



Bruno Lima Cavalcanti de Albuquerque

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO
SOLO UTILIZANDO DGS BASEADO NA GEOMETRIA
MATRIOSKA**

João Pessoa
2023



Bruno Lima Cavalcanti de Albuquerque

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO
SOLO UTILIZANDO DGS BASEADO NA GEOMETRIA
MATRIOSKA**

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

Área de Concentração: Telecomunicações

Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto

Coorientador: Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

João Pessoa
2023

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

A345d

Albuquerque, Bruno Lima Cavalcanti.

Desenvolvimento de um sensor de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska / – 2023.

59 f.: il.

Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica)
Instituto Federal da Paraíba – IFPB

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto.
Coorientador: Prof. Dr. Joabson Nogueira de Carvalho.

1.Sensor. 2. Geometria matrioska. 3. Umidade do solo. I. Título.

CDU 537.8



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

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO LIMA CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO SOLO UTILIZANDO DGS BASEADO NA
GEOMETRIA MARIOSKA**

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

Aprovado em 10 de julho de 2023.

Membros da Banca Examinadora:

Dr. Alfredo Gomes Neto

IFPB – PPGEE

Dr. Joabson Nogueira de Carvalho

IFPB – PPGEE

PhD Marcos Tavares de Melo

UFPE

Dr. Alexandre Fonseca D Andrea

IFPB

Dr. Jefferson Costa e Silva

IFPB – PPGEE

João Pessoa/2023

Documento assinado eletronicamente por:

- Alfredo Gomes Neto, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 10/07/2023 12:09:52.
- Alexandre Fonseca D Andrea, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 10/07/2023 12:21:16.
- Joabson Nogueira de Carvalho, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 10/07/2023 19:20:10.
- Jefferson Costa e Silva, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/07/2023 10:00:52.
- Marcos Tavares de Melo, **PROFESSOR DE ENSINO SUPERIOR NA ÁREA DE ORIENTAÇÃO EDUCACIONAL**, em 11/07/2023 14:28:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/06/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 437858
Verificador: 8cce60f0c4
Código de Autenticação:



A todas as pessoas de bem que passaram na minha vida e que me ajudaram sem pedir nada em troca. Para estas pessoas deixo aqui a mensagem de que nunca poderei pagar tudo que fizeram por mim, mas com certeza levarei e passarei adiante seus ensinamentos e exemplos para que nenhuma pessoa duvide que mesmo em um mundo com tantos exemplos ruins, há um número infinito de anjos estendendo suas mãos.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a toda minha família, minha esposa Simone e meu adorado filho Pedro. Meus pais, Paulo e Ilma. Meus irmãos André, Diana, Rodrigo (in memoriam) e Carolina e por fim, mas não menos importantes, meus sobrinhos Mateus, Miguel e a adorável Lorena. Obrigado por entenderem quando tive que estar ausente mesmo quando presente. Pela ajuda em todos os momentos que precisei e por estarem presentes em todos os momentos felizes que trouxeram leveza diante dos desafios!

Agradeço ao meu orientador, Professor Alfredo, pela paciência, generosidade e presteza com que me guiou nos estudos e trabalhos acadêmicos.

Agradeço aos Professores Joabson e Alexandre D'Andréa pelas suas contribuições na elucidação de questões técnicas e empréstimo de equipamentos que ajudaram na construção deste trabalho.

Agradeço ao professor Jefferson e todos os professores do PPGEE, pela dedicação e desprendimento na passagem de conhecimentos enriquecedores.

Agradeço aos colegas de mestrado pelo companheirismo e convivência que ajudaram a atravessar o período da pandemia com mais leveza.

Agradeço ao meu ex supervisor na Petrobras, Marcelo, que se prontificou a ser meu supervisor de estágio da graduação, e que sem isso, o título de Mestre hoje não seria uma realidade.

Agradeço à instituição IFPB, por me ajudar a ser e a ter tudo que sou e construí nestes últimos 25 anos em que concluí o curso Técnico em Eletrônica, o Tecnólogo em Telecomunicações e agora o Mestrado em Engenharia Elétrica!

Agradeço por fim, aos professores Marcos Tavares, Jefferson e Alexandre D'Andréa por aceitaram fazer parte da banca examinadora.

RESUMO

Os sensores são dispositivos essenciais, por suas aplicações na automação de processos. Entre essas aplicações, a quantificação da umidade é um parâmetro de suma importância para determinação das características de uma massa de solo. A partir da umidade do solo é possível gerir de maneira adequada a utilização da água na agricultura, acompanhar a evolução das bacias hidrográficas, prever deslizamentos de terra, estimar o efeito de inundações etc. Especificamente, na agricultura de precisão, os sensores de umidade do solo, têm a função de diminuir o desperdício de água e promover uma irrigação mais eficiente, evitando o estresse hídrico das plantas. Ainda assim, mesmo atualmente, a medição da umidade do solo na agricultura é limitada a um pequeno número de sensores, cujo uso é reduzido, decorrência do seu pequeno volume de amostragem, do custo relativamente alto, da necessidade de contato próximo ao solo e do baixo desempenho em solos salinos e pedregosos. A partir de estudos realizados no Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado, do Instituto Federal da Paraíba (GTEMA-IFPB), foi desenvolvido um sensor utilizando uma estrutura com defeito no plano terra, DGS (*Defected Ground Structure*), baseado na geometria matrioska, tendo sido aplicado em misturas líquidas. Nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento de sensor de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska. Quando comparado com o sensor anterior, duas características principais devem ser destacadas: o formato em U, possibilitando a inserção do sensor dentro do solo, e o ponto de medição na resposta de frequência, que utiliza - 6 dB, evitando a não tão bem definida região da frequência de ressonância. Três protótipos foram fabricados e aplicados a três substratos de solo. Um substrato de areia de construção, formado por areia de quartzo. Um substrato de areia de praia, formado por neossolo quartizarênico e um substrato de terra de jardim, formado por matéria orgânica, areia de quartzo e calcário dolomítico. Os protótipos obtiveram uma boa resolução entre os estados seco e saturado.

Palavras-chave: DGS, matrioska, sensor, umidade do solo.

ABSTRACT

Sensors are essential devices for their applications in process automation. Among these applications, the quantification of moisture is an extremely important parameter for determining the characteristics of a soil mass. Based on soil moisture, it is possible to properly manage the use of water in agriculture, monitor the evolution of watersheds, predict landslides, estimate the effect of floods, etc. Specifically, in precision agriculture, soil moisture sensors have the function of reducing water waste and promoting more efficient irrigation, avoiding water stress in plants. Even so, even today, the measurement of soil moisture in agriculture is limited to a small number of sensors, whose use is reduced, due to their small sampling volume, relatively high cost, the need for close contact with the soil and the low performance in saline and stony soils. From studies carried out in the Telecommunications and Applied Electromagnetism Group, of the Federal Institute of Paraiba (GTEMA-IFPB), a sensor was developed using a structure with a defect in the ground plane, DGS (Defected Ground Structure), based on the matryoshka geometry, having been applied in liquid mixtures. This dissertation presents the development of a soil moisture sensor using DGS based on matryoshka geometry. When compared with the previous sensor, two main features should be highlighted: the U-shape, allowing the sensor to be inserted into the ground, and the measuring point in the frequency response, which uses - 6 dB, avoiding the not-so-well-defined resonant frequency region. Three prototypes were manufactured and applied to three soil substrates. A construction sand substrate, formed by quartz sand. A substrate of beach sand, formed by arenosols and a substrate of garden soil, formed by organic matter, quartz sand and dolomitic limestone. The prototypes obtained a good resolution between dry and saturated states.

Keywords: DGS, matryoshka, sensor, soil moisture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Principais classes de solos do Brasil, respectivamente: Argissolo Vermelho, Latossolo Vermelho, Neossolo Quartzarênico e Organossolo Háptico [8]	18
Figura 2 – Sensor de umidade do solo modelo S-SMC-M005 da ONSET [11]	19
Figura 3 – Sensor de umidade do solo para arduíno modelo SC05 da Casa da Robótica [12] ..	20
Figura 4 – Sensor de umidade do solo modelo HFM2030 da Falker [13]	20
Figura 5 – Exemplo de estrutura DGS – geometria halteres [21]	21
Figura 6 – Sensor DGS com geometria halteres [21]	21
Figura 7 – Geometria do anel matrioska [21]	21
Figura 8 – Sensor de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska	22
Figura 9 – A primeira unidade DGS. Unidade DGS <i>Dumbell</i> [23].....	23
Figura 10 – Simulação de parâmetros S da DGS <i>Dumbell</i> , [23].....	23
Figura 11 – Diferentes formas de halteres [25].....	24
Figura 12 – Circuito equivalente do DGS halteres [24]	25
Figura 13 – Circuito RLC equivalente aos DGS halteres [24].....	25
Figura 14 – Geometria matrioska passo a passo [21]	26
Figura 15 – Dimensões da geometria matrioska [22]	26
Figura 16 – Sensor DGS matrioska.....	27
Figura 17 - DGS matrioska.....	27
Figura 18 - Dimensões do Sensor DGS matrioska.....	27
Figura 19 – Sensor vazio, $\epsilon_r = 1,0$	29
Figura 20 – Sensor com água, $\epsilon_r = 80,1$	29
Figura 21 – Frequências de ressonância limítrofes do sensor	30
Figura 22 –Dimensões do sensor DGS matrioska (Vista isométrica).....	30
Figura 23 – Dimensões do sensor DGS matrioska (Vista superior).....	30
Figura 24 –Dimensões do sensor DGS matrioska (Vista inferior).....	31
Figura 25 – Gráfico da umidade volumétrica em função da permissividade elétrica do solo [23]	31
Figura 26 - Sensor inserido no solo em toda sua extensão, considerando interação com uma camada de 15 mm de solo em ambos os lados. Constante dielétrica (ϵ_r), variando de 1 a 25.....	32
Figura 27 - Gráfico da Frequência de ressonância (F_{res}), em função de ϵ_r	32
Figura 28 - Gráfico da Frequência de -6dB, em função de ϵ_r	32

Figura 29 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($ S_{21} (dB)$) em função da Frequência para uma constante dielétrica (ϵ_r) = 2 e Espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.....	33
Figura 30 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($ S_{21} (dB)$) em função da Frequência para uma constante dielétrica (ϵ_r) = 10 e Espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.....	33
Figura 31 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($ S_{21} (dB)$) em função da Frequência para uma constante dielétrica (ϵ_r) = 15 e Espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.....	33
Figura 32 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($ S_{21} (dB)$) em função da Frequência para uma constante dielétrica (ϵ_r) = 20 e Espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.....	34
Figura 33 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($ S_{21} (dB)$) em função da Frequência para uma constante dielétrica (ϵ_r) = 25 e Espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.....	34
Figura 34 – Sensor 1	35
Figura 35 – Sensor 2	36
Figura 36 – Sensor 3	36
Figura 37 - Peneira granulométrica de 2 mm utilizada na preparação das amostras de substratos de solo.....	37
Figura 38 - Pesagem de amostra de substrato de areia do mar após secagem no forno.....	37
Figura 39 - analisador de rede E5071C conectado ao sensor de umidade do solo.....	38
Figura 40 - Pesagem de amostra de substrato de areia do Mar com balança de precisão.....	38
Figura 41 - Sensor de umidade do solo totalmente inserido na amostra.....	39
Figura 42 - Amostra de substrato de solo no ponto de saturação de umidade.....	39
Figura 43 – Resposta em frequência para os sensores 1, 2 e 3 em vazio.....	40
Figura 44 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($ S_{21} (dB)$), em função da Frequência (GHz) para uma amostra de substrato de solo de areia de construção de massa(g) = 600, adicionando 2,5% de massa de água até atingir 25%, utilizando o sensor 2.....	40
Figura 45 - Gráfico de massa de água (%) x Frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor 1.....	41
Figura 46 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor 2.....	42
Figura 47 - Gráfico de massa de água(g) x Frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor 3.....	43
Figura 48 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação(6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 1.....	44

Figura 49 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 2.....	45
Figura 50 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 3.....	46
Figura 51 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 1.....	47
Figura 52 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 2.....	48
Figura 53. Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor	49
Figura 54 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando os sensores 1, 2 e 3.....	49
Figura 55 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando os sensores 1, 2 e 3.....	50
Figura 56 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando os sensores 1, 2 e 3.....	50
Figura 57 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) dos três substratos de solo utilizando o sensor 2.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre modelos de sensores de umidade do solo disponíveis no mercado.....	19
Tabela 2 - Dimensões do sensor DGS matrioska (mm).....	28
Tabela 3 – Dimensões da geometria matrioska.....	31
Tabela 4 - Valores das frequências de ressonância (F_{res}) calculadas, medidas e simuladas, dos sensores 1, 2 e 3 em vazio.....	40
Tabela 5 – Valores de massa de água e frequência de atenuação - 6 dB da amostra de substrato de areia de construção utilizando o Sensor 1.....	41
Tabela 6 – Valores de massa de água e frequência de atenuação - 6 dB da amostra de substrato de areia de construção utilizando o Sensor 2.....	42
Tabela 7 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor.....	43
Tabela 8 – Valores de massa de água e frequência de atenuação - 6 dB da amostra de substrato de areia do mar utilizando o Sensor 1.....	44
Tabela 9 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 2.....	45
Tabela 10 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 3.....	46
Tabela 11 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o Sensor 1.....	47
Tabela 12 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 2.....	48
Tabela 13 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor	49

