



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DO
CEARÁ**

**PRÓ-REITORIA DE ENSINO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES-PPGET**

THIAGO PEREIRA DE ARAÚJO

**ESTUDO DE UM SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO PARA USO EM
SOLOS AGRICULTÁVEIS**

FORTALEZA

2020

THIAGO PEREIRA DE ARAÚJO

**ESTUDO DE UM SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO PARA USO EM
SOLOS AGRICULTÁVEIS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de
Telecomunicações do Instituto
Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do
Ceará, como requisito parcial a
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia
de Telecomunicações

Orientador: Prof. Dr. Daniel Xavier
Gouveia.

Co-Orientador: Prof. Dr. Antônio
Sérgio Bezerra Sombra

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A658e Araújo, Thiago Pereira de.
ESTUDO DE UM SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO PARA USO EM SOLOS
AGRICULTÁVEIS / Thiago Pereira de Araújo. - 2020.
71 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de
Telecomunicações, Campus Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia.

Coorientação: Prof. Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra.

1. Sensor de umidade. 2. tecnologia. 3. agricultura.. I. Título.

CDD 621.382

THIAGO PEREIRA DE ARAÚJO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, como requisito parcial a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Aprovada em: 18/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Daniel Xavier Gouveia (Orientador)
Instituto Federal do Ceará-IFCE

Dr. Antônio Sérgio Bezerra Sombra (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará-UFC

Dr. João Paulo Costa do Nascimento
Instituto Federal do Ceará-IFCE

Dr. José Eduardo de Vasconcelos Moraes
Universidade Federal do Ceará-UFC

FORTALEZA

2020

AGRADECIMENTOS

Ao professor Daniel Xavier Gouveia, por orientar de forma eficiente e segura e me ajudar em todos os momentos do mestrado.

Ao Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia, pelo apoio sempre concedido.

Aos bolsistas do laboratório da fotonica, pela a disponibilidade em ajudar.

Ao professor Flávio, pela amizade e ajuda nos momentos em que mais precisei.

À minha esposa Jaiane , pelo apoio e incentivo que foram essências durante o mestrado.

À minha mãe, que me trouxe ao mundo e sempre me incentivou.

À minha vó, por me ajudar em todos os momentos da minha vida.

Aos meus primos, Weine, Micaele Ronne e Ronéria.

Aos meus tios, Pereira e Ailton.

Ao meu sobrinho Jair Gabriel Félix

Aos amigos Lucas, Pedro, Tavares, George, Aldenira, Valdir, Eloy, Wilton.

“O senhor é o meu pastor nada me
faltará”

RESUMO

A água é o líquido indispensável para a desenvolvimento das plantas dentro do processo de produção agrícola. Desse modo, a busca por tecnologias de monitoramento da umidade do solo dentro da atividade agrícola, torna-se assim, uma ferramenta importante para elevar a eficiência hídrica no manejo agrícola. Neste estudo, projetou-se o sensor de umidade capacitivo transistorizado (SUCT) e o sensor de umidade capacitivo integrado (SUCI) estes sensores passaram por ensaios de umidade realizados em laboratório a temperatura de 20° C e os seus resultados foram comparados com os obtidos em experimentos com os sensores comerciais de umidade, capacitivo v1.2 e resistivo HL-69. Ademais o sensor SUCT demonstrou bom coeficiente de linearidade em todos os ensaios com granulometria grossa, média, fina e misturada enquanto o SUCI apresentou comportamento satisfatório para aplicações que mensuram a umidade com predominância de solo com granulometria grossa.

Palavras-chave: Sensor de umidade, tecnologia, agricultura.

ABSTRACT

Water is the essential liquid for the development of plants within the agricultural production process. In this way, the search for technologies for monitoring soil moisture within agricultural activity thus becomes an important tool to increase water efficiency in agricultural management. In this study, the transistorized capacitive humidity sensor (SUCT) and the integrated capacitive humidity sensor (SUCI) were designed. These sensors underwent humidity tests performed in the laboratory at a temperature of 20° C and their results were compared with those obtained in experiments with commercial humidity sensors, capacitive v1.2 and resistive HL-69. In addition, the SUCT sensor demonstrated a good linearity coefficient in all tests with coarse, medium, fine and mixed granulometry, while SUCI presented satisfactory behavior for applications that measure moisture with predominantly coarse-grained soil.

Keywords: Humidity sensor, technology, agriculture.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Capacitor de hastes Cilíndricas	9
Figura 2	Circuito RC série	12
Figura 3	Esquema elétrico do sensor SUCT	16
Figura 4	Materiais utilizado no ensaio do SUCT	17
Figura 5	Porta amostra do sensor SUCI	17
Figura 6	Materiais elétricos e instrumentos	19
Figura 7	Esquema eletrônico do sensor SUCI	20
Figura 8	Conjunto de materiais do conjunto SUCI	20
Figura 9	Fluxograma operacional do software aplicado no SUCI	21
Figura 10	Sensores comerciais	21
Figura 11	Ensaio conjunto SUCI	26
Figura 12	Ensaio com sensor modelo v1.2	27
Figura 13	Ensaio com sensor modelo HL-69	28
Figura 14	Ensaio de escolha da frequência do SUCT	29
Figura 15	Ensaio sensor SUCT em areia fina	30
Figura 16	Ensaio sensor SUCT areia média	31
Figura 17	Ensaio sensor SUCT em areia grossa	31
Figura 18	Ensaio sensor SUCT em areia misturada	32
Figura 19	Ensaio do sensor SUCI com areia fina em diferentes frequências	34
Figura 20	Ensaio do sensor SUCI com areia média em diferentes frequências	35

Figura 21	Ensaio do sensor SUCI com areia grossa em diferentes frequências	36
Figura 22	Características do detector de potência LTC5507	37
Figura 23	Ensaio conjunto SUCI em areia fina	38
Figura 24	Ensaio conjunto SUCI em areia média	39
Figura 25	Ensaio conjunto SUCI areia grossa	40
Figura 26	Ensaio conjunto SUCI em areia misturada	40
Figura 27	Ensaio do sensor capacitivo v1.2	42
Figura 28	Ensaio sensor resistivo HL-69	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Bandas do espectro eletromagnético	4
Tabela 2	Cálculo da capacitância em função das dimensões da sonda	11
Tabela 3	Critérios de projeto	13
Tabela 4	Dimensões do SUCI	18
Tabela 5	Classificação dos tipos de areia em função do tamanho do grão	18
Tabela 6	Especificações técnicas dos sensor v1.2 e HL-69	22
Tabela 7	Equações lineares e coeficiente de determinação dentro da faixa de sensibilidade do SUCT	29
Tabela 8	Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor SUCI grão fino	34
Tabela 9	Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor SUCI grão médio	35
Tabela 10	Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor SUCI grão grosso	36
Tabela 11	Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor capacitivo v1.2	42
Tabela 12	Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor resistivo HL-69	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SUCI	Sensor de umidade capacitivo integrado
SUCT	Sensor de umidade capacitivo transistorizado
FDR	Reflectometria no domínio da frequência
GHz	Giga Hetz
GPR	radar de penetração no solo
IFCE	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará
LMO	Laboratório de Máquinas Operatrizes
LtQ	Laboratório de Tecnologia Química
MeV	Mega elétrons volts
MHz	Mega Hertz
NMM	Medição da umidade por técnica de espalhamento de nêutrons
TDR	reflectometria no domínio do tempo
UFC	Universidade Federal do Ceará
L	Comprimento da haste
L1	Comprimento das hastes com dielétrico ar seco
L2	Comprimento das hastes com dielétrico de nylon
L3	Comprimento das hastes com dielétrico de areia
r	Raio da haste
d	Distância entre as hastes
$C_{T_{SOLO SECO}}$	Capacitância total do SUCI para solo seco
$C_{T_{SOLO SATURADO}}$	Capacitância total do SUCI para solo saturado

V_i	Tensão elétrica de entrada do SUCI
V_0	Tensão elétrica de saída do SUCI
I_t	Corrente elétrica total
R	Resistência elétrica
X_C	Reatância capacitiva
f	Frequência de trabalho
C	Capacitância

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_0	Permissividade no espaço livre, $8,854 \cdot 10^{-12}$ (F/m)
ϵ_1	Permissividade relativa do ar 1 (F/m)
ϵ_2	Permissividade relativa do naylon areia, 14 (F/m)
ϵ_3	Permissividade relativa da areia, 3 (F/m)
ϵ_4	Permissividade relativa do solo saturado com H ₂ O 80 (F/m)
π	Pi

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Objetivos específicos	2
1.3	Organização do trabalho	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	Classificações dos sinais	3
2.2	Materiais dielétricos	4
2.3	Tipos de polarização em dielétricos	5
2.4	Permissividade complexa	6
2.5	Capacitor de hastes cilíndricas	9
2.6	Técnica RC série	12
2.7	Técnicas de medição da umidade no solo	14
3	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	Materiais do sensor SUCT	15
3.2	Materiais do sensor SUCI	17
3.3	Ensaio de escolha da frequência do sensor SUCT	22
3.4	Método de ensaios com sensor SUCT	23
3.5	Método de escolha da frequência do sinal do SUCI	23
3.6	Sistemática dos ensaios com o conjunto (SUCI)	24
3.7	Métodos dos ensaios com sensores comerciais	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28

4.1	Ensaaios sensor SUCT	28
4.1.1	Definição da frequência do circuito SUCT	28
4.1.2	Areia fina	29
4.1.3	Areia média	30
4.1.4	Areia grossa	31
4.1.5	Areia misturada	32
4.2	Ensaaios sensor SUCI	32
4.2.1	Definição da frequência do circuito do conjunto SUCI	33
4.2.2	Ensaio conjunto sensor SUCI	37
4.4	Sensores comerciais	41
4.5	Discussão dos resultados	43
5	CONCLUSOES E TRABALHOS FUTUROS	45

1 INTRODUÇÃO

Todos os dias milhares de hectares de plantações são irrigadas no mundo para suprir a demanda de alimentos da população. Dentro de toda a cadeia produtiva de alimentos a água é o fluido essencial para o desenvolvimento de vegetais. Sabe-se que, os tecidos vegetais de plantas, hortaliças e frutas apresentarem de 90 a 95 por cento de H₂O para se tornarem metabolicamente ativos [1].

Alguns estudos apontam que nos próximos 30 anos aumentará a demanda de água para o consumo humano, além das mudanças das precipitações chuvosas provocado pelo aumento da temperatura do planeta [2]. A atividade agrícola irrigada a cada ano vem demonstrando a necessidade de se realizar pesquisas no desenvolvimento de tecnologias para monitorar a água dos mais diversos plantios. Espera-se que, o setor agrícola otimize o consumo de água dentro do processo produtivo, aumentando a eficiência hídrica e expandindo a produção sem aumentar a área de cultivo [3].

A aplicação de sensores capacitivos no monitoramento do conteúdo de água nos solos agricultáveis vem apresentando resultados satisfatórios [4]. Desta forma, o estudo de sensores como o apresentado neste trabalho é de potencial relevância para aplicações de projetos de agricultura de precisão, em região localizadas no semiárida do nordeste brasileiro que apresenta temperaturas altas, quadra chuvosa reduzida, precipitações em média anual entre 280mm e 800mm além de apresentar déficit hídrico nos seus reservatórios [5] .

OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Realizar estudos e pesquisa para o desenvolvimento de um sensor de umidade capacitivo (neste trabalho denominado de SUCI e SUCT). O mesmo foi desenvolvido e estudado na faixa de HF (5-19MHz), para ser aplicado na avaliação da umidade em solos de agricultura.

1.2 Objetivo específico

- Observar e estudar o desempenho dos sensores propostos, nas frequências de 5MHz, 10MHz, 15MHz e 19MHz;
- Verificar as possíveis influencia da granulometria do solo nas medições realizadas pelo sensor proposto em diferentes frequências;
- Determinar os melhores componentes a serem usados no sensor proposto (capacitâncias e resistores) com base em estudos da tecnologia de sensores capacitivos existentes e estudos próprios.
- Condicionar o sinal de RF do sensor para níveis compatíveis com o micro controlador utilizado.
- Coletar os dados do sensor em tempo real durante os ensaios;
- Elaborar uma avaliação comparativa entre os resultados dos sensores em estudo na pesquisa com os de sensores comerciais.

1.3 Organização do trabalho

Na abordagem do capítulo 1 são apresentados os motivos que levam ao desenvolvimento da pesquisa. No capítulo 2 é exposta a fundamentação teórica tendo como base estudos publicados em revistas indexadas, artigos de congresso, monografias, dissertações e teses. No capítulo 3 apresenta-se os materiais usados na pesquisa bem como os métodos utilizados na obtenção dos resultados do sensor proposto. No capítulo 4 apresentamos resultados e no capítulo 5 as discussões do estudo em sequência no capítulo 6 são exibidas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Classificações dos sinais

Na tabela 1 é apresentado o espectro de ondas eletromagnéticas de em função da frequência de acordo com as denominações da IUT. Assim como, os comprimentos de onda λ no espaço livre obtidos pela equação (2.1).

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Onde,

λ = Comprimento de onda em metros (m)

c = Velocidade no vácuo (3.10^8 m/s)

f = Frequência em (Hz)

Tabela 1- Bandas do Espectro eletromagnético

FREQUENCIA	BANDA	COMPRIMENTO
0-1 Hz	ULF	300Mm
1-3 KHz	ELF	100 Km
3-30 KHz	VLF	10 Km
30-300 KHz	LF	1 Km
0,3-3 MHz	MF	100m
3-30 MHz	HF	10m
30-300 MHz	VHF	1m
0,3-3GHz	UHF	10cm
3-30GHz	SHF	1cm
30-300 Hz	EHF	1 mm

Fonte: União Internacional de Telecomunicações. [6]

2.2 Materiais Dielétricos

Dielétricos, são materiais que não apresentam elétrons de condução (elétrons livres). Um dielétrico pode ser visto como uma coleção de dipolos elétricos $\mathbf{p}$. Ao ser aplicado um campo elétrico externo $\mathbf{E}$ sobre um dielétrico, os dipolos elétricos $\mathbf{p}$, (carregados com cargas positivas e negativas separadas entre si por uma distância infinitesimal $\mathbf{d}$ se reorientam na direção do campo $\mathbf{E}$. No interior do material dielétrico haverá um torque sobre os dipolos incrementais tendendo a orientar os mesmos na mesma direção do campo $\mathbf{E}$ aplicado [7] . Será então armazenada energia potencial na posição assumida pelo dipolo.

