



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CLARISSA PEREIRA DOS SANTOS

**DESEMPENHO DO “SENSOR CAPACITIVO EM MEIOS POROSOS” EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE SALINIDADE**

FORTALEZA

2017

CLARISSA PEREIRA DOS SANTOS

DESEMPENHO DO “SENSOR CAPACITIVO EM MEIOS POROSOS” EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE SALINIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, PhD.

Coorientador: Dr. Francisco José Firmino Canafístula.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S234d Santos, Clarissa Pereira dos.
Desempenho do "sensor capacitivo em meios porosos" em diferentes condições de salinidade / Clarissa Pereira dos Santos. – 2017.
70 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco José Firmino Canafístula.

1. Sensor de umidade do solo. 2. Controle eletrônico. 3. Condutividade elétrica. I. Título.

CDD 630

CLARISSA PEREIRA DOS SANTOS

DESEMPENHO DO “SENSOR CAPACITIVO EM MEIOS POROSOS” EM DIFERENTES
CONDIÇÕES DE SALINIDADE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em 04/09/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Adunias dos Santos Teixeira, PhD (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Francisco José Firmino Canafistula (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Odílio Coimbra da Rocha Neto
GEOHIDRO Panamá

Prof. Dr. Ing. Sérgio Daher
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente pelo dom da vida e pelas bênçãos concedidas.

À Funcap, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola por conceder a oportunidade de participação no mestrado.

Ao professor Adunias do Santos Teixeira pela proposta de trabalho e orientação.

Ao Dr. Francisco José Firmino Canafístula pelo apoio e confiança no desenvolvimento da pesquisa.

Ao colega Amnon Amoglia Rodrigues pelo auxílio, acompanhamento e pelas valiosas discussões geradas durante a montagem e testes realizados no trabalho.

Aos membros participantes da banca examinadora pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos colegas do LEMA, do GAMA-DT e da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

A minha mãe Cleomar Pereira dos Santos e meu pai Adão Francisco Vieira dos Santos por serem essas pessoas tão abençoadas, exemplos de amor, fidelidade e companheirismo, e por fazerem do meu lar meu porto seguro.

Ao meu bebê João Miguel que me acompanha nessa etapa final do mestrado sendo dupla fiel nos estudos e descobertas de cada dia.

Aos meus irmãos Álisson, Letícia e Mateus pelo companheirismo e alegria de cada reencontro.

Ao meu amor Mair pelo zelo, compreensão e pela presença constante em cada momento nesse período de tantos acontecimentos importantes para nós.

Aos amigos e colegas que me acolheram e compartilharam diversos momentos importantes, cujos laços foram gerados nesse período de grande aprendizado longe da minha família.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é de alguém que acredite que ele possa ser realizado.” (Roberto Shinyashiki)

RESUMO

Os métodos capacitivos de determinação da umidade do solo apresentam grande praticidade e aplicabilidade no meio agrícola sofrem influência do tipo de solo, temperatura e salinidade. Nesse trabalho, teve-se como objetivo a verificação do desempenho do Sensor Capacitivo de Umidade em Meios Porosos submetido a meios salinos. O sensor avaliado fornece valores de frequência elétrica relativos à umidade do solo e foi desenvolvido na Universidade Federal do Ceará. Foi avaliado o fornecimento de dados quando submetido a diferentes condutividades elétricas do meio, referentes às soluções salinas em diferentes concentrações de cloreto de potássio (KCl), mantendo-se a temperatura constante. As medições foram realizadas em uma faixa de frequência elétrica de kHz a MHz. Posteriormente, foi avaliado o desempenho do sensor no solo de textura arenosa em diferentes umidades e salinidades. Correlacionando as medições em relação à umidade, foi possível identificar a influência dos sais na resposta dada pelo sensor quando da aplicação da água destilada em relação à utilização de soluções de KCl em diferentes concentrações. A influência dos sais também foi considerada diante da variação da frequência de medição para identificar se o aumento ou diminuição da frequência de saída conferiu uma alternativa de ajuste do sistema quanto à influência dos sais. Observou-se que os eletrodos do sensor capacitivo de meios porosos apresentam sensibilidade à salinidade, quando inserido em soluções aquosas com salinidade de até 4 dS.m^{-1} de condutividade elétrica. Também foi identificado que não houve diferença significativa quanto à atenuação do efeito da salinidade nas medições realizadas pelo sensor em solução ou em solo quando da utilização de diferentes resistores no circuito RC montado.