LISTA DE SIGLAS

5G	5ª geração de telefonia móvel
CC	Capacidade de Campo
DGS	<i>Defected Ground Structure</i>
EM	Eletromagnética
FSS	Superfície seletiva em frequência
FR-4	Material laminado epóxi reforçado com vidro
GTEMA	Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
IoT	<i>Internet of Things</i>
MUT	<i>Material Under Test</i>
pH	Potencial hidrogeniônico
PMP	Ponto de Murcha Permanente
RF	Radio frequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometer</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

CGA	Conteúdo gravimétrico de água (umidade em base gravimétrica), em Kg Kg^{-1}
a	Massa da amostra úmida, em g
b	Massa da amostra seca a 105°C até atingir peso constante, em g
CVA	Conteúdo volumétrico de água (umidade em base volumétrica), em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
c	Volume da amostra, em cm^3
w	Largura da linha de microfita
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa (Constante dielétrica)
h	Espessura do substrato dielétrico
C	Capacitância
L	Indutância
LC	Circuito indutor-capacitor
S_{11}	Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de reflexão
S_{21}	Parâmetro S, equivalente ao coeficiente de transmissão
RLC	Circuito resistor-indutor-capacitor
R	Resistência
jX_{LC}	Reatância do circuito paralelo capacitor-indutor
Z_0	Impedância característica da linha de transmissão
jX_1	Reatância do circuito equivalente do filtro passa-baixa Butterworth
g_0	Condutância de entrada do circuito equivalente do filtro passa-baixa Butterworth
g_1	Condutância de do circuito equivalente do filtro passa-baixa Butterworth
g_2	Condutância de saída do circuito equivalente do filtro passa-baixa Butterworth
G_{LC}	Condutância do circuito paralelo capacitor-indutor
jB_{LC}	Susceptância do circuito paralelo capacitor-indutor
V_g	Tensão do gerador do circuito RLC equivalente do DGS halteres
V_1	Tensão de entrada do Circuito RLC equivalente do DGS halteres
V_2	Tensão de saída do circuito RLC equivalente do DGS halteres
L_{eff}	Comprimento efetivo do anel matrioska
w_{ma}	Espessura da linha do anel matrioska
w_{mal}	Comprimento do lado do anel matrioska quadrado 1

w_{ma2}	Comprimento do lado do anel matrioska quadrado 2
$w_{ma1-avg}$	Comprimento médio do lado do anel matrioska quadrado 1
$w_{ma2-avg}$	Comprimento médio do lado do anel matrioska quadrado 2
w_{xma1}	Comprimento ao longo da direção x do anel matrioska 1
w_{xma2}	Comprimento ao longo da direção x do anel matrioska 2
w_{yma1}	Comprimento ao longo da direção y do anel matrioska 1
w_{yma2}	Comprimento ao longo da direção y do anel matrioska 2
g	Largura da fenda
ϵ_{reff}	Permissividade elétrica relativa efetiva (Constante dielétrica efetiva)
$f_{res-calc}$	Frequência de ressonância calculada
$Port1$	Porta 1
$Port2$	Porta 2
h_t	Espessura do MUT
δ	Tangente de perda
C_s	Comprimento do sensor DGS matrioska
L_s	Largura do sensor DGS matrioska

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1 Circuitos equivalentes de uma DGS.....	23
2.2 Geometria matrioska	25
2.3 Sensor DGS com geometria matrioska.....	27
3 CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DO SENSOR	29
3.1 Projeto do sensor DGS com geometria matrioska.....	30
3.2 Simulação do sensor DGS com geometria matrioska	31
3.3 Limites da espessura do MUT.....	32
4. FABRICAÇÃO DOS SENSORES, PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E MEDIÇÕES NO LABORATÓRIO	35
4.1 Fabricação dos sensores	35
4.2 Preparação das amostras.....	36
4.3 Medições no laboratório	37
4.4 Resultados das medições	39
4.4.1 Substrato de areia de construção.....	41
4.4.1.1 Substrato de areia de construção - sensor 1	41
4.4.1.2 Substrato de areia de construção - sensor 2	42
4.4.1.3 Substrato de areia de construção - sensor 3	42
4.4.2 Substrato de areia do mar.....	43
4.4.2.1 Substrato de areia do mar - sensor 1	43
4.4.2.2 Substrato de areia do mar - sensor 2	44
4.4.2.3 Substrato de areia do mar - sensor 3	45
4.4.3 Substrato de terra de jardim	46
4.4.3.1 Substrato de terra de jardim – sensor 1	46
4.4.3.2 Substrato de terra de jardim – sensor 2	47
4.4.3.3 Substrato de terra de jardim – sensor 3	48
4.5 Comparativo entre sensores.....	49

5	CONCLUSÃO.....	53
5.1	Considerações finais.....	53
5.2	Sugestões e continuidade dos trabalhos	53
6	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia, e permanente busca pela eficiência na produção de alimentos, observa-se cada vez mais o uso de sistemas, equipamentos e sensores no auxílio da produção agrícola. Com o advento da 5ª geração de telefonia móvel(5G), e o desenvolvimento de dispositivos compatíveis com a Internet das Coisas, do inglês, *Internet of Things* (IoT), com baixo consumo de energia, torna-se possível a conexão de milhões de equipamentos e sensores a sistemas informatizados de produção, otimizando os insumos utilizados, principalmente a água.

O conhecimento da umidade do solo é importante para apoiar a produção agrícola, hidrologia de captação, previsão de inundações, previsão de deslizamento de terra e outros serviços ecossistêmicos. Globalmente, a agricultura é o maior usuário de água, representando aproximadamente 70% do consumo total [1], contribuindo para a expectativa de aumento na taxa de produção de alimentos no mundo em 1,4 pontos percentuais por ano até 2030 [2]. Nos países em desenvolvimento, cerca de 80% desse crescimento projetado virá do aumento da produtividade das culturas (em parte resultado da irrigação) e do uso mais intensivo de sistemas de produção. Neste sentido, o manejo da irrigação adquire papel fundamental para o uso correto da água na agricultura. Novas tecnologias estão sendo utilizadas para a modernização da gestão da água no solo, incluindo o planejamento e a avaliação via contabilidade e auditoria de água, e o uso das Tecnologias da Informação e Comunicação (sensoriamento remoto, computação baseada em nuvem e acesso aberto a dados e informações) e da automação para um uso mais eficiente da água [3].

A umidade do solo é a chave para a saúde e para as funções do solo, auxiliando o sequestro de carbono e evitando que solos ricos em carbono sequem e aumentem suas emissões de carbono [3]. No ambiente, muitos serviços ecossistêmicos relevantes estão relacionados à umidade do solo, como o serviço de provisão de água e recarga do lençol freático, e os serviços de regulação da purificação da água, controle e prevenção da erosão do solo, proteção contra inundações, sequestro de carbono e regulação climática local [4]. A umidade atual do solo representa o conteúdo de água presente no solo em um determinado momento e local, podendo ser calculada em base gravimétrica, utilizando (1), tendo como referência uma massa de solo, ou em base volumétrica, utilizando (2), tendo como referência um volume conhecido de solo e sua densidade [5].

$$CGA = \left(\frac{a-b}{b} \right) \quad (1)$$

$$CVA = \left(\frac{a-b}{c} \right) \quad (2)$$

Além do método padrão gravimétrico com uso de estufa, outros métodos de determinação da umidade do solo incluem os métodos eletrométricos, como o método de Bouyoucos e o método de Colman, e outros, como o uso de tensiômetros, sonda de nêutrons e o método TDR (Time Domain Reflectometry) [6].

A capacidade de retenção de água no solo é influenciada por diversas características, como a sua textura, estrutura, porosidade e densidade, influenciando o espaço de armazenamento de água no solo. Neste contexto, solos argilosos possuem maior superfície específica e, por isso, retém mais água do que os arenosos, e solos bem estruturados apresentam maiores valores de porosidade e uma densidade do solo menor, permitindo a existência de mais espaço para o armazenamento de água [7].

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos [8], as principais classes de solos do Brasil, Figura 1, em área de ocorrência são: a) os Latossolos, que são solos antigos, normalmente muito profundos, com baixa fertilidade natural e textura que varia de média a argilosa; b) os Argissolos, solos de profundidade variável e com incremento de argila em profundidade, pela translocação desse material do horizonte superficial para o subsuperficial; e c) Neossolos, solos considerados jovens por apresentarem poucas alterações em relação ao material de origem, sendo em geral pouco espessos e pedregosos, ou então formados por materiais novos ou essencialmente por areia de quartzo. Essas três classes de solos são altamente representativas no país e correspondem a mais de 70% da área do Brasil [9]. De modo geral, os teores de matéria orgânica costumam ser maiores nos horizontes superficiais do solo, mas em alguns casos existe acúmulo em profundidade de material orgânico translocado dos horizontes superficiais. Em condições locais, pode também haver o acúmulo de materiais de origem orgânica em diferentes graus de decomposição, levando à formação dos chamados Organossolos.



Figura 1 – Principais classes de solos do Brasil, respectivamente: Argissolo Vermelho, Latossolo Vermelho, Neossolo Quartzarênico e Organossolo Háptico [8].

Uma demanda global pela diminuição do consumo dos recursos hídricos desencadeou um interesse renovado no desenvolvimento de sensores de umidade do solo para melhorar o gerenciamento da irrigação e da umidade do solo na agricultura [1]. Neste contexto, a partir da década de 1980, foi introduzido o conceito de agricultura de precisão, sendo esta, basicamente, uma estratégia de gestão que permite tomar decisões para melhorar a produtividade agrícola, assim como tornar essa atividade mais sustentável [10]. Dessa forma, na gestão das plantações, as tomadas de decisão são baseadas na observação, medição e atuação para evitar a variação de fatores que afetem as culturas (ex: temperatura, umidade do solo, absorção de nutrientes pelas plantas etc.). Portanto, os sensores, e mais especificamente os sensores de umidade do solo, desempenham um papel fundamental na agricultura de precisão. Na Tabela 1, é feita uma comparação entre três sensores de umidade do solo disponíveis no mercado com princípios de funcionamento baseados na constante dielétrica, Figura 2, capacitância, Figura 3, e impedância, Figura 4.

Tabela 1 – Comparativo entre modelos de sensores de umidade do solo disponíveis no mercado

Fabricante	Modelo	Precisão	Resolução	Peso	Dimensão	Princípio de funcionamento
Onset	S-SMC-M005	3%	0,07%	180g	89 x 15 x 1,5 mm	Constante dielétrica
Casa da Robótica (Arduíno)	SC05	-	-	-	23 x 98 x 4mm	Capacitância
Falker	HFM2030	3%	0,10%	190g	45 x 299 x 1,6mm	Impedância



Figura 2 – Sensor de umidade do solo modelo S-SMC-M005 da ONSET [11]



Figura 3 – Sensor de umidade do solo para arduino modelo SC05 da Casa da Robótica [12]



Figura 4 – Sensor de umidade do solo modelo HFM2030 da Falker [13]

As redes de sensores sem fio, WSN, do inglês *wireless sensor network*, com soluções baseadas em IoT [14], ou nos sistemas de identificação por radiofrequência, RFID, do inglês *radio frequency identification* [15], assim como os dispositivos portáteis de monitoramento [16], [17], requerem sensores de baixo custo, com tamanho e peso reduzidos, o que torna os sensores baseados em estruturas planares bastante atrativos.

As estruturas planares apresentam uma das dimensões muito menor do que as demais, sendo utilizadas em filtros [18], antenas [19], sensores [20] e circuitos para comunicações em geral. Entre as estruturas planares, no Grupo de Telecomunicações e Eletromagnetismo Aplicado (GTEMA) do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), tem sido investigado a aplicação em filtros e sensores utilizando estruturas com defeito no plano terra, DGS, do inglês *defected ground structure*, onde a camada de metalização de uma estrutura guiante planar (ex: microfita, linhas acopladas, guia coplanar com plano terra etc.) é intencionalmente modificado para se obter uma determinada resposta em frequência, Figura 5, [21], [22].

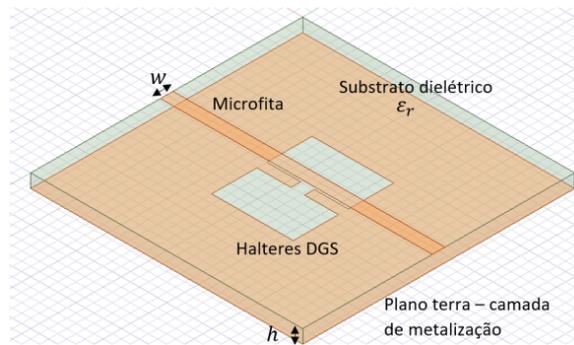


Figura 5 – Exemplo de estrutura DGS – geometria halteres, [21]

A geometria da parte removida é um dos parâmetros mais flexíveis no projeto de estruturas DGS, através da qual sua resposta em frequência pode ser ajustada [21], [22]. Colocando o material em teste, do inglês *material under test* (MUT), na região da DGS, esse interage com os campos eletromagnéticos, Figura 6, alterando assim a sua resposta em frequência, o que pode ser usado como um sensor, [21].