O momento dipolar incremental de cada dipolo elétrico do material dielétrico é definido na equação por [7].

$$d\mathbf{p}_i = Q\mathbf{l}_i \quad (2.2)$$

Sendo:

$d\mathbf{p}_i$ = momento dipolar incremental $d\mathbf{p}_i$

$\mathbf{l}_i$ = Distância incremental

Q = Magnitude da carga do dipolo

A fim de verificar a interação do campo $\mathbf{E}$ com o material devemos somar os efeitos individuais de todos os dipolos por unidade de volume, obtendo-se então o momento dipolar total do material, $\mathbf{p}_t$ por meio da equação 2.3 [7].

$$\mathbf{p}_t = \sum_{i=1}^{N_e \Delta V} d\mathbf{p}_i \quad (2.3)$$

O estado de polarização elétrica do material é então descrito pelo vetor de polarização $\mathbf{P}$ (eq. 2.4) .[7]

$$\mathbf{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\Delta V} \mathbf{p}_t \right) \quad (2.4)$$

Onde:

$\mathbf{P}$ =vetor polarização

$\mathbf{p}_t$ = momento dipolar total

N_e = número de dipolos elétricos

Δv = Volume incremental considerado

2.3 Tipos de polarização em dielétricos

Existem três mecanismos principais de formação da polarização elétrica em um material dielétrico: Polarização dipolar, Polarização iônica e Polarização eletrônica [8].

Na polarização dipolar, os dipolos incrementais permanentes estão desordenados no material, de maneira que o vetor de polarização $\mathbf{P}$ é nulo para $\mathbf{E}=0$. Com a aplicação de $\mathbf{E}$ os dipolos se orientam na sua direção de maneira

que **P** torna-se diferente de zero.

No processo de polarização iônica os íons positivos e negativos, apenas orientam-se ao interagirem com o campo elétrico externo **E**. Na polarização eletrônica ocorre o deslocamento do centro de cargas elétricas negativas eletrônicas em relação ao centro de cargas do núcleo [8]. Para todos os mecanismos de polarização citados os dipolos alinham-se no mesmo sentido do campo elétrico **E**.

2.4 Permissividade complexa

Ao aplicar um campo elétrico variável no tempo em um dielétrico em cada semi ciclo o dielétrico polariza-se na direção do campo, provocando assim, mudança na direção do vetor de polarização. Este fenômeno de rotação do dipolo tentando acompanhar a direção de **E** da origem a uma grandeza definida de permissividade complexa do material ϵ onde a parte real simbolizada ϵ' está relacionada com a capacidade do material armazenar energia potencial elétrica, enquanto o termo ϵ'' é a parte imaginária que está relacionada com as perdas no material durante o mecanismo de polarização em campo elétrico alternado.[9]

Para definir a permissividade complexa podemos fazer uma analogia do mecanismo de polarização de um átomo submetido a um campo harmônico no tempo com um sistema massa mola. Logo a força do sistema necessárias para movimentar uma carga negativa de massa m em relação a carga estacionária do núcleo, neste processo atua uma força de atrito de oposição a este movimento da carga que é força do amortecimento e de tensão da mola que pode ser representada pela a equação de segunda ordem (2.5).

$$\frac{d^2l}{dt^2}m + d\frac{dl}{dt} + sl = QE_0e^{j\omega t} \quad (2.5)$$

Observa-se que a representação do sistema massa mola do átomo definido na equação (2.5) tem a mesma resposta natural da corrente elétrica e da tensão de um circuito RLC série conforme representado na equação 2.6 e 2.7 dividindo os dois termos da equação (2.5) pela a constante m, observa-se que os termos do lado esquerdo estão associados pelas a ordem da equação diferencial com as respectivas forças: força de tempos de massa aceleração, força de velocidade dos tempos de amortecimento e força deslocamento dos tempos de mola. Enquanto os termos do lado direito representam força do campo harmônico no tempo aplicado. [9]

$$\frac{d^2 l}{dt^2} + 2\alpha \frac{dl}{dt} + \omega_0^2 l = \frac{Q}{m} E_0 e^{j\omega t} \quad (2.6)$$

Onde,

$$\alpha = \frac{d}{2m} \quad (2.6a)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{s}{m}} \quad (2.6b)$$

$$Q = \text{carga do dipolo} \quad (2.6c)$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2\alpha \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0 \quad (2.7)$$

Onde,

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (2.7a)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.7b)$$

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + 2\alpha \frac{dv}{dt} + \omega_0^2 v = 0 \quad (2.8)$$

Onde,

$$\alpha = \frac{1}{2RC} \quad (2.8a)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.8b)$$

Fazendo a análise em regime permanente das equações diferenciais de segunda ordem e aplicando seus resultados na equação (2.4) podemos definir permissividade complexa de um material pela equação (2.9).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{P}{E} = \varepsilon_0 + \frac{N_e \left(\frac{Q^2}{m} \right)}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega \left(\frac{d}{m} \right)} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.9)$$

Onde ,

ε = permissividade complexa do material

ε' = parte real da permissividade complexa

ε'' = parte imaginária da permissividade complexa

Dividindo a permissividade complexa pela a permissividade no vácuo obtém-se a permissividade relativa do material conforme a equação (2.10).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon' - j\varepsilon''}{\varepsilon_0} \quad (2.10)$$

2.5 Capacitor de hastes cilíndrica

Seu princípio de funcionamento é definido pelo fenômeno de polarização dielétrica dentro do material isolante (dielétrico) que ocorre quando é aplicado um campo elétrico **E** entre os eletrodos que ao passar pelo dielétrico provoca o alinhamento dos dipolos na direção do campo elétrico que dependendo do tipo de dielétrico acumula cargas contrárias nos eletrodos após a retirada do campo elétrico.

Outro fator que influencia no armazenamento de carga dos capacitores é o tipo de geometria dos eletrodos e a frequência do campo elétrico. Estes fatores podem modificar o fluxo do campo elétrico dentro do dielétrico. Portanto, a capacitância total do sensor de haste cilíndrica (SUCI), proposto neste estudo representado na figura 1 é desenvolvida a partir da equação (2.6) que é válida sistemas capacitivos em que a distância entre as hastes é muito maior que o raio da haste [10] .

Figura 1 – Capacitor de hastes cilíndricas



Fonte: Próprio autor.

$$C = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot L}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad (2.6)$$

Em suma, sabe-se que os capacitores configurados em paralelo a o calculo da capacitância total é definida pela a soma das capacitância dos capacitores. Portanto, definiu-se a equação (2.5) quando não tiver água na amostra de solo e a equação (2.6) que define o momento que todos os poros dos solo estão preenchidos com água.

$$C_{T_{SOLO\ SECO}} = \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_1}{\ln \frac{d}{r}} L_1 \right) + \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_2}{\ln \frac{d}{r}} L_2 \right) + \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_3}{\ln \frac{d}{r}} L_3 \right) \quad (2.5)$$

$$C_{T_{SOLO\ Saturado}} = \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_1}{\ln \frac{d}{r}} L_1 \right) + \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_2}{\ln \frac{d}{r}} L_2 \right) + \left(\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_4}{\ln \frac{d}{r}} L_3 \right) \quad (2.6)$$

Onde,

ϵ_0 = permissividade no espaço livre, igual a $8,854 \cdot 10^{-12}$ (F/m)

ϵ_1 = permissividade relativa do ar seco, igual a 3 (F/m)

ϵ_2 = permissividade relativa do naylon, igual a 14 (F/m)

ϵ_3 = permissividade relativa da areia seca, entre 2 a 5 (F/m)

ϵ_4 = permissividade relativa do solo saturado com H₂O, igual a 80 (F/m)

L_1 = comprimento da haste com dielétrico ar seco, em metros (m)

L_2 = comprimento da haste com dielétrico de naylon, em metros (m)

L_3 = comprimento da haste útil do capacitor variável, em metros (m)

d distância de separação das duas hastes (m)

r = raio da haste (m)

$C_{T\text{SOLO SECO}}$ = capacitância total com areia seca

$C_{T\text{SOLO SATURADO}}$ = capacitância total com areia encharcada com água

Logo na tabela 2 é demonstrado os valores das capacitâncias em todos os cenários de variações das dimensões da sonda com base na equação (2.5) e (2.6).

Tabela 2. Cálculo da capacitância em função das dimensões da sonda

Variação do raio da haste				
r (mm)	C (mm)	d (mm)	$C_{\text{solo-seco}}$ (pF)	$C_{\text{solo-saturado}}$ (pF)
1,5	52	22	3,59	46,143
2,5	52	22	4,43	56,982
4,	52	22	5,66	72,692
5	52	22	6,51	83,640
Variação do comprimento da haste				
22	82	22	3,80	62,71
22	72	22	3,69	54,42
22	52	22	3,59	46,14
22	42	22	3,49	37,85
22	32	22	3,38	29,57
Variação da distância entre as hastes				
1,5	52	30	3,22	41,36
1,5	52	22	3,59	46,14
1,5	52	10	5,08	65,32
1,5	52	5	8,01	102,93

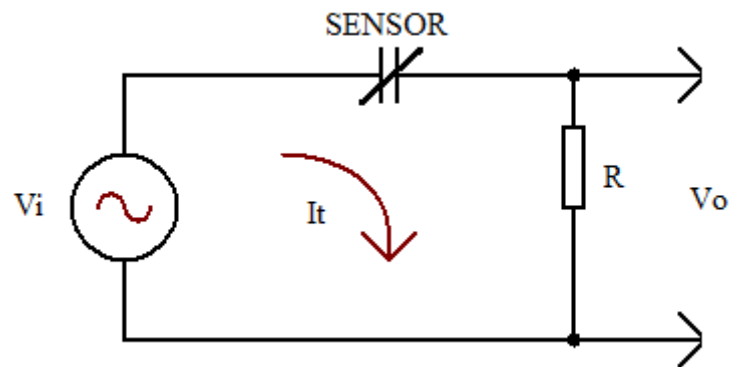
r : raio da haste. C : comprimento da haste no coletor. d : distância entre as hastes. $C_{\text{solo-seco}}$: capacitância solo seco. $C_{\text{solo-saturado}}$: capacitância solo saturado.

2.6 Técnica RC série

O capacitor do circuito da figura 2 representa um sensor capacitivo.

Sendo assim, ao aplicar um sinal de tensão senoidal no circuito RC série o capacitor apresenta uma reatância capacitiva inversamente proporcional a frequência elétrica do sinal de tensão que à circular no circuito provoca uma diferença de fase entre o sinal da fonte e o resistor [11]. Deste modo, ao variar percentual de água no solo colocado entre o sensor a permissividade complexa do solo sofre alterações, provocando assim, variações na impedância total do circuito elétrico que, podendo assim, relacionar esta mudança com a variação da umidade do solo por meio da diferença de fase entre o capacitor variável e o resistor [12].

Figura 2- Circuito RC série



Fonte: Próprio autor.

Portando, aplicando-se os critérios de projeto da tabela 3 e a lei de kirchhoff das tensões no circuito da figura 3 é extraído a equação do resistor usado para projetar uma relação linear do sinal de saída do sensor com a umidade contida na amostra.

$$x = [\text{equação (2.5)} : 0,45 * 10^{-12} : \text{equação(2.6)}] \quad (2.7)$$

$$X_C = \frac{1}{2 * \pi * f * [x]} \quad (2.8)$$

$$I_t = \frac{V_0}{R} \quad (2.9)$$

$$I_t = \frac{V_I}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \quad (2.10)$$

$$R = V_0 * \frac{\sqrt{R^2 + X_C^2}}{V_I} \quad (2.11)$$

Onde,

x = vetor de variação de umidade no solo

V_i = Tensão de entrada (V);

V_0 = Tensão de saída (V);

I_t = Corrente total (A);

R = resistência elétrica (Ω);

X_c = reatância capacitiva (Ω);

f = frequência de trabalho (Hz);

C = capacitância (F)

Tabela 3- critérios de projeto

Tensão de entrada

Tensão de saída

Capacitância de solo seco

Capacitância de solo saturado com água

Fonte: Próprio autor.

2.6 Técnicas de medição da umidade no solo

Existem várias técnicas para medir propriedades de solos agricultáveis:

reflectometria no domínio do tempo (TDR), medição da capacitância, medição da impedância elétrica, medição da resistividade do solo, radar de penetração no solo (GPR), medições de fluxo de calor, espalhamento de nêutrons (NMM), dentre outras. [13]

A tecnologias baseadas em reflectometria, caracterizam-se por empregar em sua estrutura um par de hastes de aço inoxidável em paralelos de mesmas dimensões inserido na superfície a uma profundidade entre 0,3 a 14 0,6m, por onde percorre um pulso elétrico com frequência de operação (1MHz a1GHz). [13]

Estas hastes atuam como condutores e o solo como dielétrico, como a constante dielétrica da água é maior que os compostos minerais sólidos do solo e do ar existente entre os polos esta técnica mede a umidade do solo através do tempo do pulso de propagação do sinal na amostra [14].

Os sensores de reflectometria no domínio da frequência (FDR) e os de técnicas de capacitância tem princípios análogos, diferenciando-se pelo fato do FDR fazer uma varredura completa em uma ampla faixa de frequência, enquanto o de capacitância analisa uma única frequência de operação [15].

Outra tecnologia utilizada para medir a umidade do solo é a de impedância cujo princípio baseia-se na aplicação de um pulso senoidal de 100 MHz em um cabo coaxial que liga as duas hastes que são inseridas no solo onde parte do pulso e através da relação com os parâmetros da onda estacionaria formada nos cabos é medido a quantidade de umidade no solo. [13]

Os sensores resistivos são também usados aplicados na medição da umidade em solos por meio da relação da condutividade elétrica que aumenta variando o teor de água entre dois condutores que ficam em contato com o solo,

medindo assim as variações da resistência elétrica do solo. circuito elétrico [16].

Estudos desenvolvidos em análises de solos agricultáveis (solos rasos) por meio da interpretação das alterações da permissividade do solo, a qual influem no sinal irradiado foi testado a técnica de radar de penetração no solo (GPR) [17], que realiza a medição através de duas antenas instaladas na superfície do solo, sendo uma antena usada para transmitir um pulso eletromagnético no solo na faixa de 1MHz a 1GHz e a outra antena para receber [13].

