17,492	22,777	27,610	31,759	36,641	38,171	44,524	46,533	48,397
3	3,822	17,492	17,966	22,119	23,463	25,032	25,929	28,639	32,851	36,641
4	11,026	13,078	13,720	26,751	30,572	31,759	34,163	35,372	41,068	44,524
5	4,631	13,720	22,119	30,572	38,171	39,583	50,365	52,754	60,194	60,194
6	4,274	7,317	14,822	21,398	25,032	27,610	30,572	34,163	39,583	42,863
7	4,408	8,629	9,623	12,110	20,214	22,119	24,282	28,639	30,572	38,171
8	10,517	16,971	19,578	29,584	31,759	32,851	36,641	39,583	46,533	48,397
9	10,041	16,110	28,639	38,171	39,583	42,863	44,524	46,533	46,533	48,397
10	15,645	22,777	25,929	31,759	32,851	34,163	35,372	38,171	39,583	39,583

Tabela 10 – Média e desvio padrão da permissividade elétrica relativa para os 10 mamões em 10 dias.

Fonte: O Autor.

Dia	Média	Desvio Padrão
1	8,871571	4,250510941
2	14,769097	4,512068798
3	19,421597	5,752262215
4	26,600175	7,021994250
5	30,101206	6,164637464
6	32,678263	6,394865278
7	35,960184	7,950714993
8	39,290108	7,876828931
9	42,998342	8,367376451
10	45,556164	6,868248568

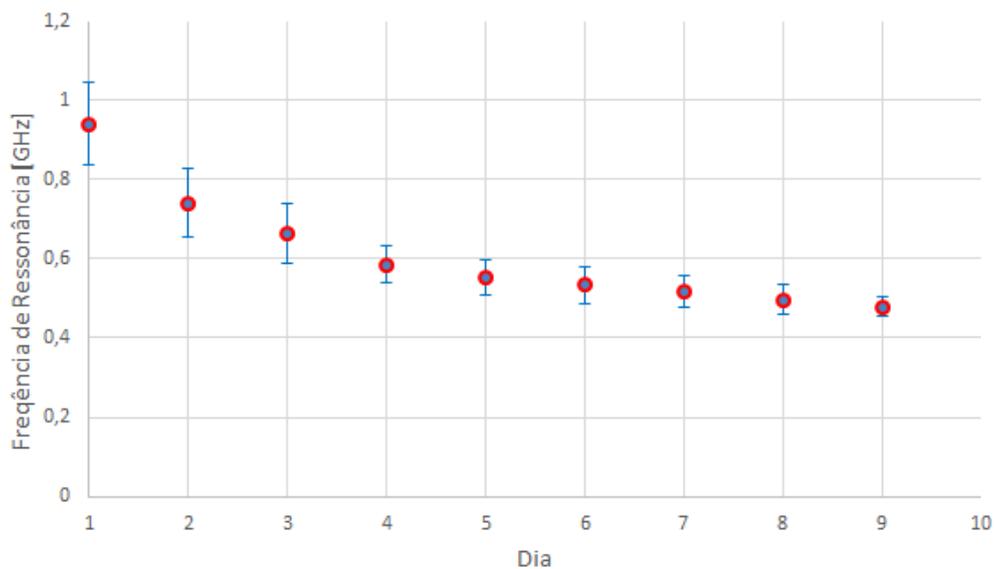


Figura 23 – Média para cada um dos dez mamões para a 1ª frequência de ressonância ao longo dos dez dias. Fonte: O Autor.

