



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SEBASTIÃO FERREIRA BARACHO NETO

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TEOR DE UMIDADE NÃO
INVASIVO APLICADO À FOLHAS VEGETAIS**

MOSSORÓ

2024

SEBASTIÃO FERREIRA BARACHO NETO

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TEOR DE UMIDADE NÃO
INVASIVO APLICADO À FOLHAS VEGETAIS**

Dissertação de mestrado apresentado ao
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal Rural do
Semi-Árido como requisito para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e
Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz
Júnior - UFERSA

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

BB223 Baracho Neto, Sebastião.
dd DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TEOR DE UMIDADE
NÃO INVASIVO APLICADO À FOLHAS VEGETAIS /
Sebastião Baracho Neto. - 2024.
79 f. : il.

Orientador: Idalmir de Souza Queiroz Júnior .
Coorientador: Samanta Mesquita de Holanda.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica, 2024.

1. Agricultura de Precisão. 2. Teor de
Umidade. 3. Antena de Microfita. 4. Sensor de
umidade. I. de Souza Queiroz Júnior , Idalmir ,
orient. II. Mesquita de Holanda, Samanta, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

SEBASTIÃO FERREIRA BARACHO NETO

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR DE TEOR DE UMIDADE NÃO INVASIVO
APLICADO À FOLHAS VEGETAIS**

Dissertação de mestrado apresentado ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal Rural do
Semi-Árido como requisito para obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Telecomunicações e
Eletromagnetismo Aplicado

Defendida em: 30 / 07/ 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Idalmir de Souza Queiroz Júnior (UFERSA)
Presidente

 Documento assinado digitalmente
IDALMIR DE SOUZA QUEIROZ JUNIOR
Data: 26/09/2024 10:38:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Samanta Mesquita de Holanda (UFERSA)
Membro Examinador

 Documento assinado digitalmente
SAMANTA MESQUITA DE HOLANDA
Data: 26/09/2024 13:15:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Reuber Régis de Melo (UFC-Sobral)
Membro Examinador

 Documento assinado digitalmente
REUBER REGIS DE MELO
Data: 26/09/2024 22:02:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela dádiva da vida e a vontade de suprir o vazio com o conhecimento.

Aos meus pais, Francisco das Chagas e Maria Janaice, pelo amor e incentivo por continuar os estudos, por meio de palavras de afirmação e sacrifícios em prol dessa carreira.

A minha tia Raquel por sempre influenciou a continuar os estudos como formar de crescimento de carreira e independência.

Aos colegas de laboratório, Samanta Holanda, Isaac Barros, Ingryd Kely, Emerson, Nickson Saymon, Raclenir, que me acompanharam nesse período fornecendo apoio, compartilhando café e conhecimento e deixando a estadia em Mossoró mais tolerável.

Ao meu orientador, Idalmir Queiroz de Souza Júnior pela confiança, disponibilidade e paciência para que esse trabalho fosse possível.

A todos os meus amigos que de forma direta e indireta, incentivaram a continuar o mestrado e foram importantes para chegar até aqui.

“Se você não sabe onde quer ir qualquer
caminho serve”,

Lewis Carroll

RESUMO

A agricultura de precisão é um modelo de gerenciamento agrícola que tem a finalidade de oferecer os recursos para cada parte da área agrícola. Nesse modelo, as condições do terreno e da cultura são estudadas, e técnicas e tecnologias são incorporadas no sistema de produção. A agricultura de precisão utiliza metodologias que atendam às necessidades de cada parte da área cultivável, considerando a leitura de dados agrícolas, a interpretação, o planejamento e a atuação sobre o processo produtivo. As diversas variáveis devem ser observadas e medidas com sensores específicos, e é nesta etapa de utilização dos sensores que esse trabalho se concentra. Com isso, pode-se otimizar o uso das áreas de cultivo atuais. Todos os tipos de cultura possuem parâmetros que indicam a melhor época de colheita, entre estes parâmetros a quantidade de água das folhas, que pode variar com o decorrer do tempo desde seu plantio até a colheita. A água é uma das partes indispensáveis das necessidades de crescimento de uma planta. Compreender ela é essencial para melhorar a produtividade, bem como as propriedades das micro-ondas no tecido vegetal que estão fortemente relacionadas a quantidade de água armazenada. Pode-se utilizar um sensor de teor de umidade desenvolvido a partir de uma antena de microfita para medir o teor de umidade em uma folha. Para tanto, é utilizado as respostas dos coeficientes de reflexão e transmissão, S_{11} e S_{21} respectivamente. Sendo definido um método para mensurar a umidade de folhas, e esta medida é relacionada aos parâmetros S_{11} e S_{21} , sendo comparando com folhas de diferentes culturas. Inicialmente é mensurado a umidade presente nas folhas de Juá, relacionando o S_{11} com o percentual de umidade da folha. No segundo teste é medido o S_{11} e o S_{21} e sua relação com o percentual de umidade em folhas de ciriguela e caju. A última medição é feita *in loco* e relaciona os valores obtidos de S_{11} e S_{21} as variações de umidade e cataloga o período de desenvolvimento do feijão-caupi.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, Teor de Umidade, Antena de Microfita; Sensor de umidade.

ABSTRACT

Precision agriculture is an agricultural management model that aims to provide resources for each part of the agricultural area. In this model, soil and crop conditions are studied, and techniques and technologies are incorporated into the production system. Precision agriculture uses methodologies that meet the needs of each part of the arable area, taking into account the reading of agricultural data, interpretation, planning and action on the production process. The various variables must be observed and measured with specific sensors, and it is at this stage of using the sensors that this work focuses. This can be used to optimize the use of current cultivation areas. All types of crop have parameters that indicate the best time to harvest, including the amount of water in the leaves, which can vary over time from planting to harvest. Water is one of the indispensable parts of a plant's growth requirements. Understanding it is essential for improving productivity, as well as the microwave properties of plant tissue, which are strongly related to the amount of water stored. A moisture content sensor developed from a microstrip antenna can be used to measure the moisture content of a leaf. To do this, the responses of the reflection and transmission coefficients, S_{11} and S_{21} respectively, are used. A method is defined for measuring leaf moisture, and this measurement is related to the parameters S_{11} and S_{21} , and compared with leaves from different crops. First, the moisture content of Juá leaves is measured, relating S_{11} to the percentage of leaf moisture. In the second test, S_{11} and S_{21} are measured and their relationship with the percentage of moisture in ciriguela and cashew leaves. The last measurement is made on site and relates the values obtained for S_{11} and S_{21} to variations in humidity and catalogs the period of development of the cowpea.

Keywords: Precision Agriculture, Moisture Content, Microphone Antenna; Moisture Sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Planos de corte vertical e horizontal de uma antena corneta	3
Figura 2 - Regiões de campo	4
Figura 3 - Antena de transmissão	5
Figura 4 - Representação de um fluxo de sinais em uma rede de duas portas	6
Figura 5 - Gráfico de perda de retorno de uma antena mostrando a frequência de ressonância	7
Figura 6 - Círculo unitário na qual a carta de Smith é construída	9
Figura 7 - Conjunto de círculos (a) Resistivos e (b) de Reatância	10
Figura 8 - Antena de microfita	11
Figura 9 - Alimentação por cabo coaxial.....	12
Figura 10 - Alimentação por abertura.....	13
Figura 11 - Alimentação por acoplamento	13
Figura 12 - Comprimento físico e efetivo de um patch retangular.....	14
Figura 13 - Esquema do sistema de medição por capacitância	20
Figura 14 - Ressonador de micro-ondas	20
Figura 15 - Guia de ondas e amostras utilizadas	22
Figura 16 - Fluxograma de pesquisa	27
Figura 17 - Fluxograma da construção da antena de microfita	28
Figura 18 - Dimensões da antena de microfita	29
Figura 19 - Coeficiente de reflexão S11	30
Figura 20 – (a) Antena construída e (b) capa de PLA	30
Figura 21 - Parâmetro de S11 real.....	31
Figura 22 - Amostras de folhas.....	32
Figura 23 - Processo de análise da variação de umidade	32
Figura 24 - Medição de S11 na antena (a) com suporte e (b) sem suporte	33
Figura 25 - Deslocamento de frequência causado pelas amostras.....	33
Figura 26 - Antenas em campo próximo	34
Figura 27 - Novo diagrama de reflexão S11 (a) e de transmissão S21 (b)	34
Figura 28 - Vista Superior do compartimento Inferior (a), Vista Superior do Compartimento Superior (b), Vista Frontal (c), Vista Lateral do Compartimento Inferior (d), Vista Lateral do Compartimento Superior (e).....	35
Figura 29 - Suporte abre fecha	36
Figura 30 - Folhas de ciriguela (a) e caju (b)	37

Figura 31 - Análise da variação de umidade utilizando S11 e S21.....	38
Figura 32 - Aplicação do suporte de antenas.....	38
Figura 33 - Alterações causadas pelas folhas no S11 (a) e no S21 (b)	39
Figura 34 - Feijões plantados.....	40
Figura 35 - Feijões crescidos	40
Figura 36 - Aplicação do sensor desenvolvido.....	41
Figura 37 - Deslocamento de Frequência conforme a variação de teor de umidade na folha para (a) a antena e (b) a antena com a presença do suporte	42
Figura 38 - FRS sem capa.....	43
Figura 39 - FRS com capa	43
Figura 40 - Respostas de S11 com a presença da folha de (a) Ciriguela e (b) Caju	45
Figura 41 - Respostas de S21 com a presença da folha de (a) Ciriguela e (b) Caju	45
Figura 42 - Dispersão entre o FRS e % de água presente na folha de ciriguela.....	46
Figura 43 - Dispersão entre o FRS e % de água presente na folha de caju	46
Figura 44 - Variação em S11 conforme o desenvolvimento do feijoeiro	47
Figura 45 - Variação em S21 conforme o desenvolvimento do feijoeiro	49
Figura 46 - Simulação da presença da folha e lâmina de água.....	51
Figura 47 - A alteração causada pela folha e lâmina de água em S11 (a) e S21 (b).....	51
Figura 48 - Média de FRS ao longo do desenvolvimento do feijão	52

NOMECLATURA

Letras Latinas

BW – Largura de banda da antena

D – Diretividade

D_a – Maior dimensão da antena

f_r – Frequência de ressonância

FRS – Taxa de variação de frequência

G – Ganho da antena

h – Espessura do substrato

IQS - Taxa de variação no fator de qualidade

L – Comprimento do patch

L_m – Comprimento da linha de microfita

M_r – Umidade relativa

P_{med} – Densidade de potência radiada

P_{rad} – Potência total radiada

R_1 – distância de campo próximo

R_2 – distância entre campo reativo e campo distante

R_a – Resistência da antena

RL – Perda de retorno;

R_{loss} – Resistência de perdas

RWC – Teor relativo de água

S_{11} – Coeficiente de reflexão da tensão na porta 1 do quadripolo

S_{12} – Coeficiente de transmissão reverso

S_{21} – Coeficiente de transmissão

S_{22} – Coeficiente de reflexão da tensão na porta 2 do quadripolo

$U(\theta, \varphi)$ – Intensidade de radiação numa dada direção

$U_{m\acute{a}x}$ – Intensidade de radiação máxima

$U_{m\acute{e}d}$ – Intensidade de radiação média

W – Largura do patch

W_aC – capacidade de conteúdo de água

W_0 – Largura da linha de microfita

X_a – Reatância dos terminais de entrada da antena

Z_a – Impedância de entrada

Z_{in} – Impedância de entrada

Z_o – Impedância característica da linha de transmissão

Letras Gregas

$\tan\delta$ – Tangente de perdas

Γ – Coeficiente de reflexão

ε – Permissividade elétrica complexa

ε' – Constante dielétrica

ε'' – Fator de Perdas

ε_0 – Permissividade elétrica do vácuo

ε_r – Permissividade elétrica relativa do material

ϵ_{eff} – Constante dielétrica efetiva

θ – Ângulo plano horizontal (azimutal)

λ – Comprimento de onda

φ – Ângulo plano vertical (elevação)

Siglas

CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IoT – Internet das coisas

PLA – Ácido Poliláctico

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

VNA – *Vector Network Analyzer*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral.....	2
1.2. Objetivos Específicos	2
2. ANTENAS.....	2
2.1. Parâmetros e Propriedades.....	2
2.1.1. Diagrama de Radiação	2
2.1.2. Regiões de Campo.....	4
2.1.3. Impedância de Entrada	5
2.1.4. Perda de retorno	5
2.1.5. Frequência de ressonância e largura de banda	7
2.1.6. Diretividade, Eficiência e Ganho	8
2.1.7. Carta de Smith.....	8
2.2. Antena de Microfita.....	11
2.2.1. Formas de Alimentação.....	12
2.2.2. Método da Linha de Transmissão	13
3. A RADIOFREQUÊNCIA NA AGRICULTURA.....	16
3.1. Agricultura de Precisão	16
3.2. Métodos para determinar a água presente nas folhas.....	17
3.3. A umidade da planta e sua resposta em radiofrequência	18
3.4. O processo de fotossíntese e transpiração da folha.....	23
3.5. Culturas Vegetais: Juá, Ceriguela, Caju e Feijão-caupi	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1. Construção da antena.....	28
4.2. Teste de umidade S_{11}	31
4.3. Teste de umidade com S_{11} e S_{21}.....	34
4.3.1. Simulação para campo próximo	34
4.3.2. Construção do suporte para as antenas.....	35
4.3.3. Teste para S_{21}	37
4.3.4. Medições de S_{11} e S_{21} em pés de feijão-caupi.....	39
5. RESULTADOS.....	42
5.1. A relação entre o deslocamento da frequência de ressonância e a presença de água em folhas de juazeiro	42

5.2. A relação entre as respostas de <i>S11</i> e <i>S21</i> e a presença de água nas folhas de caju e ciriguela	44
5.3. Analisando as respostas de <i>S11</i> e <i>S21</i> durante o desenvolvimento de um feijoeiro	47
6. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE: A frequência de ressonância ao longo dos dias.....	61

1. INTRODUÇÃO

A Organização das Nações Unidas (ONU) no Brasil, por meio do documento Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 Para O Desenvolvimento Sustentável, propõe 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), constituídos por 196 metas para tornar o mundo livre de pobreza, fome e doenças. O objetivo 12 exige um comportamento responsável e sustentável para o consumo e produção de alimentos. Os produtores devem ser capazes de produzir alimentos *in natura* com baixo impacto ambiental.

O aumento de campos para o plantio não é uma decisão sustentável. Uma forma de mitigar danos é a otimização da produção por unidade de terra. Considerando esse parâmetro, determinar o período de colheita é fundamental para atingir o nível de produtividade desejado. É nesse princípio que se baseia a agricultura de precisão, que consiste em implantar sistemas de telecomunicações e sensores distribuídos, para ter os dados a respeito das condições de terra e colheitas no local.

Nelson (2006) destaca que as propriedades elétricas dos materiais agrícolas têm sido alvo de pesquisas há pelo menos 100 anos. Com uma das primeiras aplicações, determinar o nível de umidade nos grãos por meio de resistência elétrica. Pallazi et al. (2019) comentam que várias abordagens são utilizadas para realizar o monitoramento de culturas, desde o sensoriamento remoto por satélite até sensores em campos. O sensoriamento remoto utiliza a radiação refletida do solo ou materiais vegetais, observando a umidade e condição do solo, data de plantio e temperatura do ar e da superfície, como forma de observar as condições das plantas. O uso de sensores espalhados sob vastas áreas de campo aumenta o grau de confiança da aplicação, de modo a formar uma rede de sensores sem fio, capaz de fornecer dados sobre as condições do campo, Gyarmati *et al.* (2020). Os sensores locais podem ser de temperatura, solo ou foliar, utilizando como parâmetro principal o nível de umidade.

Um tipo de dispositivo que pode ser aplicado como sensor é a antena de microfita, um dispositivo planar, que tem como características, baixo custo e leveza, tamanho reduzido, adaptabilidade a superfícies planas ou curvas, compatibilidade com circuitos integrados. Além disso, a antena de microfita apresenta um amplo material de estudos a respeito de geometrias e substratos utilizados. A antena de microfita já é aplicada em estudos para determinar o nível de umidade em blocos de concreto para detecção de infiltrações. Entretanto, seu uso não é tão discutido como sensor foliar. Analisando isso, foi escolhida a antena de microfita para atuar como sensor para avaliar o nível de umidade nas folhas.

Para observação e desenvolvimento do método de medição do teor de umidade por meio da antena de microfita, foram utilizadas as culturas de juá, ciriguela e caju, plantas disponíveis no campus da UFERSA - Mossoró. Na pesquisa, foram observadas as respostas de S_{11} e S_{21} , conforme a presença de água na folha variava, sendo esse teste aplicado em laboratório. Para o teste de campo é utilizada a cultura de feijão-caupi, nele a antena de microfita é colocada em contato as folhas e por meio do parâmetro S_{11} e S_{21} , é determinado a umidade da folha e catalogado o período de desenvolvimento do fruto por meio das variações no deslocamento da frequência de ressonância.

1.1.Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver sensor não invasivo utilizando uma antena de microfita, para medir o teor de umidade na folha e relacionar esse parâmetro à melhor época de colheita.

1.2.Objetivos Específicos

- Projetar e simular uma antena de microfita através de modelagem computacional;
- Fabricar a antena de microfita projetada, e desenvolver testes experimentais;
- Comparar os resultados experimentais com os de simulação;
- Compreender técnicas de medição de teor de umidade em folhas e relacionar esta umidade com a época de colheita.
- Realizar testes com a antena de microfita e associar as medidas obtidas com o teor de umidade da folha de algumas culturas (juá, ciriguela, caju e feijão-caupi)
- Realizar testes com a antena de microfita e associar as medidas obtidas com o teor de umidade da folha de feijão-caupi desde seu plantio até o estágio de colheita de vagens.

2. ANTENAS

Na norma IEEE Definições Padronizadas de Termos para antenas (IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas – IEEE Std 145-19831), uma antena é definida como “um dispositivo para a radiação ou a recepção de ondas de rádio”. Ou seja, uma antena é um instrumento intermediário que guia ondas eletromagnéticas de um equipamento para o espaço livre ou vice-versa.

De acordo com Balanis (2014), uma antena além de operar como dispositivo de transmissão ou recepção de ondas eletromagnéticas, também deve atuar como dispositivo direcional. Assim uma antena pode assumir diferentes formas para atender a uma particular necessidade, podendo ter a forma de um fio condutor, uma abertura, uma plaqueta (patch), um agrupamento de elementos (conjunto), um refletor, uma lente, e assim por diante.

2.1. Parâmetros e Propriedades

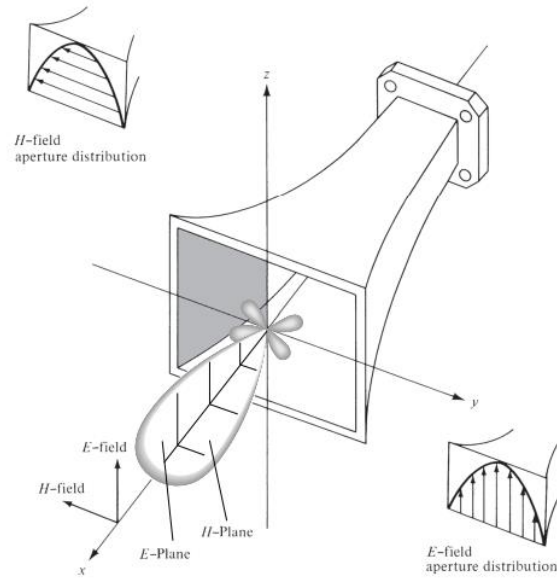
Neste tópico será abordado os principais parâmetros e propriedades das antenas, que auxiliaram no processo de construção do sensor, também é apresentado a antena de microfita, o processo de cálculo para sua construção e as suas formas de alimentação.

2.1.1. Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação ou padrão de radiação, conforme descrito por Balanis (2014), uma função matemática ou uma representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função das coordenadas espaciais. Na visão prática, existe um maior interesse na distribuição espacial bi ou tridimensional da energia irradiada em função da posição do observador ao longo de um caminho ou superfície de raio constante. O diagrama é uma figura tridimensional, mas por meio de planos de corte é possível ser representado por figura bidimensionais.

Os planos principais de corte são o plano vertical ou de elevação (geralmente $\phi = 0^\circ$ ou $\phi = 90^\circ$) e o horizontal ou azimutal ($\theta = 90^\circ$). Na Figura 1 é representado o diagrama de radiação de uma antena corneta de forma tridimensional, em conjunto aos planos de corte de elevação e horizontal.

Figura 1 - Planos de corte vertical e horizontal de uma antena corneta



Fonte: BALANIS, 2014

Conforme demonstrado em Balanis (2014), o diagrama de radiação é utilizado para distinguir parâmetros importantes da antena, como o lobo principal e os lobos inferiores. Sendo o lobo principal o que mostra a direção de máxima radiação da antena, e os lobos inferiores apresentam radiação em direções indesejadas e devem ser diminuídos para que a antena tenha uma máxima eficiência.

Segundo Balanis (2014), a intensidade de radiação de uma antena é definida como a potência irradiada de uma antena por unidade de ângulo sólido, ou seja, o produto da densidade de radiação, P_{med} , pelo quadrado da distância, r^2 .

$$U(\theta, \varphi) = r^2 P_{med} \quad (1)$$

Para uma propagação de uma antena isotrópica que independe da distância, a intensidade de radiação média pode ser escrita como

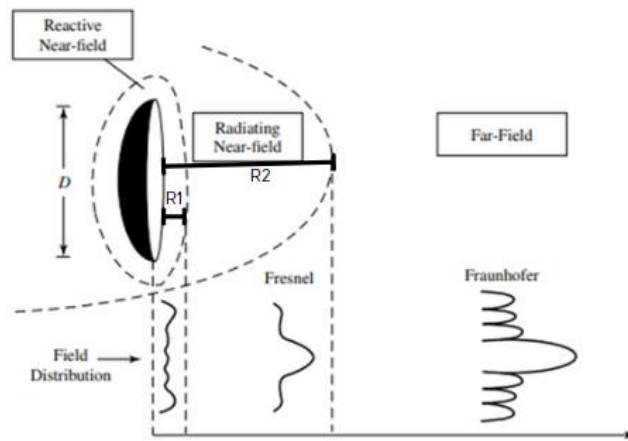
$$U_{med} = \frac{P_{rad}}{4\pi} \quad (2)$$

Onde P_{rad} é a potência total irradiada.

2.1.2. Regiões de Campo

O espaço que fica em torno da antena é dividido em três regiões, o campo próximo reativo, campo próximo (Região de Fresnel) e campo distante (Região de Fraunhofer), (BALANIS, 2014). Conforme vai se distanciando das regiões próximas, o padrão de radiação vai sendo alterado devido às variações de campo, tanto em amplitude como em fase, conforme visto na Figura 2.