Na pesquisa onde se aplica a técnica de espalhamento de nêutrons (NMM) para medir a umidade, nos experimentos é injetado nêutrons na amostra que ao entrarem em contato com o solo demonstram redução de velocidade e perdas térmicas, no entanto a estimativa da umidade é obtida relacionando a umidade com a taxa de nêutrons que chega no detector de nêutrons [18].

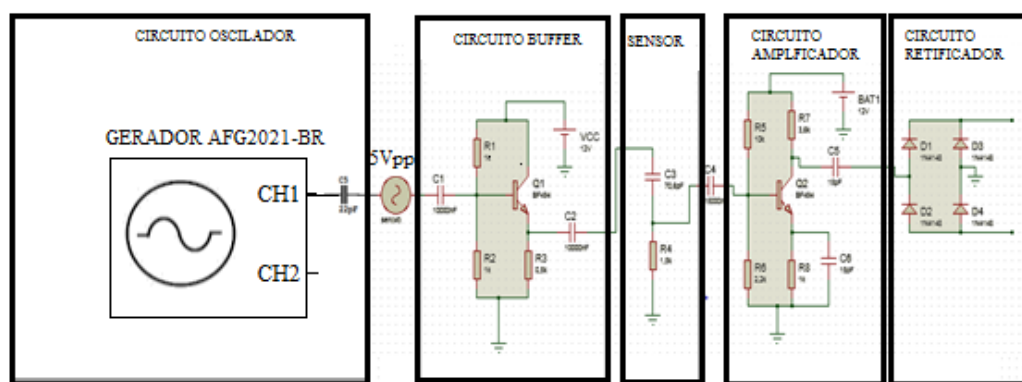
A técnica de dissipação térmica mede a umidade, por meio da relação das variações do fluxo de calor provocados pelo teor de água existente no solo em uma sonda térmica aquecida que inserido na amostra [13]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais do sensor SUCT

Neste trabalho parte da pesquisa, dedicou-se em desenvolver o projeto teórico de um sensor de umidade capacitivo de hastes retangular com liga de cobre, gerador de função, amplificação e retificação do sinal com transistor bf594, resistor, capacitor e diodo schottky conforme o esquema elétrico da figura 3.

Figura 3– Esquema elétrico do sensor SUCT



Fonte: Próprio autor.

No apêndice A é descrito o projeto do sensor com mais detalhes, demais nos ensaios do sensor SUCT, utilizou-se os seguintes materiais: sonda capacitivo fabricada com liga de cobre retangular, circuito oscilador com gerador de função modelo AFG2021-BR Tektronix, circuito eletrônico montado no protoboard, osciloscópio modelo TDS 2022C tektronix, recipiente de vidro de 100 ml, recipiente plástico para armazenar o solo, recipiente plástico com tampa com furos, cabos, solo arenoso e água, conforme demonstrado na figura 4.

Figura 4 – Materiais utilizado no ensaio do SUCT



Fonte: Próprio autor.

3.2 Materiais SUCI

No Laboratório de Máquinas Operatrizes (LMO), localizado no departamento da indústria do IFCE, processou-se a fabricação do sensor de umidade (SUCI), composto de um recipiente coletor de amostra de areia e água, base de fixação das sondas fabricada em nylon, hastes capacitivas de aço inox com circuito eletrônico fabricado em placa de fibra de vidro, conforme demonstrado na figura 5 e suas dimensões são definidas na tabela 4.

Figura 5- Porta amostra do sensor SUCI



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 - Dimensões do SUCI.

Dimensões da placa do circuito		
Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
82	63	1
Dimensões da base		
Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
49	43	20
Dimensões do coletor		
Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
63	63	49
Dimensões da haste do capacitor		
Raio da haste (mm)	Distância entre as hastes de centro a centro (mm)	Comprimento da haste dentro do coletor (mm)
1,5	26	52

Fonte: Próprio autor.
mm: milímetro.

As amostras de areia usada nos experimentos foram obtidas no laboratório de Materiais de Construção civil do IFCE onde se deu o ensaio de separação dos grãos de acordo com a classificação granulométrica da tabela

5. No processo de obtenção da amostra de solo seco se fez necessário o uso de: estufa de secagem (Quimis), recipiente metálico e peneirador de bancada com peneiras de diferentes granulometrias. Sendo que, todas as amostras de solo foram pesadas em uma balança de precisão (Filizola beyond technology) fornecida pelo Laboratório de Tecnologia Química (LTQ) do IFCE antes dos ensaios de umidade.

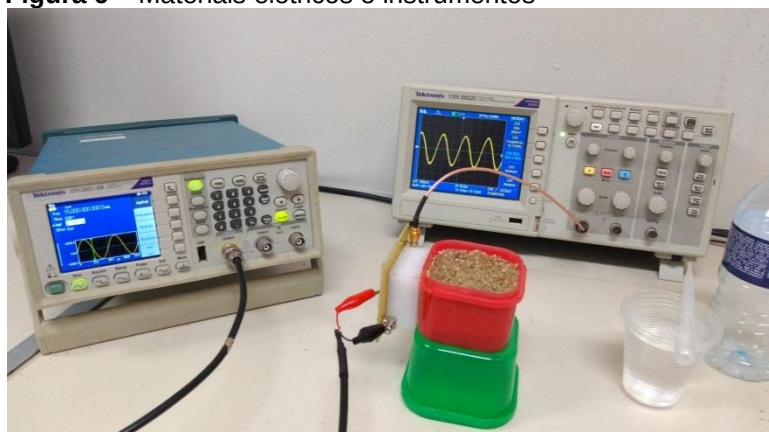
Tabela 5 – Classificação dos tipos de areia em função do tamanho do grão

Tipo de areia	Tamanho dos grãos (μm)
Grossa	$4,75 > \text{grossa} > 2,38$
Média grossa	$2,38 > \text{média grossa} > 1,18$
Média	$1,18 > \text{média} > 600$
Fina	$600 > \text{fina} > 300$
Muito fina	$300 > \text{muito fina}$

Fonte: NM 248:2001.

No laboratório do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Telecomunicações (PPGET) do IFCE, montou-se uma bancada com copo descartável, garrafa de água mineral de 500ml, recipientes plásticos, pipeta de Pasteur 3ml, gerador de função modelo AFG2021-BR Tektronix, osciloscópio modelo TDS 2022C tektronix , placa de circuito impresso com resistor, conector sma Fêmea, capacitor de hastes cilíndricas e cabos de sinal conforme demonstrado na figura 6.

Figura 6 – Materiais elétricos e instrumentos

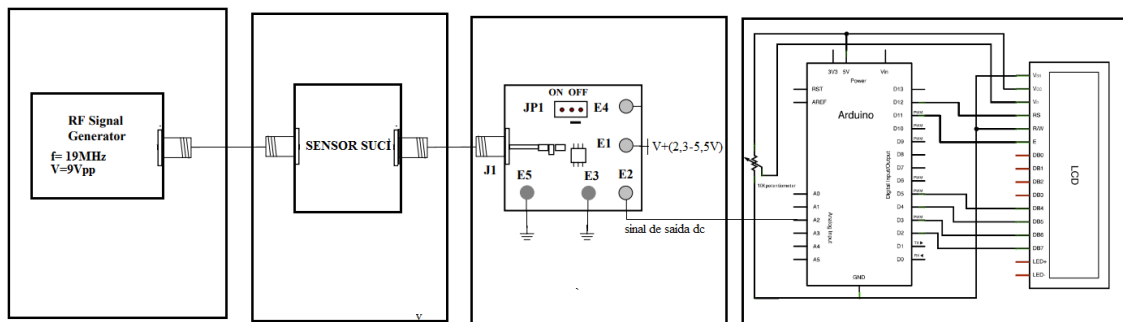


Fonte: Próprio autor.

No projeto do sensor em estudo é realizado a medição da tensão em circuito resistivo capacitivo (RC) série que é ligado a um gerador de sinal senoidal modelo AFG2021-BR Tektronix. Sendo que, o sinal tensão circula no solo por meio das hastes capacitivas, forma assim um circuito fechado, onde é feito a medida indireta da umidade em relação ao sinal de tensão de saída medido no resistor.

O gerador de sinal usado nos experimentos desta pesquisa a frequência máxima 20MHz. Logo, o projeto eletrônicos do conjunto sensor de umidade capacitivo (SUCI) funciona conforme representados na figura 7 .

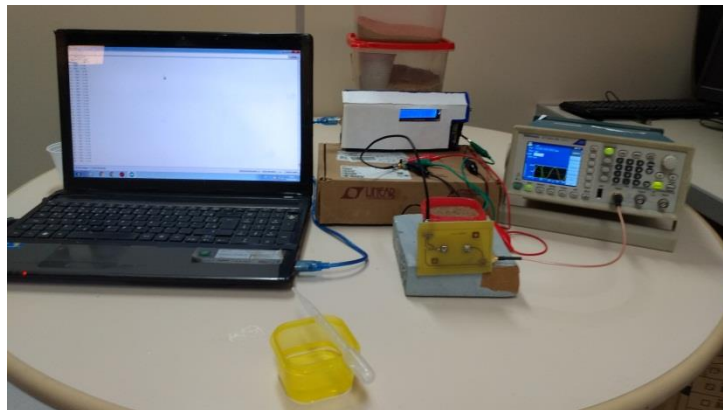
Figura 7 – Esquema eletrônico do sensor SUCI



Fonte: Próprio autor.

O sinal de saída do sensor é aplicado na porta analógica do microcontrolador que processa os dados e envia para o display alfanumérico, notebook e cartão de memória Sd card acoplado no microcontrolador, portanto logo após ser acionado um sensor de torque é dado início a rotina de medição a cada 2 minutos onde neste intervalo é coletado 120 medidas através do conjunto SUCI conforme demonstrado na figura 8.

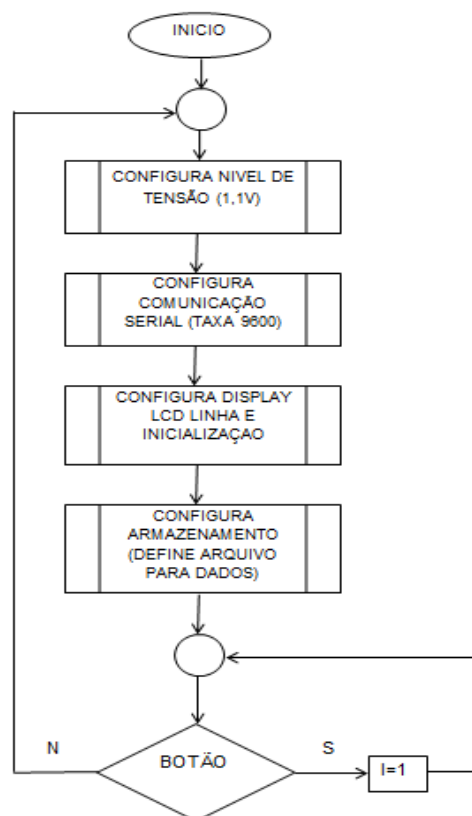
Figura 8- Conjunto de materiais do conjunto SUCI



Fonte: Próprio autor

A lógica da programação usada no software do microcontrolador (arduino mega 2560) dá-se conforme a configuração demonstrado na figura 9.

Figura 9- Fluxograma operacional do software aplicado no SUCI

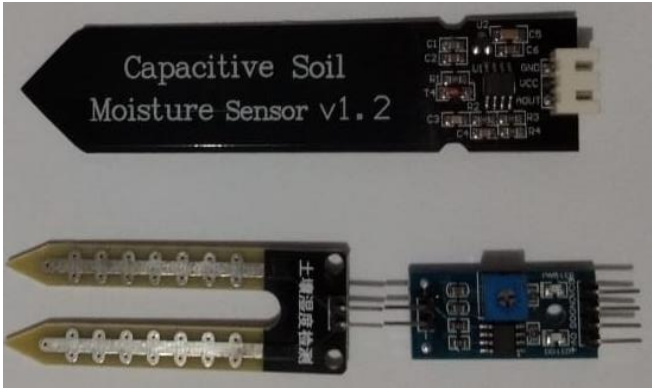


Fonte: Próprio autor

Com a finalidade de comparar os sensores do estudo com tecnologias comerciais destinadas a medir a umidade do solo, realizou-se os ensaios de

umidade com o sensor capacitivo modelo v1.2 fabricado pela DFROBOT e o sensor resistivo HL-69 representados na figura 10 com suas características de fabricação conforme tabela 6.