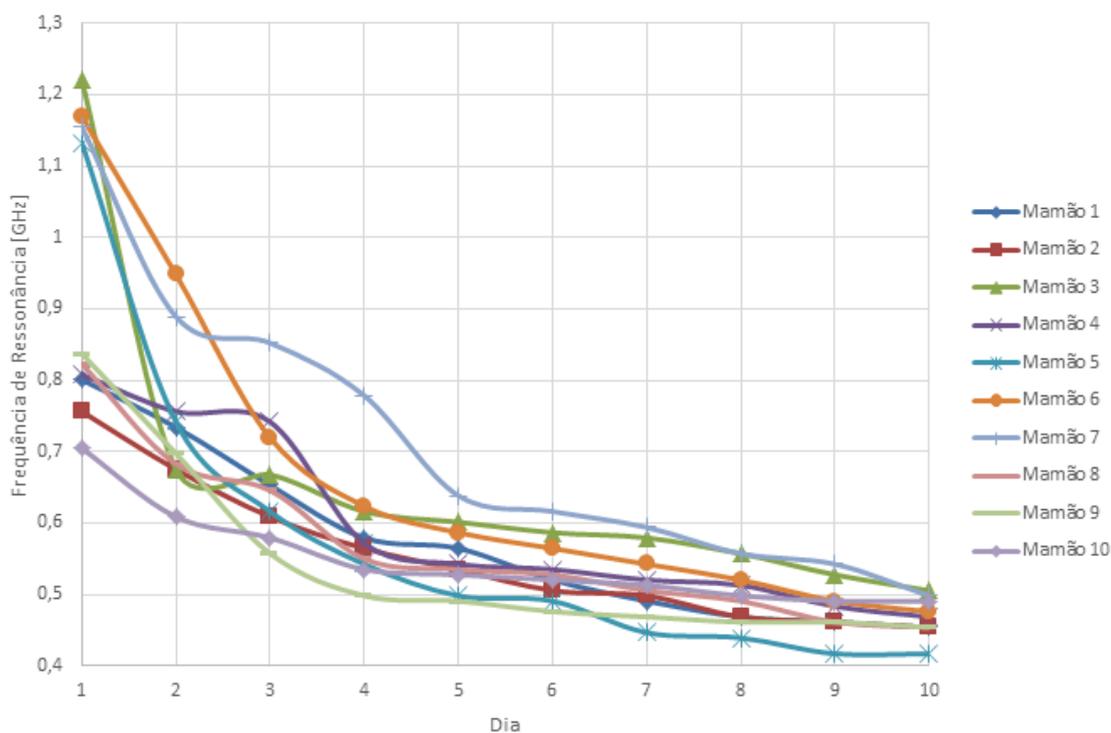


Figura 24 – 1ª frequência de ressonância para cada mamão ao longo dos dez dias. Fonte: O Autor.

O resultado obtido mostra a variação da frequência de ressonância do DGS ao longo do processo de maturação do mamão, partindo de um valor mais elevado (em média 940 MHz) para o mamão com estágio mais verde, no primeiro dia da medição, até um valor menor da frequência de ressonância (em média 460 MHz) para o mamão muito maduro, após 10 dias de

amadurecimento. Também foi verificada uma maior uniformidade dos valores medidos para todos os frutos da amostra ao longo do processo, com um menor desvio padrão para os valores medidos.

Os valores medidos mostram que a permissividade elétrica relativa do mamão varia de cerca de 8,87 para o primeiro dia (estádio verde), até aproximadamente 45,56 para o décimo dia de maturação, com sinais de secescência do fruto. Os valores também indicam que o fruto no estágio inicial de maturação é mais seco em relação ao fruto completamente maduro, devido à elevação do valor da permissividade.

Também foram correlacionados os valores da segunda ressonância para o DGS. Os resultados são mostrados nas Tabelas 11 e 12, sendo plotados no gráfico mostrado na Figura 25.

Tabela 11 – 2ª Frequência de ressonância de cada um dos 10 mamões medidos ao longo dos 10 dias.

Fonte: O Autor.

	1º dia	2º dia	3º dia	4º dia	5º dia	6º dia	7º dia	8º dia	9º dia	10º dia
Mamão	2ª res.									
-----	GHz									
1	3.360	3.389	3.050	3.028	2.807	3.146	2.792	2.785	3.338	3.139
2	3.500	3.323	2.748	3.463	3.006	2.925	3.419	3.013	3.389	3.072
3	3.655	3.006	2.755	3.419	3.116	3.072	3.057	3.072	3.227	3.050
4	3.670	3.338	2.947	3.139	2.844	2.858	3.411	3.352	3.102	3.072
5	3.596	2.910	3.028	3.441	3.102	3.124	3.588	3.360	2.777	3.080
6	3.677	2.998	2.733	3.293	3.072	3.035	3.330	3.323	3.212	3.198
7	3.706	2.475	3.028	3.382	3.028	2.866	3.352	3.308	3.139	3.146
8	3.662	3.050	2.519	3.367	3.190	3.316	3.264	3.382	3.131	3.175
9	3.684	2.453	2.571	3.293	3.242	3.271	3.559	3.588	3.323	3.234
10	3.647	2.962	2.519	3.168	3.153	3.072	3.190	3.286	3.212	3.426

Tabela 12 – Média e desvio padrão para a 2ª frequência de ressonância para os 10 mamões em 10 dias.

Fonte: O Autor.