Palavras-chave: Sensor de umidade do solo. Controle eletrônico. Condutividade elétrica.

ABSTRACT

The capacitive methods of determination of soil moisture present great practicality and applicability in the agricultural environment vary depending on soil type, temperature and salinity. In this work, the objective was to verify the performance of the Moisture Capacitive Sensor in Porous Media submitted to saline media. The evaluated sensor provides electrical frequency values related to soil moisture and was developed at the Federal University of Ceará. It was evaluated the data supply when submitted to different electrical conductivities of the medium, referring to the salt solutions in different concentrations of potassium chloride (KCl), maintaining the constant temperature. The measurements were performed in an electric frequency range from kHz to MHz. Subsequently, the sensor performance was evaluated in the soil of sandy texture in different humidity and salinity. Correlating the measurements in relation to humidity, it was possible to identify the influence of the salts in the response given by the sensor when the distilled water was applied in relation to the use of KCl solutions in different concentrations. The influence of the salts was also considered in the variation of the measurement frequency to identify if the increase or decrease of the output frequency gave an alternative of adjustment of the system as to the influence of the salts. It was observed that the electrodes of the capacitive sensor of porous media show sensitivity to salinity when inserted in aqueous solutions with salinity up to $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ of electrical conductivity. It was also identified that there was no significant difference in the attenuation of the salinity effect in the measurements made by the sensor in solution or in soil when using different resistors in the mounted RC circuit.

Keywords: Soil moisture sensor. Electronic control. Electrical conductivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacitor de placas paralelas utilizado no trabalho	21
Figura 2 – Linha do tempo de trabalhos com Sensor Capacitivo de Meios Porosos do grupo LEMA	24
Figura 3 – Capacitor preenchido com material dielétrico	26
Figura 4 – Esquema de sensor de condutividade	32
Figura 5 – Relação entre a massa de KCl a ser dissolvida em 100 mL de água a partir da condutividade elétrica da solução desejada	38
Figura 6 – Leituras realizadas com as placas capacitivas utilizando-se a ponte LCR	39
Figura 7 – Comportamento da capacitância das placas do sensor diante da variação da frequência de oscilação do sinal da ponte LCR.....	40
Figura 8 – Representação do sensor capacitivo	41
Figura 9 – Esquema de medição das soluções em diferentes salinidades com o sensor capacitivo	42
Figura 10 – Croqui do experimento de medição com o sensor capacitivo	43
Figura 11 – Esquema de trabalho para avaliação da resposta do sensor em solo	44
Figura 12 – Medidas de capacitância obtidas pela ponte LCR para diferentes condutividades elétricas da solução em diferentes frequências de oscilação.....	48
Figura 13 – Resultados obtidos para a placa capacitiva 3 em diferentes frequências de oscilação da ponte LCR	48
Figura 14 – Respostas do sensor em kHz com a alteração da resistência do circuito na análise de diferentes salinidades da solução.....	50
Figura 15 – Respostas do sensor em kHz em diferentes CE_{SS} com resistores emparelhados	51
Figura 16 – Médias normalizadas das respostas dos sensores para diferentes resistores do circuito em função da salinidade das soluções	51