Figura 10 – Sensores comerciais



Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Especificações técnicas dos sensor v1.2 e HL-69	
Sensor capacitivo de umidade v1.2	
Tensão de funcionamento	3.3 ~ 5.5 Vdc
Tensão de saída	0 ~ 3.0Vdc
Dimensões	3,86 x 0,905 polegadas (L x W)
Peso	15g
Fonte: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193#target_1	
Sensor resistivo de umidade HL-69	
Interfase (4 fios)	VCC/GND/D0/A0
Tensão de funcionamento	3,3 V ~5 V dc
Dimensões do sensor com sonda (C X L)	60 X 20 mm
Dimensões do circuito com tripot (C X L)	32 X 14 mm
Peso	9g
Fonte: https://lojinha.vamuino.com.br/produto/sensor-de-umidade-do-solo-hl-69/	

3.3 Ensaio de escolha da frequência do sensor SUCT

- Levar as amostras de areia com granulometrias grossa para a estufa a 105 graus Celsius durante 24 horas e em seguida fazer a pesagem em balança de precisão;
- Ajustar o gerador de sinal para uma tensão de 5V de pico a pico em série com um resistor e em sequência configurar a frequência do sinal;
- Conecte o cabo do gerador de função na entrada do SUCT e o cabo do

osciloscópio nos terminais do resistor;

- Realizar 3 medidas para cada incremento percentual de água na amostra no intervalo de 2min;
- Durante o ensaio a cada medida o sensor deve ser inserido no solo na posição vertical após o recipiente ser balançado para mistura o solo;
- Inserir água na amostra dando um giro rápido de 360° no recipiente com a mão até molhar toda superfície do solo;
- Repetir os ensaios até a amostra receber um 40% de água em relação à massa do solo;
- A frequência que apresentar melhor coeficiente de linearidade e range de tensão entre (1-5Vac) com grãos de areia grossa será a frequência de trabalho escolhida para o sensor SUCT;

3.4 Método de ensaio com sensor SUCT

- Levar as amostras de areia com granulometrias (grossa, média e fina) para a estufa a 105 graus Celsius durante 24 horas e em seguida fazer a pesagem em balança de precisão;
- Ajustar o gerador de sinal para uma tensão de 5V de pico a pico em série com um resistor de e configurar a frequência do sinal;
- Conecte o cabo do gerador de função na entrada do SUCT e o cabo do osciloscópio nos terminais do resistor;
- Realizar 3 medidas por cada incremento percentual de água na amostra no intervalo de 2min;
- Neste ensaio durante cada medida o sensor deve ser inserido no solo na posição vertical após o recipiente ser balançado para mistura o solo;

- Inserir água na amostra dando um giro rápido de 360° no recipiente com a mão até molhar toda superfície do solo;
- Repetir os ensaios até a amostra receber um 40% de água em relação à massa do solo;

3.5 Método de escolha da frequência do sinal do SUCI

Neste procedimento experimental adotou-se por aplicar alimentação elétrica senoidal com as seguintes frequências 5MHz, 10MHz, 15MHz, e 19MHz no circuito RC série formada com o sensor capacitivo SUCI e um resistor. De forma que, os valores aferidos no resistor elétrico suas medidas relacionam-se com a variação do teor de umidade do solo. Portanto, a frequência adotada no projeto do conjunto sensor de umidade SUCI será a que apresentar R^2 próximo de 1 com menor desvio padrão amostral em grãos de solos diferentes e valores de tensão ac compatíveis com o detector de potência LTC5507 dos ensaios realizados por meio do respectivo processo:

- Levar as amostras de areia com granulometrias (grossa, média e fina) para a estufa a 105 graus Celsius durante 24 horas e em seguida fazer a pesagem em balança de precisão;
- Ajustar o gerador de sinal para uma tensão de 9V de pico a pico em série com um resistor e configurar a frequência do sinal;
- Conecte o cabo do gerador de função na entrada do SUCI e o cabo do osciloscópio nos terminais do resistor;
- Realizar o gotejamento de 9ml de água na amostra com uma pipeta em linha reta na direção da distância entre centros das hastes em três etapas sequenciadas de 3 ml;
- Executar os ensaios com granulometrias diferentes, sendo elas: areia

fina; média, grossa

- Fazer a anotação da tensão no resistor na seguinte sequência: assim que terminar de gotejar na amostra com 1 minuto e 2 minutos;
- Repetir os ensaios até a amostra receber 40% de água em relação a massa do solo;

3.6 Sistemática dos ensaios com o conjunto (SUCI)

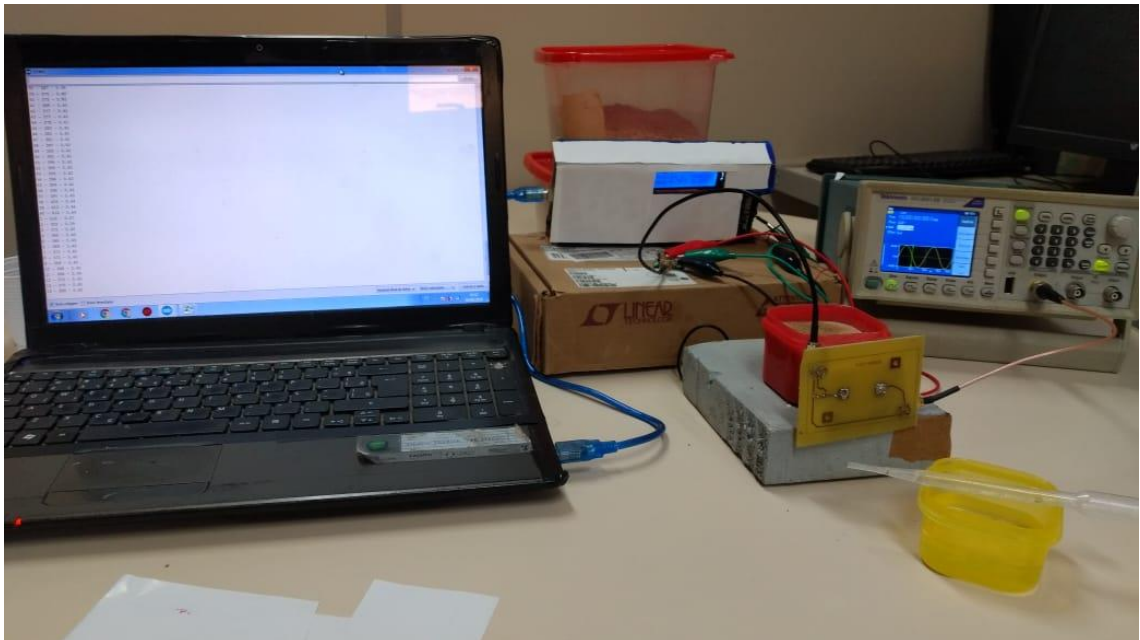
Nos ensaios deste experimento aplicaram-se os seguintes procedimentos:

- Montar o circuito conforme demonstrado na figura 11;
- Levar as amostras de areia com granulometrias (grossa, média e fina) para a estufa a 105 graus Celsius durante 24 horas e em seguida fazer a pesagem em balança de precisão;
- Realizar os ensaios com 180 gramas solo arenoso na granulometria fina, média, grossa e misturada (5% de areia fina, 35% de areia média e 60% de areia grossa);
- Ajustar o gerador de sinal para uma tensão de 9V de pico a pico e a frequência de trabalho definida para o sensor através do método de ensaio de escolha da frequência do SUCI.
- Conectar o cabo do gerador de função na entrada do SUCI;
- Conectar um cabo da saída do SUCI para a placa de circuito do LTC5507;
- Ligar a saída da placa LTC5507 na entrada analógica do micro controlador;
- Comunicar o SUCI com o computador por meio de um cabo USB que sai da interfase do micro controlador;
- Realizar o gotejamento de 2,5ml de água na amostra com uma pipeta em linha reta na direção da distância entre centros das hastes a cada 2

minutos;

- Após os dois minutos o programa para sua rotina de medição para que seja colocado outro percentual de água na amostra e reinicia ao apertar um botão de torque ligado na interfase do micro controlador;
- Repetir os ensaios até a amostra receber 40% de água em relação a massa do solo;
- Todas as medições ficam armazenadas no PC e no cartão SDcard;

Figura 11- Ensaio conjunto SUCI



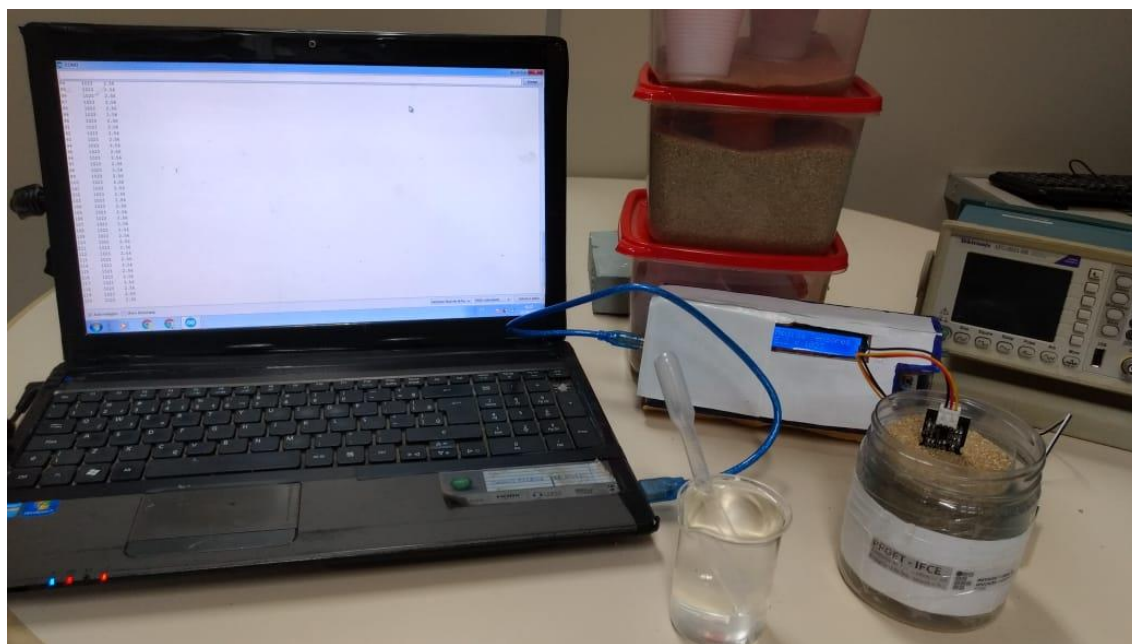
Fonte: Próprio autor.

3.7 Métodos dos ensaios com sensores comerciais

Existem vários sensores no mercado com a finalidade de medir a umidade do solo. Sendo assim, realizou-se o ensaio com os sensores (v1.2 e HL-69) por serem fácil de encontrar os produtos e pela rapidez na entrega, sendo que o experimentos com sensor capacitivo realiza-se conforme demonstrado na figura 12 e os ensaios com o sensor resistivo é demonstrado na figura 13. Portanto, os ensaios destas tecnologias procederam conforme os respectivos procedimentos:

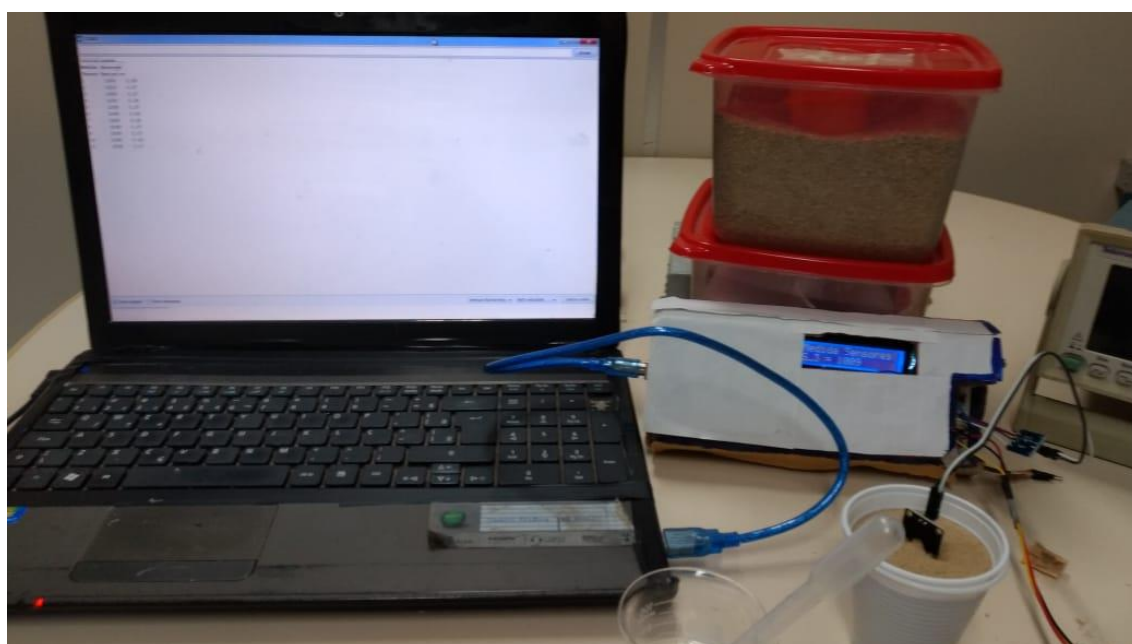
- Conecte o sensor no solo conforme o manual do fabricante;
- Pegar as amostra de solo seco em estufa a 105°C durante 24 horas;
- Realizar os ensaios com o sensor HL-69 com 180 gramas solo arenoso e com sensor na granulometria fina, média, grossa e misturada (5% de areia fina, 35% de areia média e 60% de areia grossa);
- Realizar os ensaios com o sensor v1.1 com 380 gramas solo arenoso na granulometria fina, média, grossa e misturada (5% de areia fina, 35% de areia média e 60% de areia grossa);
- Conectar as saídas dos sensores na entrada analógica da mesma interfase micro controlada utilizada no sensor SUCI;
- Aplicar a mesma rotina de coleta de dados do SUCI variando apenas o volume de água gotejado com a pipeta a cada 2 minutos;
- No ensaio do sensor modelo HL-69 aplicar uma variação de 2ml de água e sensor modelo v1.2 um volume de 5ml;
- Realizar o gotejamento conforme o manual de cada sensor;
- Repetir os ensaios até a amostra receber 40% de água em relação a massa do solo;

Figura 12- Ensaio com sensor modelo v1.2



Fonte: Próprio autor.

Figura 13- Ensaio com sensor modelo HL-69



Fonte: Próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo é apresentado os resultados dos experimentos realizado com os sensores (SUCT, SUCI, HL-69, V1.2).

4.1 Ensaios sensor SUCT

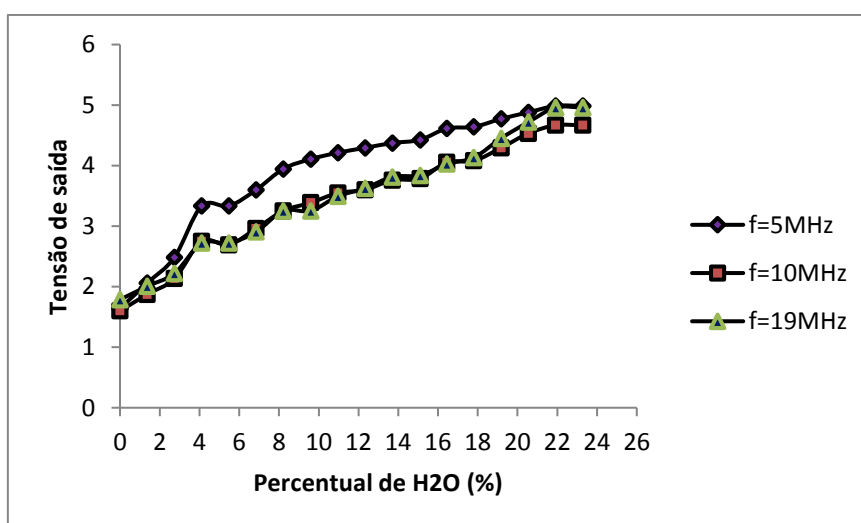
Os procedimentos adotados durante os experimentos com o sensor SUCT foram os seguintes: escolha da melhor frequência de trabalho através do ensaio de umidade com areia grossa e execução dos testes do sensor em granulometria (fina, média, grossa e misturada). Ademais, todas as médias dos ensaios estão disponíveis no apêndice B.