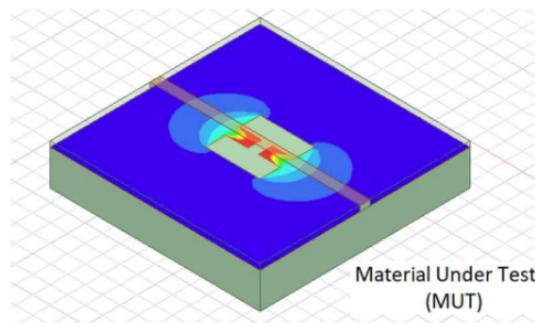


Figura 6 – Sensor DGS com geometria halteres, [21].

Dentre as geometrias estudadas no GTEMA-IFPB, uma particularmente interessante é a geometria matrioska, que apresenta características de miniaturização e seletividade. Introduzida em [21], [22], essa geometria apresenta anéis concêntricos interligados, aumentando seu comprimento efetivo, sem ocupar uma área maior do que a área do anel mais externo, Figura 7.



a) Anel matrioska [21]



b) Anel matrioska expandido [21]

Figura 7 – Geometria do anel matrioska, [21].

Dando continuidade às pesquisas iniciadas no GTEMA e procurando aproveitar as características da geometria matrioska e da DGS, nesta proposta de dissertação é apresentado um sensor de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska, Figura 8. Ao contrário do sensor anterior [21], a linha de microfita do sensor proposto é em formato de U, o que facilita sua inserção no solo, como é comum em outros tipos de sensores, e opera na faixa de 0,3 GHz a 1,1 GHz.

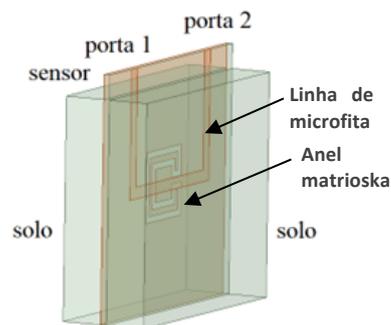


Figura 8 – Sensor de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska.

No capítulo 2, será introduzida a fundamentação teórica das estruturas planares DGS, suas características, circuitos equivalentes e a geometria matrioska. No capítulo 3, o sensor DGS será caracterizado através do seu projeto e simulação no software Ansys Designer bem como serão definidos seus limites de operação. No capítulo 4, teremos o processo de fabricação dos sensores, preparação das amostras de substrato de solo e por fim as medições em laboratório seguindo dos resultados obtidos. No capítulo 5, faremos as considerações finais sobre o presente trabalho e seus resultados, bem como as sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A estrutura DGS ganhou popularidade devido ao seu design estrutural simples, podendo ser composta por um único, ou múltiplos defeitos no plano terra. Inicialmente, a DGS foi relatada para filtros sob a linha de microfita, apresentando característica de rejeita faixa, suprimindo harmônicos de alta ordem e minimizando acoplamentos mútuos, Figura 9. Atualmente, a DGS é aplicada em várias estruturas planares (ex: guia de onda coplanar com plano terra, linhas de fenda, linhas acopladas etc.). Os defeitos no plano terra perturbam a distribuição de corrente. Esse distúrbio altera as características da linha de transmissão. Em outras palavras, um defeito gravado no plano terra sob a linha de transmissão planar, altera a capacitância (C) e a indutância (L) efetivas da linha de transmissão, adicionando resistência de *slot*, capacitância e indutância. Devido a este circuito indutor-capacitor (LC), ocorre uma ressonância em uma determinada frequência, conforme pode ser visto na Figura 10 [23].

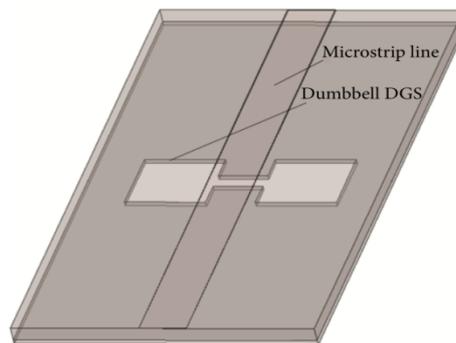


Figura 9 – A primeira unidade DGS. Unidade DGS *Dumbbell*, [23]

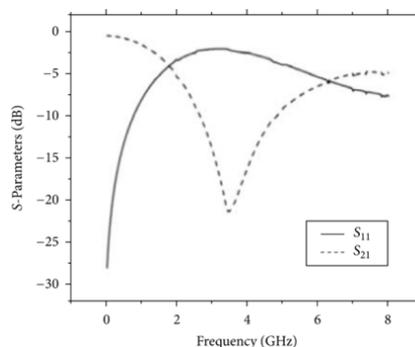


Figura 10 – Parâmetros S da DGS *Dumbbell*, [23].

2.1 Circuitos equivalentes de uma DGS

Projeto e análise são dois desafios para a DGS. Os programas computacionais para aplicações eletromagnéticas (EM) comercialmente disponíveis são um dos principais recursos para projetar e analisar DGS. Para aplicar a seção DGS proposta a um exemplo prático de projeto

de circuito, é necessário extrair os parâmetros do circuito equivalente. Geralmente, a resposta em frequência (ex: parâmetros S) deve ser calculada por simulação eletromagnética (EM) de onda completa. A análise de onda completa não fornece uma visão física do princípio de funcionamento da DGS e essa é assimilada para cada geometria. Por exemplo, para uma DGS em forma de halteres, as partes retangulares dos halteres aumentam o comprimento do percurso da corrente e a indutância efetiva. A parte da fenda acumula carga e aumenta a capacitância efetiva da linha de microfita, Figura 11, [24].

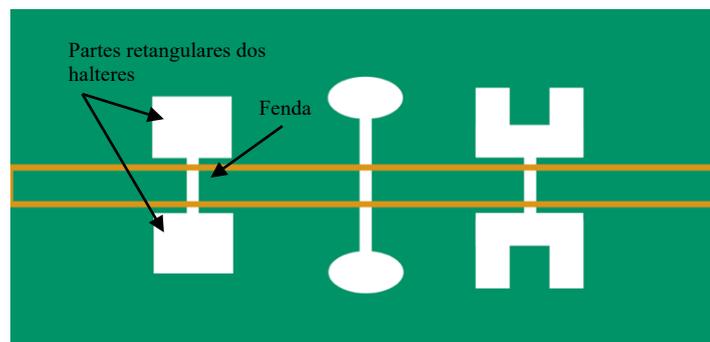


Figura 11 – Diferentes formas de halteres [25].

Dois áreas retangulares e uma fenda de conexão correspondem à indutância (L) e à capacitância (C) adicionadas de forma equivalente, respectivamente. Assim, uma ressonância ocorre em uma determinada frequência por causa do circuito indutor-capacitor (LC) paralelo, Figura 12. À medida que a área retangular gravada aumenta, aumenta a indutância efetiva, e o aumento da indutância dá origem a uma frequência de ressonância mais baixa. Quando a distância da fenda gravada aumenta, a capacitância efetiva diminui fazendo com que a frequência de ressonância se desloque para uma frequência mais alta. A unidade DGS também pode ser analisada por um circuito ressonante resistor-indutor-capacitor (RLC) paralelo de forma mais eficiente. Uma resistência (R) é adicionada ao circuito indutor-capacitor (LC) para modelar as perdas da radiação, do condutor, e do dielétrico. O circuito ressonante resistor-indutor-capacitor (RLC) é mostrado na Figura 13 [24].

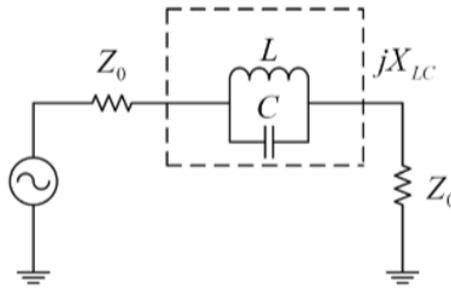


Figura 12 - Circuito equivalente do DGS halteres [24].

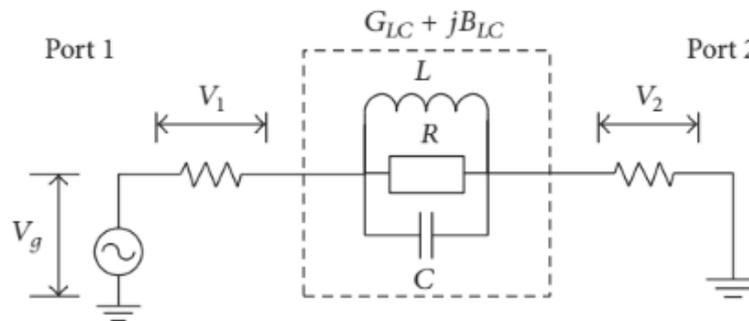


Figura 13 – Circuito RLC equivalente aos DGS halteres [24].

2.2 Geometria matrioska

A geometria matrioska é caracterizada pela interligação de seus anéis concêntricos, aumentando seu comprimento efetivo (L_{eff}), sem aumentar a área ocupada, limitada à área do anel mais externo, Figura 15, [22]. Esta característica confere à geometria matrioska propriedades interessantes para aplicações em RF/micro-ondas, como miniaturização e operação multibanda. Superfícies seletivas em frequência (FSS), [26], filtros, [27], e sensores [21], [28], são exemplos de aplicações da geometria matrioska e suas variações.

Embora possam ser utilizados mais de dois anéis concêntricos, para exemplificar o processo de construção da geometria matrioska, serão considerados apenas dois anéis concêntricos, o que corresponde a um anel matrioska. Inicialmente são projetados dois anéis concêntricos, Figura 14a. Em seguida, fendas são inseridas na mesma posição em anéis consecutivos, Figura 14b. Finalmente, os anéis são interconectados e o anel matrioska é obtido, Figura 14c [21].

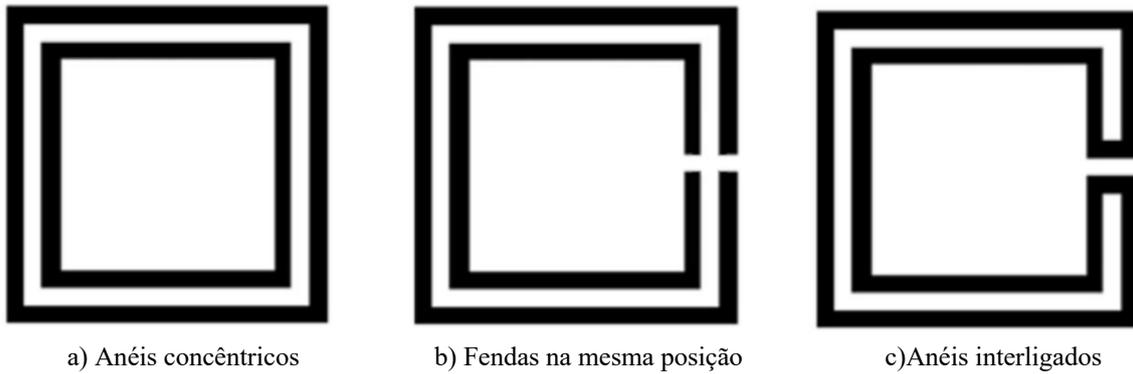


Figura 14 – Geometria matrioska passo a passo [21].

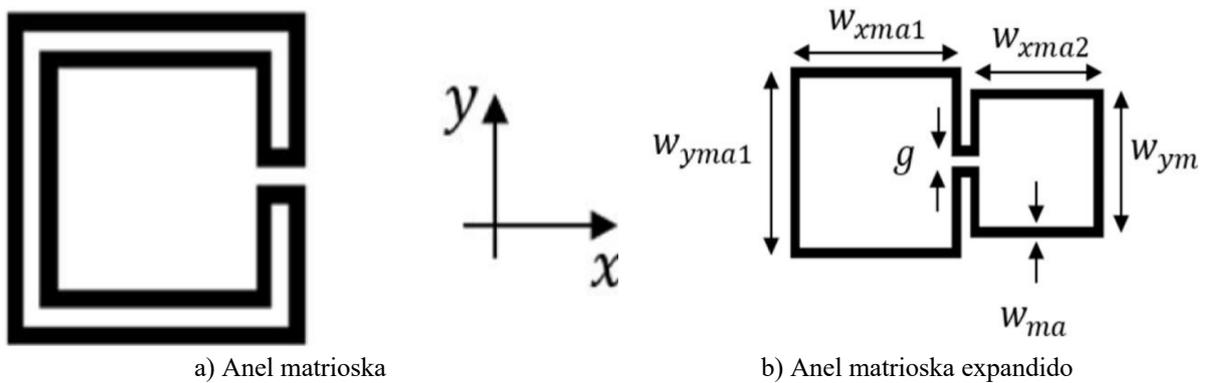


Figura 15 – Dimensões da geometria matrioska [22].

Normalmente, $w_{xma1} = w_{yma1} = w_{ma1}$ e $w_{xma2} = w_{yma2} = w_{ma2}$. Neste caso a frequência de ressonância calculada ($f_{res-calc}$), pode ser estimada por [22]:

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

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

$$L_{eff} = 3 \times (w_{ma1-avg} + w_{ma2-avg}) \quad (4)$$

$$w_{mai-avg} = w_{mai} - w_{ma}, \quad i = 1,2 \quad (5)$$

ϵ_{reff} é a constante dielétrica efetiva para a linha de microfita com largura w , sobre um substrato de espessura h e constante dielétrica ϵ_r . A constante dielétrica efetiva pode ser facilmente calculada usando um dos softwares disponíveis [29].