Figura 17 – Respostas dos sensores quando da variação do nível de água destilada para diferentes resistências do circuito elétrico	52
Figura 18 – Respostas dos sensores quando da variação do nível da solução com condutividade de 0,0017 dS/m (A) de 4 dS/m (B) para diferentes resistências do circuito elétrico	53
Figura 19 – Relação entre o teor de água no solo e o sinal de frequência elétrica dos sensores para diferentes condutividades elétricas	56
Figura 20 – Representação da normalidade dos resíduos para a regressão em função de θ e CE1:1	57
Figura 21 – Representação dos dados obtidos das leituras realizadas pelo sensor em relação aos estimados a partir da equação 13	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Constantes dielétricas de alguns materiais	23
Tabela 2	– Índice salino de diversos fertilizantes	34
Tabela 3	– Parâmetros básicos para a classificação de um solo segundo o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos	35
Tabela 4	– Classes de salinidade em função da condutividade elétrica do extrato de saturação (CE _{ES})	36
Tabela 5	– Resultados da análise do solo	43
Tabela 6	– Resultados de capacitância gerados com ponte LCR configurada com frequência de oscilação de 10 kHz a 25°C	46
Tabela 7	– Determinação da constante dielétrica da água considerada para cada placa capacitiva a partir da capacitância medida em frequência de 10 kHz no LCR	47
Tabela 8	– Valores de condutividade dos solos utilizados nos testes após saturação em solução salina	54
Tabela 9	– Coeficientes encontrados para regressão com transformação de dados do tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 \ln(X)$ para os valores de resposta em frequência em função da CE1:1	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ϵ	Permissividade dielétrica ($F.m^{-1}$)
ϵ_0	Permissividade do vácuo ($F.m^{-1}$)
ϵ_r	Permissividade relativa ou constante dielétrica (adimensional)
σ	Condutividade elétrica ($\Omega^{-1}.m^{-1}$)
f	Frequência elétrica (Hz)
ω	Frequência angular ($rad.s^{-1}$)
j	Número complexo $\sqrt{-1}$
d	Distância (m)
A	Área (m^2)
E	Campo elétrico (N/C)
D	Densidade de cargas elétricas ($J.m^{-3}$)
C	Capacitância (F)
R	Resistência elétrica (Ω)
CE_{SS}	Condutividade elétrica da solução de KCl (S/m)
CE_{ES}	Condutividade elétrica do extrato de saturação (S/m)
$CE_{1:1}$	Condutividade elétrica pelo método 1:1 (S/m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVO.....	18
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1	Medição da umidade do solo.....	19
3.2	Sensor capacitivo de meios porosos.....	21
3.3	Permissividade dielétrica de uma solução aquosa.....	25
3.4	Permissividade dielétrica em meios porosos.....	29
3.5	Condutividade elétrica.....	31
3.6	Salinidade do solo.....	33
4	METODOLOGIA.....	37
4.1	Avaliação dos eletrodos dos Sensores Capacitivos de Umidade em Meios Porosos em soluções salinas.....	37
4.2	Alteração de resistência do circuito eletrônico para avaliação de desempenho ótimo em meio salino.....	40
4.3	Avaliação de desempenho dos protótipos em meios porosos.....	42
4.4	Análise estatística dos dados.....	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1	Respostas das placas capacitivas.....	46
5.2	Teste com circuito de diferentes resistores em solução aquosa.....	49
5.2.1	<i>Avaliação da influência do nível da solução nas leituras do sensor.....</i>	<i>52</i>
5.3	Teste com circuito de diferentes resistores em solo.....	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DAS LEITURAS GERADAS PELOS TRÊS SENSORES EM SOLUÇÕES AQUOSAS A DIFERENTES CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS	65

APÊNDICE B – TESTE DE MÉDIAS PARA AS LEITURAS NORMALIZADAS DOS SENSORES EM SOLUÇÕES A DIFERENTES CES	66
APÊNDICE C – REGRESSÕES $f = \beta_0 + \beta_1 \ln(CE1:1)$ PARA CADA RESISTÊNCIA ELÉTRICA.....	67
APÊNDICE D– REGRESSÃO $f(\theta, CE1:1)$ PARA CIRCUITO COM O RESISTOR 7 (92 kΩ).....	72