Figura 2 - Regiões de campo



Fonte: Adaptado de BALANIS, 2014

A região reativa de campo próximo é definida como a região que está imediatamente rodeando a antena. A sua distância é dada por R_1 e é dada por:

$$R_1 < 0,62\sqrt{D_a^3/\lambda} \quad (3)$$

Onde D_a é a maior dimensão da antena e λ o comprimento de onda. Já a região de Fresnel é a região entre o campo reativo e a região de campo distante. Os seus limites são dados por:

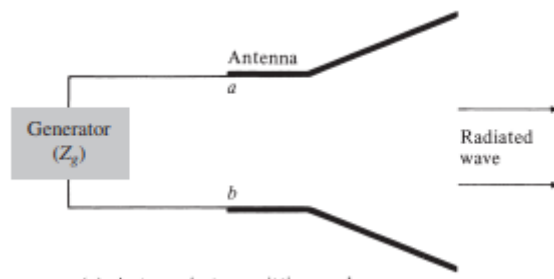
$$0,62\sqrt{D_a^3/\lambda} \leq R_2 < \frac{2D_a^2}{\lambda} \quad (4)$$

A região de campo distante é a região que passa a região de campo próximo e a sua distribuição de campo é independente da dimensão da antena.

2.1.3. Impedância de Entrada

De acordo com Balanis (2014), a impedância de entrada é definida como a impedância apresentada por uma antena em um dos seus terminais, ou a relação de tensão e corrente em um par de terminais, ou a relação dos componentes apropriados dos campos elétricos e magnéticos em um ponto. Em uma antena existe duas impedâncias presentes, a da antena e a de entrada. A impedância pode ser relacionada com a linha de transmissão a qual antena é conectada. A Figura 3 representa esquema de impedância de entrada em uma antena.

Figura 3 - Antena de transmissão



Fonte: BALANIS, 2014

A impedância da antena (Z_A), que pode ser descrita como Balanis (2014):

$$Z_A = R_A + jX_A \quad (5)$$

Onde R_A , é a resistência entre os terminais a e b, e X_A a reatância. O valor de R_A pode ser decomposto em duas partes, R_{rad} a resistência de radiação da antena que corresponde diretamente à potência radiada (P_{rad}), e R_{loss} a resistência de perdas que corresponde diretamente as perdas ôhmicas na antena (P_{loss}).

$$R = R_{rad} + R_{loss} \quad (6)$$

2.1.4. Perda de retorno

A perda de retorno demonstra a relação entre a potência incidida e a potência refletida, sendo um parâmetro importante no projeto da antena. Pode ser obtida pela expressão (POZAR, 2012):

$$RL = -20\log|\Gamma| \quad (7)$$

Onde o coeficiente de reflexão de tensão Γ é obtido a partir da equação (BALANIS, 2014):

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - Z_o}{Z_{in} + Z_o} \quad (8)$$

Onde Z_{in} é a impedância de entrada da antena e Z_o a impedância característica da linha de transmissão.

Outra forma para se obter a perda de retorno é por meio da matriz de espalhamento S , nela é possível obter os dados de ondas incidentes, refletidas e transmitidas. Essa matriz possui semelhança com a matriz de impedância e admitância das linhas de transmissão. Entretanto de acordo com Pozar (2012), enquanto as matrizes de impedância e admitância relacionam as tensões e correntes totais nos pontos de entrada, a matriz de dispersão relaciona as ondas de tensão incidentes nos pontos de entrada com aquelas refletidos nesses pontos. A sua representação é descrita na matriz abaixo.

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \\ \vdots \\ V_N^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \\ \vdots \\ V_N^+ \end{bmatrix} \quad (9)$$

Um elemento específico dessa matriz é determinado por

$$S_{ij} = \frac{V_i^-}{V_j^+} \quad (10)$$

Na prática muitas redes de micro-ondas consistem em uma conexão em cascata de duas ou mais redes de duas portas. Neste caso sendo conveniente definir uma matriz 2x2. A Figura 4 traz a representação de ondas de potências incidentes, a_1 e a_2 , e ondas de potência refletidas, b_1 e b_2 , em uma rede duas portas.

Figura 4 - Representação de um fluxo de sinais em uma rede de duas portas



Fonte: POZAR, 2012

Representando a Figura 4 em uma forma matricial.

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

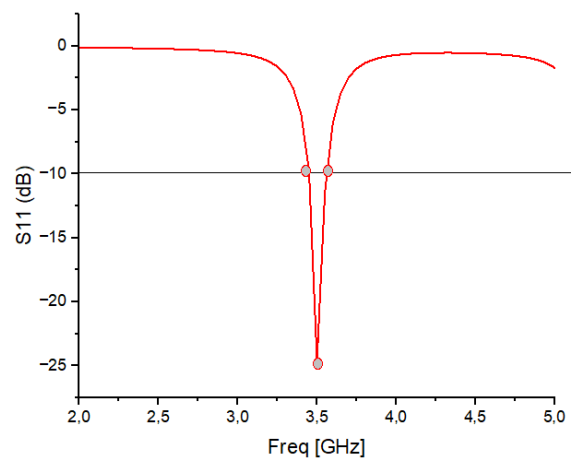
O S_{11} representa o coeficiente de reflexão na porta 1, S_{12} representa o coeficiente de transmissão reverso, S_{21} o coeficiente de transmissão e S_{22} o coeficiente de reflexão na porta 2. O parâmetro S_{11} possui uma relação direta com a perda de retorno, tendo a mesma definição de Γ . Logo a equação 7 pode ser reescrita da seguinte forma.

$$RL = -20\log|S_{11}| \quad (12)$$

2.1.5. Frequência de ressonância e largura de banda

De acordo com Balanis (2014), a frequência de ressonância ou frequência central de uma antena, f_r , é valor da frequência onde a perda de retorno atinge o seu menor valor, sendo abaixo de -10dB. A largura de banda pode ser definida como a faixa de frequências em torno da frequência de ressonância. Quanto maior for a largura de banda, maior será a sua capacidade de receber e transmitir sinais em diversas frequências. A Figura 5 demonstra um gráfico de perda de retorno, onde é possível identificar a frequência de ressonância como o ponto onde o gráfico atinge seu menor valor. E a região abaixo de -10dB é largura de banda da antena.

Figura 5 - Gráfico de perda de retorno de uma antena mostrando a frequência de ressonância



Fonte: Autoria Própria

2.1.6. Diretividade, Eficiência e Ganho

Conforme descrito por Pozar (2012), a diretividade é a relação entre a intensidade máxima de radiação no feixe principal (U_{max}) e a intensidade média de radiação sobre todo o espaço (U_{med}), ou seja, é a capacidade de uma antena em focalizar em uma área em detrimento a outras.

$$D = \frac{U_{max}}{U_{med}} \quad (13)$$

Perdas resistivas devidas aos materiais dielétricos na antena, causam uma diferença entre a potência fornecida a entrada e a potência irradiada por essa antena. Sendo assim a eficiência da antena pode ser determinada como a relação da potência de saída com a de entrada.

$$\eta_{rad} = \frac{P_{rad}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_{loss}}{P_{in}} \quad (14)$$

Onde P_{rad} é a potência irradiada pela antena, P_{in} a potência recebida na entrada e P_{loss} a potência perdida na antena.

Outro fator que define o desempenho da antena é o ganho. De acordo com Balanis (2014), o ganho é a relação da intensidade, em uma determinada direção, com a intensidade da radiação que seria obtida se a potência aceita pela antena fosse irradiado isotropicamente. Ou seja, o ganho está diretamente relacionado com a diretividade da antena. Para uma antena não isotrópica o ganho pode ser dado pelo produto da diretividade com a eficiência da antena.

$$G = \eta_{rad} D \quad (15)$$

2.1.7. Carta de Smith

De acordo com Sadiku (2004), na medida em que o sinal se movimenta ao longo da linha de transmissão, a carta de Smith serve como um indicativo gráfico da variação de impedância dessa linha. Sendo assim, o uso da carta de Smith tem grande relevância no desenvolvimento de um projeto de uma antena, visto que, por meio dela se torna possível a obtenção dos compensadores e da impedância da linha de transmissão que será utilizada com o objetivo de possibilitar uma melhor junção de impedância entre a linha de transmissão e a carga, além também de obter o coeficiente de reflexão, converter esse coeficiente para sua admitância normalizada equivalente (POZAR, 2012).

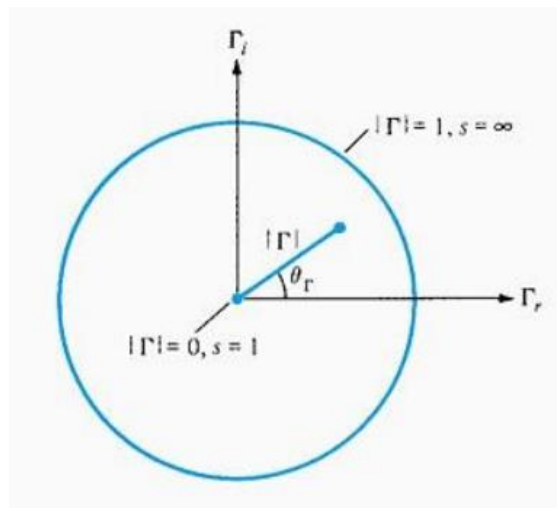
A carta de Smith foi desenvolvida após a análise de carga onde a impedância deve ser associada. De forma que é conveniente a representação graficamente da relação entre a impedância da carga e o coeficiente de reflexão.

A carta de Smith é desenhada dentro de um círculo de raio unitário ($|\Gamma| \leq 1$), como ilustrado na Figura 6. A carta é desenvolvida por meio da Equação 16.

$$\Gamma = |\Gamma| \angle \theta_\Gamma = \Gamma_r + j\Gamma_i \quad (16)$$

Onde Γ_r e Γ_i , correspondem respectivamente as partes real e imaginária do coeficiente de reflexão.

Figura 6 - Círculo unitário na qual a carta de Smith é construída



Fonte: SADIKU, 2004

Sadiku (2004) relata que para não ter uma carta para cada linha de transmissão com impedância característica diferente, é preferível que tenha apenas uma impedância característica válida para todas as linhas. Para isso é feito a normalização da carga por meio de uma impedância característica (Z_o), a impedância normalizada para uma para uma impedância de carga (Z_c) é dada por:

$$z_c = \frac{Z_c}{Z_o} = r + jx \quad (17)$$

Onde r e x representam respectivamente a resistência e a reatância da carga normalizada. A Equação 18, relaciona a impedância normalizada com o coeficiente de reflexão.

$$z_c = r + jx = \frac{(1 + \Gamma_r) + j\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r) - j\Gamma_i} \quad (18)$$

Normalizando e igualando os termos, encontra as formas real e imaginaria de forma separada.

$$r = \frac{1 - \Gamma_r^2 - \Gamma_i^2}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (19)$$

$$x = \frac{2\Gamma_i}{(1 - \Gamma_r)^2 + \Gamma_i^2} \quad (20)$$

Rearranjando as Equações 19 e 20, obtemos as seguintes relações:

$$\left[\Gamma_r - \frac{r}{1+r}\right]^2 + \Gamma_i^2 = \left[\frac{1}{1+r}\right]^2 \quad (21)$$

$$[\Gamma_r - 1]^2 + \left[\Gamma_i - \frac{1}{x}\right]^2 = \left[\frac{1}{x}\right]^2 \quad (22)$$

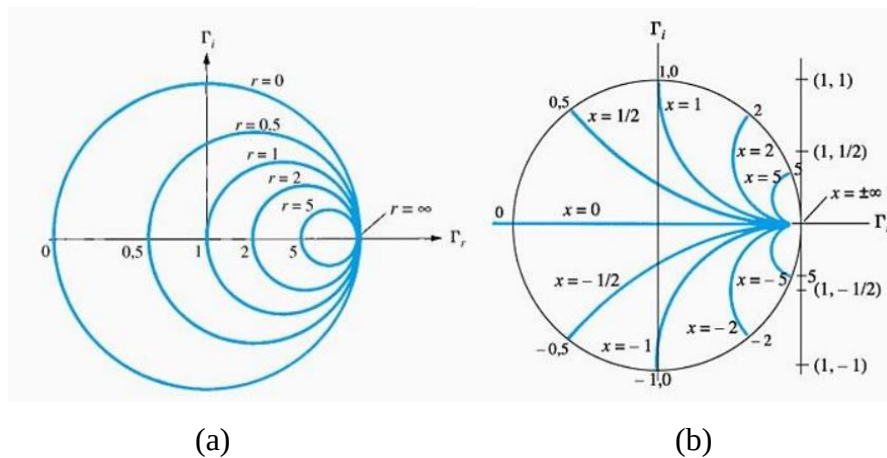
As Equações 21 e 22 são similares a equação geral de circunferência, de forma a descrever o comportamento gráfico e características dos círculos resistivos (Equação 23) e dos círculos reativos (Equação 24).

$$\text{Centro em } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left(\frac{1}{1+r}, 0\right) \text{ e raio} = \frac{1}{1+r} \quad (23)$$

$$\text{Centro em } (\Gamma_r, \Gamma_i) = \left(0, \frac{1}{x}\right) \text{ e raio} = \frac{1}{x} \quad (24)$$

A resolução da Equação 23, fornece valores r que formam um conjunto de circunferências conforme mostrado na Figura 7 (a). E a resolução da Equação 24, fornece os valores de x, de modo a formar outro conjunto de circunferências, conforme a Figura 7 (b). demonstra.

Figura 7 - Conjunto de círculos (a) Resistivos e (b) de Reatância



Fonte: SADIKU, 2004

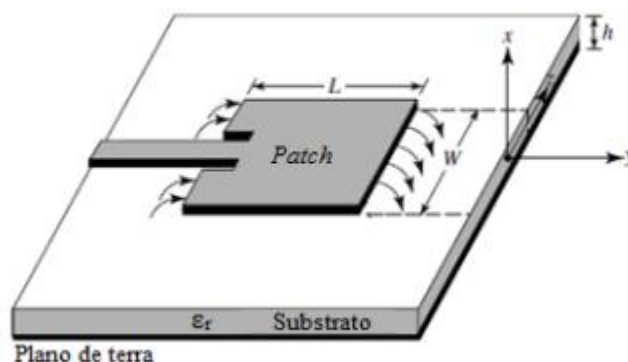
A sobreposição desses dos círculos resistivos e de reatância formam o que é conhecido como a carta de Smith.

2.2. Antena de Microfita

A antena de microfita é uma estrutura planar, sendo uma classe de antenas amplamente utilizada aplicações de comunicações sem fio, como em dispositivos moveis, Wi-Fi, radares e sistema de comunicações por satélite. De acordo com Balanis (2014), as antenas de microfita são simples e de baixo custo de produção, usando a tecnologia de fabricação de circuito impresso.

A antena de microfita, conforme demonstrado na Figura 8, consiste em um pedaço metálico fino, geralmente cobre, impresso sobre um substrato. A parte superior é conhecida como *patch*, é a parte responsável pela transmissão e recepção da onda eletromagnética, ele é projetado em uma geometria que atenda aos requisitos de frequência e direcionalidade da antena. A parte inferior da antena é conhecido como plano de terra, ele é encarregado pela blindagem de radiação do lóbulo secundário da antena. Por fim no meio fica o substrato, o qual utiliza um material dielétrico que influencia diretamente nas características das antenas, como a impedância, a frequência de operação, eficiência, além de determinar a espessura da antena.

Figura 8 - Antena de microfita



Fonte: BALANIS, 2014

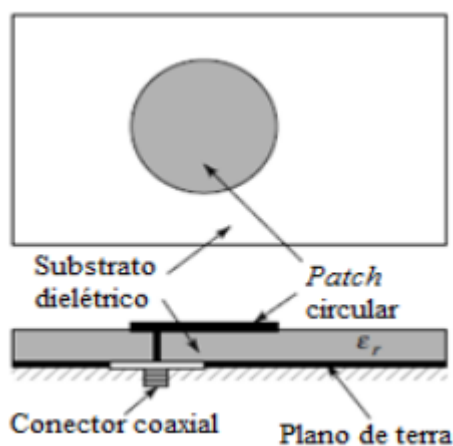
2.2.1. Formas de Alimentação

O formato de alimentação da antena de microfita também vai depender do projeto em questão, de acordo com Balanis (2014) as configurações mais comuns de alimentação são a linha de microfita, cabo coaxial, acoplamento e por proximidade.

A linha de microfita é impressa no substrato dielétrico e é usada tanto para a transmissão do sinal quanto para a alimentação da antena. O patch da antena é projetado de forma que sobrepõe a linha de microfita, conforme visto na Figura 8, é uma alimentação simples de modelar e controlar. No entanto esse tipo de alimentação deve ser somente com largura de banda entre 2% a 5%, para evitar radiações indesejadas.

A alimentação de linha coaxial, tem o condutor interno do cabo coaxial conectado ao *patch* enquanto o condutor externo é conectado ao plano de terra, como demonstrado na Figura 9. Este tipo de alimentação tem a simplicidade de projeto, em relação ao valor impedância de entrada, feito através do posicionamento do ponto de alimentação. No entanto, também tem estreita largura de banda e é mais difícil de modelar, especialmente para substratos grossos ($h > 0,02\lambda$), BALANIS (2014).

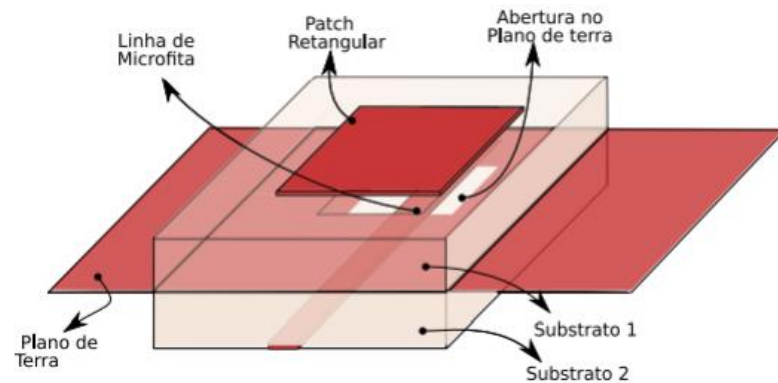
Figura 9 - Alimentação por cabo coaxial



Fonte: BALANIS, 2014

A alimentação por abertura consiste em dois substratos separados por um plano de terra, conforme a Figura 10. Na parte de baixo do substrato inferior existe uma linha de microfita, cuja energia se acopla ao patch por meio de uma abertura existente no plano de terra localizado na face inferior do substrato superior. As principais desvantagens desse método são sua difícil implementação e estreita largura de banda.

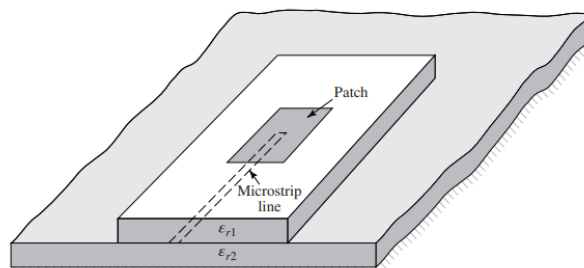
Figura 10 - Alimentação por abertura



Fonte: BALANIS, 2014

O método de acoplamento, conforme mostrado na Figura 11 é semelhante a alimentação por abertura, porém nesse método não tem uma abertura. Nesse método o *patch* é localizado na parte superior e entre os dois substratos se encontra a linha de microfita.

Figura 11 - Alimentação por acoplamento



Fonte: BALANIS, 2014

2.2.2. Método da Linha de Transmissão

O método da linha de transmissão é um dos métodos para determinar as dimensões dos componentes da antena. De acordo como Balanis (2014), apesar de ser um método simples e pouco exato, produz resultados satisfatórios e proporciona encontrar o casamento de impedância da estrutura, sendo mais recomendado para antenas de *patch* quadrado ou retangular.

Conforme descrito por Balanis (2014), O modelo da linha de transmissão representa a antena de microfita por duas fendas separadas por uma linha de transmissão de baixa impedância Z_c e comprimento L . As dimensões do *patch* são finitas ao longo do comprimento e da largura, os campos da borda podem sofrer com efeito de franjeamento. A quantidade de franjas é função das dimensões do *patch* e da espessura do substrato. Para o plano E principal

(plano x-y), o franjamento é efeito da relação do comprimento L do *patch* e a espessura h do substrato (L/h) e da constante dielétrica (ϵ_r). O efeito do franjamento influencia na frequência de ressonância da antena, devendo ser levado em conta nos cálculos.

O efeito do franjamento faz com que as linhas de campo percorram tanto o ar quanto o substrato. Esse efeito requer que seja calculado uma permissividade efetiva, que leve em consideração tanto a permissividade do ar quanto a do substrato (ϵ_r). De acordo com Balanis (2014) a constante dielétrica efetiva é dada pela Equação 25.

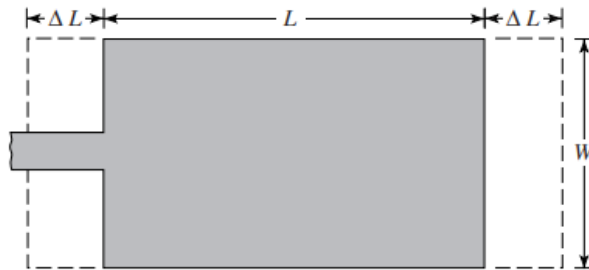
$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (25)$$

Onde, h é a espessura do substrato e W a largura do *patch*.

O efeito de franjamento também causa mudanças no comprimento efetivo do *patch* da antena, tendo valores diferente do comprimento físico, conforme ilustrado na Figura 12. A variação desse comprimento é função tanto da permissividade relativa (ϵ_{reff}) quanto da razão entre a largura do *patch* e espessura do substrato (W/h). Um método analítico para aproximar desse valor é demonstrado na Equação 26.

$$\frac{\Delta L}{h} = \frac{(\epsilon_{reff} + 0,3) \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0,258) \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)} \quad (26)$$

Figura 12 - Comprimento físico e efetivo de um *patch* retangular



Fonte: BALANIS, 2014

Com base na Equação 26 é possível determinar os parâmetros do *patch*, largura (W) e comprimento (L), em conjunto com outras informações da antena como sua frequência de ressonância (f_r), constante dielétrica do substrato (ϵ_r) e espessura do substrato (h).

$$W = \frac{c}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (27)$$

$$L = \frac{c}{2f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (28)$$

Onde c é a velocidade propagação de ondas eletromagnéticas no espaço livre.

De acordo com Silva (2014), a linha de microfita pode ser utilizada como uma forma de casamento de impedância na antena através dos cálculos de sua largura e comprimento. Pozar (2012), afirma que o comprimento da linha de microfita deve ser igual ou menor que $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda da frequência de ressonância, levando também em conta a permissividade relativa. A Equação 29 descreve como é determinado o comprimento da linha.

$$L_m = \frac{c}{4f_r\sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (29)$$

Balanis (2014) demonstra que a largura da linha de microfita pode ser dada pela Equação 30.

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\epsilon_{reff}} \ln \left(\frac{8h}{W_0} + \frac{W_0}{4h} \right), & \frac{W_0}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{reff} \left[\frac{W_0}{h} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{W_0}{h} + 1,444 \right) \right]}}, & \frac{W_0}{h} > 1 \end{cases} \quad (30)$$

Onde Z_0 é a impedância da linha de microfita e W_0 a largura da linha de microfita. Segundo Balanis (2014), a solução para $\frac{W_0}{h} > 1$ pode ser por meio de métodos numérico, admitindo um valor ideal de impedância de entrada igual a 50Ω .