Dia	Média	Desvio Padrão
1	3,615690	0,107263667
2	2,990250	0,325956167
3	2,789670	0,212571426
4	3,299300	0,145035528
5	3,055930	0,140872141
6	3,068450	0,155768163
7	3,296350	0,238201452
8	3,246920	0,228231217
9	3,184973	0,171814263
10	3,159150	0,111890266

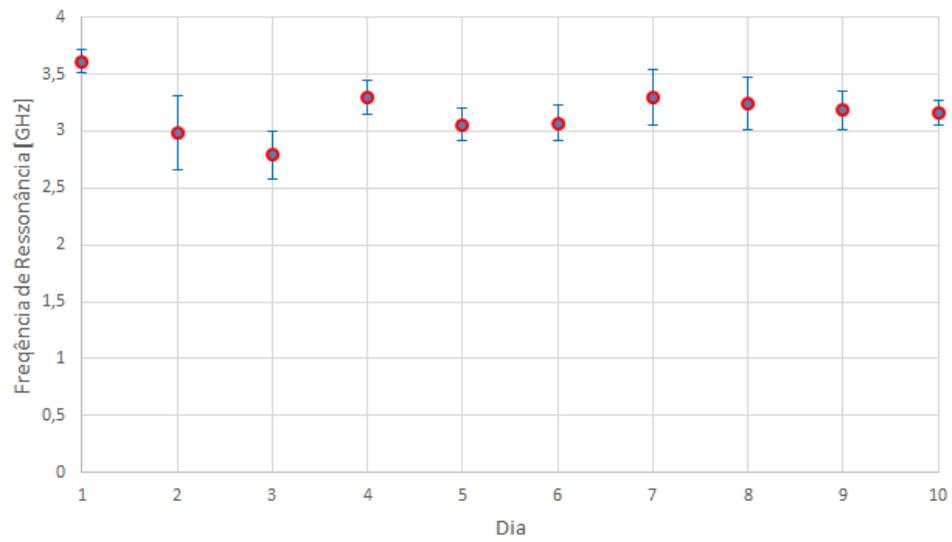


Figura 25 – Média para cada um dos dez mamões para a 2ª frequência de ressonância ao longo dos dez dias. Fonte: O Autor.

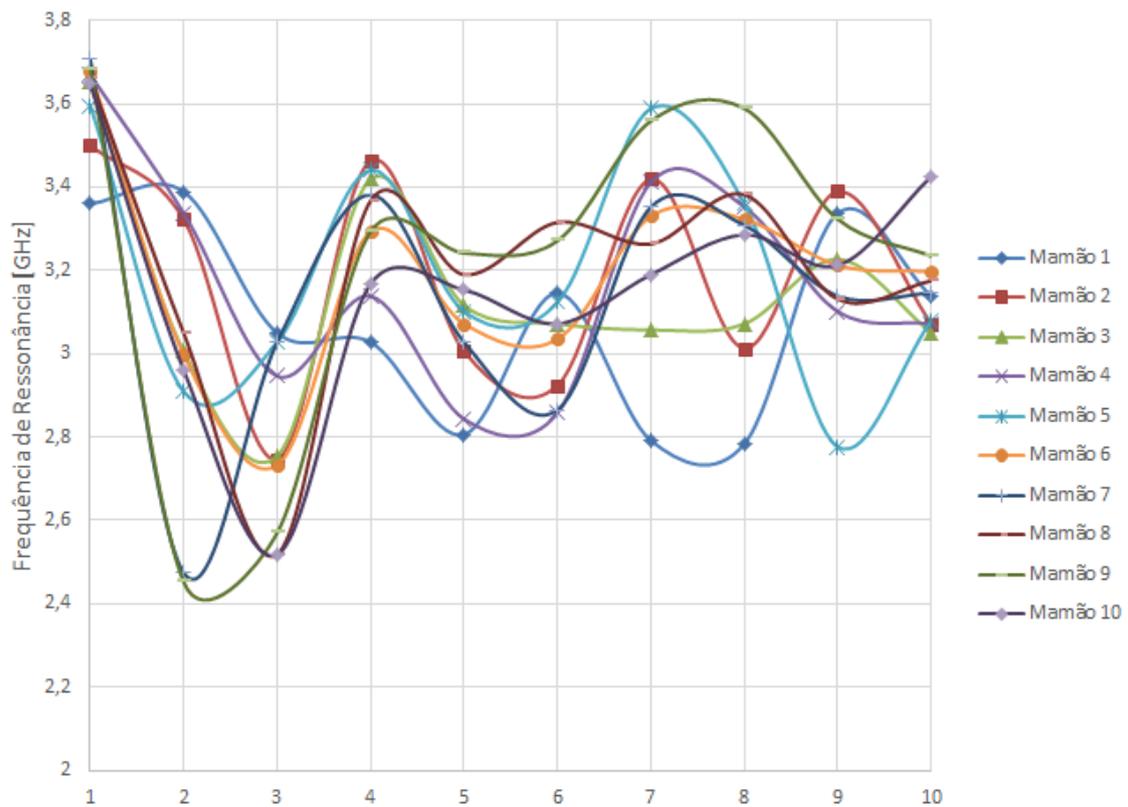


Figura 26 – 2ª frequência de ressonância para cada mamão ao longo dos dez dias. Fonte: O Autor.