4.1.1 Definição da frequência do circuito SUCT

Visto que, as diferentes frequências analisadas em ensaio com grãos de areia grossa, conforme demonstra a figura 14 observa-se que, ao variar a massa percentual de água no solo o range de tensão aumenta em função da umidade, apresentando assim, sinais senoidais na saída do sensor compreendido entre (1-5Vac). Valores estes, que ao serem retificados, exibirá um sinal de saída contínuo compatível com os valores exigidos na entrada analógica do microcontroladores ATmega.

Logo, dentre as frequências aplicadas no circuito do sensor a 19MHz demonstrou melhor linearidade com R^2 mais próximo do valor unitário, conforme descrito na tabela 5.

Figura 14- Ensaio de escolha da frequência do SUCT



Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 - Equações lineares e coeficiente de determinação dentro da faixa de sensibilidade do SUCT

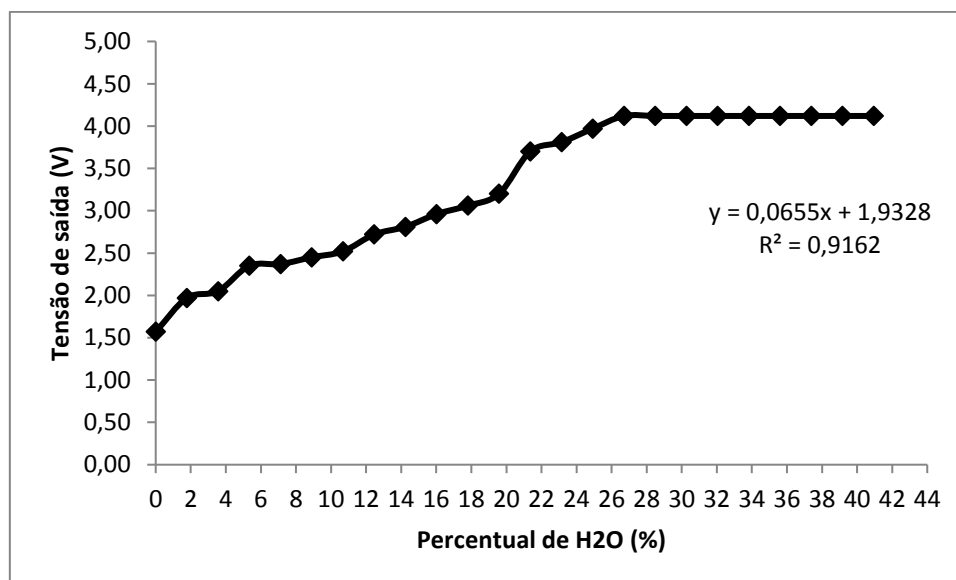
	y (a x + b)	R ²	Frequência
Areia grossa	0,1848x + 2,2017	0,87	5MHz
Areia grossa	0,1763x + 1,7644	0,96	10MHz
Areia grossa	0,1823x + 1,7674	0,98	19MHz

Fonte: Próprio autor.

4.1.2 Areia fina

Ao realizar os experimentos com o sensor SUCT, constata-se na figura 15 que ao variar o teor de água com variação constante e crescente de 0 a 40% em solo com grãos de areia fina, o mesmo apresenta comportamento linear no intervalo de (0-27%) com R² de 0,91. Ademais, os valores de dispersão da tensão de saída do sensor mostram pico de amplitude maior entre (20-22%) de umidade na amostra, além de exibir valores constantes na saída do sensor em todas as medidas coletadas ao variar a massa de água no solo a partir de 27%.

Figura 15- Ensaio sensor SUCT em areia fina



Fonte: Próprio autor.

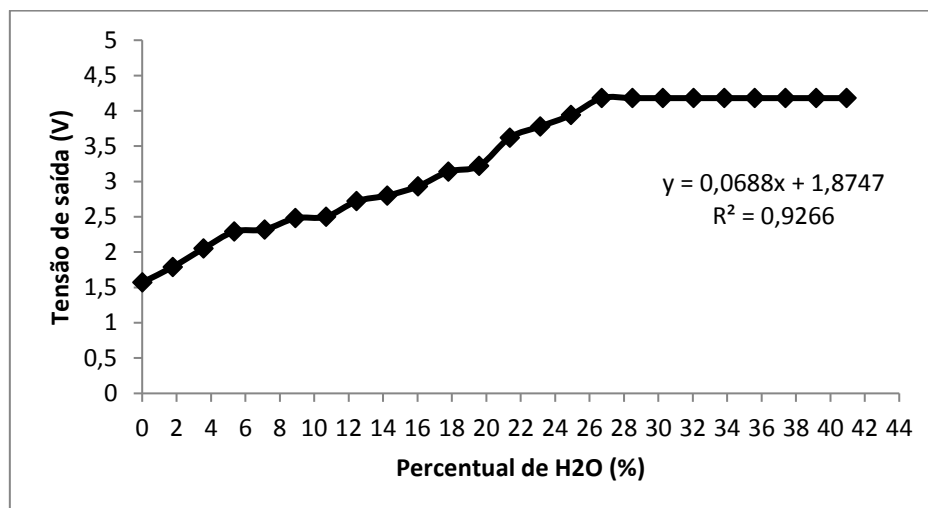
4.2.3 areia média

Em solo com granulometria média durante os ensaios constata-se na

figura 16 que ao mudar o teor de umidade na amostra com variação constante e crescente de 0 a 40% o sensor comporta-se com tendência linear no intervalo de (0-27%) com R^2 de 0,92. Além disso, as medidas apresentam pouca dispersão com maior pico de amplitude entre (20-22%) de umidade na amostra.

Além disso, o sensor exibi pequena dispersão da tensão de saída entre as medidas, demonstrando assim, pico de amplitude maior entre (20-22%) de massa de água além de apresentar valores constantes na saída do sensor em todos os testes coletados ao variar a massa de água no solo acima de 27%

Figura 16- Ensaio sensor SUCT areia média

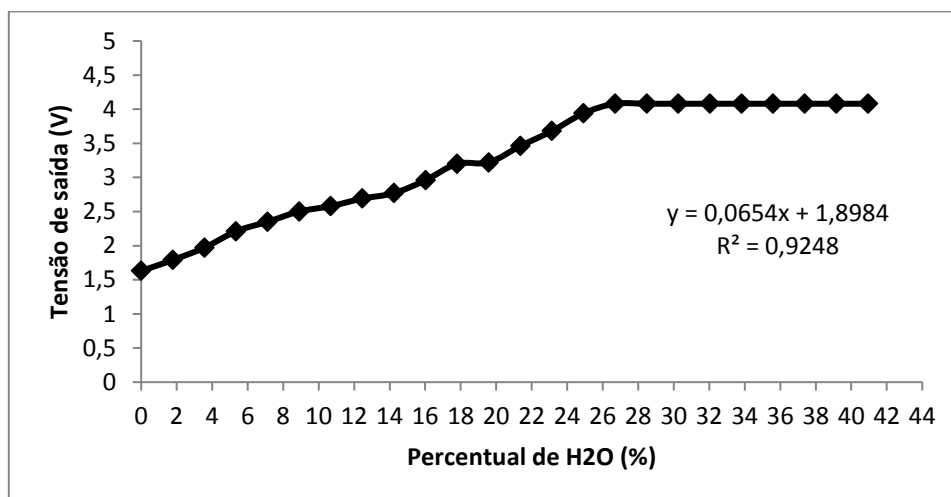


Fonte: Próprio autor.

4.1.4 Areia grossa

Durante a rotina de ensaios com areia grossa o sensor SUCT demonstrou comportamento linear no intervalo de (0-27%) com R^2 de 0,92 ao variar um volume de água constante e crescente no intervalo entre 0 a 40% de umidade no solo. Portanto, de acordo com a figura 17 observa-se também um pequeno pico na amplitude em 18% de umidade além do sensor não detectar o aumento da umidade do solo no intervalo de (27-40%).

Figura 17- Ensaio sensor SUCT em areia grossa

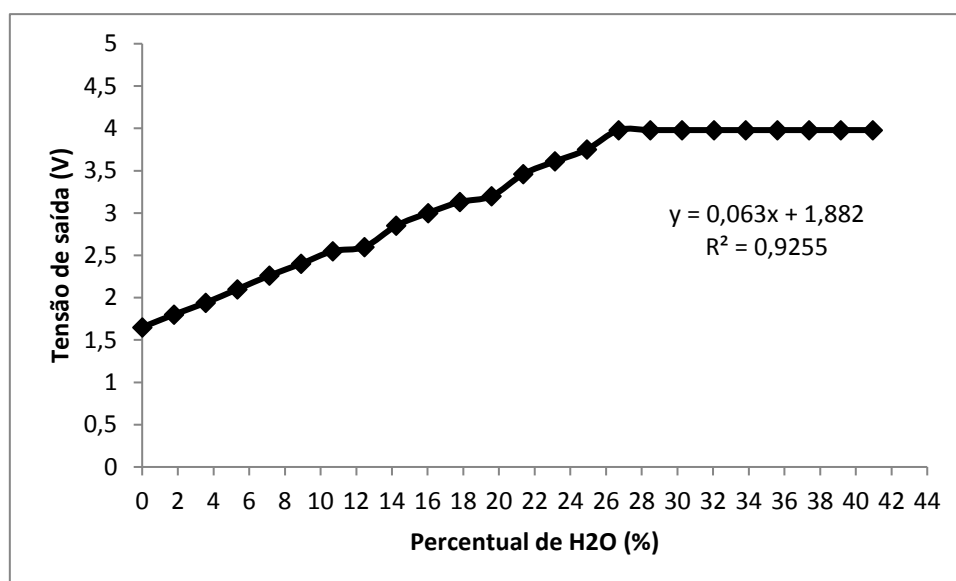


Fonte: Próprio autor.

4.1.5 Areia misturada

Nos ensaios com granulometria misturada em conformidade com a figura 18, o sensor tem comportamento linear na faixa de (0-27%) com R^2 de 0,92. Além do que, apresenta tensão de saída constante entre (27-40%) com atenuações desprezíveis entre as medidas realizadas durante o ensaio.

Figura 18- Ensaio sensor SUCT em areia misturada



Fonte: Próprio autor.

Fazendo uma análise comparativa entre os ensaios em diferentes

tamanhos de grãos, observa-se que o sensor SUCT é capaz de detectar as variações de água com características linear em todos os tamanhos de grãos analisados no intervalo 0 a 27 % de umidade. Não sendo assim, indicado para aplicações agrícolas que necessite detectar o volume de umidade acima de 27%.

4.2 Ensaio sensor SUCI

Nesta etapa do estudo durante os experimentos com o sensor SUCI adotou-se os seguintes testes: definição da frequência que apresente melhores resultados de umidade em areia (grossa, média, fina) e em sequência realizou-se ensaios com o conjunto SUCI em granulometria (fina, média, grossa e misturada) com a frequência definida para o conjunto sensor SUCI.

4.2.1 Definição da frequência do circuito do conjunto SUCI

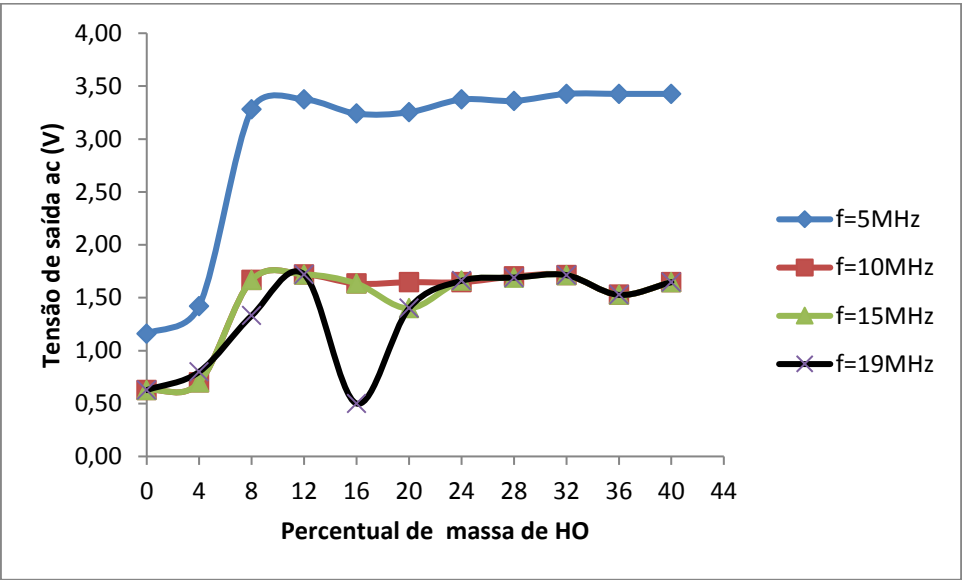
Os resultados dos ensaios de umidade destinados para selecionar a frequência do campo elétrico aplicado no projeto eletrônico do conjunto SUCI, realizou-se com três tamanho de grão do solo (areia fina, média, grossa). Sendo que, os parâmetros ideais de escolha da frequência são: R^2 igual a 1, Desvio Padrão amostral zero e range de tensão do sinal de saída entre (0,3-1,2Vac).

No ensaio desenvolvido na frequência de 5MHz, conforme demonstrado na figura 19 o range de tensão obtido entre a variação de umidade do estado de solo seco e saturação foi entre (1 e 3,5 Vac). Nesta granulometria o R^2 apresentou valores maiores que os obtidos nos experimentos nas outras frequências, porém apresentou um desvio padrão de 38 % a mais que o da maior frequência (19MHz).

Além disso, na tabela 8 podemos verificar que as demais frequências possuem R^2 e desvio padrão entre 0,4 e 0,5 com range de tensão na saída entre (0,5-1,5V). Valores este, que podem ser aplicados para detectar a presença

de água na amostra, no entanto, o ensaio mostra uma relação não linear entre a tensão de saída e a variação percentual de 0 a 40% de água no solo.

Figura 19- Ensaio do sensor SUCI com areia fina em diferentes frequências



Fonte: Próprio autor.