Destaque-se que (3)-(5) são para o sensor em vazio, ou seja, sem o MUT. Além disso, essas equações são equações iniciais de projeto, para, quando necessário, uma posterior otimização numérica.

2.3 Sensor DGS com geometria matrioska

Conforme ilustrado na Figura 16, o sensor utilizando DGS baseado na geometria matrioska, ou simplesmente sensor DGS matrioska, é formado pela colocação do material sob teste, MUT, em contato com a região DGS, com o anel matrioska centrado sob a linha de microfita. A largura da microfita é w , a espessura do substrato h , e sua constante dielétrica ϵ_r , Figura 17. As dimensões finais do sensor DGS matrioska, estão ilustradas na Figura 18.

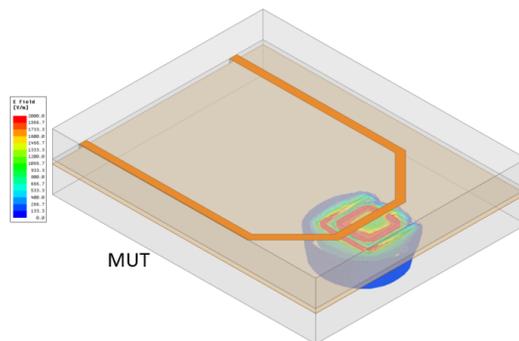


Figura 16 – Sensor DGS matrioska.

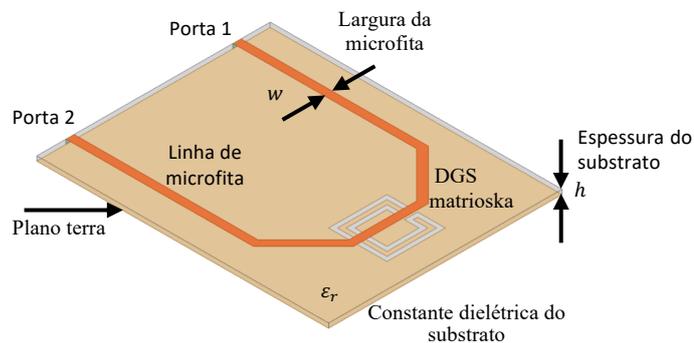


Figura 17 – DGS matrioska.

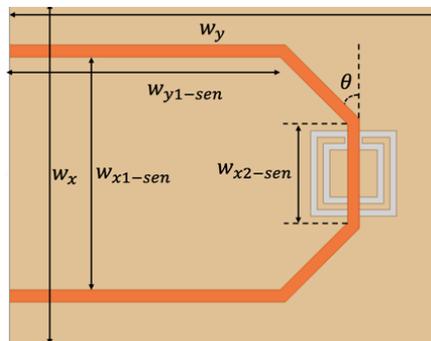


Figura 18 – Dimensões do sensor DGS matrioska.

O sensor DGS matrioska foi projetado em formato de U, o que facilita sua inserção no solo, como é comum nos sensores comerciais. O ângulo $\theta = 45^\circ$ foi numericamente otimizado.

O substrato escolhido foi o FR-4, que apresenta um baixo custo, com constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, tangente de perda $\text{tg}(\delta) = 0,02$, espessura do substrato $h = 1,6$ mm, espessura do cobre $t = 0,035$ mm. As dimensões do sensor DGS matrioska foram sumarizadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões do sensor DGS matrioska (mm)

W_x	W_y	$W_{x1\text{-sen}}$	$W_{y1\text{-sen}}$	$W_{x2\text{-sen}}$	W_{ma1}	W_{ma2}	W_{ma}	g
80	100	54,4	63	25,5	20	14	2	1

3 CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICA DO SENSOR

Antes do sensor proposto ser aplicado em amostras de substrato de solo, foi realizado um processo de caracterização numérica, procurando estabelecer o seu comportamento. Os resultados numéricos foram obtidos utilizando o software ANSYS, módulo Designer.

No caso do sensor de umidade do solo, ele fica inserido no solo e os dois lados, microfita e plano terra, ficam totalmente envolvidos pelo solo, Figura 8. Como um processo de caracterização numérica, a resposta em frequência do sensor é simulada considerando o sensor vazio, $\epsilon_r = 1,0$, Figura 19. E em seguida a resposta em frequência é simulada para o meio água, $\epsilon_r = 80,1$, Figura 20. Essas duas curvas estabelecem os limites das frequências de ressonância do sensor, Figura 21. Entretanto, a resposta em frequência do sensor, em geral, é em torno da frequência de ressonância para o sensor imerso na água. Note que as Figuras 19-21 são apenas ilustrativas, não sendo apresentadas as dimensões consideradas para o sensor.

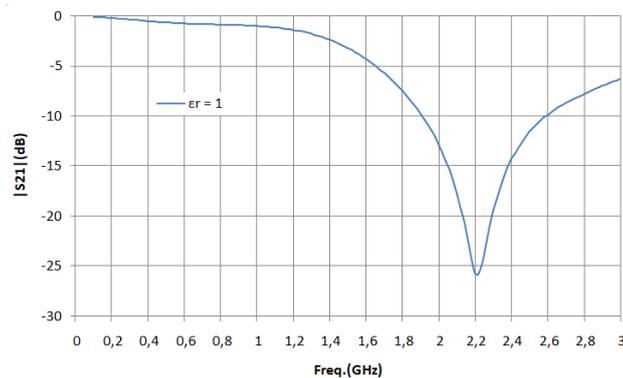


Figura 19 - Sensor vazio, $\epsilon_r = 1,0$.

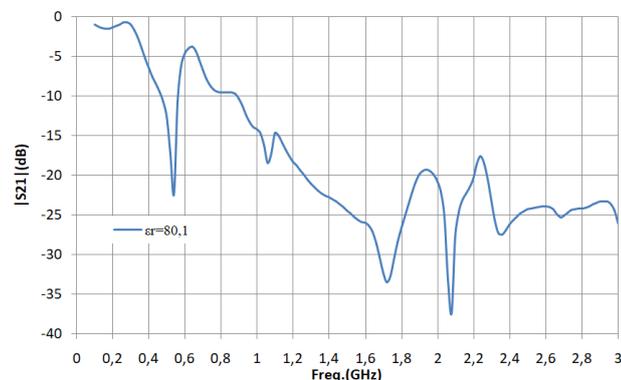


Figura 20 - Sensor com água, $\epsilon_r = 80,1$.

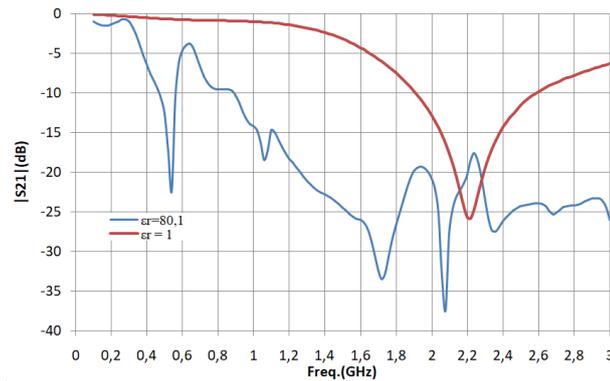


Figura 21 - Frequências de ressonância limítrofes do sensor.

3.1 Projeto do sensor DGS com geometria matrioska

O sensor DGS matrioska, Figuras 22-24, foi simulado no software ANSYS *Electronics Desktop*, utilizando o módulo Designer. O substrato escolhido foi a fibra de vidro FR-4 de baixo custo com constante dielétrica (ϵ_r) = 4,4, tangente de perda ($tg(\delta)$) = 0,02, espessura (h) = 1,6 mm, comprimento (C_S) = 50 mm e Largura (L_S) = 50 mm, com largura de microfita (w) = 2,8 mm. As dimensões da geometria matrioska estão resumidas na Tabela 3. As dimensões do sensor fabricado foram modificadas para facilitar sua inserção no solo.

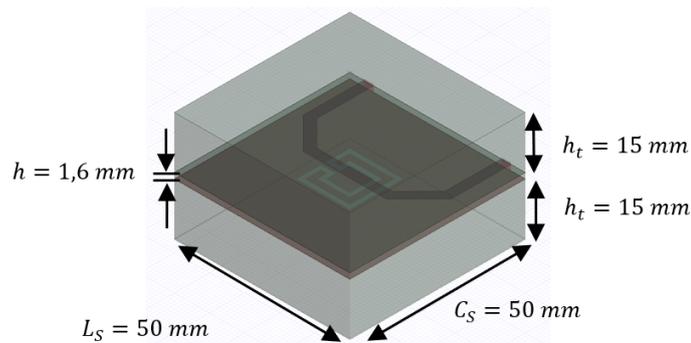


Figura 22 - Dimensões do sensor DGS matrioska (vista isométrica).

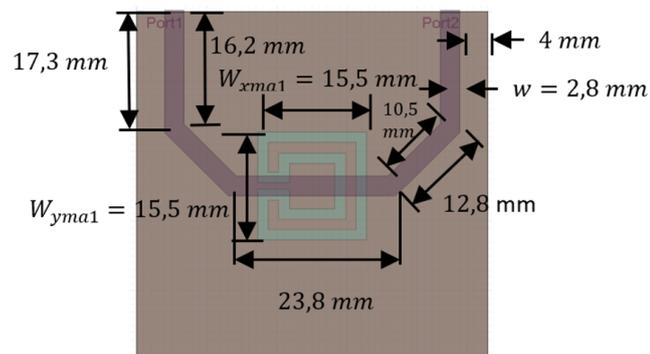


Figura 23 - Dimensões do sensor DGS matrioska (vista superior).

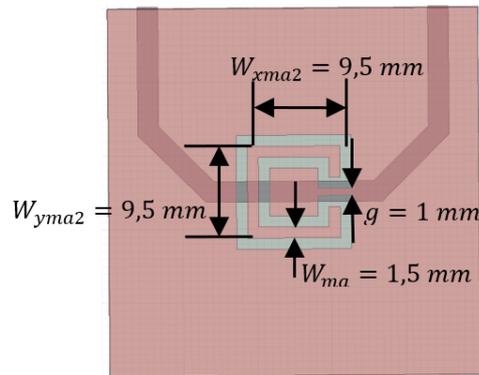


Figura 24 - Dimensões do sensor DGS matrioska (vista inferior).

Tabela 3 - Dimensões da geometria matrioska

W_{ma1}	W_{ma2}	W_{ma}	g
15,5 mm	9,5 mm	1,5 mm	1 mm

3.2 Simulação do sensor DGS com geometria matrioska

De acordo com [30], a permissividade elétrica relativa do solo, em função de sua umidade volumétrica, varia de 4 a 24, Figura 25. A umidade volumétrica é a relação entre o volume de água numa amostra do solo, e o volume total da amostra seca. Foram realizadas simulações com o sensor considerando interação com uma camada de solo de 15 mm em ambos os lados e em toda extensão da placa, o que pode ser verificado na Figura 26. As frequências de ressonâncias (F_{res}) para cada constante dielétrica (ϵ_r) foram sumarizadas na Figura 27, e as frequências de -6 dB, onde $|S_{21}|$ cruza o ponto de -6 dB pela primeira vez, para cada constante dielétrica (ϵ_r) foram sumarizadas na Figura 28.

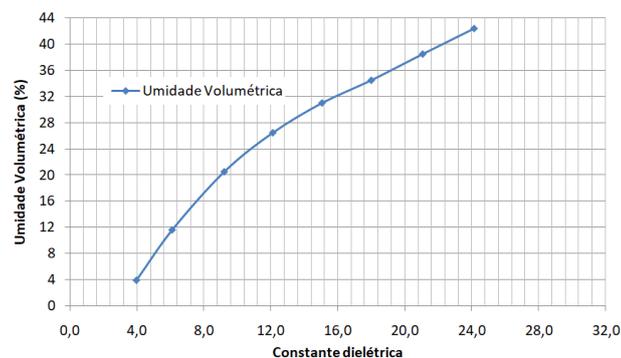


Figura 25 - Gráfico da umidade volumétrica em função da permissividade elétrica do solo [30].

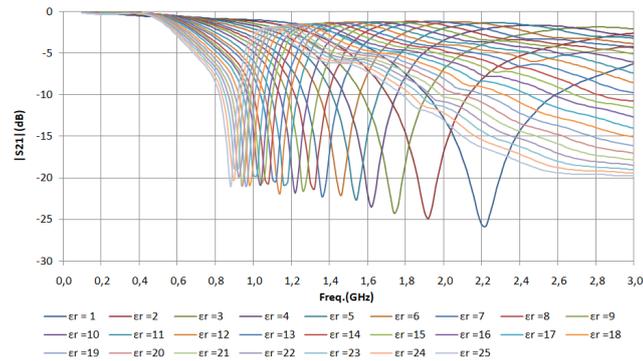


Figura 26 - Sensor inserido no solo em toda sua extensão, considerando interação com uma camada de 15 mm de solo em ambos os lados. Constante dielétrica (ϵ_r), variando de 1 a 25.