3. A RADIOFREQUÊNCIA NA AGRICULTURA

Neste capítulo é apresentado a agricultura de precisão e qual o seu objetivo, são apresentados os métodos atuais para a medição do teor de umidade em folhas e os métodos em radiofrequência para determinar o teor de umidade. Por fim, é apresentado conceitos básicos no estudo da anatomia vegetal, como o processo de fotossíntese e a transpiração da folha, e uma seção explicando as amostras que foram utilizadas nesse trabalho.

3.1. Agricultura de Precisão

Segundo Gyarmati *et al.* (2020), um dos maiores desafios do setor agrícola é alimentar significativamente mais pessoas em mais ou menos o mesmo tamanho de terra agrícola. O tamanho da área agrícola utilizada não pode ser expandido significativamente, mediante a isso é necessário técnicas para melhorar o setor agrícola.

A agricultura de precisão é uma área de pesquisa que monitora as atividades agrícolas por meio de tecnologias de monitoramento. De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), a agricultura de precisão colabora no processo e análise de dados, auxiliando no entendimento das condições ideais para o cultivo das principais culturas agrícolas.

Conforme citado por Palazzi *et al.* (2019a), a agricultura de precisão consiste em implantar sistemas de telecomunicações e sensores distribuídos, para adquirir os dados das condições de terra, temperatura, nível de colheitas no local, além de determinar em tempo real as condições mais adequadas (como irrigação, preparo do solo e colheita) para cada área específica, de forma a aumentar a produtividade, enquanto reduz desperdício e custos de produção. As técnicas utilizadas na agricultura de precisão podem ser classificadas como remotas, que utiliza imagens aeroespaciais formadas pelo nível de reflectância da vegetação e do solo formado por algum nível de radiação; e locais, que utilizam sensores que monitoram diferentes áreas de plantio e transmitem os dados obtidos via comunicação sem-fio. Esses sensores podem ser classificados em sensores de solo, que ficam enterrados no solo; sensores de ar, projetado para avaliar as condições atmosféricas; e sensores foliares, que são colocados diretamente na planta.

Os sensores de solo são utilizados para medir o teor de umidade do solo, definido como a razão entre o volume de água e o volume do solo. A presença de água aumenta a condutividade e a constante dielétrica do solo. Sensores de folhas, são aplicados diretamente nas folhas das

plantas e geralmente são utilizados para inferir o nível de estresse hídrico de colheitas. As plantas utilizam a água para realizar suas funções metabólicas além de realizar sua regulação de temperatura. Quando as plantas são hidratadas, um maior nível de umidade está presente na superfície da folha. À medida que a planta sofre estresse hídrico a umidade na folha diminui.

O uso de sensores sem fio seria uma forma de absorver os dados em grandes áreas de campo. Equipando-os com recursos de telecomunicação, a informação poderia ser transmitida por meio da Internet das coisas (IoT). Para isso esses sensores devem ser econômicos e sustentáveis, de forma a operar em diferentes condições climáticas. Além de serem autônomas na questão de energia. Outro ponto crucial é saber gerenciar a troca de sensores a cada período de colheita, atualmente existem pesquisas com propostas de sensores biodegradáveis. Permitindo assim o seu descarte de forma consciente.

Em síntese a agricultura de precisão está em constante evolução. Ao ponto que Gyarmati *et al.* (2020), estipula que a quantidade de dados obtidos nos campos por meio de sensores de campo e remoto, seja enorme em alguns anos. Na iminência disso refletir em um sistema de *big data*, onde o desafio será manipular, armazenar e processar os dados, bem como conectar os diferentes dispositivos entre si. Com um processamento de dados mais automatizado, o projeto de futuras culturas nas mãos dos agricultores seria mais arbitrário.

3.2. Métodos para determinar a água presente nas folhas

A água é uma das partes indispensáveis das necessidades de crescimento de uma planta. O estresse hídrico, deficiência de água na planta, acarreta baixa qualidade e quantidade de produção e no fim a morte da planta. Por outro lado, a irrigação excessiva causa baixa eficiência no uso da água e baixa resistência das plantas à escassez hídrica, aumentando os danos causados por algumas pragas e doenças.

Para isso existem, formas de determinar as condições das plantas por meio da água presente nas suas folhas, podendo ter métodos associados diretamente a planta ou utilizando o ambiente exterior para determinar o nível de umidade. Um método simples utilizado para determinar a quantidade de água presente numa folha é por meio do teor relativo de água (RWC), que representa a capacidade máxima que uma folha pode captar. O RWC é um método simples, ondes folhas frescas de amostras cultivadas são destacadas e em seguida pesadas, após isso são colocadas em água destilada no refrigerador por até 12 h, após isso são pesadas novamente e são colocadas em uma estufa para secar totalmente e terem seu peso medido. A

diferença relativa no teor de água da folha fornece uma medida quantitativa de seu estado de hidratação interno, conforme descrito por Pask (2012).

$$RWC(\%) = \left(\frac{FW - DW}{TW - DW} \right) \times 100 \quad (31)$$

Onde FW é a massa da folha fresca, TW a massa da folha saturada de água e DW a massa da folha seca. Esse método é utilizado para selecionar melhores genótipos de folha se baseando na sua capacidade de absorver água, contexto importante para agricultura. Ou para relacionar o RWC com a tolerância à salinidade, por meio da seleção de genótipos, escolhendo qual amostra se adapta melhor, como descrito por Duangjai et. al. (2004).

Outra forma de determinar a água presente nas folhas é por meio do potencial hídrico (Ψ_w), uma medida do grau de hidratação de uma planta, sendo assim fornece um índice relativo do estresse hídrico que a planta está submetida, (TAIZ E ZEIGER, 2004). O potencial hídrico em tecidos vegetais pode ser determinado por meio de psicrômetros de termopar. De acordo com Carvalho (2019), neste método, o tecido vegetal é mantido em uma pequena câmara a uma temperatura constante e o grau de resfriamento do termopar é determinado à medida que a água evapora do ou é absorvida pelo tecido. Botega (2009) complementa que o termopar apresenta o potencial da relação termodinâmica da umidade relativa com o potencial matricial da água no tecido vegetal.

Segundo Martinez et. al (2011), os psicrômetros podem ser utilizados em métodos não destrutivos, em câmaras fechadas, ou em *in loco*, a depender do *design* do equipamento. A técnica destrutiva, produz medições confiáveis de potencial de água que podem ser comparadas com medições obtidas com outras técnicas utilizadas para o mesmo fim. Entretanto os métodos *in situ* necessitam de cuidado e experiência para a calibração para diminuir de erros de leitura.

A existência desse tipo de sensores não impede o estudo de outras alternativas, uma delas é a aplicação de radiofrequência para determinar os níveis de umidade em folhas, que já estudada por outros autores.

3.3. A umidade da planta e sua resposta em radiofrequência

As propriedades de micro-ondas do tecido vegetal estão fortemente relacionadas a quantidade de água armazenada, sendo que uma folha de planta saudável possui a composição de cerca 90% de água. Segundo Afzal et al. (2010), uma das características da água líquida é a relativa alta constante dielétrica entre suas moléculas, que é substancialmente diferente daquela

em outros materiais. Sendo essa constante de 80 (em temperatura ambiente). Em geral, a constante dielétrica de uma amostra de folha é uma função do teor de água dentro da folha e da frequência de medição. De acordo Nelson (2006) a captação do teor de água na planta por meio das propriedades dielétricas da folha em vários estágios (polinização até o fruto) poderia fornecer dados para estipular quando o fruto irá amadurecer.

As ondas eletromagnéticas quando incidem sobre a vegetação, penetrando nas folhas, caules e frutos, tem comportamentos de reflexão, refração, absorção e espalhamento. As características dielétricas são parâmetros importantes que determinam a interação entre as ondas eletromagnéticas e os materiais. Para um meio homogêneo, isotrópico e com perdas, a constante dielétrica é dada pela Equação 32.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (32)$$

Onde ε' é a parte real da permissividade dielétrica e representa a capacidade do material armazenar energia. E ε'' é a parte imaginária que representa as perdas dentro do material. Outra forma de representar as perdas do material é por meio da tangente de perdas, descrita na equação 33.

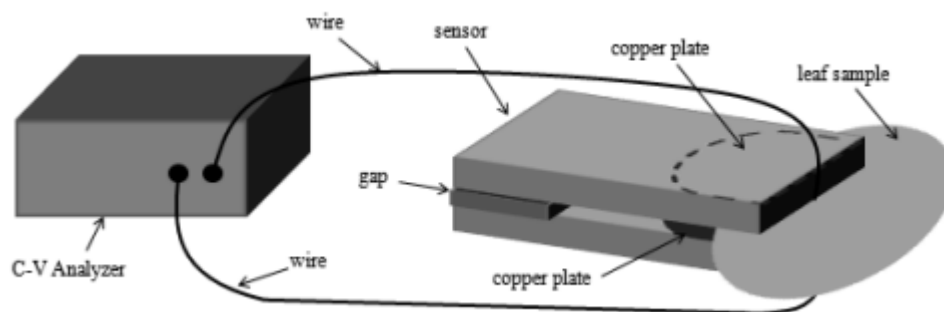
$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (33)$$

Onde ε_0 é a constante dielétrica do espaço livre, σ a condutividade do material, ω a frequência angular, e ε_r a constante dielétrica relativa.

De acordo com Dasdhani *et al.* (2015), a escolha da frequência é determinada pelo tamanho dos objetos avaliados em comparação ao comprimento de onda, se os métodos de padrão de absorção e reflexão forem utilizados. Nos casos de plantas com folhas com dimensões centimétricas, frequências acima de 30 GHz são vantajosas. Entretanto equipamentos com frequência acima de 20 GHz, apresentam preços elevados. Outro ponto levantado por Dasdhani *et al.* (2015) são os parâmetros de relaxamento Debye e condutividade iônica são dependentes da temperatura, então os testes para determinar a constante dielétrica da planta deve ser feito em ambientes controlados.

Afzal *et al.* (2010), em seu trabalho utiliza um sensor capacitivo, para determinar a constante dielétrica nas folhas, onde foram utilizadas 5 culturas (milho, sorgo, feijão branco, feijão comum e girassol). O sensor capacitivo é formado por duas placas de cobre isoladas semiovais, e duas placas de plástico firme com um espaço separando as duas. O esquema do aparato utilizado é mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema do sistema de medição por capacitância



Fonte: Afzal *et al.* (2010)

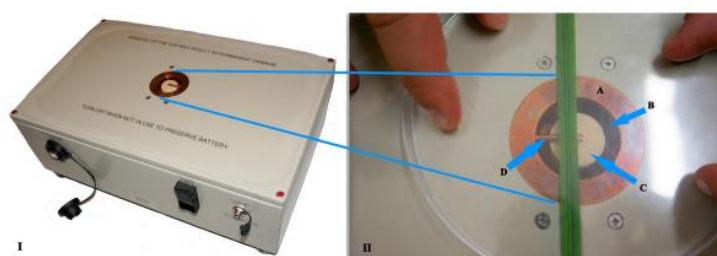
Afzal *et al.* (2010) realizou o experimento colhendo três folhas de forma aleatória de cada cultura. As amostras foram retiradas da parte central de uma folha. Amostras de folhas foram inseridas no sensor e a capacitância foi medida a cada hora. As amostras foram pesadas após as leituras. Este procedimento foi continuado até que as amostras fossem desidratadas em condições ambientais. Em seguida as amostras foram secas em estufas a 70 °C por 24 h para encontrar os pesos da folha seca. Essa pesquisa foi limitada para que os fatores efetivos para alterar a constante dielétrica fosse limitado a variação de umidade. Foi utilizado a correlação entre o valor da capacitância e a percentagem de umidade presente na folha, conforme a Equação 34.

$$y = ae^{bx} \quad (34)$$

Onde y é valor para a capacitância, x o percentual de umidade na folha em relação ao peso, a é o coeficiente linear, e b o coeficiente exponencial.

Dasdhani *et al.* (2015), utilizou em sua pesquisa um ressonador de micro-ondas que opera em duas faixas de frequência (2,4 GHz e 150 MHz), Figura 14. No seu trabalho ele relaciona o nível de umidade presente na folha com a taxa de variação de frequência (FRS), a Equação 35 descreve essa taxa.

Figura 14 - Ressonador de micro-ondas



Fonte: Dasdhani *et al.* (2015)

$$FRS = \frac{f_{r.vazio} - f_{r.amostra}}{f_{r.vazio}} \quad (35)$$

Onde $f_{r.vazio}$ é a frequência de ressonância do ressonador e $f_{r.amostra}$ é a frequência que resulta da presença da amostra. Também é visualizado a relação da umidade da folha com a alteração no fator de qualidade do ressonador. Essa relação é demonstrada na Equação 36.

$$IQS = \frac{1}{Q_{amostra}} - \frac{1}{Q_{vazio}} \quad (36)$$

Onde IQS é o inverso da alteração do fator Q no ressonador, com Q_{vazio} sendo o valor para o ressonador vazio e $Q_{amostra}$ o valor do ressonador com a amostra presente. Caso a amostra não cause grandes perturbações na distribuição do campo eletromagnético, FRS e IQS podem ser relacionados com a permissividade complexa da amostra, consequentemente relacionar a tangente de perdas no material.

$$FRS = \frac{k}{2}(\varepsilon' - 1) \quad (37)$$

$$IQS = k\varepsilon'' \quad (38)$$

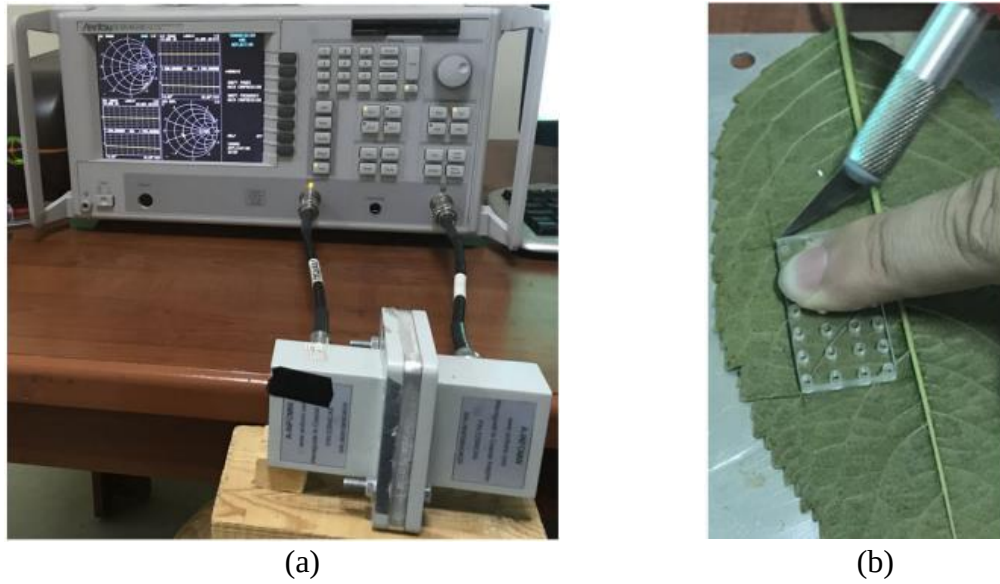
$$\frac{IQS}{FRS} = \frac{2\varepsilon''}{(\varepsilon' - 1)} \approx \frac{2\varepsilon''}{\varepsilon'} = 2 \tan \delta \quad (39)$$

O fator k, descreve o campo de energia ressonante no volume da amostra, ele é descrito na Equação 40.

$$k = \frac{\varepsilon_0 \int E_0^2 dV}{2W} \quad (40)$$

Dogan *et al.* (2020), utiliza em sua pesquisa dois guias de onda WR229 e WR159, conforme apresentado na Figura 15 (a), para medir a umidade na folha de duas culturas de cerejeira, a doce e a azeda. Os dois guias de onda são utilizados para varrer a faixa de frequência de 3,30-7,70 GHz. O processo que ele utiliza é não invasivo e é necessário o corte da folha para verificação, Figura 15 (b).

Figura 15 - Guia de ondas e amostras utilizadas



Fonte: Dogan et. al (2020)

O primeiro passo é adquirir as amostras frescas e depois satura-las de água por 48h. Após isso elas são cortadas usando um bisturi de acordo com as dimensões do guia de onda WR229 e WR159. As amostras saturadas de água são secas no forno de micro-ondas até estarem totalmente secas. É necessário determinar a capacidade máxima de que uma folha pode armazenar água, para isso é necessário o peso da folha totalmente saturada ($m_{saturada}$) e da folha totalmente seca (m_{seca}).

$$WaC = m_{saturada} - m_{seca} \quad (41)$$

A partir da Equação 41 é possível determinar a umidade relativa de cada folha, conforme visto na Equação 42, onde m_{medida} é o peso da amostra medido durante o experimento.

$$M_r = \frac{m_{medida} - m_{seca}}{WaC} \quad (42)$$

Em cada etapa os parâmetros S_{11} e S_{21} , são obtidos por VNA. Tendo suas medições realizadas em temperatura controlada de 24 °C. Com esses dados é possível determinar o valor do dielétrico relativo da folha para cada variação de umidade. A partir das equações de S_{11} e S_{21} , mostrado respectivamente nas Equações 43 e 44.

$$S_{11} = \frac{\Gamma (1 - T^2)}{(1 - \Gamma^2 T^2)} \quad (43)$$

$$S_{21} = \frac{T (1 - \Gamma^2)}{(1 - \Gamma^2 T^2)} \quad (44)$$

Onde Γ é o coeficiente de reflexão e T o coeficiente de transmissão. Os valores dos coeficientes podem ser encontrados com uma variável X que é demonstrada na equação 45.

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{11}} \quad (45)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (46)$$

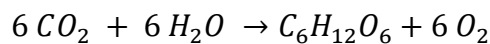
$$\frac{1}{\Lambda^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (47)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\lambda_0}{\mu_r} \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \frac{1}{\Lambda^2} \right) \quad (48)$$

A escolha do melhor método para análise dependerá de como estão dispostas as condições das amostras e dos equipamentos de medição. A antena de microfita pode fornecer os dados de S_{11} e S_{21} .

3.4. O processo de fotossíntese e transpiração da folha

A fotossíntese é o processo realizado pelas plantas para a produção de energia necessário para a sua sobrevivência. Conforme descrito por Taiz, et. al. (2017), a energia luminosa impulsiona a síntese de carboidratos e a liberação de oxigênio a partir de dióxido de carbono e água:



Onde $C_6H_{12}O_6$ representa um açúcar simples, assim como a glicose. A planta absorve seus nutrientes e água por meios das raízes. A anatomia da folha é altamente especializada para a absorção de luz. Nelas estão presentes a clorofila, que confere a folha ter tonalidade verde, sua função é absorver a energia luminosa que no final armazenada como energia química via formação de ligações químicas. Com a absorção de gás carbônico a planta consegue transformar a energia luminosa em alimento e simultaneamente libera oxigênio.

Durante o processo de fotossíntese ocorrem processos de dissipação de calor para que a folha não fique em temperatura extremamente altas, uma delas é por meio de transferência de calor, caso o ambiente externo tenha uma temperatura menor que a presente na folha. E a outra é por meio da perda de calor latente, quando uma folha transpira (libera vapor de água) ela

remove uma quantidade de calor. De acordo com Taiz, et. al. (2017), grandes quantidades de água são perdidas durante os períodos fotossintéticos.

Quem faz o controle do processo de transpiração e a entrada de CO_2 na folha são os estômatos, pequenos orifícios localizados na superfície das folhas. Eles são abertos no período diurno e se fecham durante o período noturno, CUTLER et. al. (2011). A manutenção de temperaturas foliares favoráveis é crucial para o crescimento vegetal, porque a fotossíntese máxima ocorre dentro de uma faixa de temperatura relativamente estreita, TAIZ, et. al. (2017). Quando a planta está sofrendo estresse hídrico, além dos estômatos existem outros mecanismos utilizados como o enrolamento foliar, perda sazonal de folhas, adensamento e aumento da impermeabilidade cuticular, CAMARGO (2009).

A compreensão do processo de fotossíntese e transpiração das folhas é fundamental para a aplicação proposta para o sensor desenvolvido, pois é possível entender as leituras de quando a planta estiver sofrendo estresse hídrico.

3.5. Culturas Vegetais: Juá, Ceriguela, Caju e Feijão-caupi

O Juá é uma planta da família das Rhamnaceae, também conhecida como joá, joazeiro, juazeiro, entre outros nomes. É uma árvore alta, podendo crescer de 5 a 15 metros, além disso, é característico dessa árvore a presença de espinhos. Conforme descrito por Vasconcelos (2017), suas folhas são coriáceas (semelhante ao couro e quebradiças), lustrosas, elípticas, com tamanho de 3 a 6 cm. Apresenta flores pequenas, axilares, em caches, amarelo-esverdeadas, em formato de estrela. Possui um fruto globoso, com cerca de 3cm, amarelo, comestível com pedúnculo orlado, que se assemelha com uma pitomba, porém menor. Ernani e Carvalho (2009), falam que o juazeiro é um dos elementos típicos da vegetação dos sertões nordestinos. É uma espécie de maior ocorrência nas caatingas, no Sertão e no Agreste. Durante as épocas de seca, a planta se conserva verde e cresce lentamente e vive por mais de 100 anos.

A ciriguela (*Spondias purpurea*) é uma das espécies cultivadas do gênero *Spondias*, sendo uma planta com alta capacidade de adaptação ao calor e a seca, possui um longo ciclo de vida e geralmente é cultivada em quintais e sítios ou explorada economicamente pelo seu valor comercial. Seus frutos, por sua vez, têm como característica uma cor vermelho-escura quando madura e polpa de sabor e aroma agradável. Bernardo (2021), complementa que as partes da planta como os frutos, as folhas, as sementes e as cascas da árvore são utilizadas na medicina popular por apresentarem propriedades terapêuticas antibacterianas, diuréticas,

antiespasmódicas e antitérmicas. Portanto, a folha da ciriguela pode ser caracterizada como uma PANC (Plantas alimentícias não convencionais).

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), planta originária do Brasil, encontra-se disseminado em todo o mundo tropical. De acordo com a EMBRAPA, a árvore tem porte médio e ramificação baixa. Possui folhas simples que medem de 10cm a 20cm de comprimento por 6cm a 12cm de largura. Seu fruto, o caju, é composto pela castanha, o fruto do cajueiro, que é conectado a um pedúnculo floral, o pseudofruto, que possui textura carnuda em cores amarela, vermelha ou rosada.

O feijão-caupi pertencente à espécie *Vigna unguiculata* L., originário da África é foi trazido ao Brasil e é cultivado desde o Século XVI, pode ser conhecido como feijão-de-corda, feijão-fradinho, feijão de praia, feijão miúdo e feijão macaçar. De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), é segundo feijão mais cultivado no Brasil, predominantemente nas regiões Norte e Nordeste, responsáveis por 75% da produção. Na região Nordeste, a produção tradicionalmente concentra-se nas áreas semiáridas, onde outras culturas leguminosas anuais, em razão da irregularidade das chuvas e das altas temperaturas, não se desenvolvem satisfatoriamente, FREIRE FILHO et. al. (2011). É uma cultura importante por conter altos valores de proteínas, carboidratos, fibras e vitaminas essenciais ao crescimento do ser humano, constituindo um meio de qualidade de vida para populações rurais carentes.

Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), essa espécie tem ciclo médio, de 70 dias até a primeira colheita, com hábito de crescimento indeterminado, porte semiramador, com inserção da vagem acima da folhagem, e folhas que medem de 6cm a 10cm. Vale et. al. (2017) dissertam sobre o solo para o feijão-caupi, não podendo o solo com pouca drenagem, devido à permanência do excesso de água no perfil do solo, que proporciona ambiente anaeróbico e consequentemente atrapalhando o desenvolvimento da planta. Dando preferência a solos de textura franco-arenosa a franco-argilosa, bem drenados e de relativa fertilidade natural. De acordo com a EMBRAPA o consumo hídrico vai depender do solo e as condições climáticas. Com consumo hídrico diário de 3,0 a 4,0 mm. Durante a fase inicial de desenvolvimento, entre o pleno crescimento e desenvolvimento de vagens, consumo de 5,0 a 6,5 mm/dia. E na fase final de ciclo, consumo de 3,0 a 3,5 mm/dia.

Em seu trabalho Alencar et. al. (1996) elenca algumas pragas que prejudicam o crescimento e desenvolvimento das vagens. Como o caso de algumas lagartas, como Lagarta Elasma que abrem caminhos entre as raízes e o caule causando secamento e morte. Lagarta de folhas, alimentam-se das folhas durante o cultivo, ocasionalmente a redução da área

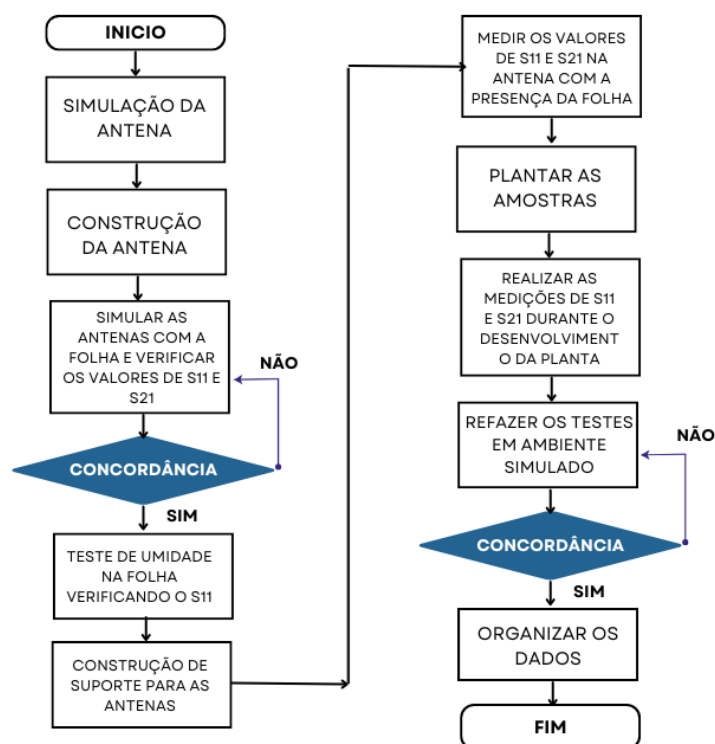
fotossintética das plantas pode acarretar queda de produção da cultura. Cigarrinha Verde, por meio de injeção de enzima na sua alimentação, intoxica a planta podendo levar ao amarelamento das folhas. Larva Mineradora, abrem caminho dentro do tecido foliar, destruindo a folha por dentro dificultando a fotossíntese e podendo provocar o secamento da folha. Vale et. al. (2017) ainda descreve sobre a doença Antracnose, que afeta diretamente as vagens, ocasionado manchas pardacentas, também afetando folhas e caules com lesões necróticas, escuras que geralmente rebaixando o tecido.

Para a compreensão dos aspectos de umidade da folha, é necessário observar os detalhes presentes no solo e a observação da saúde da planta. Com isso podendo gerar uma métrica para a mensuração de umidade e sua relação com o período de cultivo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo trata sobre a metodologia aplicada ao trabalho desenvolvido. Inicialmente, é proposto determinar o nível de umidade em uma folha relacionando com o efeito que ela causa em radiofrequência. O roteiro para esse trabalho é descrito no fluxograma.

Figura 16 - Fluxograma de pesquisa



Fonte: Autoria Própria

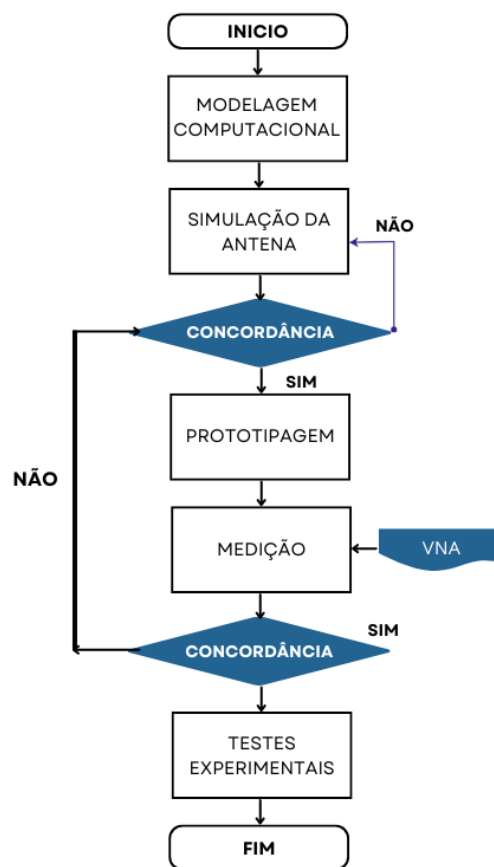
No início, foi construída a antena de microfita para realizar as medições de S_{11} em contato com a folha. Foi verificado se existia uma concordância nos dados obtidos baseado em literaturas de antenas aplicadas para verificar nível de umidade. O passo seguinte é realizar uma simulação de duas antenas operando em campo próximo para compreender o funcionamento. Para acomodar as duas antenas e facilitar as medições, foi construído um suporte e realizado novamente as medições, observando os valores de S_{11} e S_{21} . O projeto do trabalho é uma aplicação de método não destrutivo de medição do teor de umidade nas folhas, para isso foram

plantadas amostras de feijão. Após os testes, foi realizada uma simulação das antenas e da folha para verificar concordância nos dados.

4.1. Construção da antena

O fluxograma da Figura 17 resume os passos adotados inicialmente para a construção da antena.

Figura 17 - Fluxograma da construção da antena de microfita



Fonte: Autoria Própria

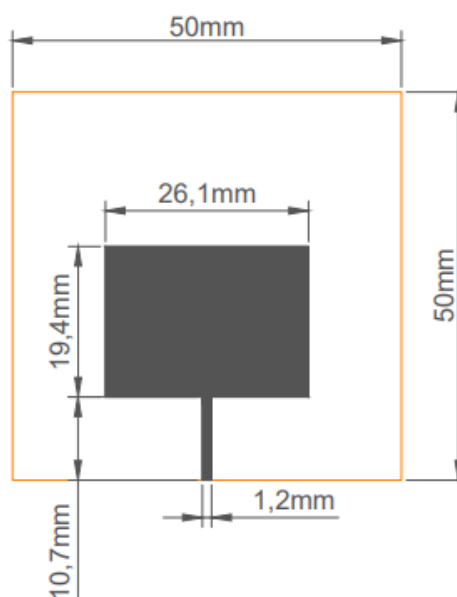
Primeiramente é escolhida a frequência de operação das antenas, foi escolhida a faixa 3,5 GHz. Dogan et al. (2020), recomendam a escolha de frequências nas faixas S e C, devido a essas terem aplicações em radares nas produções agrícolas.

Escolhido a frequência de operação, é feita a modelagem computacional. É utilizado o método da linha de transmissão para *patch* retangular e aplicado no *software* MATLAB, para

realizar os cálculos de dimensões da antena. As dimensões do *patch* da antena gerada são $W = 26,1 \text{ mm}$ e $L = 19,4 \text{ mm}$, conforme demonstradas na Figura 18.

Para simular o funcionamento da antena, foi utilizado o *software ANSYS High Frequency Structure Simulator (HFSS), Release 2019.2*. As dimensões foram desenhadas e o material utilizado como substrato é o FR4 (Fibra de vidro), cujas características dielétricas já estão presentes na biblioteca do *software HFSS*. A escolha desse material é a sua fácil disponibilidade para a construção da antena. Foi utilizada a ferramenta *Optimetrics* do *software* para otimizar a linha de transmissão e obter um melhor casamento de impedância. Foram obtidos os valores do comprimento da linha de transmissão, $L_m = 6,1 \text{ mm}$, e a largura da linha, $W_o = 1,2 \text{ mm}$. O plano de terra ficou com as dimensões de 50 mm para largura e altura, como ilustrado na Figura 18.

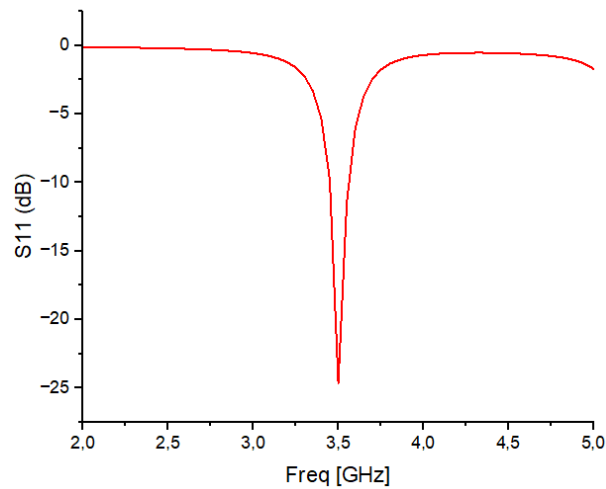
Figura 18 - Dimensões da antena de microfita



Fonte: Autoria Própria

Para o gráfico de S_{11} , foi escolhido um limite de frequência que começa em 2 GHz até 5 GHz, com um passo de 0,05 GHz. Com o tipo de simulação em frequência em modo *discrete*, o gráfico é mostrado na Figura 19.

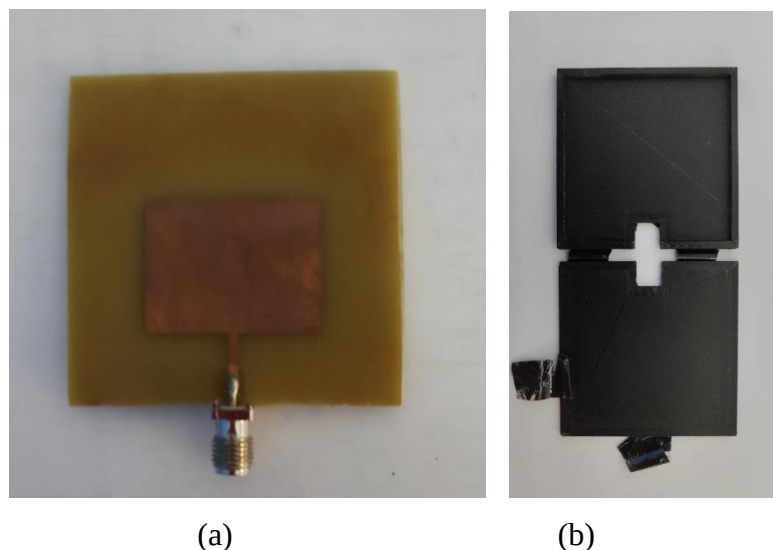
Figura 19 - Coeficiente de reflexão S11



Fonte: Autoria Própria

A antena foi construída imprimindo o desenho do *patch* e plano de terra, em uma placa de FR4. Após a impressão, a placa é corroída para que fique apenas a parte impressa. Com o auxílio de um *Portable Vector Network Analyzer (LiteVNA)*, 50 kHz – 6,3 GHz, foi medido o coeficiente de reflexão (S_{11}) para verificar se a antena estava ressoando. Foi utilizado a faixa de frequência de 2 GHz a 5 GHz, para ser similar ao ambiente de simulação. A antena construída é ilustrada na Figura 20 (a). Como forma de auxílio na medição de umidade em folhas, foi desenvolvido um suporte com filamento de Ácido Polilático (PLA) para alocar a antena e permitir que a mesma fique em contato direto com a folha, ilustrado na Figura 20 (b).

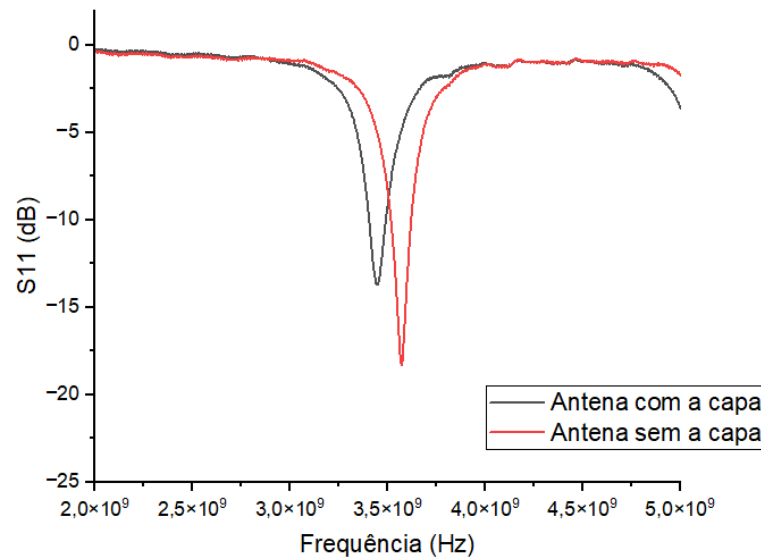
Figura 20 – (a) Antena construída e (b) capa de PLA



Fonte: Autoria Própria

Com o VNA foram medidos os valores de S_{11} para a antena com e sem a capa de PLA, conforme demonstrado na Figura 21. A antena construída ressoou em 3,56 GHz, operando na largura de banda prevista na simulação. A presença da capa de PLA causa um deslocamento na frequência de ressonância para a esquerda, com a frequência ficando em 3,44 GHz.

Figura 21 - Parâmetro de S_{11} real



Fonte: Autoria Própria

4.2. Teste de umidade S_{11}

O primeiro teste foi realizado em ambiente de temperatura controlada e foram medidos apenas os valores de S_{11} . Utilizando-se de instrumentos como uma estufa de secagem e esterilização (modelo 315 SE da marca FANEM), uma balança de precisão (modelo AY220 da marca Marte) e um VNA (*LiteVNA*). Para o experimento, algumas folhas de juazeiro foram analisadas, sendo retiradas do bosque dos juazeiros, localizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró, lado Leste, Mossoró - RN. Foram selecionadas três árvores e, em cada uma, retiradas três folhas, conforme demonstrado na Figura 22.

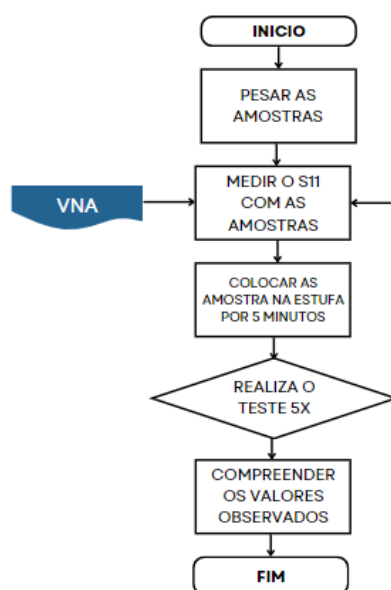
Figura 22 - Amostras de folhas



Fonte: Autoria Própria

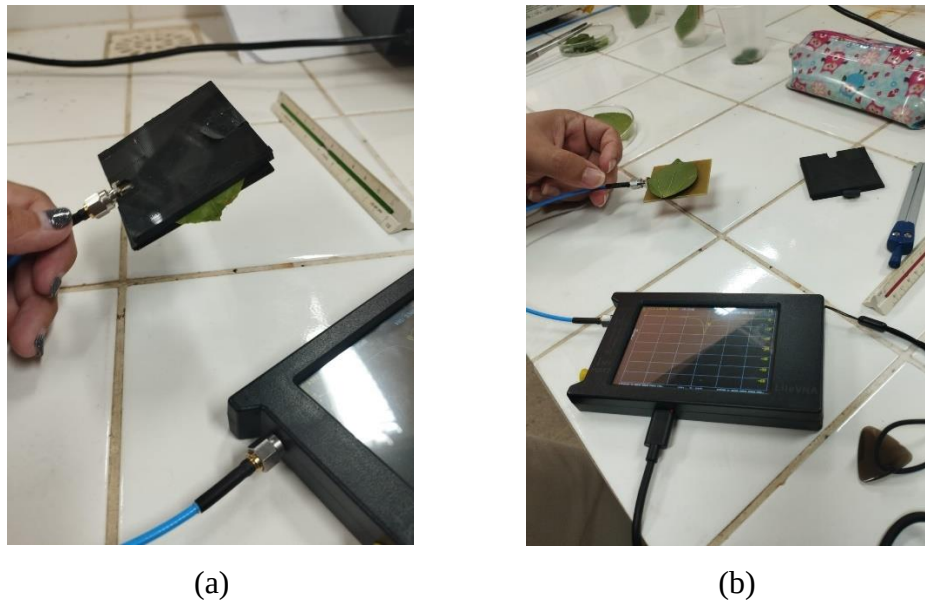
Com o auxílio da balança, foi feita uma pesagem inicial onde foi feita uma média aritmética para a massa das três folhas de cada amostra, sendo a primeira amostra com 0,1980 g, a segunda amostra com 0,1767 g e a terceira amostra com 0,2352 g. Com a utilização do VNA, foram realizadas as medições de S_{11} após a pesagem, realizando uma medição com a presença do suporte na antena e sem, conforme a Figura 24. Após a medição e pesagem, as folhas foram levadas para a estufa a 65°C, por 5 minutos, para secarem. O fluxograma da Figura 23 exemplifica o processo.

Figura 23 - Processo de análise da variação de umidade



Fonte: Autoria Própria

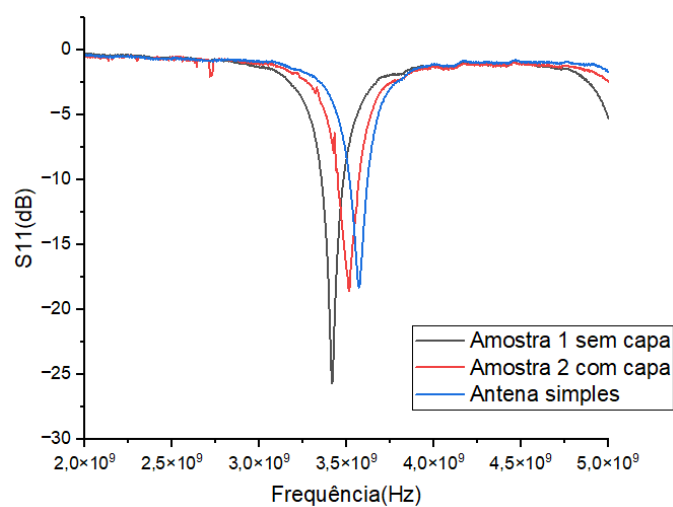
Figura 24 - Medição de S_{11} na antena (a) com suporte e (b) sem suporte



Fonte: Autoria Própria

As medições foram feitas até a folha ficar e não ter uma grande diferença na sua massa em relação à medida anterior. A presença da folha em contato com a antena, causou um deslocamento na frequência de ressonância, como retratado na Figura 25. A antena representa à frequência de ressonância original e as amostras os deslocamentos causados pela presença da folha.

Figura 25 - Deslocamento de frequência causado pelas amostras



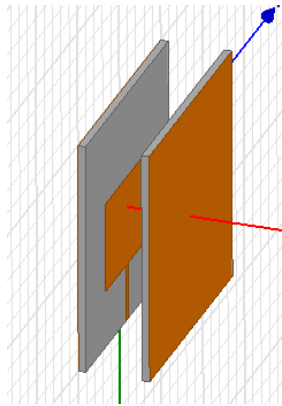
Fonte: Autoria Própria

4.3. Teste de umidade com S_{11} e S_{21}

4.3.1. Simulação para campo próximo

Para as análises de S_{21} , era necessária a construção de uma antena igual à primeira. O primeiro passo foi utilizar novamente o ambiente de simulação do HFSS. A operação das antenas é em campo próximo, pelas simulações a melhor distância foi a de 10 cm . A Figura 26 demonstra o posicionamento das antenas no HFSS.

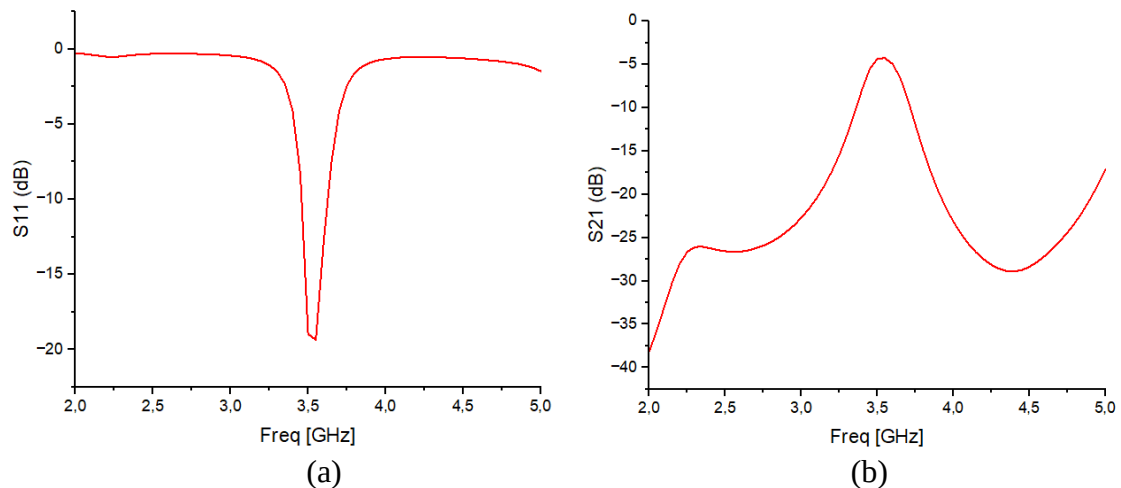
Figura 26 - Antenas em campo próximo



Fonte: Autoria Própria

Para os gráficos de S_{11} , Figura 27 (a), e S_{21} , Figura 27 (b), o limite de frequência definido é de 2 GHz até 5 GHz, com um passo de 0,05 GHz. Com o tipo de simulação em frequência em modo *discrete*.