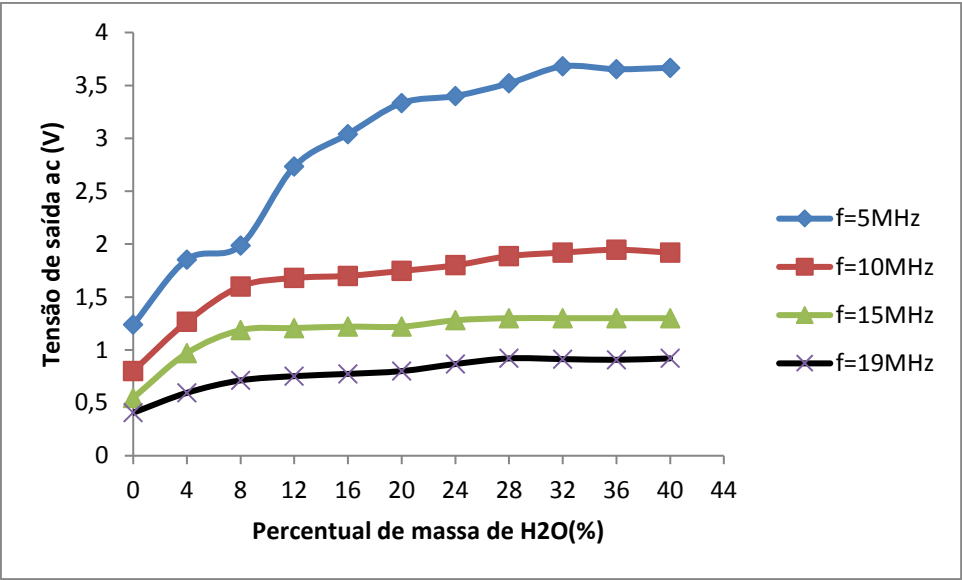
Tabela 8 – Equações lineares e coeficientes de determinação do sensor SUCI grão fino			
	y (a x + b)	R ²	DESVIPAD.A
Frequência de 5MHz			
Areia fina	y = 0,0452x + 2,0715	0,51	0,84
Frequência de 10MHz			
Areia fina	y = 0,0194x + 1,0875	0,40	0,41
Frequência de 15MHz			
Areia fina	y = 0,0774x + 0,9883	0,41	0,40
Frequência de 19MHz			
Areia fina	y = 0,0932x + 0,769	0,40	0,46

R²: coeficiente de determinação. DESVIPAD.A: desvio padrão amostral

Com grãos de areia média, observa-se na tabela 9 que a menor frequência (5MHz) e a maior (19MHz) apresentam R² tendendo a 1. Por outro lado, a frequência de 5MHz apresenta taxa de erro acentuada quando comparado os obtidos nos experimentos com frequências maiores. Ademais, de acordo com os dados demonstrados na figura 20 conclui-se que, a partir de 2% de umidade na amostra a frequência de 19MHz comporta-se de forma linear com

menor taxa de dispersão da amplitude de saída em relação as outras frequência, além de exibir valores com sinal de tensão senoidal compatível com a potência exigida pelo detector LTC5507.

Figura 20- Ensaio do sensor SUCI com areia média em diferentes frequências



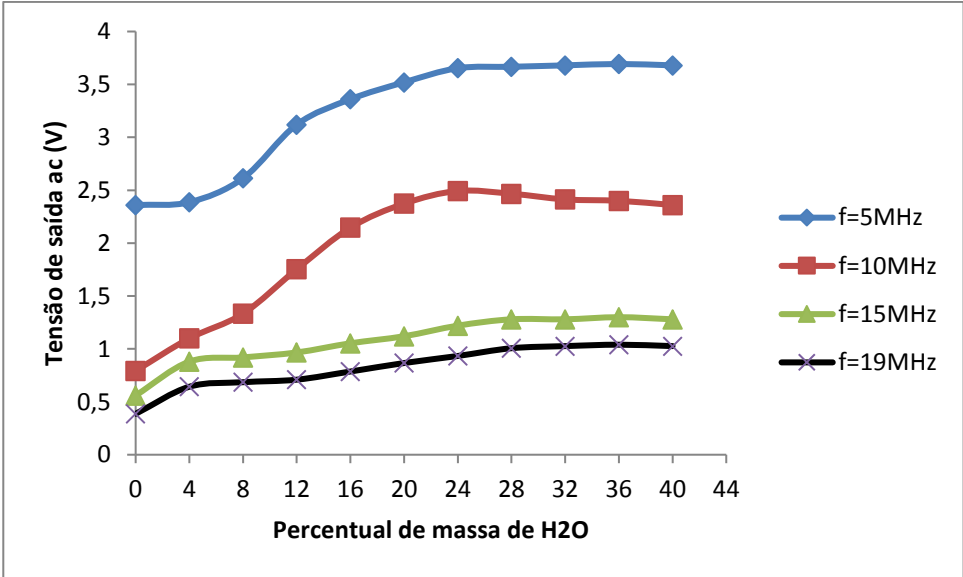
Fonte: Próprio autor

Tabela 9 - Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor SUCI grão médio			
	y (a x + b)	R²	DESVIPAD.A
Frequência de 5MHz			
Areia média	y = 0,0599x + 1,7212	0,86	0,86
Frequência de 10MHz			
Areia média	y = 0,0223x + 1,2155	0,72	0,35
Frequência de 15MHz			
Areia média	y = 0,0129x + 0,9083	0,56	0,23
Frequência de 19MHz			
Areia média	y = 0,011x + 0,5583	0,82	0,16
R²: coeficiente de determinação. DESVIPAD.A: desvio padrão amostral.			

No ensaio com grãos de areia grossa conforme demonstrado na tabela 10 a maior frequência (19MHz) obteve um R² próximo de 1 taxa de dispersão entre as medidas pequena. Sendo que, as frequência 5MHz e 10 MHz conforme ilustrado na figura 22 o fundo de escala do range tensão não é maior os valore

exigidos, porém tanto a frequência de 15MHz como a 19MHz apresentaram nos ensaios fundo de escala de tensão elétrica entre 0 e 40% de umidade compatível.

Figura 21- Ensaio do sensor SUCI com areia grossa em diferentes frequências



Fonte: Próprio autor.

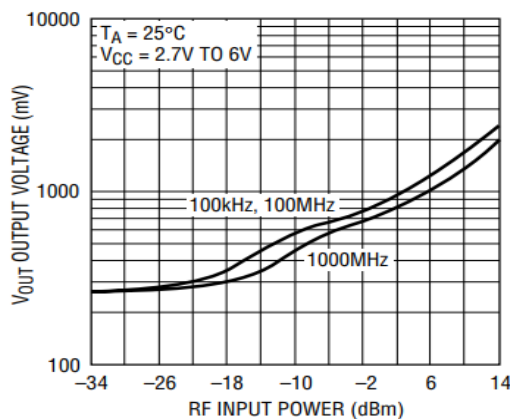
Tabela 10- Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor SUCI grão grosso			
	y (a x + b)	R ²	DESVIPAD.A
Frequência de 5MHz			
Areia grossa	0,14x + 2,35	0,83	0,54
Frequência de 10MHz			
Areia grossa	0,16x + 0,98	0,77	0,62
Frequência de 15MHz			
Areia grossa	0,06x + 0,68	0,86	0,23
Frequência de 19MHz			
Areia grossa	0,05x + 0,47	0,90	0,21

R²: coeficiente de determinação. DESVIPAD.A: desvio padrão amostral.

Portanto, ao comparar os resultados do campo elétrico variável aplicado nas amostras em diferentes tamanhos de grãos de areia distintos, observa-se que a maior frequência (19MHZ) demonstrou melhor linearidade R² em grão médio e grosso com desvio padrão menor em relação as outras frequências

adotadas no ensaio, além de apresentar sinal de tensão compatível ao exigido no manual do detector conforme demonstrado na figura 22.

Figura 22- Características do detector de potência LTC5507



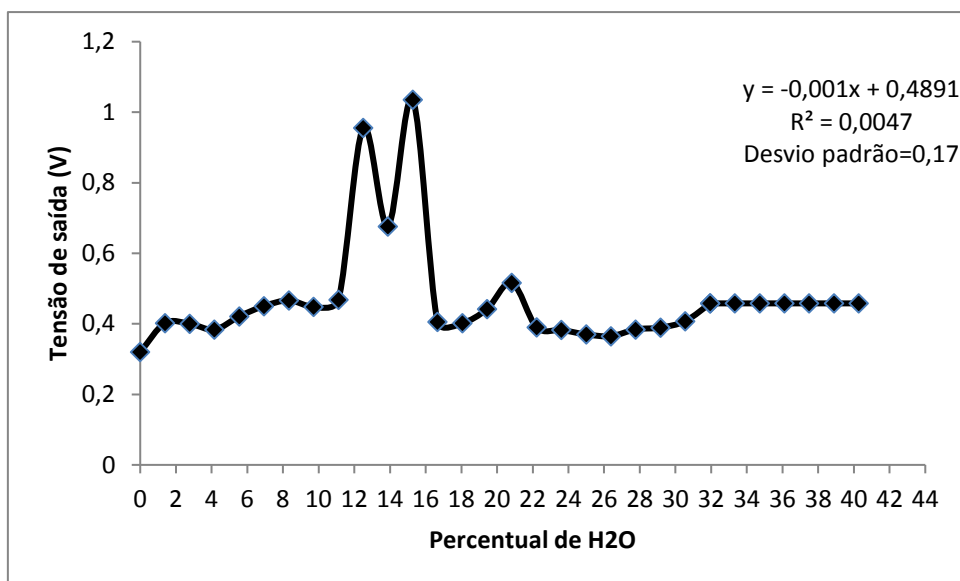
Fonte: Linear Technology [22]

4.2.2 Ensaio conjunto sensor SUCI

Com base nos ensaios realizados para definir a frequência do campo elétrico do conjunto sensor SUCI, o mesmo foi projetado na frequência de 19MHZ. Deste modo, nos testes do sensor SUCI em areia fina, percebe-se na figura 23 que as medidas não apresentam um comportamento linear com dispersão elevada entre (11-17%) de água na amostra.

Apresentando assim, comportamento linear entre 0 e 11% de umidade e oscilações da amplitude na faixa de sensibilidade do sensor no intervalo de 12 a 32% com tensão de saída constante entre 32 e 40% de umidade. Todavia, observa-se que o SUCI pode ser utilizado em aplicações agrícolas que necessite saber apenas se o solo está úmido ou seco.

Figura 23- Ensaio conjunto SUCI em areia fina

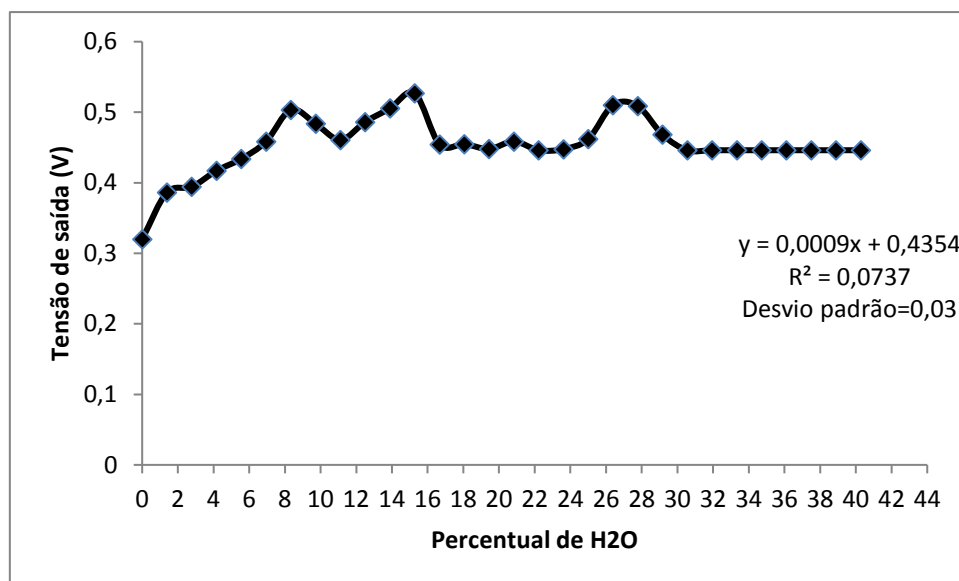


Fonte: Próprio autor.

Durante os experimentos com grãos de areia média, o sensor SUCI demonstrou na figura 24, tendência linear entre 0 e 16% de umidade no solo, porém o coeficiente de linearidade R^2 apresentou valores indesejados próximo de zero entre 0 e 40%.

Portanto, observa-se que entre (16,5 - 25%) o sensor apresenta tensão de saída com pequena variação com pico de tensão entre (26-30%) tornando-se constante entre (31- 40%). Embora o sensor não apresente comportamento linear em toda sua faixa de sensibilidade este tipo de tecnologia pode ser aplicado em projetos que necessite apenas monitorar a existência de umidade no solo.

Figura 24- Ensaio conjunto SUCI em areia média

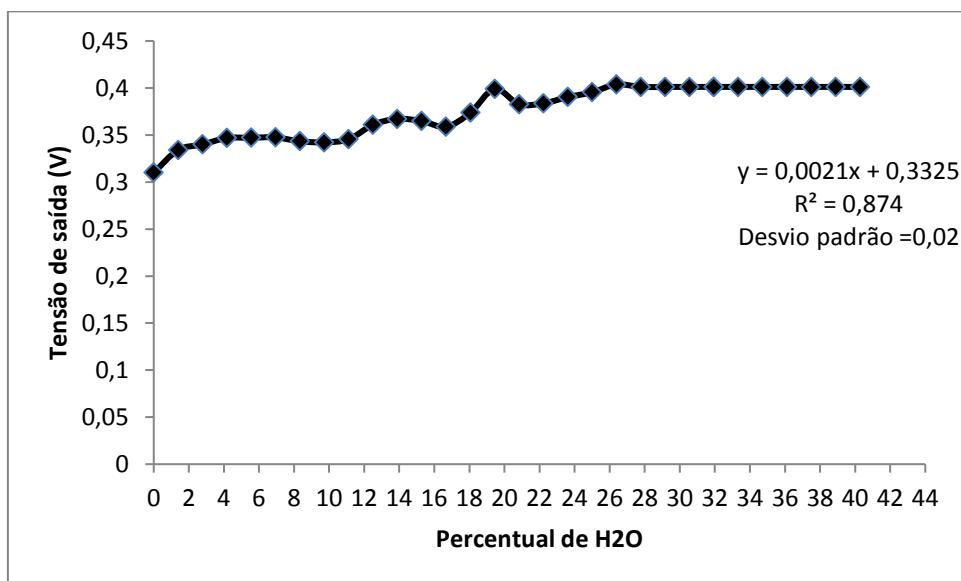


Fonte: Próprio autor.