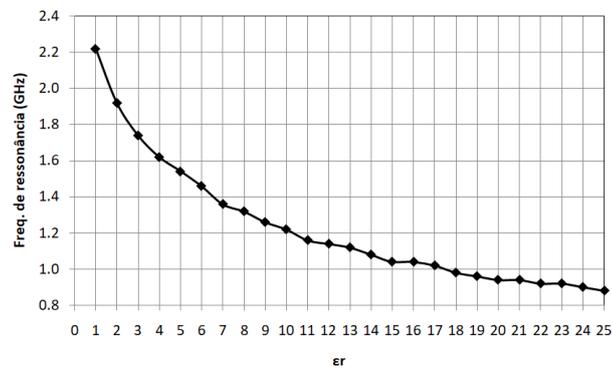


Figura 27 - Gráfico da Frequência de ressonância (F_{res}), em função de ϵ_r .

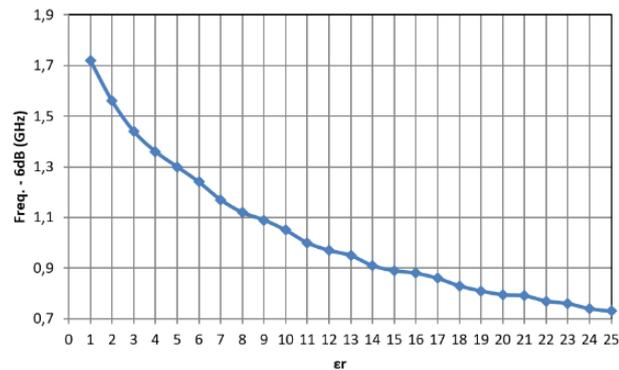


Figura 28 - Gráfico da Frequência de -6dB, em função de ϵ_r .

3.3 Limites da espessura do MUT

Para verificar os limites da espessura do MUT para o sensor proposto, foram realizadas simulações mantendo o valor da constante dielétrica (ϵ_r) fixa e variando a espessura da camada do solo com o qual o sensor interage. Foram realizadas simulações para os valores de constante dielétrica $\epsilon_r = 2, 10, 15, 20$ e 25 , com os valores de espessura do solo (h_t) de

5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 30 mm para cada valor da constante dielétrica (ϵ_r),
Figuras 29-33.

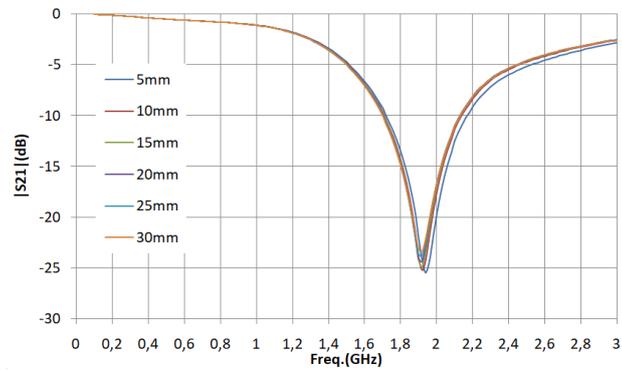


Figura 29 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($|S_{21}|$ (dB)) em função da frequência para uma constante dielétrica $\epsilon_r = 2$ e espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.

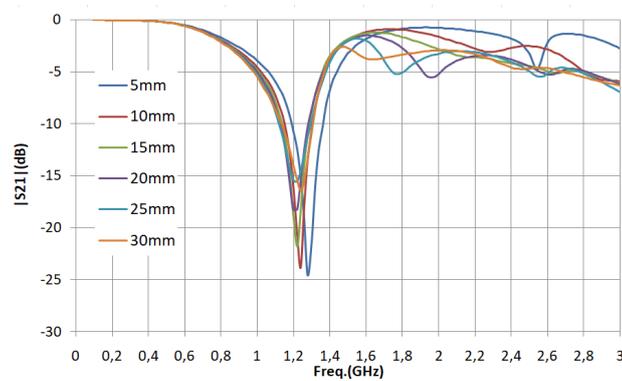


Figura 30 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($|S_{21}|$ (dB)) em função da frequência para uma constante dielétrica $\epsilon_r = 10$ e espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.

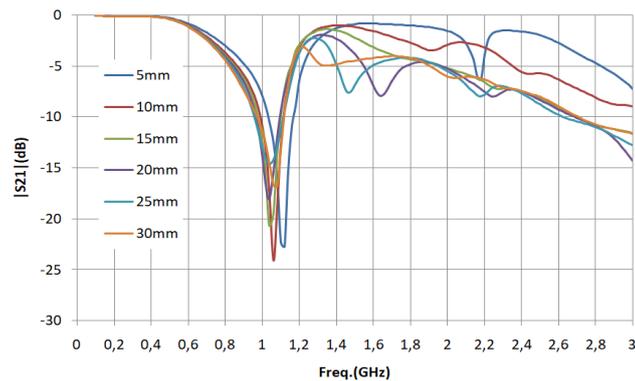


Figura 31 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($|S_{21}|$ (dB)) em função da Frequência para uma constante dielétrica $\epsilon_r = 15$ e espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.

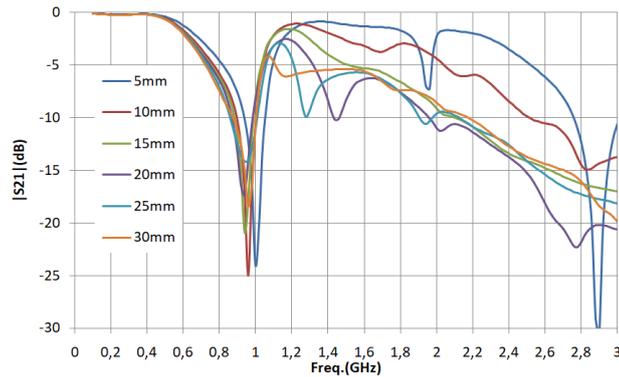


Figura 32 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($|S_{21}|(dB)$) em função da Frequência para uma constante dielétrica $\epsilon_r = 20$ e espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.

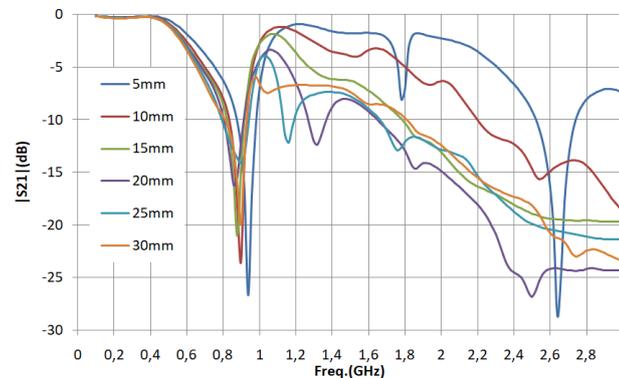


Figura 33 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($|S_{21}|(dB)$) em função da frequência para uma constante dielétrica $\epsilon_r = 25$ e Espessura do solo (h_t) variando de 5 a 30 mm.

Observa-se que mesmo alterando a espessura do solo (h_t), as frequências de ressonância (F_{res}), não sofrem alterações significativas para uma determinada constante dielétrica (ϵ_r), com alguma alteração da amplitude da atenuação. Para as espessuras de 20 mm e 25 mm, pode-se verificar o aparecimento de uma segunda ressonância antes de 2 GHz. Já para a espessura de 30 mm observa-se que essa segunda ressonância antes de 2 GHz começa a atenuar. Entretanto, essa ressonância não dificulta a identificação da frequência da primeira ressonância.

A caracterização numérica mostrou que o sensor tem capacidade para operar na faixa de $\epsilon_r = 1$, no caso do sensor em vazio, até $\epsilon_r = 80,1$, no caso do sensor imerso em água. A operação do sensor é restrita, no caso de umidade do solo, apenas até $\epsilon_r = 24$, quando o solo fica saturado. O sensor DGS foi projetado com as portas no mesmo lado para facilitar sua inserção no solo como nos sensores comerciais. O sensor DGS conseguiu identificar as variações de ϵ_r de 1 a 24, simulando o solo totalmente seco à saturado, tanto nas frequências de ressonância como nas frequências de atenuação de -6 dB.

4. FABRICAÇÃO DOS SENSORES, PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E MEDIÇÕES NO LABORATÓRIO

4.1 Fabricação dos sensores

Para a realização dos testes em laboratório, foram confeccionados três sensores DGS matrioska. O substrato escolhido foi o FR-4, que apresenta um baixo custo, com constante dielétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$, tangente de perda $\text{tg}(\delta) = 0,02$, espessura do substrato $h = 1,6$ mm, espessura do cobre $T = 0,18$ mm, comprimento do sensor $C_S = 120$ mm e Largura do sensor $L_S = 60$ mm, com largura de microfita $w = 2,8$ mm. Para os três sensores foi considerado que a geometria matrioska é quadrada, com as seguintes dimensões: comprimento do lado do anel 1, $w_{ma1} = 22$, comprimento do lado do anel 2, $w_{ma2} = 14$ mm, largura da fenda $g = 1$ mm, para os três sensores. No sensor 1, foi utilizada a espessura da linha do anel matrioska, $w_{ma} = 1$ mm, Figura 34. Para o sensor 2, foi utilizada a espessura da linha do anel matrioska, $w_{ma} = 2$ mm, Figura 35. E no sensor 3, foi utilizada a espessura da linha do anel matrioska, $w_{ma} = 3$ mm, Figura 36. Após a impressão dos sensores no substrato, foi realizada a corrosão das partes de cobre não protegidas pela tinta da impressão, em percloroeto de ferro. Dois conectores coaxiais SMA foram soldados às linhas de microfita com impedância característica $Z_0 = 50 \Omega$.

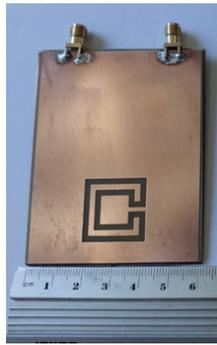


a) Vista inferior do sensor 1

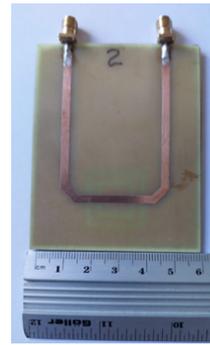


b) Vista superior do sensor 1

Figura 34 – Sensor 1.

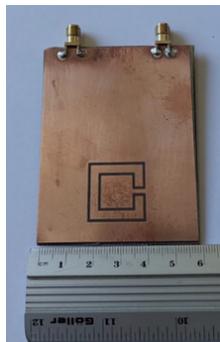


a) Vista inferior do sensor 2



b) Vista superior do sensor 2

Figura 35 – Sensor 2.



a) Vista inferior do sensor 3



b) Vista superior do sensor 3

Figura 36 – Sensor 3.

4.2 Preparação das amostras

Para a realização das medições em laboratório, foram preparadas três amostras de substrato de solo: uma amostra de substrato de areia de construção, formada por areia de quartzo, tipicamente usada na construção civil. Uma amostra de substrato de areia de praia, formada por neossolo quartizarênico, coletada na orla da praia de Boa Viagem, na cidade de Recife-PE. E uma amostra de substrato de terra de jardim, rica em matéria orgânica. A areia de praia e a terra de jardim foram adquiridas em estabelecimentos comerciais. Apenas a terra de jardim possuía a especificação de sua composição, que era turfa, casca de pinus, areia, terra para jardim e calcário dolomítico, produzida pela empresa All Gardem de Holambra-SP [31].

De posse das amostras dos três substratos de solo, foi realizado o peneiramento das amostras com uma peneira de análise granulométrica de 2 mm, Figura 37, da empresa Contenco Indústria e comércio Ltda [32], para obtenção da fração terra fina, alterando a estrutura do solo e uniformizando as amostras. A peneira foi cedida como empréstimo, pelo Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) campus João Pessoa. Esta etapa tinha como objetivo homogeneizar as amostras e evitar que a diferença do tamanho dos grãos interferisse nas medições com o sensor de umidade.



Figura 37 - Peneira granulométrica de 2 mm utilizada na preparação das amostras de substratos de solo.

Com as amostras já peneiradas, passou-se a etapa de secagem e retirada de praticamente toda umidade para pesagem. A secagem foi realizada em forno a gás de fogão de cozinha comum. Foi utilizada a temperatura de 200 °C em intervalos intercalados de 30 minutos no forno e 30 minutos em resfriamento. Ao final de cada ciclo de uma hora, a amostra era pesada em balança de precisão de cozinha, Figura 38, e se apresentasse perda de peso considerável em relação com a última medição, o processo era repetido até não apresentar diferença maior que 2 gramas. Por fim as amostras foram acondicionadas em caixas de isopor e vedadas para evitar o aumento da umidade até o momento das medições no laboratório.



Figura 38 - Pesagem de amostra de substrato de areia do mar após secagem no forno

4.3 Medições no laboratório

Para a medição em laboratório, foi utilizado o analisador de rede E5071C da *Agilent Technologies*, Figura 39, do laboratório de medidas em telecomunicações do GTEMA no IFPB. A porta 1 do analisador de rede foi conectada à porta de entrada do sensor de umidade injetando um sinal na faixa de frequência de 200 MHz a 2 GHz. A porta de saída do sensor de umidade foi conectada à porta 2 do analisador de rede. Foram utilizados 3000 pontos na varredura, ou seja, em intervalos de 600 KHz.