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão é um modelo sustentável de produção que visa ao aumento produtivo e econômico da atividade agrícola, enquanto realiza o uso racional e eficiente dos insumos, causando menor impacto ambiental. Tal modelo produtivo adota tecnologias nos ramos da eletrônica e da informação como ferramentas de manejo da cultura agrícola, considerando-se a variabilidade espacial do campo. Tal variabilidade é resultado de uma complexa interação entre fatores biológicos, edáficos, antrópicos, topográficos e climáticos do ambiente que, quando conhecidas, possibilitam determinar onde, como, quanto e quando fertilizar, aplicar pesticidas ou irrigar, por exemplo.

Em se tratando da irrigação, pode-se dizer que a técnica da irrigação de precisão tem por objetivo aplicar a quantidade certa de água, no local correto, buscando-se diminuir as perdas e atingir as necessidades da cultura da forma mais otimizada possível. Isso é possível quando as características que influenciam a dinâmica da água no solo e na atmosfera são consideradas, sendo importante a manutenção da água no solo. A água interage com o meio e algumas de suas propriedades são reforçadas como é o caso da condutividade elétrica, da densidade e da temperatura de ebulição, que tendem a aumentar devido às substâncias nela dissolvidas, constituindo a solução do solo. Esse comportamento serve de base para métodos que visam à determinação da umidade do solo de forma direta ou indireta.

Há diversas metodologias para obtenção de dados da umidade do solo, como o uso de métodos tensiométricos, de moderação de nêutrons, técnicas eletromagnéticas e dielétricas como a reflectometria no domínio do tempo (TDR) e de reflectometria no domínio da frequência (FDR), entre outros que levam em consideração características elétricas da água e do meio. Dentre as metodologias citadas, há os sensores capacitivos de umidade do solo. Nesse caso, tanto as características do ambiente onde o sensor capacitivo é inserido, quanto a permissividade do meio e a condutividade elétrica, além das características geométricas, como a área e a distância entre as placas do sensor, são levadas em consideração na estimativa da quantidade de água no solo.

Os sensores capacitivos de meios porosos apresentam boa precisão de dados fornecidos, grande velocidade de resposta, são de manuseio relativamente fácil além de apresentarem menor custo em comparação com outros métodos como o TDR, possibilitando a automatização do sistema de irrigação. Como medem a capacitância do meio, esses sensores sofrem influência de variáveis que interferem nessa grandeza como a temperatura e a

condutividade elétrica do meio. Assim, a presença de sais dissolvidos pode influenciar na medida da umidade, pois estes alteram as características químicas do meio entre as placas capacitivas.

Apesar de a agricultura irrigada apresentar-se como uma grande alternativa para a produção de alimentos, estima-se que parte da água destinada à irrigação é utilizada de forma incorreta, gerando encharcamento e salinização do solo, comprometendo a sustentabilidade produtiva. Nos solos sob condições salinas, por exemplo, ocorre a redução da disponibilidade de água para as plantas, o que causa efeitos negativos no rendimento agrícola. A salinização de solos tem grande relação com as condições climáticas e com a agricultura irrigada, sendo este um fenômeno crescente na região semiárida. Além disso, o incremento de fertilizantes via água de irrigação mediante um manejo inadequado torna-se um grande agravante para o aumento da concentração de sais na solução do solo. Esse efeito torna-se maior quando o grau de salinidade dos adubos empregados é alto. Esses fatores interferem na medição da umidade do solo através de sensores capacitivos, pois a água da solução do solo apresenta suas características elétricas variáveis a depender das condições de salinidade.