Figura 27 - Novo diagrama de reflexão S_{11} (a) e de transmissão S_{21} (b)

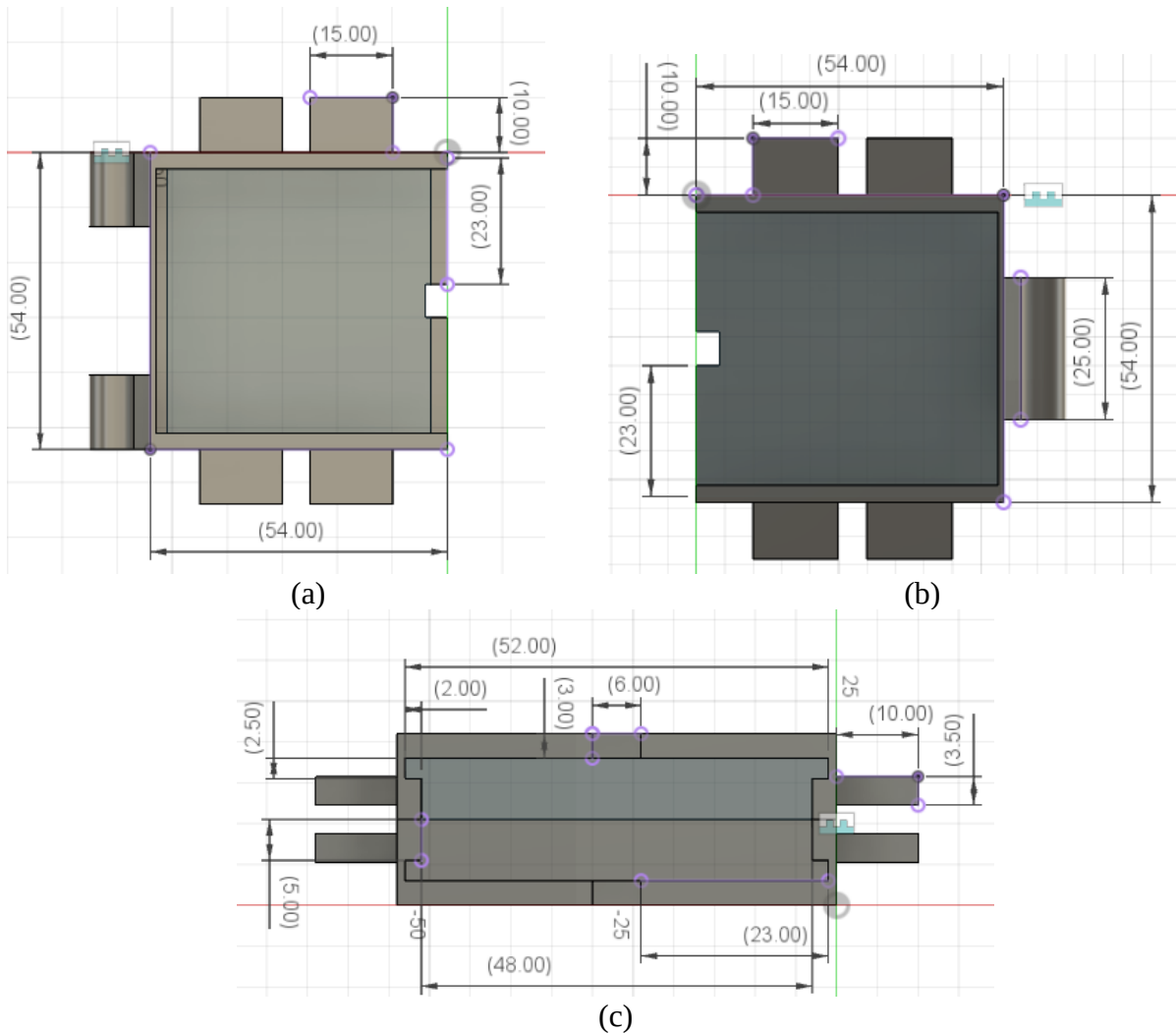


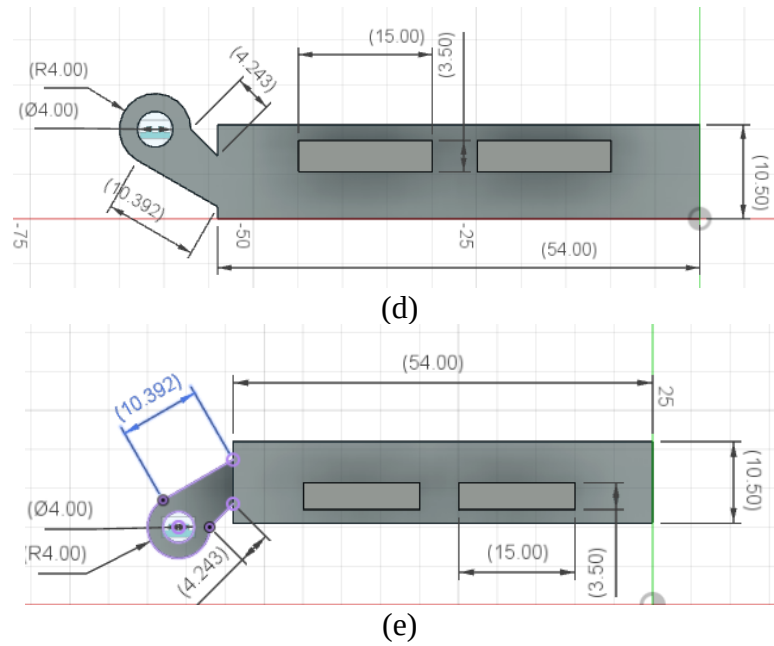
Fonte: Autoria Própria

4.3.2. Construção do suporte para as antenas

Para auxiliar as medições e permitir que as antenas fiquem a uma distância igual à discutido na simulação, era necessária a construção de um suporte. Primeiramente, foi utilizado o *software Fusion 360* para a construção do modelo da peça. Ela foi planejada para funcionar como uma caixa abre fecha, que comportaria as antenas e a folha não teria como entrar em contato. A Figura 28 informa todas as vistas e medidas em mm.

Figura 28 - Vista Superior do compartimento Inferior (a), Vista Superior do Compartimento Superior (b), Vista Frontal (c), Vista Lateral do Compartimento Inferior (d), Vista Lateral do Compartimento Superior (e)



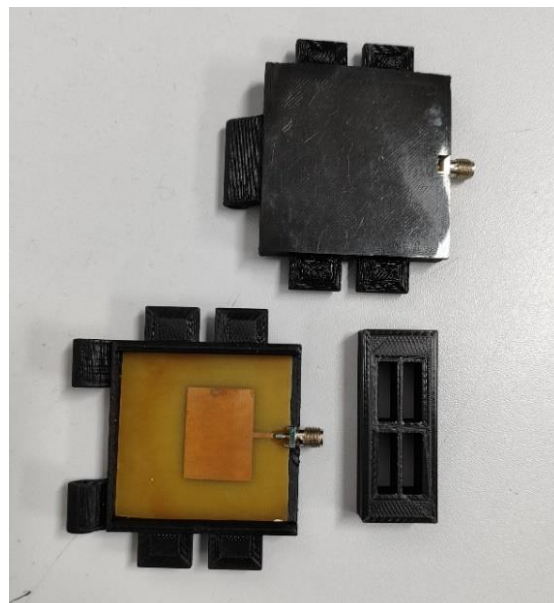


Fonte: Autoria Própria

A espessura do suporte foi escolhida para ser o dobro da espessura da antena, para que não ocorresse o problema de o mesmo quebrar. O local onde iriam ficar as antenas tem a espessura apenas um pouco maior que as antenas, para que as mesmas pudessem deslizar com facilidade. Por fim, foi planejado colocar na lateral apoios para segurar o suporte.

A impressão da peça foi feita na impressora 3D (Tevo Tarantula) com filamento de Ácido Polilático (PLA), conforme Figura 29.

Figura 29 - Suporte abre fecha



Fonte: Autoria Própria

4.3.3. Teste para S_{21}

No segundo teste, foram medidos os valores do coeficiente de reflexão (S_{11}) e coeficiente de transmissão (S_{21}). Utilizando-se novamente dos instrumentos como uma estufa de secagem e esterilização (modelo 315 SE), a balança de precisão (modelo AY220) e um VNA (*LiteVNA*). Para o experimento, algumas folhas de ciriguela e caju foram analisadas, sendo retiradas do pomar, localizado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró, lado Leste, Mossoró - RN. Foram selecionadas três árvores e, em cada uma, retiradas três folhas, conforme demonstrado na Figura 30.

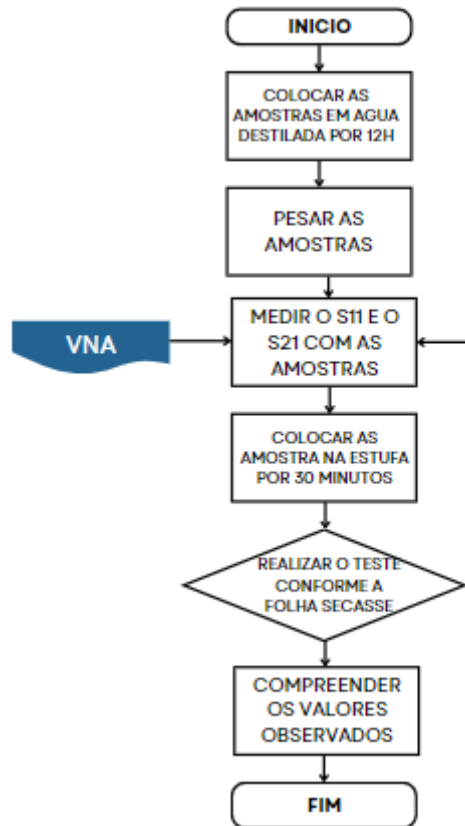
Figura 30 - Folhas de ciriguela (a) e caju (b)



Fonte: Autoria Própria

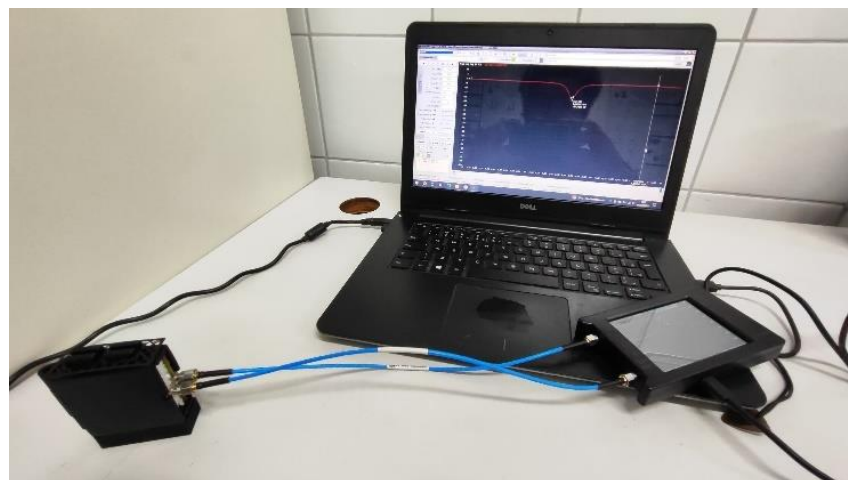
O fluxograma da Figura 31 representa o processo adotado. Foi adotado deixar as folhas com saturação hídrica como forma de padronizar as medições. Nesse teste, também o tempo de estufa foi alterado, sendo inicialmente de 30 minutos para todas as amostras e, em seguida, de 60 minutos para elas secarem mais tempo. A secagem foi feita até a folha ficar com aspecto seco, marrom e quebradiço. A Figura 32 ilustra o auxílio do suporte desenvolvido no processo de medição.

Figura 31 - Análise da variação de umidade utilizando S_{11} e S_{21}



Fonte: Autoria Própria

Figura 32 - Aplicação do suporte de antenas

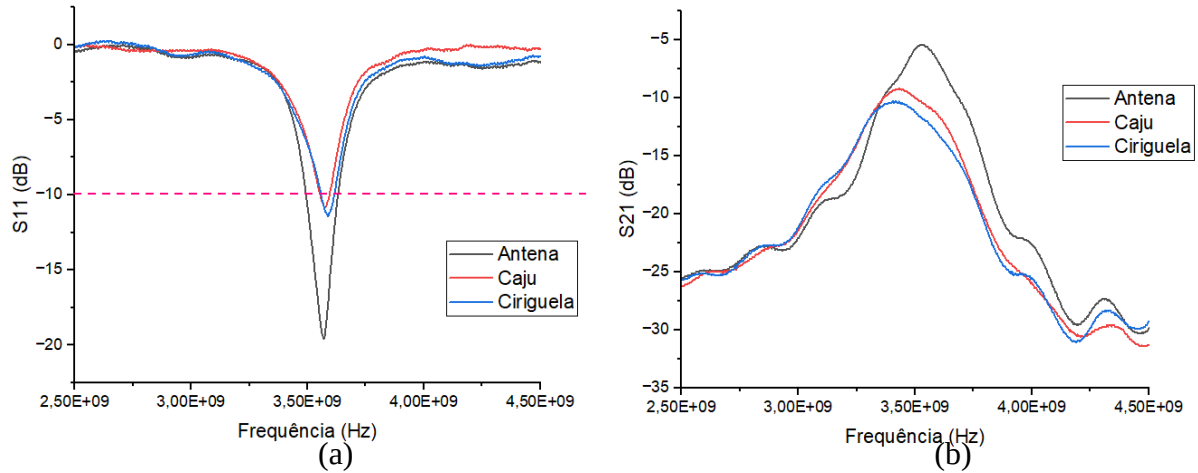


Fonte: Autoria Própria

A folha foi colocada diretamente em contato com a antena 2, causando deslocamento na frequência de ressonância. Para melhor entendimento, a Figura 33 retrata os distúrbios causados

pela presença das folhas em relação à frequência original, onde a antenna representa a frequência de ressonância original.

Figura 33 - Alterações causadas pelas folhas no S_{11} (a) e no S_{21} (b)



Fonte: Autoria Própria

4.3.4. Medições de S_{11} e S_{21} em pés de feijão-caupi

O principal objetivo do sensor era observar a variação de umidade na folha de culturas vegetais, e nesse tópico aborda-se uma cultura até o desenvolvimento do fruto. Para esse trabalho, foi usado o feijão-caupi como amostra, devido ao seu rápido crescimento.

As amostras foram plantadas no dia 11 de fevereiro de 2024, ao todo foram plantadas 20 unidades. O feijão plantado foi o de corda, que tem um desenvolvimento de vagens em aproximadamente 70 dias. A terra utilizada para as mudas foi uma mistura de três partes de solo de várzea, duas partes de areia e uma parte de adubo.

Figura 34 - Feijões plantados



Fonte: Autoria Própria

No total, 12 unidades germinaram e, no dia 04 de março de 2024, foi feita a troca de vasos, colocando as mudas em recipientes maiores. Foi escolhido deixar os feijões em vasos para facilitar os experimentos na questão de transporte. Foram utilizados vasos de jardinagem de 10L, a terra utilizada foi a mesma mistura aplicada nas mudas, e esses foram preenchidos em 2/3 do seu volume. A Figura 35 mostra os feijões já replantados.

Figura 35 - Feijões crescidos



Fonte: Autoria Própria

Quando as plantas atingiram um crescimento considerável e já apresentavam muitas folhas, os testes para medir o S_{11} e o S_{21} começaram no dia 07 de março de 2024. Para a composição dos dados, os testes foram feitos utilizando o *LiteVNA*, consistindo em posicionar as antenas com a folha no meio e realizar a medida, conforme ilustrado na Figura 35. Os testes foram realizados no horário geralmente entre 10:00 e 14:00, e era repetido de 1 a 4 vezes na semana. O teste foi realizado no período de 07 de março de 2024 até 17 de maio de 2024, compreendendo o período de crescimento da planta e desenvolvimento das vagens. A Figura 36 ilustra como era realizada a medição.

Figura 36 - Aplicação do sensor desenvolvido



Fonte: Autoria Própria

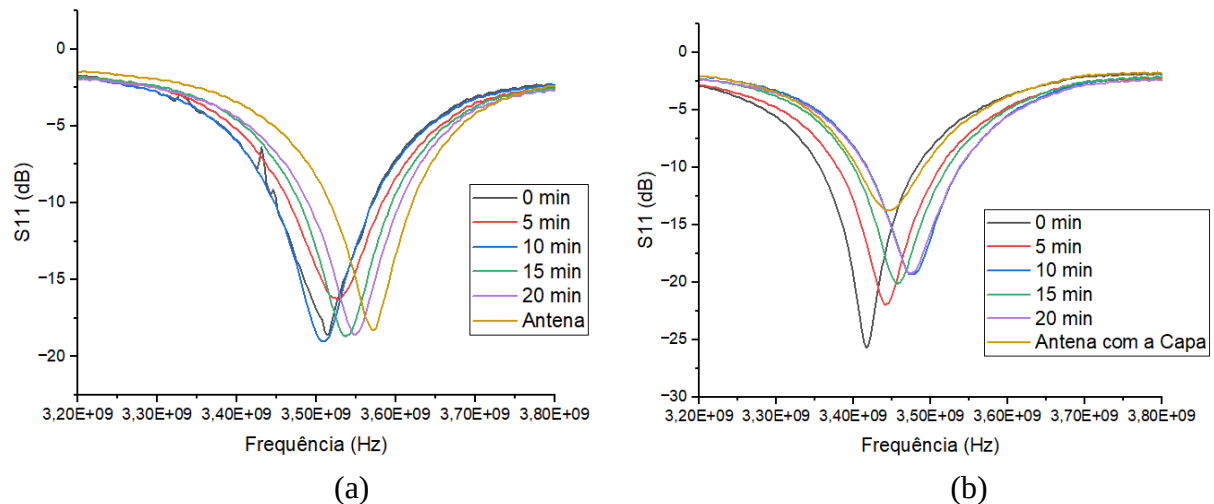
5. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos durante a pesquisa, desde os primeiros relacionando o coeficiente de reflexão (S_{11}) com o teor de umidade presente nas folhas, até os dados obtidos nas medições dos coeficientes de reflexão e transmissão (S_{11} e S_{21}) durante o crescimento de uma planta e o desenvolvimento do seu fruto.

5.1. A relação entre o deslocamento da frequência de ressonância e a presença de água em folhas de juazeiro

Como citado anteriormente no subtópico 4.2., a presença da folha na antena causa um deslocamento na frequência de ressonância e conforme a folha ia secando, a frequência tendia a voltar para sua frequência de ressonância original. A Figura 37 demonstra esse deslocamento causado pela Amostra 1 (a) para a antena simples e (b) para antena com capa.

Figura 37 - Deslocamento de Frequência conforme a variação de teor de umidade na folha para (a) a antena e (b) a antena com a presença do suporte



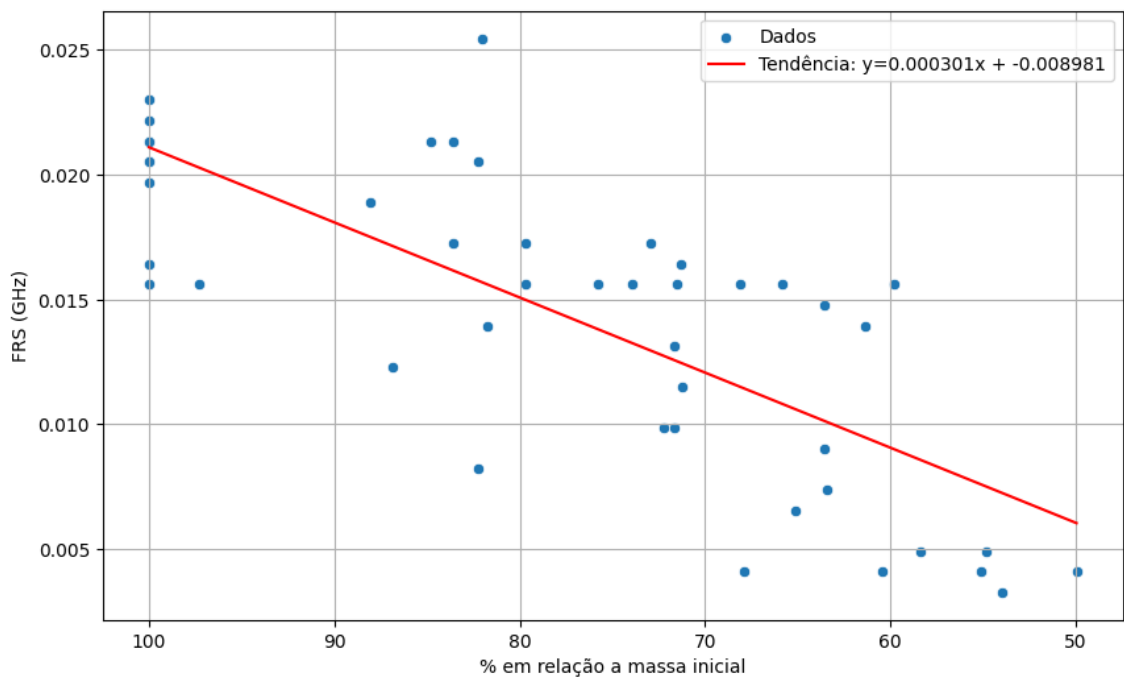
Fonte: Autoria Própria

Para cada amostra de folha foi calculado um deslocamento de frequência, conforme demonstra a Equação 35. Após isso, foi realizado um cálculo de média de variação na frequência (FRS do inglês *Frequency Relative Shift*) entre as amostras.

No período em que cada folha passou na estufa, ela perdeu um percentual de água. Considerando que a folha com a massa inicial tem 100 % de umidade, podemos criar uma relação de quanto foi perdido durante cada período de tempo que as amostras passaram na

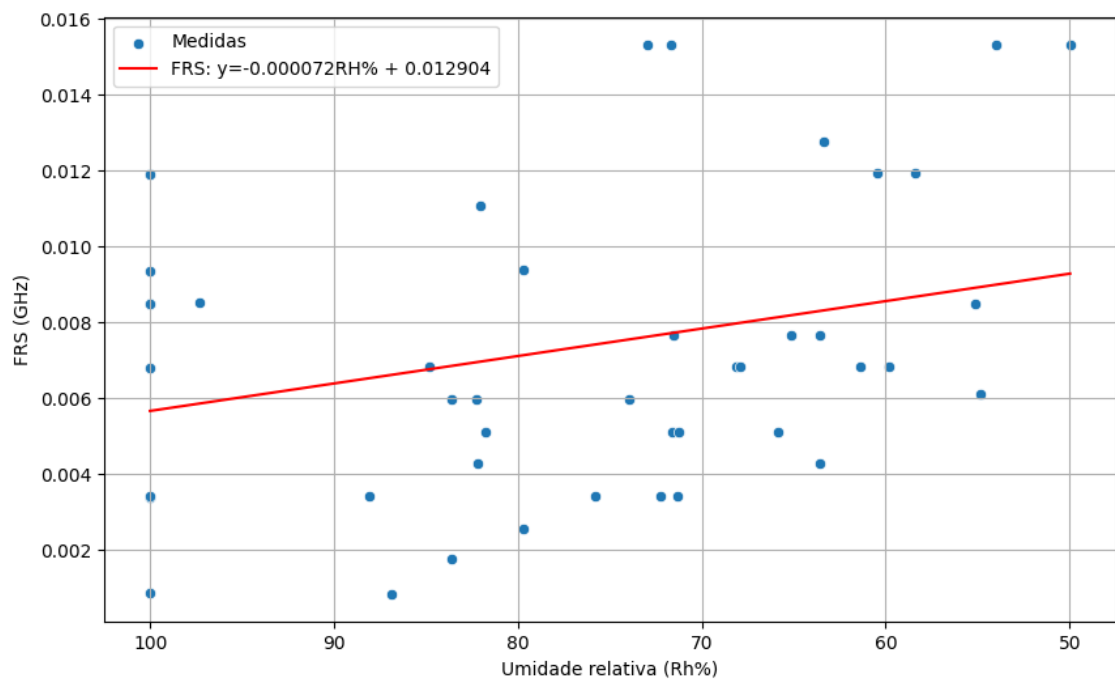
estufa. Para cada folha foi medido um valor de Deslocamento de Frequência (FRS) e relacionado a uma porcentagem de umidade presente na folha. A Figura 38 se refere aos dados da relação de FRS sem capa, e a Figura 39 os dados para a FRS com capa.