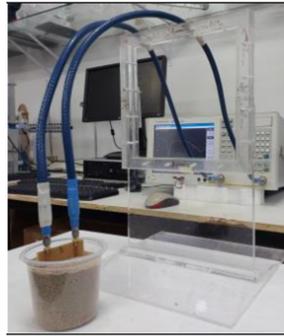


Figura 39 - analisador de rede E5071C conectado ao sensor de umidade do solo.

Após configuração do cenário de testes descrito no parágrafo anterior, foram realizadas as medições de umidade nas amostras de substratos de solo, onde a amostra totalmente seca era retirada da caixa de isopor e colocada em um recipiente menor e pesada em balança de precisão descontando o peso do recipiente, Figura 40.



Figura 40 - Pesagem do substrato de areia de praia com balança de precisão

À amostra seca, foi acrescentada uma quantidade de água equivalente a mais ou menos 2,5% de sua massa seca no caso do substrato de areia de construção e de areia do mar e de mais ou menos 5% para o substrato de terra de jardim. A adição de água foi realizada de forma manual verificando o aumento do peso da amostra na balança. Depois da adição da água, era realizada a homogeneização da amostra, manualmente com o auxílio de uma colher, para a próxima medição, Figura 41.

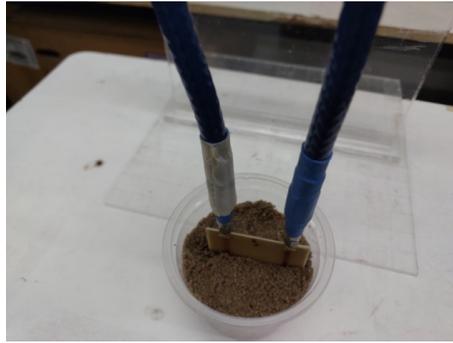


Figura 41 - Sensor de umidade do solo totalmente inserido no substrato de solo umedecido.

Após a medição do substrato de solo umedecido, o processo era repetido em intervalos de massa de água de 2,5% para os substratos de areia de praia e de areia de construção e de 5% para o substrato de terra de jardim até que fosse constatada a saturação do substrato de solo, verificando-se o acúmulo de água na superfície do material, Figura 42. Desta forma foi possível realizar 11 medições para os substratos de areia de construção e terra de jardim, e 12 medições para o substrato areia do mar.

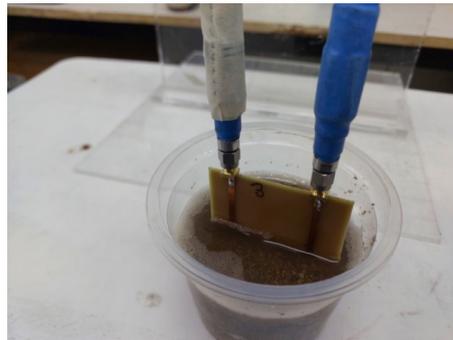


Figura 42 - Substrato de solo no ponto de saturação de umidade

4.4 Resultados das medições

Os resultados das medições, em laboratório, dos sensores 1, 2 e 3 em vazio, ficaram muito próximos dos valores simulados no software ANSYS, como pode ser observado na Figura 43. Os resultados calculados (2)-(4), ficaram um pouco mais distantes dos resultados medidos e simulados, mas, ainda assim, apresentaram uma aproximação muito boa. Tabela 3.

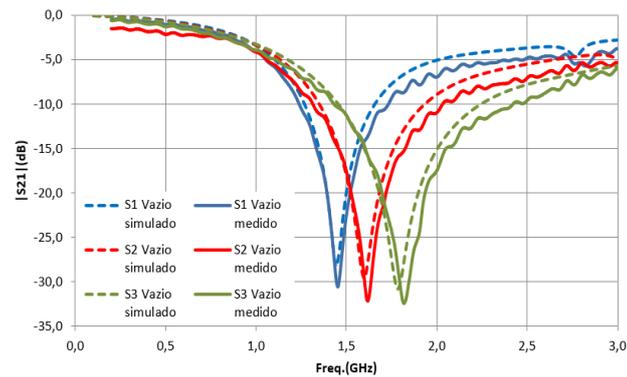


Figura 43 – Resposta em frequência para os sensores 1, 2 e 3 em vazio.

Tabela 4 - Valores das frequências de ressonância (F_{res}) calculadas, medidas e simuladas, dos sensores 1, 2 e 3 em vazio

	Freq. Res. Calculada (GHz)	Freq. Res. Medida (GHz)	Freq. Res. Simulada (GHz)	Dif. Freq. Res Med. x Calc. (%)
Sensor 1	1,56	1,453	1,44	6,85
Sensor 2	1,605	1,617	1,6	0,74
Sensor 3	1,653	1,816	1,78	9,86

Os resultados das medições em laboratório, baseados nas frequências de ressonância (F_{res}), não se mostraram viáveis em virtude da dificuldade de correlacionar a frequência de ressonância com as medidas de massa de água, como pode ser visto na Figura 44. A resposta dos sensores fica bastante prejudicada à medida que a massa de água aumenta. A partir do momento que a amostra de substrato de areia de construção atinge o ponto de 15% de massa de água, as frequências de ressonância não seguem mais uma ordem decrescente com o aumento da massa de água, levando a um erro de interpretação.

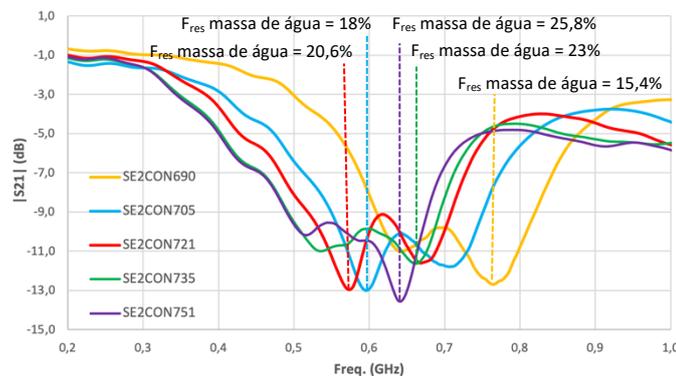


Figura 44 - Gráfico do coeficiente de transmissão ($|S21|(dB)$), em função da Frequência (GHz) para um substrato de areia de construção de massa(g) = 600, adicionando 2,5% de massa de água até atingir 25%, utilizando o sensor 2.

No entanto, as medidas em torno da frequência de atenuação de - 6 dB se mostraram bastantes promissoras e é com base nelas que serão apresentados os resultados de medição das três amostras de substrato de solo e dos três sensores a seguir.

4.4.1 Substrato de areia de construção

A seguir são mostrados os resultados de medição da umidade do substrato de areia de construção para os três sensores, Figuras 45-47, com as respectivas frequências de atenuação de - 6 dB. Foram medidos onze pontos desde a amostra totalmente seca até sua saturação, Tabelas 5-7.

4.4.1.1 Substrato de areia de construção - sensor 1

Como mostra o gráfico da Figura 45, pode ser observado que o sensor 1 aplicado ao substrato de areia de construção, apresenta um comportamento em degraus, chegando à saturação com 23,08% de massa de água. O sensor 1 foi sensível a todas as variações de massa de água, apresentando comportamento monotônico.

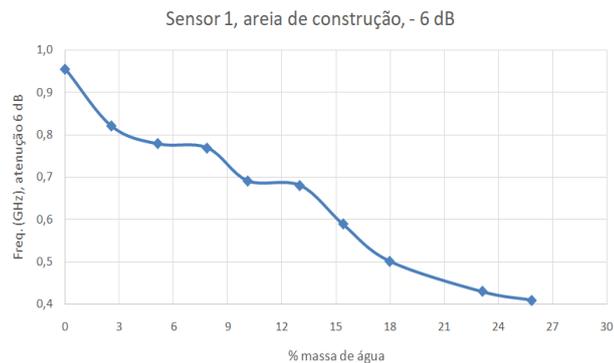


Figura 45 – Gráfico da frequência de atenuação (6 dB) em função da massa de água (%), substrato de areia de construção, sensor 1.

Tabela 5 – Valores de massa de água e frequência de atenuação - 6 dB da amostra de substrato de areia de construção utilizando o Sensor 1

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 1
585	0,00	0,9547
600	2,56	0,8203
615	5,13	0,7780
631	7,86	0,7686
644	10,09	0,6908
661	12,99	0,6797
675	15,38	0,5884

690	17,95	0,5013
720	23,08	0,4295
736	25,81	0,4087

4.4.1.2 Substrato de areia de construção - sensor 2

Como mostra o gráfico da Figura 46, pode ser observado que o sensor 2 aplicado ao substrato de areia de construção, apresenta variação próxima da linearidade, chegando à saturação com 23,08% de massa de água. O sensor 2 foi sensível a todas as variações de massa de água, apresentando comportamento monotônico.

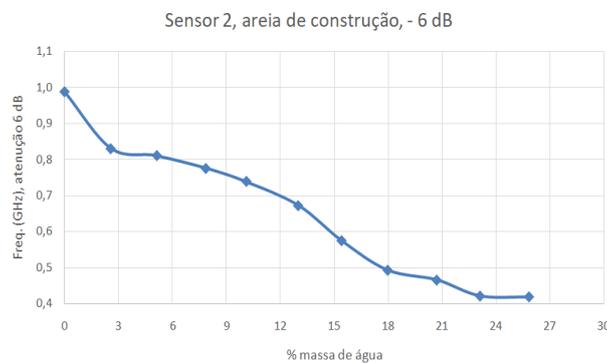


Figura 46 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor 2.

Tabela 6 – Valores de massa de água e frequência de atenuação - 6 dB da amostra de substrato de areia de construção utilizando o Sensor 2

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 2
585	0,00	0,9871
600	2,56	0,8301
615	5,13	0,8099
631	7,86	0,7751
644	10,09	0,7387
661	12,99	0,6717
675	15,38	0,5743
690	17,95	0,4922
706	20,68	0,4648
720	23,08	0,4211
736	25,81	0,4180

4.4.1.3 Substrato de areia de construção - sensor 3

Como mostra o gráfico da Figura 47, pode ser observado que o sensor 3 aplicado ao substrato de areia de construção, apresenta variação próxima da linearidade, chegando à

saturação com 23,08% de massa de água. O sensor 3 foi sensível a todas as variações de massa de água, apresentando comportamento monotônico.

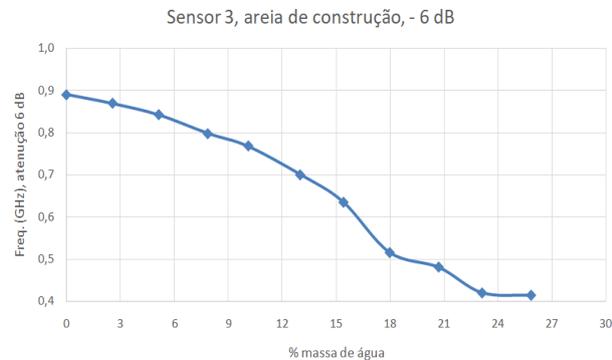


Figura 47 - Gráfico de massa de água(g) x Frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor 3.

Tabela 7 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção utilizando o sensor 3

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 3
585	0,00	0,88923
600	2,56	0,86856
615	5,13	0,84203
631	7,86	0,79712
644	10,09	0,76756
661	12,99	0,70000
675	15,38	0,63520
690	17,95	0,51565
706	20,68	0,48025
720	23,08	0,41977
736	25,81	0,41308

4.4.2 Substrato de areia do mar

A seguir são mostrados os resultados da medição de umidade da amostra de substrato de areia do mar para os três sensores, Figuras 48-50, com as respectivas frequências de atenuação de - 6 dB. Foram medidos doze pontos desde a amostra totalmente seca até sua saturação, Tabelas 8-10.

4.4.2.1 Substrato de areia do mar - sensor 1

Como mostra o gráfico da Figura 48, pode ser observado que o sensor 1 aplicado ao substrato de areia do mar, apresenta variação pouco linear, chegando à saturação com 25,64 %

de massa de água. O sensor 1 foi sensível a todas as variações de massa de água, mas não apresentou comportamento monotônico.

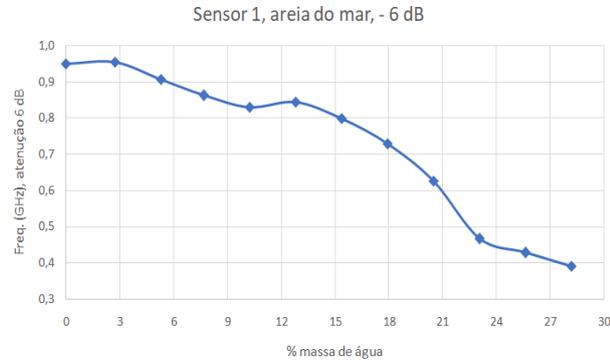


Figura 48 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação(6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 1

Tabela 8 – Valores de massa de água e frequência de atenuação - 6 dB da amostra de substrato de areia do mar utilizando o Sensor 1

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 1
585	0,00	0,94975
601	2,74	0,95423
616	5,30	0,90637
630	7,69	0,86244
645	10,26	0,82917
660	12,82	0,84432
675	15,38	0,79892
690	17,95	0,72991
705	20,51	0,62635
720	23,08	0,46705
735	25,64	0,42877
750	28,21	0,39070

4.4.2.2 Substrato de areia do mar - sensor 2

Como mostra o gráfico da Figura 49, pode ser observado que o sensor 2 aplicado ao substrato de areia do mar, apresenta variação linear até o ponto de 20,51% de massa de água, ocorrendo uma variação abrupta após este ponto. A saturação é atingida com 25,64% de massa de água. O sensor 2 foi sensível a todas as variações de massa de água, e apresentou comportamento monotônico.