Analisando a segunda ressonância, não é possível estabelecer um padrão no comportamento da permissividade relativa do mamão, como se mostrou no caso da primeira ressonância.

Percebe-se através da análise dos gráficos da 1ª frequência de ressonância e da média da 1ª frequência de ressonância que eles são decrescentes com relação à contagem de dias, ou seja, com o amadurecimento da fruta, a frequência de ressonância diminui. Para os gráficos da 2ª frequência de ressonância e da média da 2ª frequência de ressonância houve uma variação da frequência de ressonância para mais ou para menos, a depender da medição do dia.

Os resultados de frequência de ressonância obtidos da Figura 17 e Tabela 3 foram utilizados nos valores limites superior e inferior das medidas obtidas para o mamão. Também é possível verificar por meio da Figura 16, curva de calibração do sensor, que ao diminuirmos a frequência de ressonância, aumenta a constante dielétrica relativa e comparando com a Tabela 7, com o amadurecimento do mamão ao longo dos dias, a 1ª frequência de ressonância diminui e com isso a permissividade elétrica relativa aumenta, o que permite dizer que a permissividade pode ser um indicador do nível de maturação em substituição a variação da cor da casca do mamão.

#### 4. CONCLUSÃO

Nesta dissertação foram apresentadas as características dielétricas do mamão papaia no período de amadurecimento, como a constante dielétrica do mamão se comporta durante este período através da variação da frequência de ressonância da estrutura. De maneira inicial, houve uma revisão da bibliografia relativa ao trabalho para compreender os conceitos básicos sobre sensores DGS com geometria matrioska, suas equações, os princípios básicos e suas características. Os resultados numéricos e experimentais apresentaram uma considerável conformidade, concluindo que o sensor trabalhado possui um bom desempenho e pode ser utilizado para medir as frequências de ressonância, para diferentes valores de permissividade elétrica relativa do mamão, no qual a permissividade pode ser um indicador do nível de maturação em substituição a variação da cor da casca.

Para continuação desta dissertação, as seguintes sugestões são apresentadas:

- a) Caracterização dielétrica de outras frutas, como o melão, utilizando sensor DGS matrioska;
- b) Aplicabilidade do sensor DGS matrioska na indústria alimentícia.

## REFERÊNCIAS

- [1] ROSÁRIO, Henrique Fiegenbaum do. Caracterização de farinhas de sementes de mamão papaia e formosa. 2019.
- [2] EMBRAPA 50 ANOS. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/mamao#:~:text=Hoje%20o%20mam%C3%A3o%20C3%A9%20cultivado,do%20Norte%20e%20Minas%20Gerais.>>. Acesso em: 28 mar. 2024.
- [3] INSTITUTO BRASILEIRO DE FRUTAS (IBRAF). Disponível em:<<http://www.ibraf.org.br/>> . Acesso em: 05 fev. 2024.
- [4] BARBOSA, Nayara Cantarino. Taxa de respiração do mamão em função das diferentes condições de atmosferas de armazenamento em temperatura ambiente. Campos dos Goytacazes, 2013.
- [5] Pinto, L.K.A.; Martins, M.L.L.; Resende, E.D.; Almeida, R.F.; Vitorazi, L.; Pereira, S.M.F. Influência da atmosfera modificada por filmes plásticos sobre a qualidade do mamão armazenado sob refrigeração, 2006.
- [6] Moraes, F.A.; Araújo, F.M.M.C.; Machado, A.V.; Ricarte, F.D.N.; Júnior, R.S. Influência da atmosfera modificada sob a vida útil pós-Colheita do mamão “formosa”. Revista Verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável, Mossoró – Rio Grande do Norte, 2010.
- [7] Embrapa. Aceitação sensorial e estabilidade do mamão desidratado enriquecido com frutooligossacarídeo, 2018.
- [8] 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.
- [9] CRUZ, J. do N. **Caracterização de FSS com geometria matrioska aberta**. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2015.
- [10] <http://www.hp.woodshot.com>, acessado em 14/02/2024.
- [11] Bruno Lima Cavalcanti de Albuquerque, **Desenvolvimento de um Sensor de Umidade do Solo Utilizando DGS Baseado na Geometria Matrioska**, Dissertação de Mestrado, IFPB, João Pessoa, PB, Brasil, 2023.

[12] Ansys Electronics Desktop. Disponível em: <<http://www.ansys.com>>. Acesso em 11/03/2024.