Figura 38 - FRS sem capa



Fonte: Autoria Própria

Figura 39 - FRS com capa



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 38, é possível notar que cada ponto de deslocamento de frequência conforme a umidade diminui, o valor de FRS diminui também de forma linear. O coeficiente de Pearson desse gráfico é de 0,75, ou seja, tem uma correlação entre o deslocamento e a umidade presente na folha. Entretanto, na Figura 39, os valores de FRS ficam bastante dispersos, e apresentam um coeficiente de Pearson de 0,28, ou seja, uma correlação fraca.

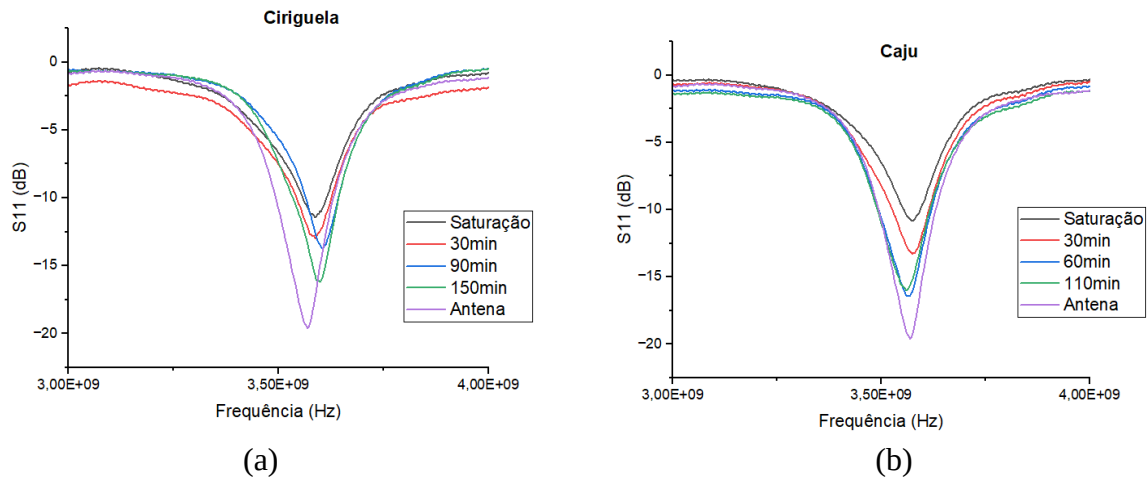
Na leitura com a antena sem capa, a presença das folhas causava um deslocamento de frequência de ressonância à esquerda, ou seja, a frequência de ressonância que tinha valor de 3,65 GHz ficava com valor aproximado de 3,47 GHz. A leitura começa inicialmente com uma frequência deslocada à esquerda e conforme o nível de água nas folhas diminuía, a frequência de ressonância se aproximava do valor original. A presença da capa de PLA na antena causou uma alteração significativa no comportamento de deslocamento de frequência da antena, inicialmente a frequência tinha deslocamento à esquerda. Entretanto, conforme o percentual de umidade da folha diminuía, a frequência de ressonância era deslocada para a direita, ou seja, ficando com a frequência original acima de 3,57 GHz. Diferente da outra análise que, após a folha secar, teve a sua frequência de ressonância bem próxima da original. Com isso, foi optado pela substituição da capa.

5.2. A relação entre as respostas de S_{11} e S_{21} e a presença de água nas folhas de caju e ciriguela

No subcapítulo 4.3.3 são apresentados os primeiros testes para verificar como o sensor se comportava na presença de folhas. Para isso, foram utilizadas amostras de folha de ciriguela e caju. Durante o processo de medição, é notado que o tempo para secagem das folhas é diferente entre as duas amostras de planta. A folha de caju seca totalmente em menor tempo em relação à folha de ciriguela.

Com relação à interferência no sensor, em ambos os casos, a folha causa o aumento do valor de S_{11} , e conforme a folha vai secando, os valores de S_{11} vão diminuindo, e apresentando um leve deslocamento à direita para a frequência de ressonância. Isso é ilustrado na Figura 40.

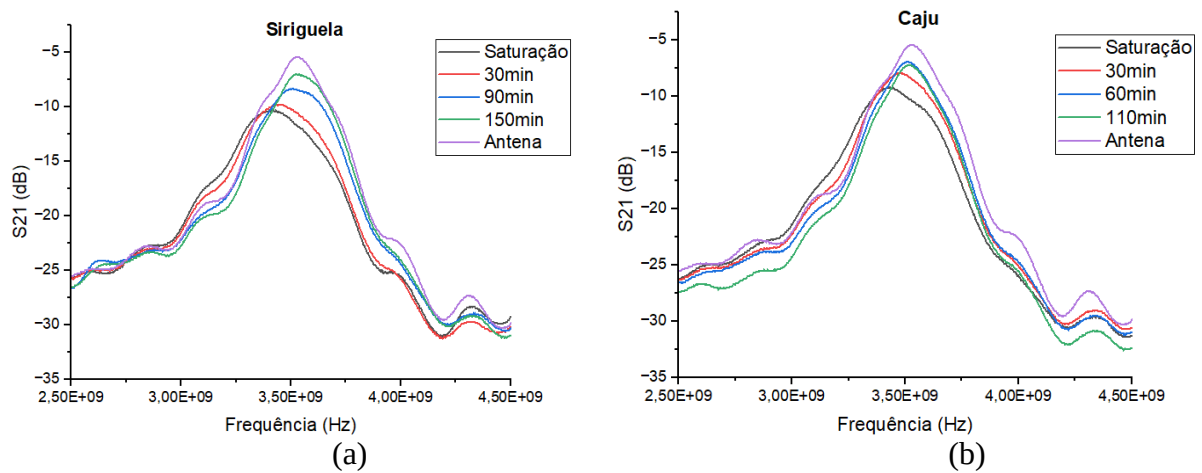
Figura 40 - Respostas de S_{11} com a presença da folha de (a) Ciriguela e (b) Caju



Fonte: Autoria Própria

O contato direto da folha com a antena 2 causa alteração no valor de S_{21} . A folha saturada de água causa deslocamento na frequência para a esquerda e diminuição no valor da intensidade de S_{21} . E conforme a folha secava, os valores de S_{21} se atenuavam e ficavam próximos à frequência de ressonância original da antena, como ilustrado na Figura 41.

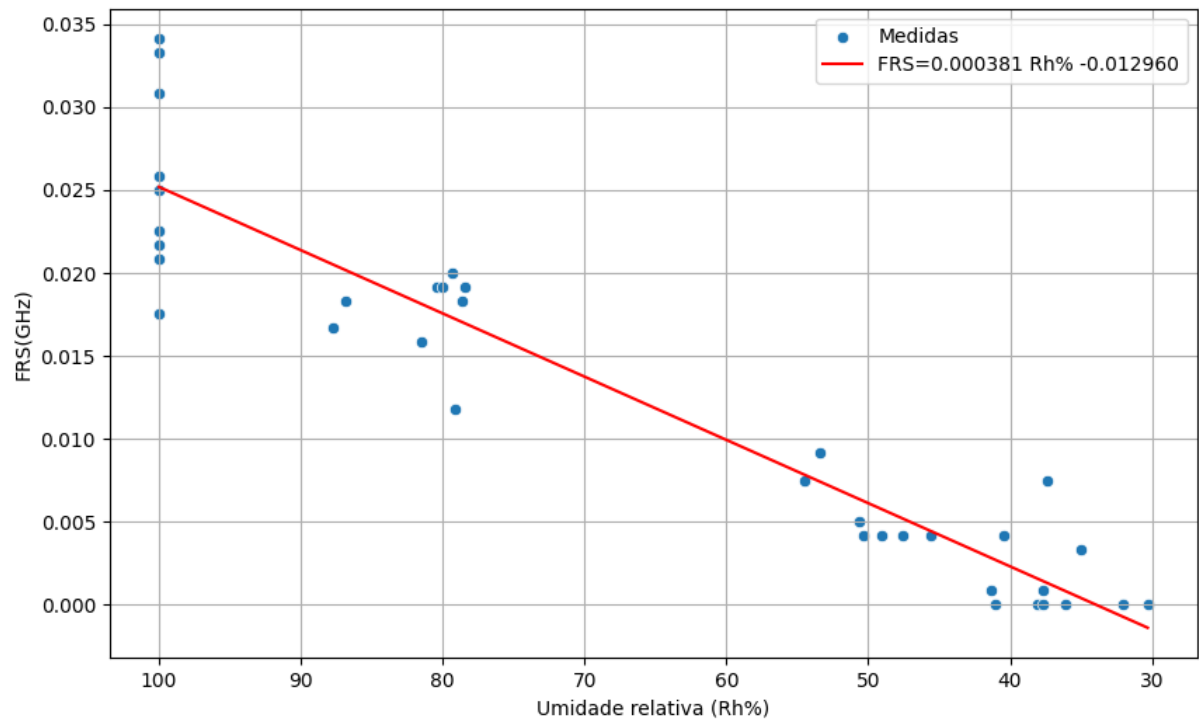
Figura 41 - Respostas de S_{21} com a presença da folha de (a) Ciriguela e (b) Caju



Fonte: Autoria Própria

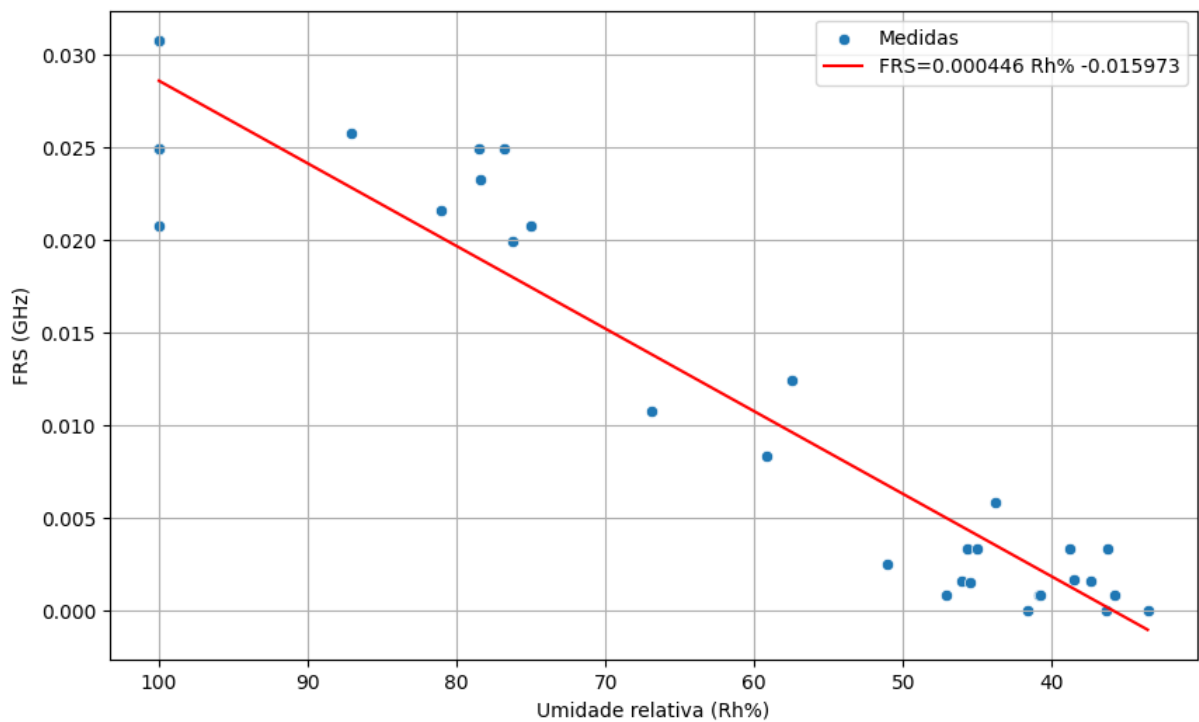
Para comparar o deslocamento da frequência em S_{21} e o nível de água presente, foi estipulada uma relação percentual entre a massa atual e a massa inicial da folha e definida como percentual de umidade. Para cada FRS medido existe um valor percentual, relacionando esses dois pode formar o gráfico de dispersão, com a Figura 42 para a folha de ciriguela e a Figura 43 para a folha de caju.

Figura 42 - Dispersão entre o FRS e % de água presente na folha de ciriguela



Fonte: Autoria Própria

Figura 43 - Dispersão entre o FRS e % de água presente na folha de caju



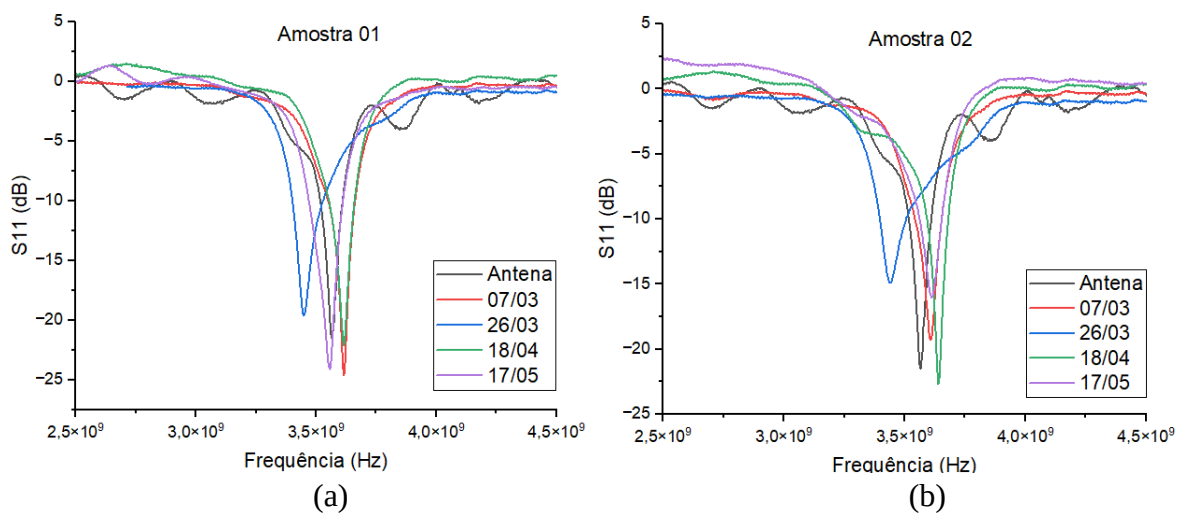
Fonte: Autoria Própria

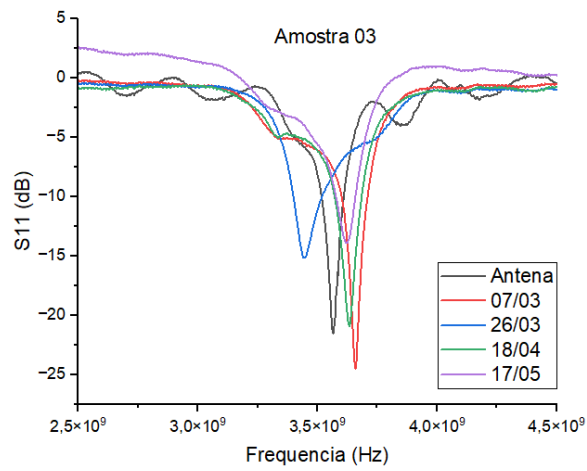
Considerando que a maior parte do peso da folha é composta por água, a massa inicial induz um deslocamento de frequência. Conforme a água presente na folha reduzia, o valor de FRS também decrescia de forma linear. Ambos os gráficos apresentam um coeficiente de Pearson no valor de 0,95, apresentando uma correlação forte entre a presença de água na folha e o deslocamento de frequência.

5.3. Analisando as respostas de S_{11} e S_{21} durante o desenvolvimento de um feijoeiro

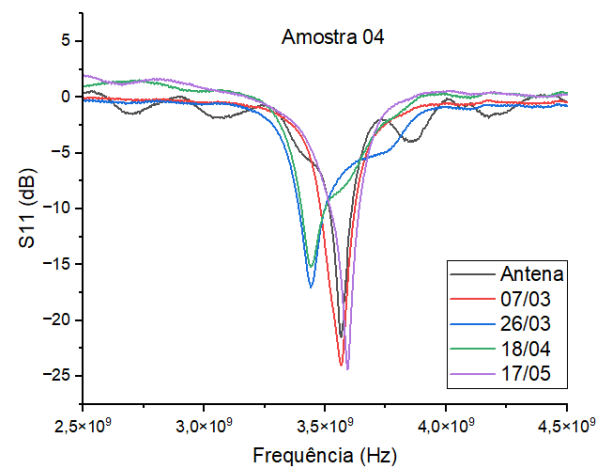
Durante o período de crescimento e desenvolvimento das vagens do feijão, foram analisadas as respostas de S_{11} e S_{21} na presença da folha. A análise foi não destrutiva, ou seja, o sensor era colocado em contato com a folha sem a necessidade de arrancar. Diferente das outras análises que foram realizadas em laboratório, essa foi feita no local onde os feijões foram plantados. Alguns fatores têm influência nos dados obtidos, como o alto nível de precipitação durante o período de medição e o processo de transpiração da planta e liberação de vapor de água. A coleta de dados foi realizada para verificar as variações de umidade na folha e relacionar com o período de coleta dos frutos. Na Figura 44 são apresentados os valores para a resposta de S_{11} em diferentes dias, para todas as amostras. De forma análoga, na Figura 45 são ilustradas as respostas de S_{21} .

Figura 44 - Variação em S_{11} conforme o desenvolvimento do feijoeiro

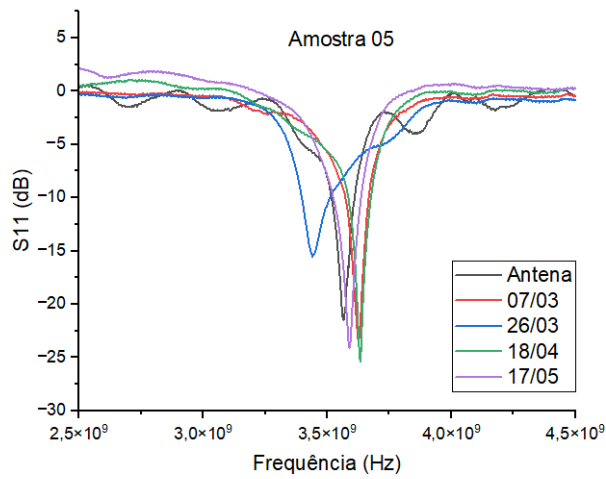




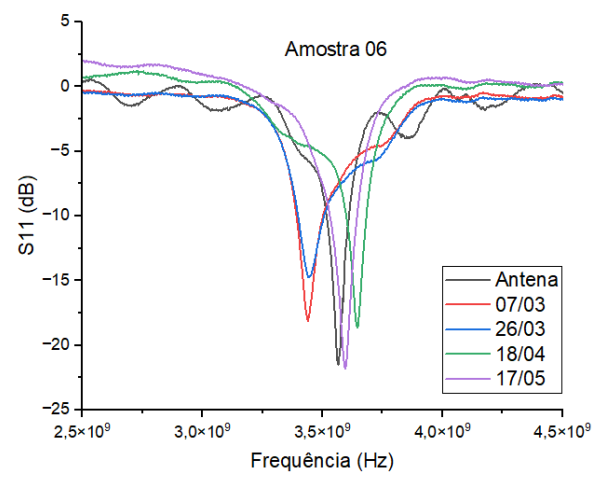
(c)



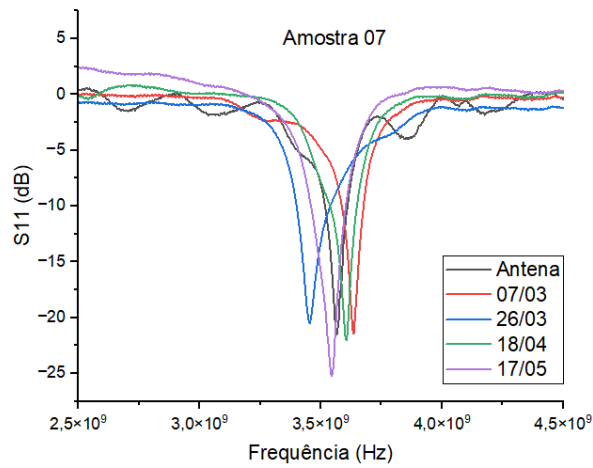
(d)



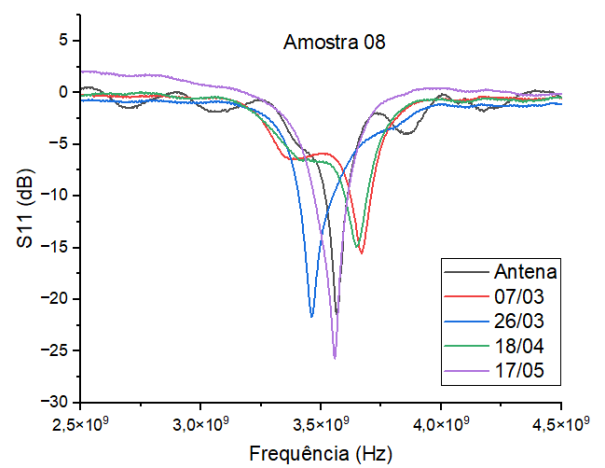
(e)



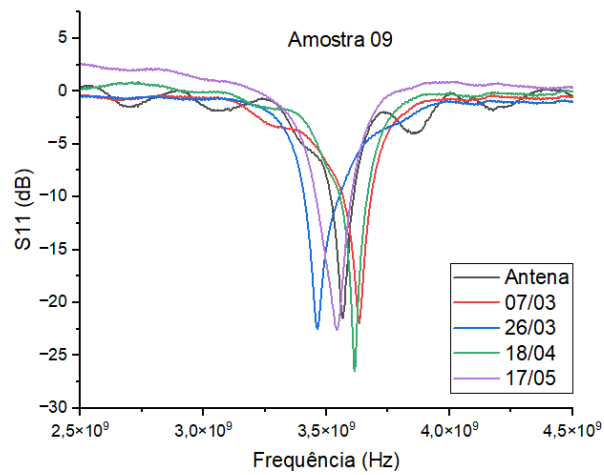
(f)