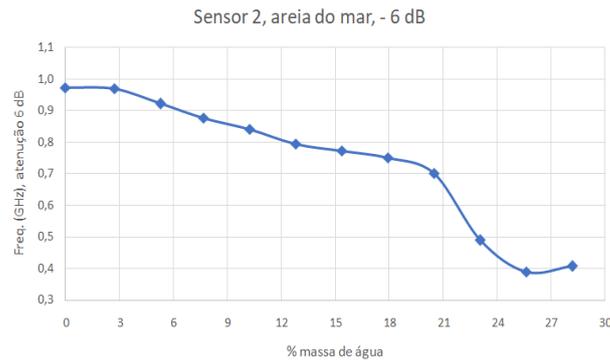


Figura 49 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 2

Tabela 9 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 2

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 2
585	0,00	0,97333
601	2,74	0,96946
616	5,30	0,92239
630	7,69	0,87735
645	10,26	0,84178
660	12,82	0,79428
675	15,38	0,77288
690	17,95	0,75127
705	20,51	0,70077
720	23,08	0,48938
735	25,64	0,39006
750	28,21	0,40742

4.4.2.3 Substrato de areia do mar - sensor 3

Como mostra o gráfico da Figura 50, pode ser observado que o sensor 3 aplicado ao substrato de areia do mar, apresenta variação aproximadamente linear até o ponto de 20,51% de massa de água, ocorrendo uma variação abrupta após este ponto. A saturação é atingida com 25,64% de massa de água. O sensor 3 foi sensível a todas as variações de massa de água, mas não apresentou comportamento monotônico.

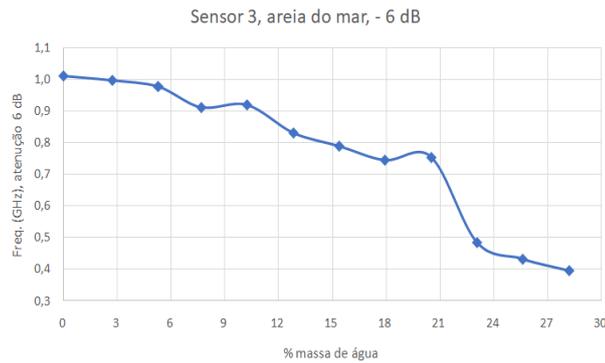


Figura 50 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 3

Tabela 10 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando o sensor 3

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 3
585	0,00	1,01111
601	2,74	0,99725
616	5,30	0,97691
630	7,69	0,91173
645	10,26	0,91921
660	12,82	0,83148
675	15,38	0,78957
690	17,95	0,74373
705	20,51	0,75411
720	23,08	0,48396
735	25,64	0,43245
750	28,21	0,39672

4.4.3 Substrato de terra de jardim

A seguir são mostrados os resultados da medição de umidade da amostra de substrato de terra de jardim para os três sensores, Figuras 51-53, com as respectivas frequências de atenuação de - 6 dB. Foram medidos onze pontos desde a amostra totalmente seca até sua saturação, Tabelas 11-13.

4.4.3.1 Substrato de terra de jardim – sensor 1

Como mostra o gráfico da Figura 51, pode ser observado que o sensor 1 aplicado ao substrato de terra de jardim, apresenta variação próxima a linearidade até o ponto de 22,39% de massa de água, ocorrendo uma aceleração na variação da frequência de - 6 dB em função da massa de água a partir deste ponto. A saturação é atingida com 40,6% de massa de água. O sensor

1 foi sensível a todas as variações de massa de água, mas não apresentou comportamento monotônico.

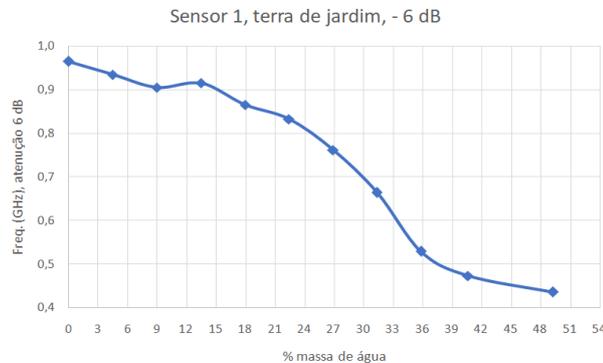


Figura 51 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 1

Tabela 11 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o Sensor 1

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 1
335	0,00	0,96447
350	4,48	0,93403
365	8,96	0,90529
380	13,43	0,91511
395	17,91	0,86500
410	22,39	0,83229
425	26,87	0,76212
440	31,34	0,66409
455	35,82	0,52975
471	40,60	0,47329
500	49,25	0,43622

4.4.3.2 Substrato de terra de jardim – sensor 2

Como mostra o gráfico da Figura 52, pode ser observado que o sensor 2 aplicado ao substrato de terra de jardim, apresenta variação praticamente linear até o ponto de 26,87% de massa de água, ocorrendo uma variação abrupta a partir deste ponto. A saturação é atingida no ponto de 40,6% de massa de água. O sensor 2 foi sensível a todas as variações de massa de água, mas não apresentou comportamento monotônico.

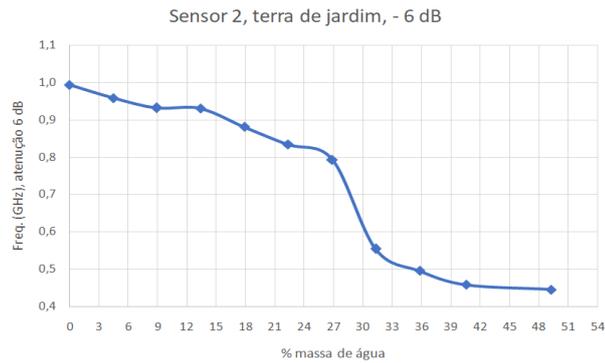


Figura 52 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 2.

Tabela 12 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 2

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 2
335	0,00	0,99446
350	4,48	0,95855
365	8,96	0,93209
380	13,43	0,93066
395	17,91	0,88153
410	22,39	0,83421
425	26,87	0,79374
440	31,34	0,55396
455	35,82	0,49530
471	40,60	0,45801
500	49,25	0,44456

4.4.3.3 Substrato de terra de jardim – sensor 3

Como mostra o gráfico da Figura 53, pode ser observado que o sensor 3 aplicado ao substrato de terra de jardim, apresenta variação praticamente linear até o ponto de 22,39% de massa de água, ocorrendo uma aceleração na variação da frequência de – 6 dB em função da massa de água a partir deste ponto. A saturação é atingida no ponto de 40,6% de massa de água. O sensor 3 foi sensível a todas as variações de massa de água, mas não apresentou comportamento monotônico.

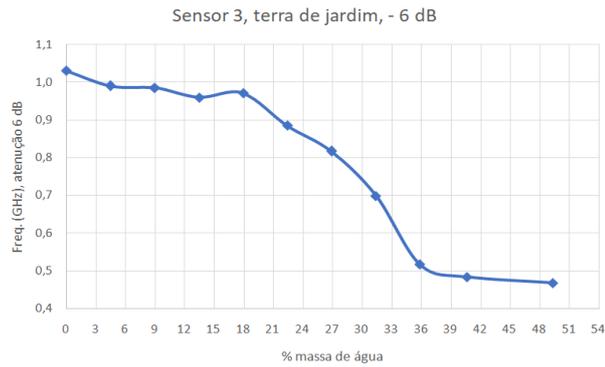


Figura 53. Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 3.

Tabela 13 – Valores de massa de água(g) e frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando o sensor 3

Massa total	% massa de água	Freq. (GHz), - 6 dB - Sensor 3
335	0,00	1,03034
350	4,48	0,99014
365	8,96	0,98514
380	13,43	0,95982
395	17,91	0,97087
410	22,39	0,88536
425	26,87	0,81706
440	31,34	0,69888
455	35,82	0,51716
471	40,60	0,48444
500	49,25	0,46777

4.5 Comparativo entre sensores

A seguir são realizadas comparações entre os sensores, Figuras 54-57, para verificar qual dos três forneceu resultados mais eficientes, apresentando comportamento linear e uma curva monotônica.

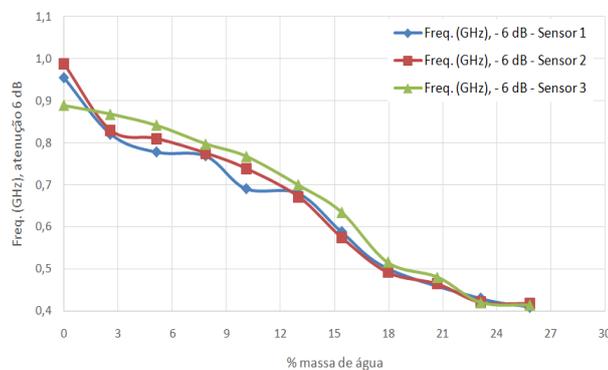


Figura 54 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia de construção. utilizando os sensores 1, 2 e 3.

Na Figura 54, é possível verificar semelhança no comportamento dos três sensores para a amostra de substrato de areia de construção. Ou seja, independente das dimensões do sensor, o mesmo foi capaz de detectar as variações de massa de água na amostra de substrato de solo. Apesar disso, o sensor que melhor se comportou na amostra de substrato de areia de construção foi o sensor 2 por apresentar comportamento mais próximo da linearidade e apresentar uma curva monotônica.

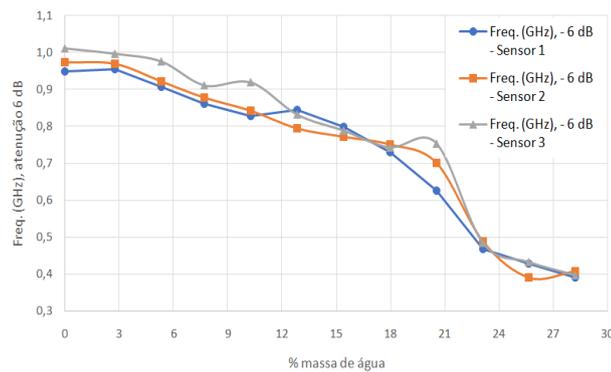


Figura 55 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de areia do mar utilizando os sensores 1, 2 e 3.

Na Figura 55, é possível verificar semelhança no comportamento dos três sensores para a amostra de substrato de areia do mar. Ou seja, independente das dimensões do sensor, o mesmo foi capaz de detectar as variações de massa de água na amostra de substrato de solo. Apesar disso, o sensor que melhor se comportou na amostra de substrato de areia do mar foi o sensor 2 por apresentar comportamento mais próximo da linearidade e apresentar uma curva monotônica.

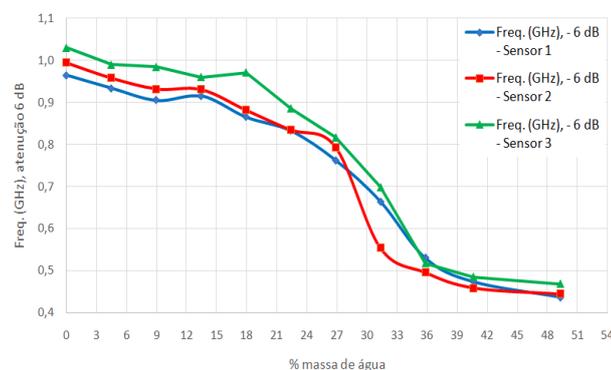


Figura 56 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) da amostra de substrato de terra de jardim utilizando os sensores 1, 2 e 3.

Na Figura 56, é possível verificar semelhança no comportamento dos três sensores para a amostra de substrato de terra de jardim. Ou seja, independente das dimensões do sensor, o mesmo foi capaz de detectar as variações de massa de água na amostra de substrato de solo.

Apesar disso, o sensor que melhor se comportou na amostra de substrato de terra de jardim foi o sensor 2, por apresentar o comportamento mais linear até o ponto de 27,86% de massa de água, como também, por ter sido o que apresentou uma curva monotônica.

Apesar do sensor 2 ter apresentado o melhor resultado entre os três sensores, isso não quer dizer que os demais não sejam viáveis. A depender da escolha de quantos níveis de umidade se pretende ler e a partir de qual nível de umidade se pretende tomar alguma ação de irrigação, os sensores 1 e 3 podem funcionar perfeitamente.

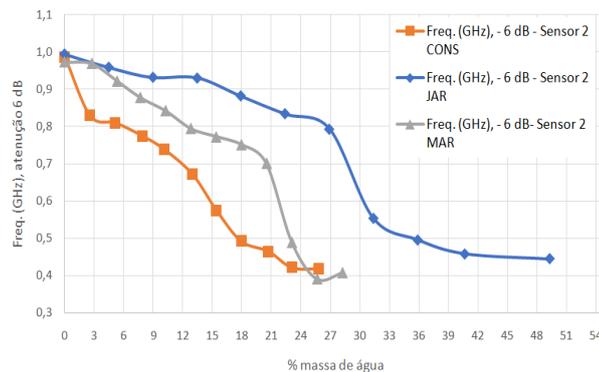


Figura 57 - Gráfico de massa de água(g) x frequência de atenuação (6 dB) dos três substratos de solo utilizando o sensor 2.