Assim, o conhecimento de como ocorre a dinâmica do meio, a verificação da alteração das propriedades da água e a avaliação dos sinais de saída dos sensores capacitivos são importantes na proposição de atenuação do efeito da salinidade nos resultados das leituras de umidade fornecidos.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Investigar a influência da salinidade de soluções aquosas e do solo nas respostas de medição do sensor capacitivo de meios porosos.

2.2 Objetivos específicos

- Medir a capacitância das placas do sensor em soluções salinas de diversas concentrações;
- Desenvolver circuitos eletrônicos para gerar frequências de kHz a MHz;
- Investigar o efeito do aumento da frequência na medição do sensor em solução salina;
- Avaliar o desempenho do sensor na medição de quantidade de água em meio poroso;
- Analisar a influência de diferentes dosagens de soluções de cloreto de potássio (KCl) na medição da umidade do solo em diferentes frequências;
- Propor um método prático para calibração do sensor.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Serão expostos tópicos relacionados à pesquisa, no tocante às influências na medição da umidade pelo sensor, quanto à umidade e a salinidade, além das informações de funcionamento do sensor capacitivo estudado.

Considera-se importante, para melhor entendimento do assunto a ser abordado, apresentar a definição de alguns termos utilizados nesse trabalho:

- Capacitância: capacidade de acumular carga elétrica nas placas de um capacitor quando aplicada uma corrente alternada numa determinada tensão e frequência.
- Dielétrico: material que preenche o espaço entre as placas do capacitor.
- Permissividade elétrica (ou constante dielétrica): é uma medida da facilidade com que o dielétrico “permite” o estabelecimento de linhas de campo elétrico em seu interior, ou seja, a facilidade de polarização do meio entre as placas capacitivas e consiste em uma grandeza adimensional.
- Condutividade elétrica: sendo o inverso da resistência elétrica, essa propriedade está relacionada diretamente ao fluxo elétrico.
- Frequência elétrica: consiste na quantidade de ciclos (oscilação) de um sinal que ocorre em determinado período de tempo, tendo como unidade o Hertz e seus múltiplos. Se uma rede elétrica tem sua tensão variando 60 vezes por segundo, o que é imperceptível ao olho humano, então, pode-se afirmar que sua frequência elétrica é de 60 Hz, valor esse pequeno quando comparado às frequências de kHz e MHz que serão abordadas nesse trabalho.

3.1 Medição da umidade do solo

O monitoramento da umidade do solo, realizado continuamente *in situ* ou em tempo real, é uma demanda na agricultura para o estudo de plantas e do ambiente, e na hidrologia, para desenvolver modelos de interação entre o clima e a umidade do solo em uma determinada área (CHAVANNE; FRANGI, 2014).

Tem-se o método termogravimétrico de determinação da umidade do solo como a metodologia padrão. Esse método consiste em realizar pesagens de amostras de solo anterior (m_1) e posteriormente (m_2) ao seu acondicionamento em estufa a 105-110°C, para secagem em recipientes abertos (m_3) por um período de 24 horas, o que proporciona a perda da umidade do solo por evaporação. Ao se avaliar a diferença entre os valores pesados para cada amostra, é

possível inferir a umidade em que o solo se encontrava, com unidade em base de massa (U_m). A partir daí, conhecendo-se a densidade aparente do solo (d_s), é possível determinar o teor de água em base volumétrica (U_v). Esse é um método preciso, destrutivo e direto, mas que tem como desvantagem o tempo demandado para a obtenção do resultado.

$$U_m = \frac{m_l}{m_s} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \right) 100 \quad (1)$$

$$U_v = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \right) \cdot d_s \cdot 100 = U_m \cdot d_s \quad (2)$$

Como no manejo do solo seria necessário um método de determinação de umidade que fosse mais rápido e que, de preferência, não necessitasse de análises destrutivas, seriam mais indicados métodos indiretos que levam em consideração as propriedades físicas altamente relacionadas à quantidade de água presente no meio. Podem ser citadas as técnicas baseadas na determinação da condutividade elétrica ou da permissividade dielétrica do meio, sendo que estas têm sido amplamente utilizadas desde 1980 (TOPP et al., 1980). Sensores destinados a estimar o conteúdo de água do solo baseando-se somente na condutividade, normalmente não apresentam boa precisão, porque os resultados são influenciados pela salinidade do solo, sendo os métodos dielétricos de medição os mais apropriados em situações como essa.