(g)

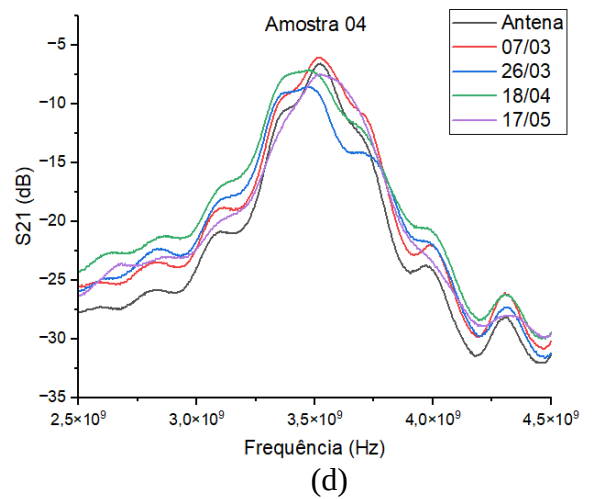
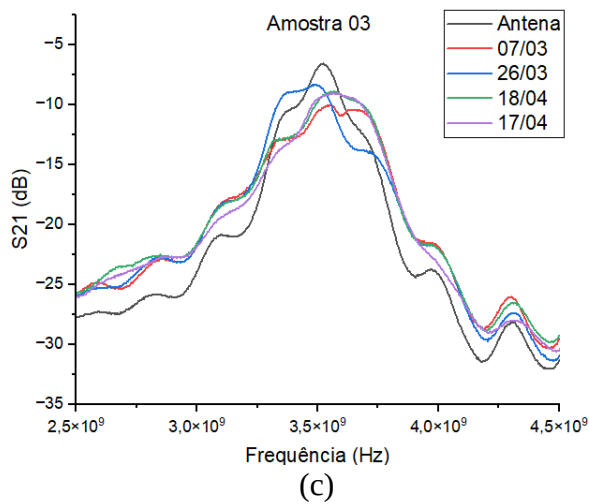
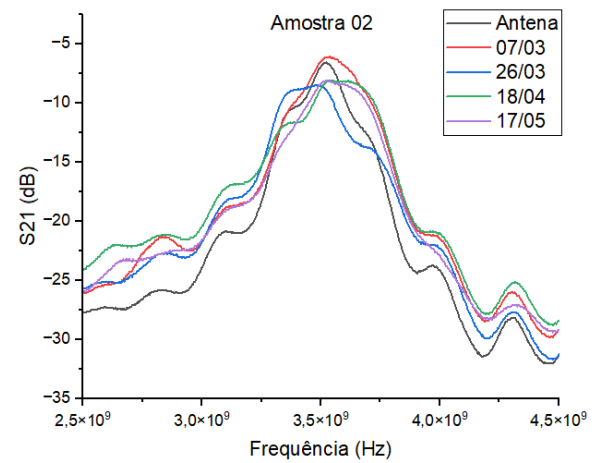
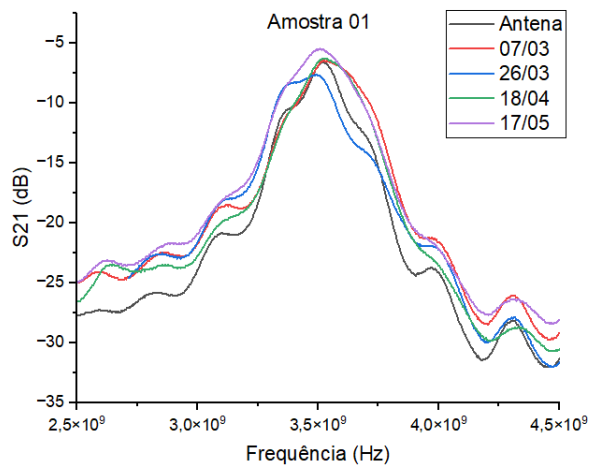


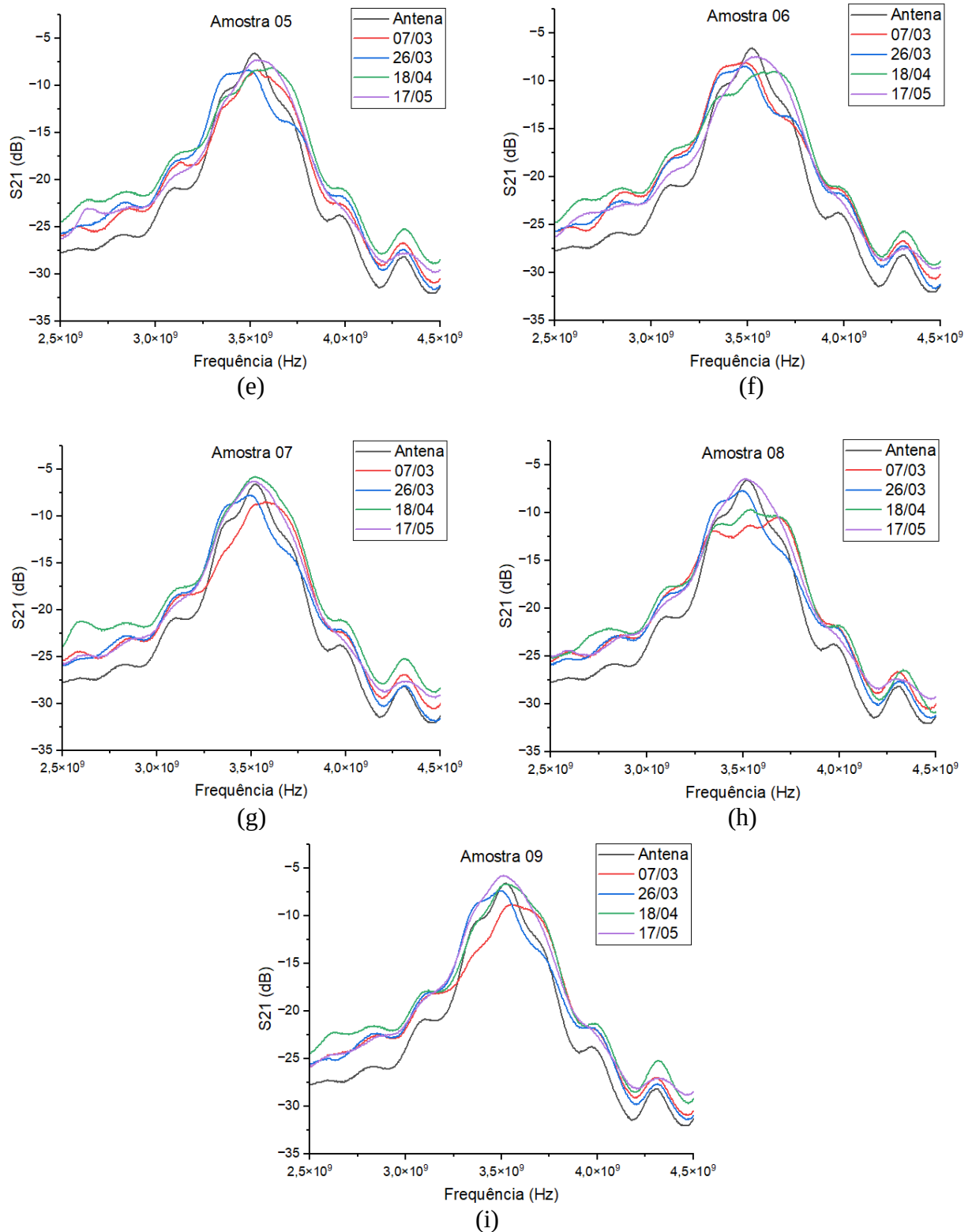
(h)



Fonte: Autoria Própria

Figura 45 - Variação em S_{21} conforme o desenvolvimento do feijoeiro



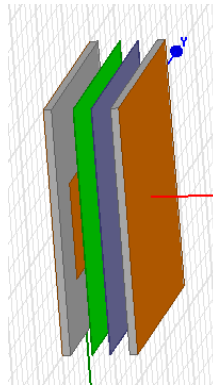


Fonte: Autoria Própria

Como observado, cada amostra apresenta diferentes respostas ao longo dos dias. Conforme citado anteriormente, durante o período de março a abril ocorreram muitas chuvas, deixando as folhas bastante saturadas com água. Sendo assim, era esperado que a frequência de ressonância tivesse um deslocamento à esquerda.

Também era observado quando acontecia o deslocamento de frequência à direita, alguns fatores externos eram observados para interpretar esses dados. Como a superfície do solo estava com aspecto seco, a folha ficava mais fina e frágil, e também quando surgiam algumas pragas na folha, como a mosca mineradora. Foi chegado à conclusão de que o processo de transpiração da folha poderia estar influenciando nos resultados, já que é liberado vapor de água como uma forma de regular a temperatura da folha. Para observar se era realmente isso que acontecia, foi utilizado o ambiente de simulação do HFSS. Foi colocada entre as duas antenas uma folha e uma lâmina de água para ser simulada como um vapor de água, conforme ilustrado na Figura 46.

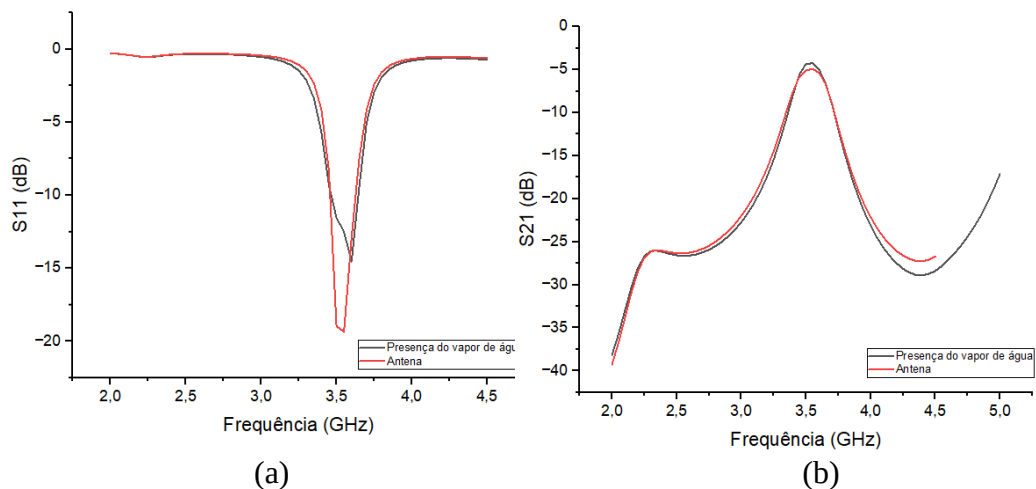
Figura 46 - Simulação da presença da folha e lâmina de água



Fonte: Autoria Própria

As respostas de S_{11} e S_{21} são demonstradas na Figura 47.

Figura 47 - A alteração causada pela folha e lâmina de água em S_{11} (a) e S_{21} (b)

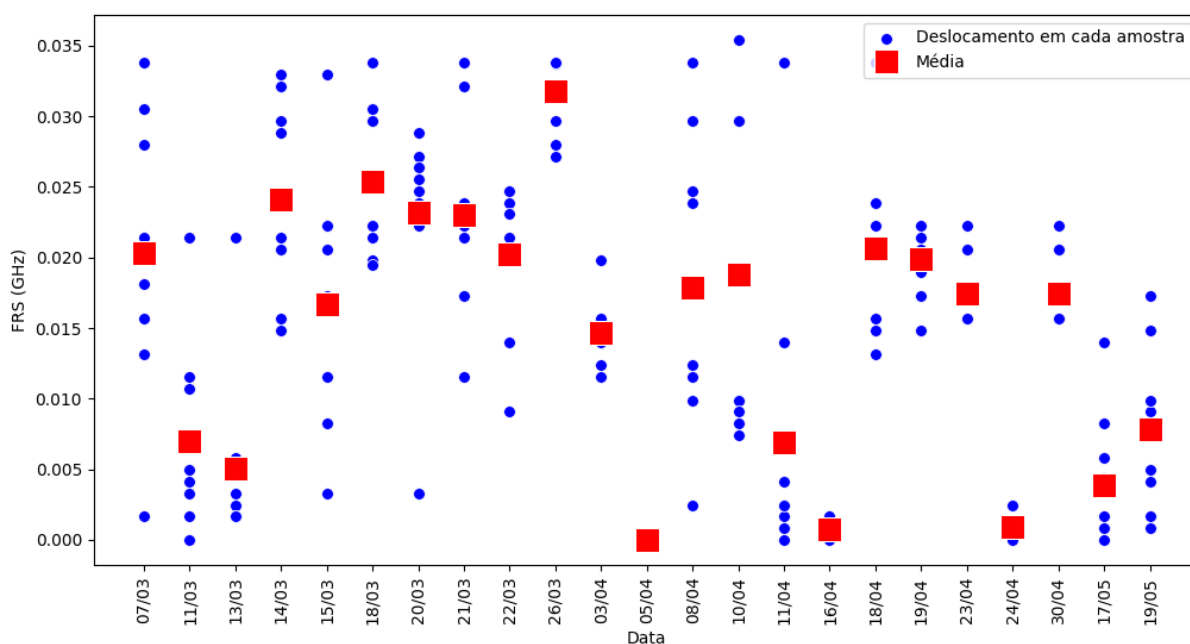


Fonte: Autoria Própria

Observando as respostas geradas, percebe que a presença da lâmina de água causa o deslocamento da frequência de ressonância para a direita na resposta S_{11} , portando foi dada uma maior observação nessas respostas para o tratamento dos dados. Na totalidade das medições, concluiu-se que durante o crescimento dos feijões e o desenvolvimento das vagens, a faixa de frequência ficava variando entre 3,4 GHz até 3,65 GHz. No Apêndice se encontram os gráficos de linha de como a frequência de ressonância ficou variando durante os dias para cada amostra.

Os gráficos apresentados no Apêndice demonstram o comportamento da presença das folhas no sensor. Como apresentado nos outros tópicos de resultado, foi calculado um valor de FRS para cada amostra em cada dia, sendo apresentado no formato de dispersão na Figura 49, sendo desenhada uma linha entre as médias de deslocamento.

Figura 48 - Média de FRS ao longo do desenvolvimento do feijão



Fonte: Autoria Própria

O parâmetro da umidade é de extrema importância para entender a saúde da planta e encontrar a melhor maneira para o seu desenvolvimento. O período de chuvas durante a pesquisa atrasou o desenvolvimento das plantas, devido à pouca iluminação solar e à saturação das plantas com a água da chuva, deixando mais suscetíveis às pragas. Contudo, o parâmetro da umidade não deve ser o único para mensurar o período de cultivo, sendo necessário a observação de como está o solo, o clima, e a saúde das plantas.

6. CONCLUSÃO

Por meio de modelagem computacional e simulação, uma antena de microfita foi criada para funcionar como um sensor de umidade. A faixa de frequência foi escolhida por meio das leituras dos artigos que recomendavam o uso da faixa de 3,5 GHz para pesquisas agrícolas, e outro motivo para a escolha da faixa foi a limitação dos equipamentos de medição presentes no laboratório.

O primeiro teste para mensurar a umidade foi utilizado somente uma antena, e como amostra foram utilizadas folhas de juazeiro. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia para medir o nível de umidade presentes nas folhas e como isso influencia na resposta de S_{11} na antena.

No segundo teste, para verificar a umidade, foi desenvolvido um suporte em PLA e outra antena idêntica à primeira. Nesse teste, seria observado como as respostas de S_{11} e S_{21} responderiam a presença da folha. Em composição da metodologia aplicada no primeiro teste, as folhas de caju e ciriguela foram saturadas com água, para o maior controle sobre a umidade presente na folha.

Para concluir a pesquisa, foi realizado o teste em plantas vivas sem que fosse necessário destruir as folhas para a análise. Foram plantados feijões e medidos os valores de S_{11} e S_{21} durante o seu crescimento e desenvolvimento das vagens. No teste, aconteceram algumas interferências devido ao ambiente aberto, como a influência de chuvas e a transpiração das folhas. Observando os dados coletados, foi possível analisar o período de desenvolvimento da planta. O parâmetro de umidade é fator principal para entender o crescimento, contudo, deve também ser observado o solo, o clima e a saúde da planta, para compor os dados sobre o período de colheita.

Para trabalhos futuros, se propõe usar uma antena com largura de banda ultra larga e uma superfície seletiva de frequência (FSS) que possa ser mais sensível ao teor de umidade, visto que esta antena se mostrou menos sensível devido à super umidade e ao estresse hídrico. Além de realizar testes com outras culturas vegetais e com outros processos de cuidados.

REFERÊNCIAS

- ABE, S. et al. **Quantitative Determination of Optimal Harvest Time by Surface Color Analysis of Tree Fruits**. 1 de março de 2020.
- AFZAL, A.; SEYYED MOHAMMAD MOUSAVI; KHADEM, M. **Estimation of Leaf Moisture Content by Measuring the Capacitance**. v. 12, n. 3, p. 339–346, 7 de março de 2010.
- ALENCAR, José Aldalberto de; HAJI, Francisca Nemauro P.; PREZOTTI, Lusinério. **Pragas do Feijão**. 1ª edição. Petrolina: CPATSA-EMBRAPA, 1996.
- BALANIS, C. A. **Antenna Theory: Analysis and Design**. 4ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- BERNARDO, D. et al. **CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DAS FOLHAS DE SERIGUELA PARA FINS DE USO EM DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS ALIMENTÍCIOS**. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.31692/IICIAGRO.0069>. Acesso em: 20 de abril de 2024.
- BOTEGA, J. V. L. **Viabilidade de Métodos Óticos Para Identificação de Conteúdo de Água de Folha de Cafeeiros**. Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.
- BOYER, J. S. **Isopiestic Technique: Measurement of Accurate Leaf Water Potentials**. Science, v. 154, n. 3755, p. 1459–1460, 16 de dezembro de 1966.
- CAMARGO, M. A. G. **Características Estomáticas em Espécies Arbóreas da Amazônia Central**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa Integrado de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM. Manaus, 2009.
- CARACTERÍSTICAS DA PLANTA - PORTAL EMBRAPA**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/caju/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/caracteristicas-da->

planta#:~:text=O%20cajueiro%20%C3%A9%20uma%20planta>. Acesso em: 20 de abril de 2024.

CARVALHO, J.; UESC, M. **Padronização de método psicrométrico para monitoramento contínuo de potencial hídrico em plantas jovens de Pinhão-manso**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210834/1/B-LAVIOLA-SEG-Padronizacao-de-metodo-psicrometrico-para-monitoramento.pdf>>. Acesso em: 5 de outubro de 2023.

Consumo de água - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao-caupi/producao/irrigacao/consumo-de-agua>>. Acesso em: 25 de junho de 2024.

CUTLER, David F.; BOTHA, Ted; STEVENSON, Dennis W. **Anatomia vegetal**. Artmed: Grupo A, 2011. *E-book*. ISBN 9788536325125. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536325125/>. Acesso em: 24 de junho de 2024.

DADSHANI, S. et al. **Non-invasive assessment of leaf water status using a dual-mode microwave resonator**. *Plant Methods*, v. 11, n. 1, 22 de fevereiro de 2015.

DHOLU, M.; GHODINDE, K. A. **Internet of Things (IoT) for Precision Agriculture Application**. 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), maio 2018.

DOGAN, H.; BASYIGIT, I. B.; GENC, A. **Determination and modelling of dielectric properties of the cherry leaves of varying moisture content over 3.30–7.05 GHz frequency range**. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, v. 54, n. 3, p. 254–270, 2 de julho de 2020.

DUANGJAI SURIYA-ARUNROJ et al. **Relative leaf water content as an efficient method for evaluating rice cultivars for tolerance to salt stress**. 1 de janeiro de 2004.

ERNANI, P.; CARVALHO, R. **Taxonomia e Nomenclatura**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/42434/1/Circular139.pdf>>. Acesso em 17 de julho de 2024.

Feijão Caupi. Disponível em: <<https://cnabrazil.org.br/cna-pulses/page3.html>>. Acesso em: 25 de junho de 2024.

Feijão-Caupi BRS Pujante - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-solucoes-tecnologicas/-/produto-servico/445/feijao-caupi-brs-pujante>>. Acesso em: 25 de junho de 2024.

FREIRE FILHO, Francisco Rodrigues et. al. **Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. 1ª edição. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.

GARCIA, Soraya Helena et. al. **Simulação de estresse hídrico em feijão pela diminuição do potencial osmótico**. Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v.11, n.1, 2012.

GUERRA, J. R. F. **Projeto De Antena De Microfita Flexível Utilizando De Tecido Malha A Base De Fibras Naturais E Sintéticas**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2016.

GYARMATI, G., & MIZIK, T. (2020). **O presente e o futuro da agricultura de precisão**. 2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9130481>. Acesso em: 13 de dezembro de 2022.

HOANG NAM DAO; CHUWONG PHONGCHAROENPANICH; M. KRAIRIKSH. Narrow-Beam Antenna for Short-Distance Non-Destructive Sensor in Fruit-Ripeness Monitoring. **IEEE Access**, v. 8, p. 226142–226150, 1 de janeiro de 2020.

HOLANDA, S. M. **Estudo e Desenvolvimento de Antenas de Microfita Utilizando Tecido de Malha a Base de Fibras Têxteis Compostas**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2016.

HONG WEI WANG; QI JUN LI; ZHAN HOU WANG. **Study on the Frequency Bands Applied in Grains' Moisture Measurement**. Applied Mechanics and Materials, v. 421, p. 438–443, 11 de setembro de 2013.

İBRAHİM BAHADIR BAŞYIĞIT. **The examination and modeling of moisture content effect of banana leaves on dielectric constant for remote sensing**. Microwave and Optical Technology Letters, v. 62, n. 3, p. 1087–1092, 6 de novembro de 2019.

Larva minadora (Liriomyza huidobrensis). Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/problemas/larva-minadora_383.html>. Acesso em 25 de junho de 2024.

MARTINEZ, E. M. et al. Review. **Use of psychrometers in field measurements of plant material: accuracy and handling difficulties**. Spanish Journal of Agricultural Research, v. 9, n. 1, p. 313, 1 de março de 2011.

MENZEL, M. I. et al. **Non-invasive determination of plant biomass with microwave resonators**. v. 32, n. 4, p. 368–379, 1 de abril de 2009.

NATH K., D.; RAMANATHAN, P. **Non-destructive methods for the measurement of moisture content – a review**. Sensro Review, v. 37, n. 1, p. 71-77, 16 de janeiro de 2017.

NELSON, S. O. **Agricultural applications of dielectric measurements**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 13, n. 4, p. 688–702, 1 de agosto de 2006.

NELSON, S. O. **Dielectric properties of agricultural products-measurements and applications**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 26, n. 5, p. 845–869, 1 de outubro de 1991.

NÓBREGA, J. Q. et al. **Análise de crescimento do feijoeiro submetido a quatro níveis de umidade do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 5, n. 3, p. 437–443, 1 de dezembro de 2001.

PALAZZI, V. et al. **Feeding the world with microwaves**. IEEE Microwave Magazine, v. 20, n. 12, p. 72–86, 2019a. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8894635>. Acesso em: 13 de dezembro de 2022.