Na Figura 57, são apresentadas as curvas de massa de água x frequência de atenuação de - 6 dB dos três substratos de solo utilizando o sensor 2. Um ponto de destaque aqui é a proximidade dos valores das frequências de atenuação de - 6 dB para os três tipos de substratos de solo quando os mesmos estão totalmente secos, indicando que a composição do substrato em si, altera bem menos a resposta em frequência do que a massa de água no solo.

Por outro lado, o tipo de substrato parece interferir nas curvas à medida em que o teor de água aumenta. A água retida pela massa do substrato do solo interage menos com o campo eletromagnético do sensor, fazendo com que a frequência de atenuação de - 6 dB aumente. Por outro lado, a água que o solo não consegue mais reter se acumula nos poros maiores do solo e responsáveis pela sua drenagem, interagindo mais com o campo eletromagnético do sensor, fazendo a frequência de atenuação de - 6 dB diminuir.

As medidas do sensor de umidade apresentadas no gráfico da Figura 57, mostram que o substrato de terra de jardim tem uma maior capacidade de reter umidade, por possuir matéria orgânica em sua composição. A matéria orgânica possui maior superfície específica, o que aumenta a capacidade de retenção de água pelo substrato. Também melhora a agregação do solo, aumentando a porosidade do solo, incluindo os poros menores que ocorrem no interior dos agregados (especialmente em solos com mais argila e mais bem estruturados) e os poros maiores,

responsáveis pela percolação de água no solo. De modo contrário, os substratos arenosos possuem elevada presença de poros grandes de drenagem e uma reduzida capacidade de retenção de água pela sua textura mais grosseira, que apresenta menor superfície específica para a interação solo-água. Há, ainda, que se considerar que a dinâmica de água no solo saturado difere da dinâmica de água presente em solos não saturados, interferindo na infiltração, redistribuição e evaporação de água no solo [33], o que deve ser considerado para a análise dos resultados obtidos no presente estudo. O substrato de areia do mar tem maior capacidade de reter umidade do que o substrato de areia de construção, por conter sal e este ter uma forte força de atração com as moléculas de água.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

Neste trabalho foram desenvolvidos sensores de umidade do solo DGS baseados na geometria matrioska com anéis quadrados na faixa de 0,3 a 1,1 GHz. Inicialmente, foi realizado um estudo sobre os sensores de umidade do solo mais comuns no mercado, seus princípios básicos, classificações e características. As principais classes de solo do Brasil também foram descritas bem como suas características que influenciam a retenção de umidade. Foi realizada revisão de trabalhos anteriores sobre as estruturas com defeito no plano terra, DGS, bem como foi descrita a geometria matrioska em conjunto com as equações iniciais de projeto.

Três sensores de umidade do solo utilizando DGS baseados na geometria matrioska foram projetados, fabricados e caracterizados numericamente e experimentalmente. O sensor 1 com a espessura do anel matrioska de 1mm, o sensor 2 com 2 mm e o sensor 3 com 3 mm. Durante as simulações e medições em laboratório, os sensores projetados apresentaram divergências entre os resultados simulados e medidos, talvez devido a limitação do software em simular a interação do campo eletromagnético do sensor com um MUT não homogêneo. O ANSYS Designer 8.0 foi utilizado nas simulações e na obtenção dos resultados numéricos. Para a realização dos experimentos, foi utilizado o analisador de rede E5071C pertencente ao laboratório de medidas em telecomunicações do IFPB.

Em relação aos três sensores projetados e fabricados, seus resultados numéricos foram satisfatórios. Já os resultados experimentais não se mostraram viáveis para a correlação da taxa de massa de água na amostra de substrato de solo com a frequência de ressonância. Entretanto, foi possível estabelecer uma boa correlação entre a taxa de massa de água na amostra de substrato de solo e a frequência de atenuação de - 6 dB, concluindo que os sensores DGS matrioska, podem ser utilizados com sucesso como sensores de umidade do solo. Adicionalmente, os dados experimentais apontam que pode ser utilizado um sensor específico para cada tipo de solo, escolhendo aquele com maior linearidade e que seja monotônico em sua resposta. Baixo custo, maior resolução e tamanho reduzido são os principais atrativos dos sensores de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska.

5.2 Sugestões e continuidade dos trabalhos

Em trabalhos futuros, poderá ser explorada a construção de sensores com ressonadores matrioska em outra faixa de frequência, podendo reduzir ainda mais o tamanho do sensor.

Também poderão ser realizados estudos com a utilização dos sensores DGS matrioska incluindo outras medições a fim de correlacionar o CC (capacidade de campo) e o PMP (ponto

de murcha permanente). Outra aplicação que pode ser investigada é a utilização dos sensores DGS matroska para identificação de tipos de solo.

6 REFERÊNCIAS

- [1] M. Hardie, “Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture,” *Sensors*, 2020, no. 23, 6934. [doi:10.3390/s20236934](https://doi.org/10.3390/s20236934)
- [2] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. WORLD AGRICULTURE: TOWARDS 2015/2030 AN FAO PERSPECTIVE. Bruinsma, J. (Ed.). 2003. Earthscan Publications Ltd. Londres. Disponível em <<https://www.fao.org/3/y4252e/y4252e.pdf>>. Acesso em 07/07/2023.
- [3] FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. THE STATE OF THE WORLD’S LAND AND WATER RESOURCES FOR FOOD AND AGRICULTURE. 2021. Synthesis Report 2021. <<https://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf>>. Acesso em 07/07/2023.
- [4] GRIZZETTI, B.; LANZANOVA, D.; LIQUETE, C.; REYNAUD, A.; CARDOSO, A.C. Assessing water ecosystem services for water resource management. ENVIRONMENTAL SCIENCE & POLICY, 2016. Vol. 61. Págs. 194-203.
- [5] VIANA, J.H.M.; TEIXEIRA, W.G.; DONAGEMMA, G.K. Umidade atual. In: EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Paulo César Teixeira et al. (Eds.). Capítulo 2. Págs. 28-30. 3ª. ed. Brasília, DF. Embrapa, 2017. 574 p.: il. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>>. Acesso em 07/07/2023.
- [6] BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de Irrigação**. Viçosa, Ed. UFV. 2006. 625 p. il.
- [7] BASSOI, L. H.; SOARES, J. M. Relação solo-água-plantas. In: ROCHA, E. M. de M.; DRUMOND, M. A. (Ed.). Fruticultura irrigada: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. Págs. 27-35. Disponível em <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/896999>>. Acesso em 07/07/2023.
- [8] EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Humberto Gonçalves dos Santos et al. 5ª ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.: il. Disponível em <<https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>>. Acesso em 06/07/23.
- [9] EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. SANTOS, H.G. et al. (Eds.). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 67 p. (Documentos / Embrapa Solos, 130). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/123772/1/DOC-130-O-novo-mapa-de-solos-do-Brasil.pdf>>. Acesso em 06/07/2023.

- [10] Jaime Lloret, Jose M. Jimenez, Laura Garcia, Sandra Sendra, “A Wireless Sensor Network Deployment for Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture,” *Sensors*, 2021, no. 21, 7243. doi:10.3390/s21217243
- [11] Sensor de umidade do solo, modelo S-SMC-M005. Disponível em: < <https://sigmasensors.com.br/produtos/sensor-de-umidade-do-solo-plug-and-play/>>. Acesso em 11 de Maio de 2023.
- [12] Sensor de umidade do solo para arduíno, modelo SC05. Disponível em: < [https://www.casadarobotica.com/sensores-modulos/sensores/umidade/sensor-de-umidade-de-solo-capacitivo-para-arduino-jumper?parceiro=3259&gclid=CjwKCAjwx_eiBhBGEiwA15gLN9IBN5jZxo3Jxr5_fmONII1UcOEL6ZjHZOaHszwfoPyPZwKZKO5f62hoCkRsQAvD_BwE//](https://www.casadarobotica.com/sensores-modulos/sensores/umidade/sensor-de-umidade-de-solo-capacitivo-para-arduino-jumper?parceiro=3259&gclid=CjwKCAjwx_eiBhBGEiwA15gLN9IBN5jZxo3Jxr5_fmONII1UcOEL6ZjHZOaHszwfoPyPZwKZKO5f62hoCkRsQAvD_BwE//>)>. Acesso em 11 de Maio de 2023.
- [13] Sensor de umidade do solo, modelo HFM2030. Disponível em: < <https://www.falker.com.br/br/hidrofarm/>>. Acesso em 11 de Maio de 2023.
- [14] Glória, André, Carolina Dionisio, Gonçalo Simões, João Cardoso, and Pedro Sebastião. 2020. "Water Management for Sustainable Irrigation Systems Using Internet-of-Things" *Sensors* 20, no. 5: 1402. <https://doi.org/10.3390/s20051402>.
- [15] Fangming Deng, Kaiyun Wen, PengqiZuo , Xiang Wu, “Novel soil environment monitoring system based on RFID sensor and LoRa,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 169, February 2020, 105169.
- [16] Chia Yew Lee, Ee Meng Cheng, Kok Yeow You, Li Ling You, Sheau Huey Chen Chong, Yi Lung Then, Zulkifly Abbas, “Precise Moisture Monitoring for Various Soil Types Using Handheld Microwave-Sensor Meter,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 7, July 2013, pp. 2563—2570.
- [17] Bonny Mgawe, Hoang Nam Dao, Monai Krairiksh, Phaophak Sirisuk, Prapan Leekul, Twahir Kazema, “Simple and Effective Design Concept for Constructing In-Situ Soil Dielectric Property Sensorwith Dual Low-Cost COTS Microwave Modules,” *IEEE Access*, vol. 10, May 26, 2022, 54516—54524.
doi: 10.1109/ACCESS.2022.3175845
- [18] J. S. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF Microwave Applications*, John Wiley, New York, 2001.
- [19] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd Edition, New York, USA: J. Wiley and Sons, Inc; 2005.
- [20] Jonathan Muñoz-Enano, Marta Gil Paris Vélez, and Ferran Martín, “Planar Microwave Resonant Sensors: A Review and Recent Developments,” *Applied Sciences*, vol.10, no. 7: 2615. doi.org/10.3390/app10072615

- [21] D. F. Mamedes; A. Gomes Neto; J. Bornemann; J. C. e Silva; F. A. T Abreu. "A Sensor Using a Matryoshka Geometry Defected Ground Structure," In: 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2022, Madrid.
- [22] A. Gomes Neto, J. C. e Silva, I. B. G. Coutinho, S. S. Camilo Filho, D. A. Santos, B. L. C. de Albuquerque, "A Defected Ground Structure Based on Matryoshka Geometry", *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 21, no. 2, June 2022. doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2256115
- [23] Binod Kumar Kanaujia, Mukesh Kumar Khandelwal and Sachin Kumar, "Defected Ground Structure: Fundamentals, Analysis, and Applications in Modern Wireless Trends", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2017, Article ID 2018527, 22 pages, 2017. doi: 10.1155/2017/2018527
- [24] Li Hong Weng, Yu-Chun Guo, Xiao-Wei Shi, and Xiao-Qun Chen, "An Overview on Defected Ground Structure," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 7, pp. 173-189, 2008. doi:10.2528/PIERB08031401.
- [25] Breed, Gary. (2008). "An Introduction to Defected Ground Structures in Microstrip Circuits". *High Freq Electron*. 7.
- [26] A. Gomes Neto, D. F. Mamedes, J. C. E. Silva and T. R. de Sousa, "A polarization independent frequency selective surface based on the matryoshka geometry", *IEEE/MTT-S Int. Microw. Symp. Dig. Philadelphia, USA*, 2018, pp. 999-1002.
- [27] A. Flor Neto, A. Gomes Neto, J. C. e Silva, J. N. de Carvalho and M.C. Andrade, "Filtros em microfita utilizando a geometria anéis Matrioska circulares," in portuguese, in: 18o SBMO/13o CBMag, 2018, Santa Rita do Sapucaí, MG., pp. 366-370.
- [28] A. Gomes Neto, A. Gonçalves da Costa, C. da Silva Moreira, I. B. G. Coutinho and T. R. de Sousa, "A new planar sensor based on the matryoshka microstrip resonator," *Proc. SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. (IMOC)*, Aguas de Lindoia, Brazil, Aug. 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMOC.2017.8121074.
- [29] Software Appcad. Disponível em: < <http://www.hp.woodshot.com/>>. Acesso em 11 de Mai. de 2023.
- [30] Irênio Amaro da Silva, Variabilidade da Constante Dielétrica do Solo em Função de sua Umidade e Classe, Dissertação de Mestrado, UFPB, Campina Grande, PB, Brasil, 2003.
- [31] Terra de Jardim da Allgarden. Disponível em: <https://www.allgardenholambra.com.br/plantio-replantio/>. Acesso em 11 de Mai. De 2023.

- [32] Peneira granulométrica da Contenco. Disponível em: <https://contenco.com.br/produto/peneiras-granulometricas-redondas//>. Acesso em 11 de Mai. De 2023.
- [33] PREVEDELLO, C.L. Física do solo com problemas resolvidos. Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo. SAEAFS. Curitiba, 1996. 446 p. il.