Nos testes realizados em solo com granulometria grossa, conforme demonstrado na figura 25, o sensor SUCI tem coeficiente de linearidade R^2 próximo de 1. Assim como, a taxa de erro tende a zero com pequena variação crescente e decrescente entre as medidas.

O sensor demonstrou comportamento linear no intervalo de variação da umidade entre 0 e 27%. Sendo que, acima de 27% o sensor torna-se insensível ao aumento do teor de água na amostra caracterizado por apresentar sinal de saída constante no intervalo de 27 a 40% de água aplicada na amostra.

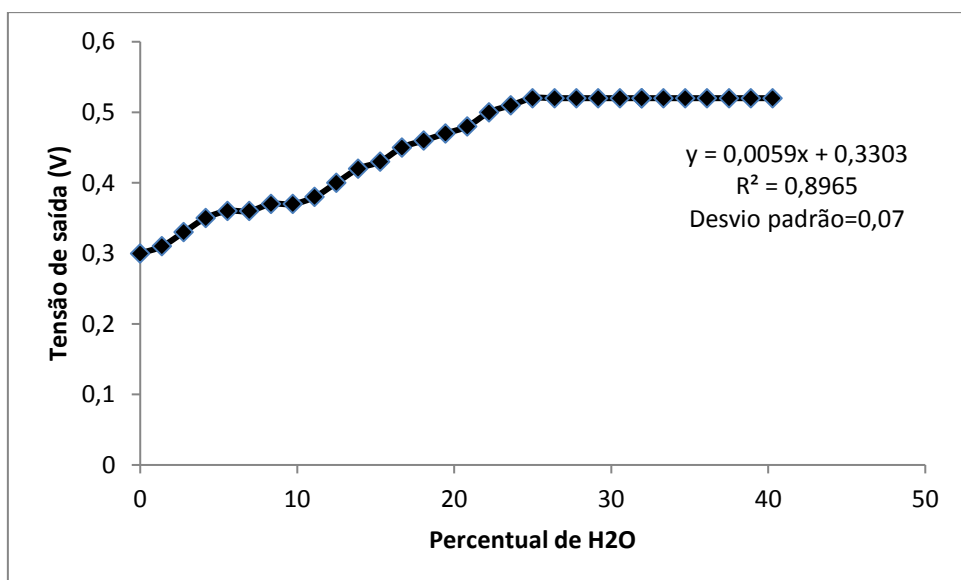
Figura 25- Ensaio conjunto SUCI areia grossa



Fonte: Próprio autor.

Ademais no ensaio desenvolvido com areia misturada, conforme demonstrado na figura 26 o conjunto sensor SUCI apresentou boa linearidade com desvio padrão pequeno próximo de zero dentro da faixa de sensibilidade de (0 - 25%). No entanto, acima de 25% apresenta tensão de saída constante.

Figura 26- Ensaio conjunto SUCI em areia misturada



Fonte: Próprio autor.

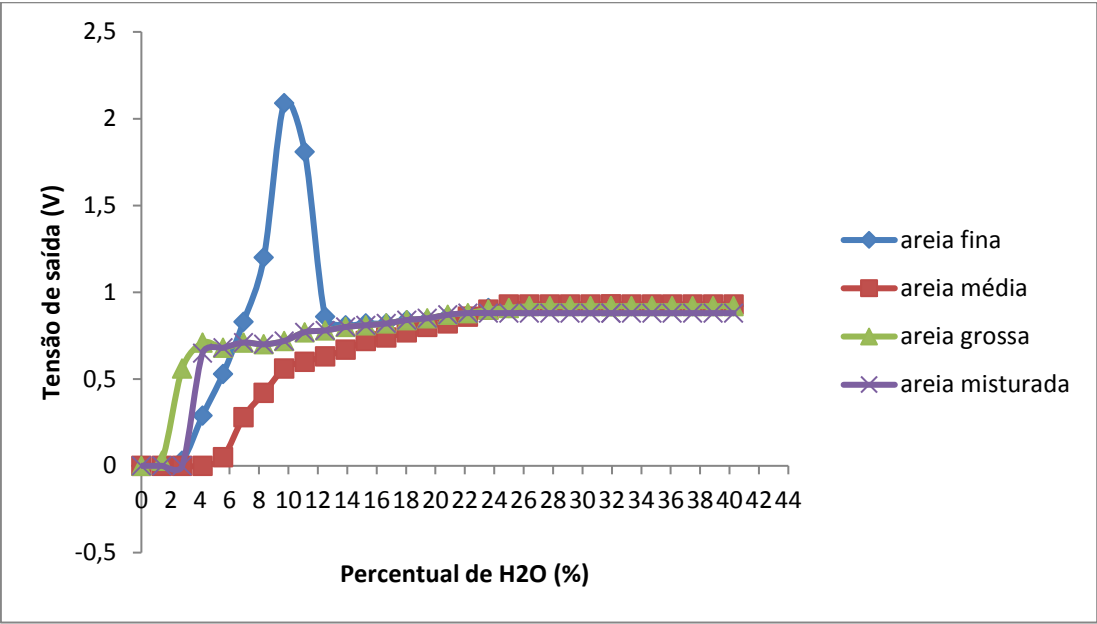
4.4 Sensores comerciais

Durante os experimentos desenvolvidos com o sensor de umidade capacitivo V1.2 em diferentes granulometrias o mesmo detectou variações de umidade na amostra entre 0 e 27% tornando-se insensível a variações de umidade após a saturação como demonstrado na figura 27. Ademais, no ensaio grãos finos o sensor apresenta comportamento linear entre 12 e 24,5% de umidade na amostra, porém observa-se na tabela 11 que o coeficiente de linearidade R^2 entre 0 e 40% tende a zero com elevado desvio padrão e grandes dispersão entre as amplitudes medidas pelo ao variar o teor de água na amostra.

Por outro lado, em areia média o sensor mostrou-se sensível a variações da umidade na amostra a partir de 5% aplicado com comportamento linear entre 8 e 24,5 % com R^2 próximo de 1 com desvio padrão de (0,35) de acordo com a tabela 12. No entanto, ao variar o teor de água durante os experimentos com granulometria grossa o sensor apresentou a desempenho linear entre o intervalo de (4 a 24,7 %) de umidade com desvio padrão tendendo a zero (0,2) e R^2 distante de 1 entre 0 e 40%.

Além disso, nos testes em areia misturada o sensor V1. 2 tem inicia na detecção das variáveis da umidade com 4% apresentando comportamento linear no intervalo entre 4 e 23% com coeficiente de linearidade próximo de zero, por isso tem comportamento não linear entre 0 e 40% com desvio padrão de 0,3 de acordo com a tabela 12.

Figura 27- Ensaio do sensor capacitivo v1.2



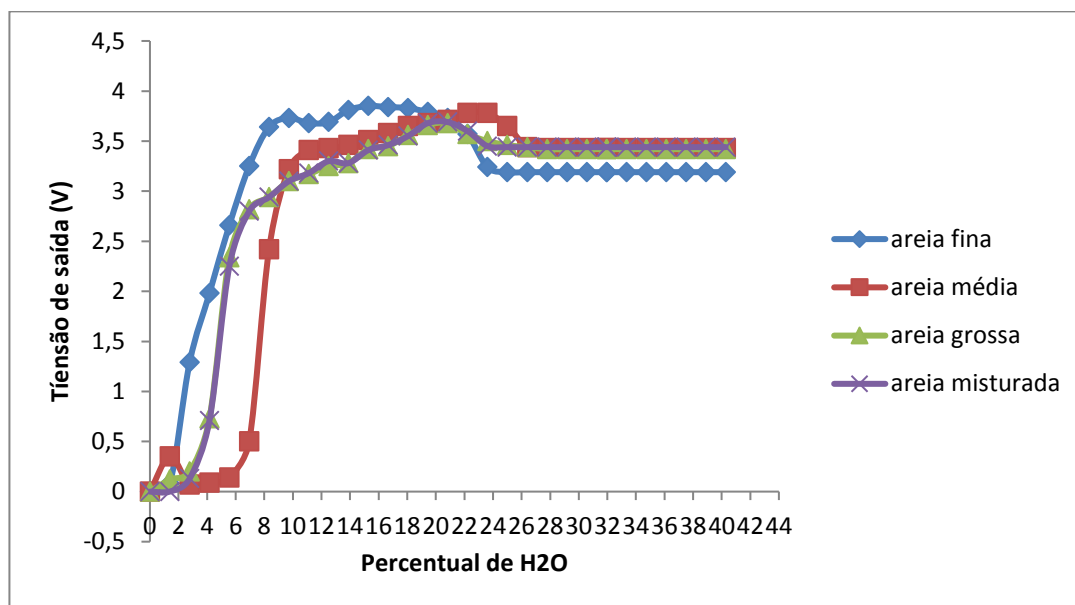
Fonte: próprio autor.

Tabela 11. Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor capacitivo v1.2			
	y (a x + b)	R ²	DESVIPAD.A
Areia fina	0,014x + 0,6268	0,09	0,51
Areia média	0,0327x + 0,1514	0,77	0,35
Areia grossa	0,0182x + 0,4953	0,53	0,26
Areia misturada	0,0197x + 0,4332	0,48	0,3

R²: coeficiente de determinação. DESVIPAD.A: desvio padrão amostral.

Ao longo dos ensaios realizados com o sensor HL-69 com distintos tamanhos de grãos de areia observa-se que o coeficiente de linearidade R² apresenta valores abaixo de 0,5 com desvio padrão em todas as granulometrias maior que 1 conforme a tabela 12. Bem como, demonstrou pico elevado de tensão no intervalo de 0% a 4% de umidade na amostra de areia fina, grossa e misturada com detecção de umidade em areia média a partir de 6%, conforme ilustrado na figura 30. No entanto, o sensor apresenta tendência linear das medidas em grãos grossos no intervalo 9 e 22% de umidade e entre 6 a 20% em amostra de solo misturado.

Figura 28- Ensaio sensor resistivo HL-69



Fonte: Próprio autor.

Tabela 12. Equações lineares e coeficiente de determinação do sensor resistivo HL-69

	y (a x + b)	R ²	DESVIPAD.A
Areia fina	0,0451x + 2,3465	0,17	1,04
Areia média	0,1028x + 1,1815	0,49	1,47
Areia grossa	0,0806x + 1,6566	0,45	1,13
Areia misturada	0,0829x + 1,6177	0,46	1,15

R²: coeficiente de determinação. DESVIPAD.A: desvio padrão amostral.

4.5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em granulometria fina o sensor SUCT é o que apresenta melhor comportamento linear entre (0-27%) ,enquanto os dados coletados nos experimentos com o sensor SUCI e os comerciais (HL-69 e V1.2) apresentaram intervalos de medições com picos de amplitude do sinal que influenciaram na linearidade deste sensores em grãos de solo fino.

Sabe-se na literatura que ao reduzir a frequência do campo elétrico fatores como a temperatura, granulometria, salinidade iram influenciar na medida da umidade do solo. Sendo assim, as atenuações apresentadas nos sensores

comerciais em areia fina, média, grossa e misturada é devido ao campo oscilatório de 100KHz aplicado no solo por estes sensores. [23]

No entanto, como o sensor SUCI foi desenvolvido com a mesma frequência elétricos do SUCT e com placas de circuito impresso que provocam menos atenuação que o protoboard usado nos ensaios do SUCT, o mesmo deveria apresentar comportamento linear próximos dos apresentados pelo o SUCT.

Assim sendo, as influencias observadas nos resultados em areia fina e média no sensor SUCI não está relacionada diretamente com o tamanho do grão como nos sensores comerciais e sim pelo o método de ensaio em que não é possível aplicar água no solo de forma homogêneo em toda amostra como os realizados nos ensaios do SUCT.

Nos ensaios com grão de areia grossa e misturada o sensor SUCT comporta-se de forma linear entre (0-27%), enquanto o SUCI apresenta tendência linear na faixa de (0-26%) e os sensores comerciais HL-69 entre (7-21%) e o V1.2 de (4-23%). Esta aproximação linear dos resultados obtidos o sensor SUCI próximo do sensor SUCT justifica-se, pelo o fato que, entre os grãos de areia grossa os poros apresentam um espaço maior que ajuda a diminuir a falta de homogeneidade do método de aplicação da água no solo diminuindo assim as influencias da forma como o sensor é inserido na amostra.

Em um estudo desenvolvido com sensores comerciais em uma faixa de frequências de medição entre 5 e 150 MHz verificou que a frequência de medição é um dos principais fatores que afetam a sensibilidade das medições do sensor de capacitância a função das variáveis do solo, como textura do solo,

condutividade elétrica e temperatura. Deste modo, para que tanto o sensor SUCT como o SUCI aumente sua faixa de sensibilidade para intervalo de (0-40%) de umidade com as variáveis do solo provocando influencia mínima das medidas, deve-se projetar os sensores com frequência de 70MHz. [24]

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Nesta pesquisa investigou-se a resposta a umidade em solo arenoso de dois sensores capacitivo em frequência na faixa de (5 a 19MHz). Nesse estudo ambos os sensores foram projetados na frequência de 19MHz, após os ensaios de escolha da frequência apresentarem melhor coeficiente de linearidade e menor taxa de erro entre as medidas.

Dentre os sensores um foi definido por SUCT desenvolvido com sondas capacitivas construídas com hastes retangulares de cobre conectado ao circuito eletrônico projetado com componentes baratos tais como, transistores e diodos com frequência de chaveamento de 120MHz com ensaios de umidade realizados na posição vertical. Por outro lado, o sensor SUCI foi desenvolvido com sondas capacitivas de aço inox cilíndrico ligadas a um circuito eletrônico compostos de detector de potência LTC 5507 e um sistema microcontrolado de aquisição de dados com testes de umidade realizados na posição horizontal.

Deste modo, observou-se que o sensor SUCT pode ser utilizado para detectar a variação de água na granulometria (fina, média, grossa e misturada) de (0 a 25%) por apresentar comportamento linear entre a variação do teor de água na amostra com a tensão elétrica de saída. No entanto, o sensor SUCI 45 apresentou influencia na linearidade do sistema nos ensaios com areia fina e

média apresentando assim, comportamento linear em solo com predominância de areia grossa.

Cabe desenvolver em um trabalho futuro o circuito eletrônico dos sensores todos em uma mesma placa com o circuito oscilador LTC 6905 e analisar o comportamento destes sensores em 40MHZ, 60MHZ, 70MHZ, 100MHZ e 120MHZ de forma a investigar se tais frequências aumentam a sensibilidade do sensor para 40% diminuindo as perdas da parte imaginária da permissividade complexa.