PALAZZI, V. et al. **Leaf-compatible autonomous RFID-based wireless temperature sensors for precision agriculture**. In: IEEE TROPICAL CONFERENCE ON WIRELESS SENSORS AND SENSORS NETWORKS (WISNET), 9., 2019, Orlando. Anais [...]. Orlando: IEEE, 2019b. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8711808>. Acesso em: 13 de dezembro de 2022.

PASK, A. **Leaf relative water content**. In: MULLAM, Daniel; PIETRAGALLA, Julian. Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping. [s.l.] CIMMYT, 2012. p. 25-27.

POZAR, David M. **Microwave Engineering**. 4 ed. United States of America: John Wiley & Sons. p. 756. 2012.

Programa Agricultura de Precisão | Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Disponível em: <<https://cnabrasil.org.br/projetos-e-programas/agricultura-de-precis%C3%A3o>>. Acesso em 29 de setembro de 2023.

RAYHANA, R.; XIAO, G. G.; LIU, Z. **Printed Sensor Technologies for Monitoring Applications in Smart Farming: A Review**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 70, p. 1–19, 2021.

RIBEIRO, José Antônio J. **Engenharia de Microondas - Fundamentos e Aplicações**. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Saraiva, 2009.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SHYH YAU TEIN; YI LUNG THEN; KOK YEOW YOU. **Tea leaves moisture measurement and prediction using RF waveguide antenna**. 1 de novembro de 2017.

SILVA, I. B. T. **Projeto e Análise de Antena de Microfita Com Utilização de Metamaterial do Tipo CSRR**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2014.

SILVA, L. A. P. **Desenvolvimento De Um Sensor De Umidade Do Solo Biodegradável Baseado Em Geometria Do Metamaterial Do Tipo Csrr Para Aplicações Na Agricultura De Precisão**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFERSA. Mossoró, 2021.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo; MØLLER, Ian M.; e outros. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed: Grupo A, 2017. E-book. ISBN 9788582713679. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582713679/>. Acesso em: 24 de junho de 2024.

TRANSFORMANDO NOSSO MUNDO: A AGENDA 2030 PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf>. Acesso em: 29 de setembro de 2023.

United Nations Development Programme. **Sustainable Development Goals**. Disponível em: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals/climate-action?gclid=EAIaIQobChMIm5D12bPQgQMvtxCtBh2wXw4VEAAAYAiAAEgIMwPD_BwE>. Acesso em: 29 de setembro de 2023.

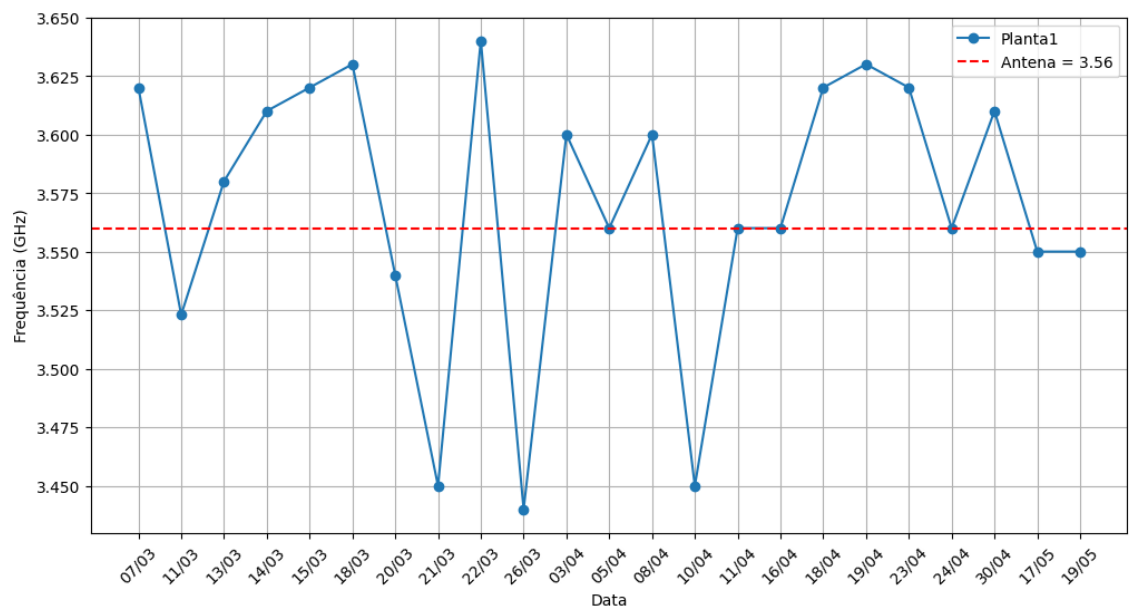
VALE, Júlio César do; BERTINE, Cândida; BORÉM, Aluísio. **Feijão-Caupi: do Plantio à Colheita**. 1ª edição. Viçosa: Editora UFV, 2017.

Vasconcelos, Luiz Fernando Santos de. **Definição de parâmetros para a secagem em camada de espuma (foam-mat drying) do juazeiro (ziziphus joazeiro)**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/ PB, 2017.

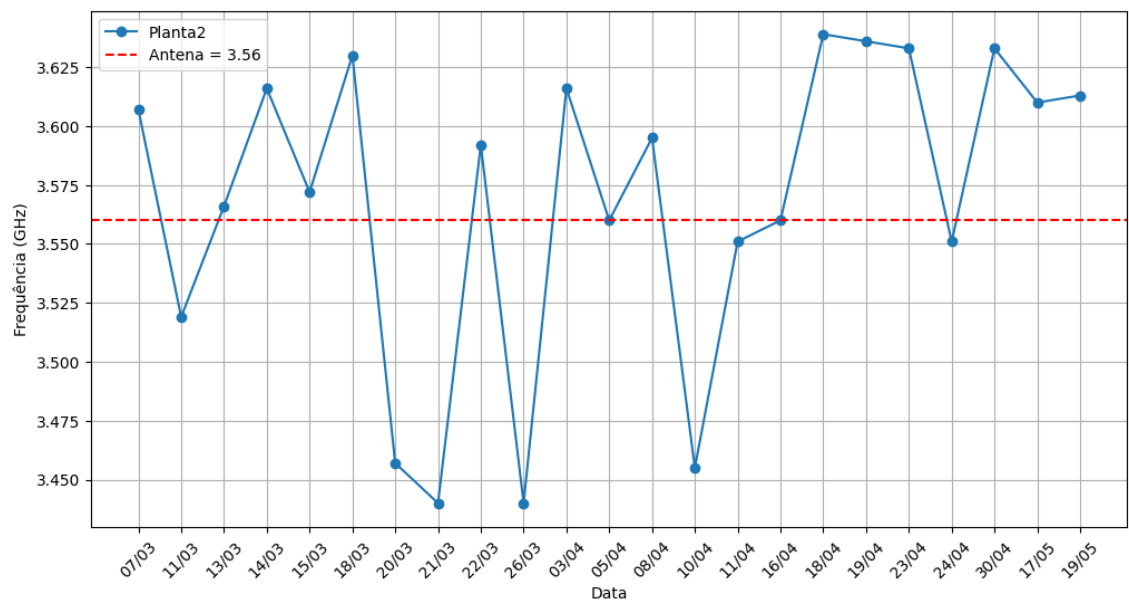
WOLFERT, S. et al. **Big Data in Smart Farming – A review**. Agricultural Systems, v. 153, p. 69–80, maio 2017.

ZAHID, A. et al. **Characterization and Water Content Estimation Method of Living Plant Leaves Using Terahertz Waves**. Applied Sciences, v. 9, n. 14, p. 2781, 10 de julho de 2019.

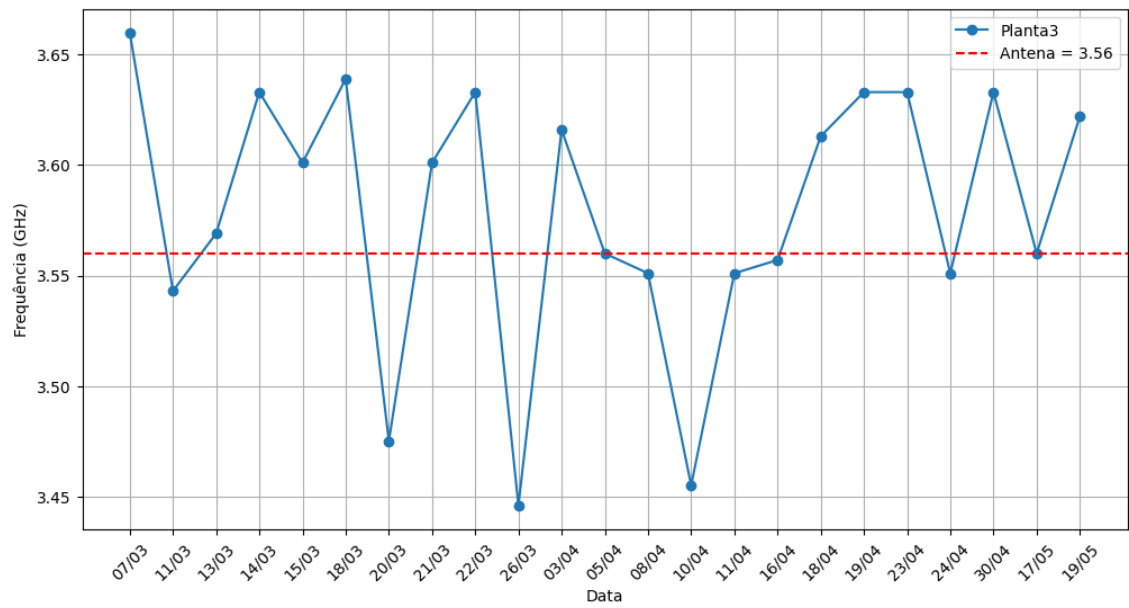
APÊNDICE: A frequência de ressonância ao longo dos dias



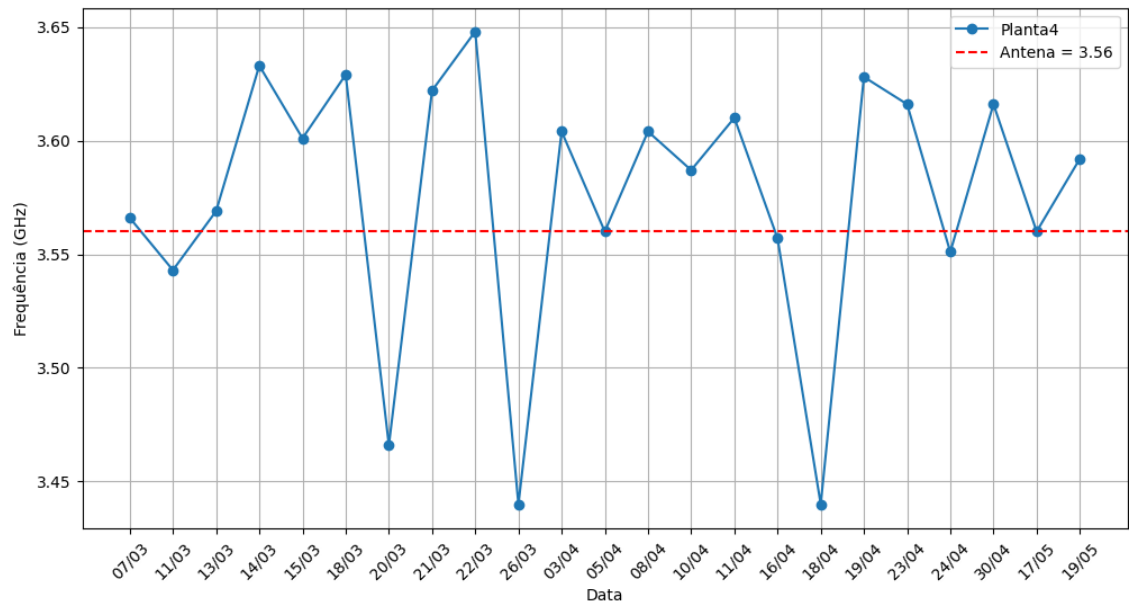
(a)



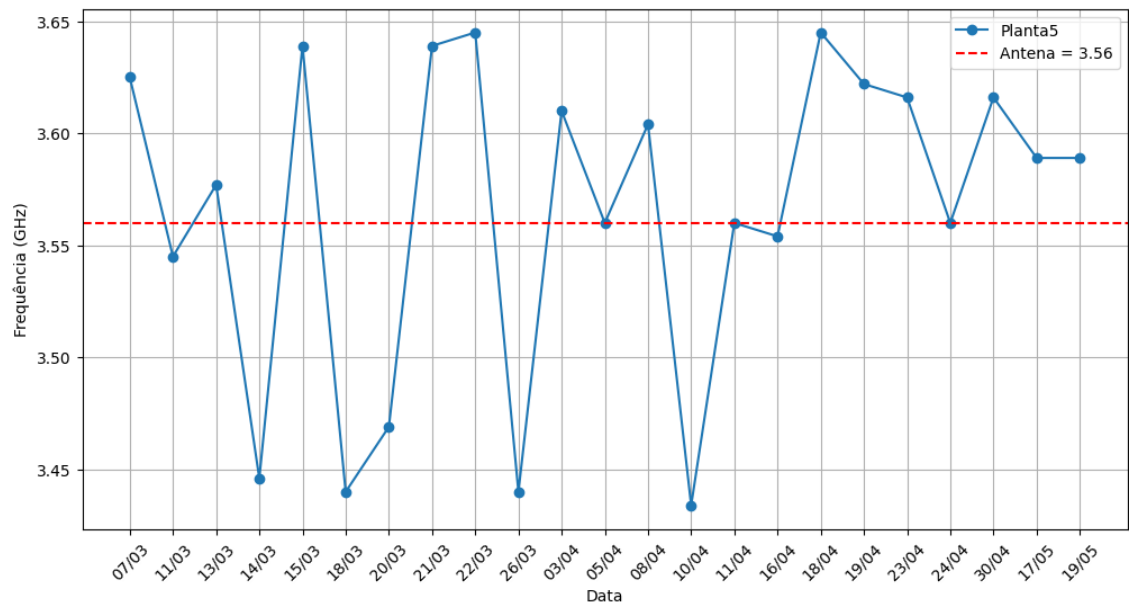
(b)



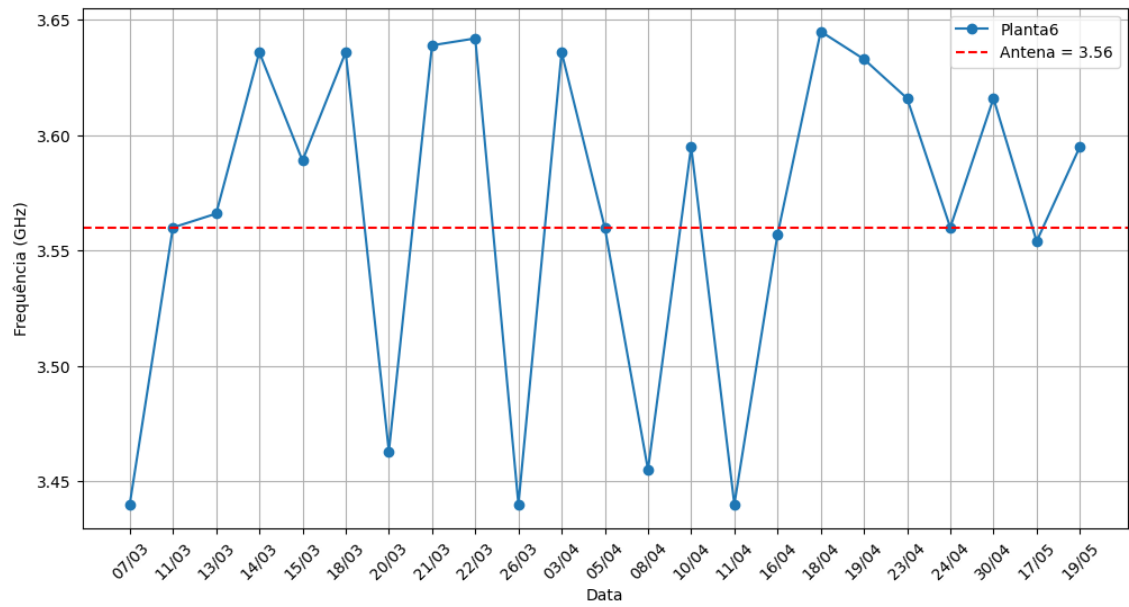
(c)



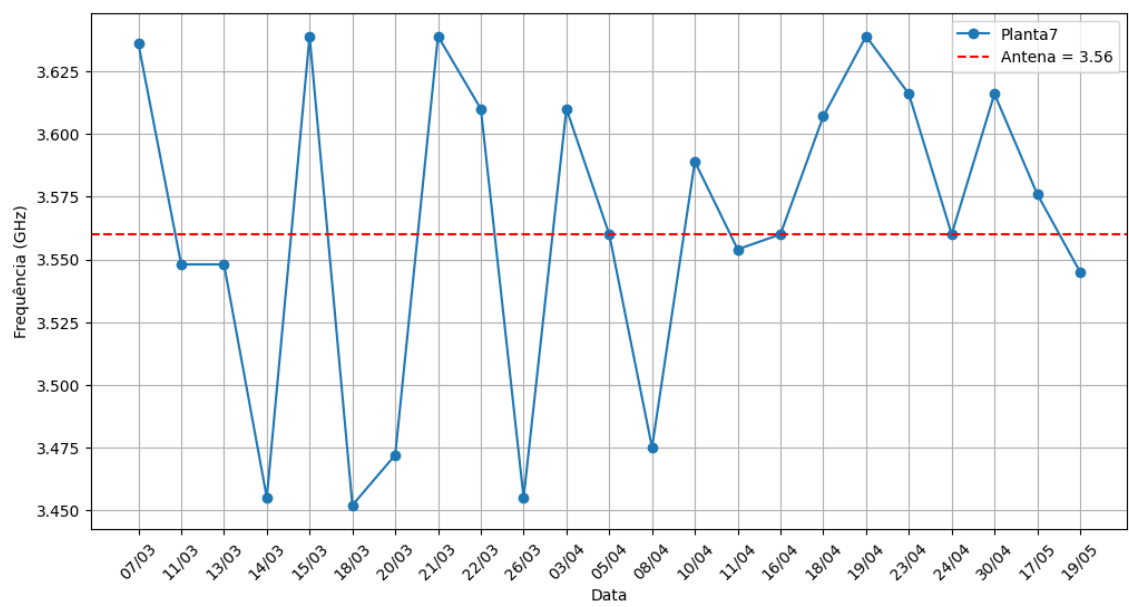
(d)



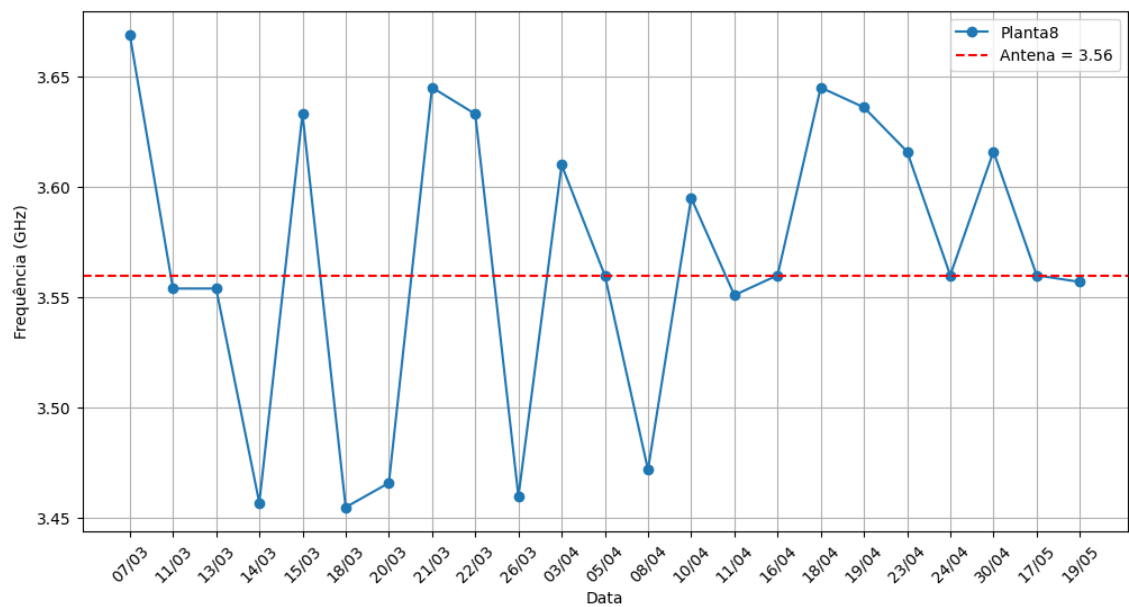
(e)



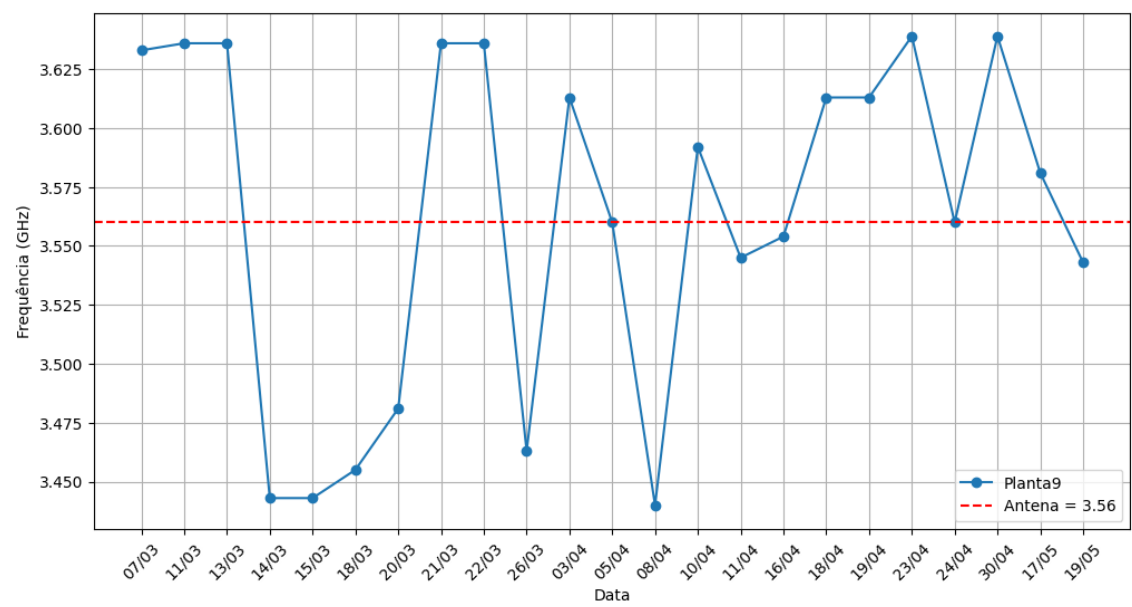
(f)



(g)



(h)



(i)

Fonte: Autoria Própria