Métodos bem estabelecidos tais como a reflectometria no domínio do tempo (TDR) e a reflectometria no domínio da frequência (FDR), que correspondem a sensores de capacitância, baseiam-se em propriedades dielétricas do solo, de forma que é possível mensurar o conteúdo de água aí presente a partir da permissividade do meio (BERNARDO et al., 2006). Noborio (2001) apresenta uma avaliação positiva do uso do TDR para a medição do conteúdo de água no solo e da condutividade elétrica com grande acurácia, tendo seu funcionamento baseado na medição do tempo de propagação de um pulso eletromagnético em uma linha de transmissão inserida no solo. O tempo de propagação é relacionado com a constante dielétrica do solo e uma equação de calibração relaciona o conteúdo volumétrico de água com a constante dielétrica. Já os métodos no domínio da frequência (sensores capacitivos e FDR) têm em seu circuito elétrico o capacitor conectado a um oscilador e as variações na frequência de operação são identificadas como mudanças no conteúdo de água do solo (Muñoz-Carpena et al., 2005).

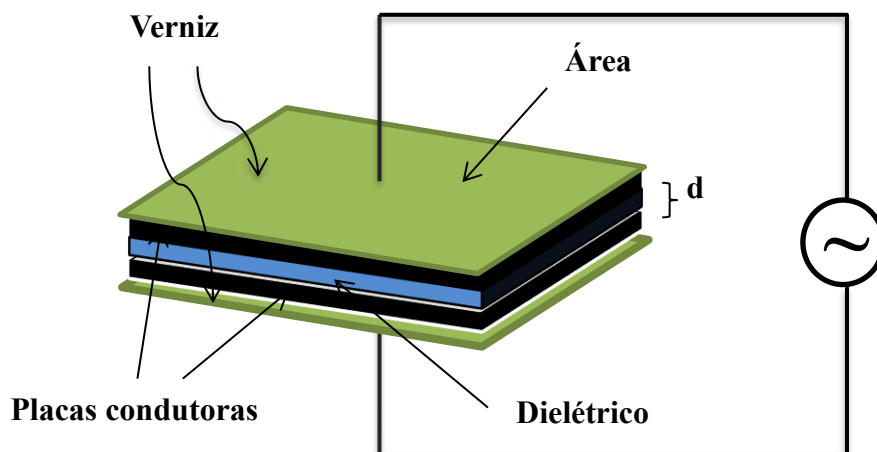
Os sensores capacitivos são submetidos a um campo elétrico e determinam a permissividade dielétrica do solo medindo o carregamento e descarregamento de um capacitor no solo, operando em uma medida de frequência. Mudanças na quantidade de água presente no

meio podem ser detectadas pelo efeito da alteração da capacitância, devido às mudanças da permissividade dielétrica do solo. Essa relação entre a permissividade do solo e a quantidade de água se dá devido ao grande contraste entre as propriedades da água livre, solo seco e ar (STACHEDER et al., 2009). Tais sensores capacitivos têm sido largamente utilizados devido à sua maior simplicidade de uso e por ter custo mais baixo comparado aos métodos baseados no TDR (FARES et al., 2007).

3.2 Sensor capacitivo de meios porosos

Silva et al. (2005) desenvolveram os sensores capacitivos de meios porosos que serviram como base para esse trabalho. Seu funcionamento fundamenta-se nas propriedades dos capacitores de placas paralelas, composto por duas placas condutoras, entre as quais é aplicada uma tensão elétrica variável, como é apresentado na figura 1. As placas condutoras do sensor são isoladas do ambiente o que auxilia na manutenção das cargas elétricas adquiridas. Entre as placas capacitivas, é inserido um dielétrico de forma que suas propriedades interferem na capacitância e, conseqüentemente, no sinal de frequência elétrica gerado na saída do circuito elétrico desse sensor.