Referências

- [1] PIMENTEL, C. **a relação da planta com a água**. Seropédica: EDUR, 2004. 48-49 p.
- [2] MARIN, F. R. et al. Intensificação sustentável da agricultura brasileira cenário para 2050. **revista de política agrícola**, v. 25, n. n.3, p. 1-17, jul/ago/set 2016.
- [3] RAMADAN, K. M. et al. Design and implementation of a low cost photovoltaic soil moisture monitoring station for irrigation scheduling with different frequency domain analysis probe structures. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 148, p. 148-159, mai 2018.
- [4] SARAIVA, J. L. R. et al. A importância da utilização de sensores de umidade do solo para eficiência da irrigação na agricultura de precisão. **Encontros Universitários da UFC**, FORTALEZA, v. 3, 2018.
- [5] ARAÚJO, S. M. S. A região semiárida do nordeste do Brasil: Questões Ambientais e possibilidades de uso Sustentável dos Recursos. **Revista Científica da FASETE**, Campina Grande, v. 5, p. 98, dez 2011.
- [6] RADIO FREQUENCIES FOR SPACE COMMUNICATION. www.spaceacademy.net.Disponível em: <<https://www.spaceacademy.net.au/spacelink/radiospace.htm>>. Acesso em: 25 out. 2019.
- [7] BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. Arizona: [s.n.], 2012. 41-42 p.
- [8] BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. Arizona: [s.n.], 2012. 43-46 p.
- [9] BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. Arizona: [s.n.], 2012. 68-72 p.
- [10] TERZIC, E. et al. A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments. XII. ed. [S.l.]: Springer, 2012. 140 p
- [11] GUSSUOW, M. **Eletricidade básica**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 317-328p.
- [12] COSTA, B. R. S.; SANTOS, L. M.; BASSOI, L. H. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE CAPACITÂNCIA IRRIGAP® PARA A MEDIDA DA UMIDADE EM SOLO DO SEMIÁRIDO. **XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, Fortaleza, 4 a 8 agosto 2013.
- [13] LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI, M. B. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v. 54, p. 92-105, Agosto 2014.

- [14] MENDES, S.; CESAR, P. Caracterização de um sensor para medição da umidade do solo com termo -resistor a temperatura constante. Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 12. 2006
- [15] J.MINET et al. A Generalized Frequency Domain Reflectometry Modeling Technique for Soil Electrical Properties Determination. *Vadose Zone Journal*, v. 9, p. 1063-1073, Novembro 2010.
- [16] SREEDEEP , S.; RESHMA, ; SINGH,. Measuring Soil Electrical Resistivity Using a Resistivity Box and a Resistivity Probe. *Geotechnical Testing Journal*, v. 27, n. 4, p. 411-415, feereiro 2004.
- [17] ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*, v. Volume 343, 1 2019 junho , Pages 116-129, p. 116-129, junho 2019.
- [18] JAYAMARDANE, N. S.; MEYER, W. S.; BARRS, H. D. Moisture measurement in a swelling clay soil using neutron moisture meters. *Australian Journal of Soil Research*, p. 109-117, 1984.
- [19] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. www.linear.com. Disponível em: . Acesso em: 25 nov 2019.
- [11] XIAO, et al. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. **Measurement**, setembro 2019.
- [12] TERZIC, E. et al. A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments. XII. ed. [S.l.]: Springer, 2012. 140 p
- [13] LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI, M. B. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, v. 54, p. 92-105, Agosto 2014.
- [14] MENDES, S.; CESAR, P. Caracterização de um sensor para medição da umidade do solo com termo -resistor a temperatura constante. Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 12. 2006.
- [15] J.MINET et al. A Generalized Frequency Domain Reflectometry Modeling Technique for Soil Electrical Properties Determination. **Vadose Zone Journal**, v. 9, p. 1063-1073, Novembro 2010.
- [16] LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI, M. B. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, v. 54, p. 92-105, Agosto 2014.
- [17] SREEDEEP , S.; RESHMA, ; SINGH,. Measuring Soil Electrical Resistivity Using a Resistivity Box and a Resistivity Probe. **Geotechnical Testing Journal**, v. 27, n. 4, p. 411-415, feereiro 2004.

- [18] ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. **Geoderma**, v. Volume 343, 1 2019 junho , Pages 116-129, p. 116-129, junho 2019.
- [19] LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI, M. B. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, v. 54, p. 92-105, Agosto 2014.
- [20] JAYAMARDANE, N. S.; MEYER, W. S.; BARRS, H. D. Moisture measurement in a swelling clay soil using neutron moisture meters. **Australian Journal of Soil Research**, p. 109-117, 1984.
- [21] LEKSHMI, S. U.; SINGH, D. N.; SHOJAEI, M. B. A critical review of soil moisture measurement. *Measurement*, v. 54, p. 92-105, Agosto 2014.
- [22] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. **www.linear.com**. Disponível em: <www.linear.com>. Acesso em: 25 nov 2019.
- [23] DECAGON. GS1 Soil Moisture Sensor. www.decagon.com, p. 3, 23 novembro 2015. Disponível em: <<http://www.decagon.com.br/>>. Acesso em: 30 julho 2019
- [24] KIZITO, F. et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture. *Journal of Hydrology* (2008) 352, 367–378, v. 352, p. 367– 378, jan 2008.

Apêndice A – Projeto do sensor transistorizado

Características transistor BF494					
SÍMBOLO	PARAMENTRO	CONDIÇÕES	MINIMO	MAXIMO	UNIDADE
I_{CBO}	Corrente de corte do coletor	$I_E = 0; V_{CB} = 20 \text{ V}$	-	100	nA
		$I_E = 0; V_{CB} = 20 \text{ V}; T_{amb} = 150^\circ\text{C}$	-	4	μA
I_{EBO}	Corrente de corte do emissor	$I_C = 0; V_{EB} = 4\text{V}$	-	100	nA
I_{CM}	corrente máxima de coletor			30	mA
h_{FE}	Ganho de corrente DC	$I_C = 1 \text{ mA}; V_{CE} = 10 \text{ V}$	67	220	
V_{BE}	Tensão emissor base	$I_C = 1 \text{ mA}; V_{CE} = 10 \text{ V}$	650	740	mV
C_{re}	Capacitância	$I_C = 0; V_{CB} = 10 \text{ V}; f = 1 \text{ MHz}$	-	1	pF
f_t	Frequência de transição	$I_C = 1 \text{ mA}; V_{CE} = 10 \text{ V}; f = 100 \text{ MHz}$	120	-	MHz
Fonte: Philips					

1. Projeto circuito emissor seguidor unitário

Nesta etapa foi projeto um circuito amplificador unitário com a finalidade de proteger o oscilador

Regras de projeto

- $R1/R2$ igual a R_E
- $I_E = I_B = I_C$
- $H_{FE} = 1$
- $I_B < 30\text{mA}$

De acordo com o data sheet do transistor no BF494 a corrente máxima de coletor é 30mA. Sendo assim, os resistores do divisor de tensão devem ser projetados para que a corrente da base apresente um valor menor que 30mA, de forma que o transistor não seja danificado.

2. Circuito amplificador unitário

$$R1 = R2 \quad (4.1)$$

$$R_{TH} = \frac{R1 * R2}{R1 + R2} \quad (4.2)$$

$$R_E = R_{TH} \quad (4.3)$$

$$V_{BB} = 0,5 * V_{CC} = \frac{R2 * V_{CC}}{R1 + R2} \quad (4.4)$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{TH}} \quad (4.5)$$

$$I_E = I_C = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E} \quad (4.6)$$

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = 1 \quad (4.7)$$

VCC	12 V
VBE	0,7 V
IB	1,06 mA
IE	1,06 mA
IC	1,06 mA
R1	1KΩ
R2	1kΩ
RE	500Ω
Hfe ca SEGUIDOR UNITÁRIO	1
Hfe CA AMPLIFICADOR	100

Apêndice B – Média dos resultados dos ensaios

Tabela – Resultado dos ensaios sensor SUCI				
H2O	areia fina	areia média	areia grossa	areia misturada
0	0,32	0,32	0,31	0,3
1,39	0,40	0,39	0,33	0,31
2,78	0,40	0,39	0,34	0,33
4,17	0,38	0,42	0,35	0,35
5,56	0,42	0,43	0,35	0,36
6,94	0,45	0,46	0,35	0,36
8,33	0,47	0,50	0,34	0,37
9,72	0,45	0,48	0,34	0,37
11,11	0,47	0,46	0,35	0,38
12,50	0,96	0,49	0,36	0,4
13,89	0,68	0,51	0,37	0,42
15,28	1,04	0,53	0,36	0,43
16,67	0,41	0,45	0,36	0,45
18,05	0,40	0,45	0,37	0,46
19,44	0,44	0,45	0,40	0,47
20,83	0,52	0,46	0,38	0,48
22,22	0,39	0,45	0,38	0,5
23,61	0,38	0,45	0,39	0,51
25,00	0,37	0,46	0,40	0,52
26,39	0,37	0,51	0,40	0,52
27,78	0,38	0,51	0,40	0,52
29,16	0,39	0,47	0,40	0,52
30,55	0,41	0,45	0,40	0,52
31,94	0,46	0,45	0,40	0,52
31,94	0,46	0,45	0,40	0,52
33,33	0,46	0,45	0,40	0,52
34,72	0,46	0,45	0,40	0,52
36,11	0,46	0,45	0,40	0,52
37,50	0,46	0,45	0,40	0,52
38,89	0,46	0,45	0,40	0,52
40,28	0,46	0,45	0,40	0,52

Tabela- Resultado dos ensaios sensor SUCT				
H2O	areia fina	areia média	areia grossa	areia misturada
0	1,8	1,76	1,8	1,79
1,39	1,96	2,02	2,04	2,01
2,78	2,26	2,18	2,22	2,22
4,17	2,72	2,8	2,64	2,72
5,56	2,8	2,72	2,64	2,72
6,94	2,8	2,88	3,04	2,91
8,33	3,28	3,28	3,2	3,25
9,72	3,2	3,2	3,36	3,25
11,11	3,52	3,52	3,44	3,49
12,50	3,6	3,76	3,52	3,63
13,89	3,84	3,84	3,84	3,84
15,28	3,84	3,84	3,84	3,84
16,67	3,92	4	4,16	4,03
18,05	4	4,24	4,16	4,13
19,44	4,4	4,48	4,32	4,4
20,83	4,72	4,72	4,72	4,72
22,22	4,96	4,96	4,96	4,96
23,61	4,96	4,96	4,96	4,96
25,00	4,96	4,96	4,96	4,96
26,39	4,96	4,96	4,96	4,96
27,78	4,96	4,96	4,96	4,96
29,16	4,96	4,96	4,96	4,96
30,55	4,96	4,96	4,96	4,96
31,94	4,96	4,96	4,96	4,96
31,94	4,96	4,96	4,96	4,96
33,33	4,96	4,96	4,96	4,96
34,72	4,96	4,96	4,96	4,96
36,11	4,96	4,96	4,96	4,96
37,50	4,96	4,96	4,96	4,96
38,89	4,96	4,96	4,96	4,96
40,28	4,96	4,96	4,96	4,96

Tabela - Resultado dos ensaios sensor HL-69				
H2O	areia fina	areia média	areia grossa	areia misturada
0	0	0	0	0
1,39	0,08	0,35	0,12	0
2,78	1,29	0,07	0,2	0,13
4,17	1,98	0,09	0,73	0,71
5,56	2,66	0,14	2,34	2,25
6,94	3,25	0,5	2,82	2,8
8,33	3,64	2,42	2,94	2,94
9,72	3,73	3,22	3,1	3,1
11,11	3,68	3,41	3,17	3,18
12,50	3,69	3,43	3,25	3,3
13,89	3,81	3,46	3,28	3,28
15,28	3,85	3,51	3,42	3,41
16,67	3,84	3,58	3,45	3,46
18,05	3,83	3,65	3,56	3,55
19,44	3,79	3,68	3,66	3,68
20,83	3,73	3,71	3,68	3,69
22,22	3,57	3,78	3,57	3,6
23,61	3,24	3,78	3,5	3,45
25,00	3,19	3,65	3,46	3,44
26,39	3,19	3,44	3,44	3,44
27,78	3,19	3,43	3,42	3,44
29,16	3,19	3,43	3,42	3,44
30,55	3,19	3,43	3,42	3,44
31,94	3,19	3,43	3,42	3,44
31,94	3,19	3,43	3,42	3,44
33,33	3,19	3,43	3,42	3,44
34,72	3,19	3,43	3,42	3,44
36,11	3,19	3,43	3,42	3,44
37,50	3,19	3,43	3,42	3,44
38,89	3,19	3,43	3,42	3,44
40,28	3,19	3,43	3,42	3,44

Tabela - Resultado dos ensaios sensor HL-69				
H2O	areia fina	areia média	areia grossa	areia misturada
0	0	0	0	0
1,39	0	0	0,03	0
2,78	0,03	0	0,56	0
4,17	0,29	0	0,71	0,65
5,56	0,53	0,05	0,68	0,68
6,94	0,83	0,28	0,71	0,71
8,33	1,2	0,42	0,7	0,7
9,72	2,09	0,56	0,72	0,72
11,11	1,81	0,6	0,77	0,77
12,50	0,86	0,63	0,78	0,78
13,89	0,81	0,67	0,8	0,8
15,28	0,82	0,72	0,81	0,81
16,67	0,82	0,74	0,82	0,82
18,05	0,84	0,77	0,84	0,84
19,44	0,84	0,8	0,85	0,85
20,83	0,86	0,82	0,87	0,87
22,22	0,87	0,86	0,88	0,88
23,61	0,91	0,9	0,9	0,88
25,00	0,91	0,93	0,91	0,88
26,39	0,92	0,93	0,92	0,88
27,78	0,92	0,93	0,92	0,88
29,16	0,92	0,93	0,92	0,88
30,55	0,92	0,93	0,92	0,88
31,94	0,92	0,93	0,92	0,88
31,94	0,92	0,93	0,92	0,88
33,33	0,92	0,93	0,92	0,88
34,72	0,92	0,93	0,92	0,88
36,11	0,92	0,93	0,92	0,88
37,50	0,92	0,93	0,92	0,88
38,89	0,92	0,93	0,92	0,88
40,28	0,92	0,93	0,92	0,88