Figura 1 – Capacitor de placas paralelas utilizado no trabalho.



Fonte: a autora.

O termo dielétrico é normalmente utilizado no sentido de materiais com baixa condutividade, sendo altamente isolantes. Dessa forma, vale salientar a presença de um verniz isolante que envolve as placas capacitivas do sensor desenvolvido por Silva et al. (2005),

garantindo esse isolamento elétrico, pois se não houvesse o verniz, as placas capacitivas não teriam a capacidade de armazenar carga, como deve ocorrer para o funcionamento do capacitor, principalmente se o dielétrico fosse condutor.

A capacitância desse modelo de capacitor é encontrada através da seguinte expressão:

$$C = \frac{A\varepsilon}{d} \quad (3)$$

onde A é a área de cada placa condutora (m^2), d é a distância entre as placas (m) e ε , a permissividade do material entre as placas.

A distribuição do campo elétrico entre as placas paralelas do capacitor depende do tipo de dielétrico, de forma que menor será o impedimento ao fluxo de cargas quanto menor for a resistividade. Assim, é esperado que os eletrólitos, como as soluções salinas, por exemplo, apresentem altas permissividades (NETTELBLAD, 1994). Em uma situação como essa, a aplicação de uma tensão elétrica através dos eletrólitos iria gerar uma distribuição de igual valor e de cargas opostas na superfície das placas do capacitor. Este fato é explicado pela lei de Gauss, segundo a qual as cargas não podem residir no interior de um condutor em equilíbrio eletrostático.

O número de linhas de campo elétrico (E) por unidade de área é chamada densidade de fluxo (D). Quanto maior a carga, maior é o número de linhas de campo por unidade de área, independente do meio onde ela se encontra. O campo elétrico E inclui os efeitos das cargas elétricas e da polarização do material, referente aos dipolos, enquanto que a densidade elétrica D , sobre uma superfície, é resultante somente das cargas livres, inclusive aquelas internas ou externas ao material, no espaço adjacente à superfície do capacitor.

A razão entre a densidade de fluxo e intensidade do campo elétrico no dielétrico é chamada de permissividade do dielétrico:

$$\varepsilon = \frac{D}{E} \quad (4)$$

A permissividade dielétrica (ε) de um material representa o coeficiente de proporcionalidade na relação entre um campo elétrico E , e a densidade de fluxo elétrico do condutor, D . Quanto maior for esse valor, maior será a densidade de fluxo para uma área constante.

Na ausência de cargas livres no material, o valor de sua permissividade é considerada como permissividade do vácuo ϵ_0 ($\epsilon_0=8,854 \text{ pF.m}^{-1}$), ou como permissividade relativa (ou constante dielétrica) ϵ_r , sendo esta cerca de 80 para água pura, variando por volta de 4 para constituintes sólidos do solo e 1 para o ar (CHAVANNE; FRANGI, 2014). Na tabela 1 são apresentadas as constantes dielétricas de alguns materiais. A razão entre a permissividade de qualquer dielétrico e a permissividade do vácuo é denominada permissividade relativa, ou constante dielétrica, ϵ_r . Ela simplesmente compara a permissividade do dielétrico com a do ar:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \therefore \epsilon = \epsilon_r * \epsilon_0 \quad (5)$$

Tabela 1 – Constantes dielétricas de alguns materiais

Material	Constante dielétrica
Vácuo	1
Ar (1 atm)	1,00054
Poliestireno	2,6
Papel	3,5
Óleo de transformador	4,5
Pirex	4,7
Mica rubi	5,4
Porcelana	6,5
Silício	12
Germânio	16
Etanol	25
Água (20°C)	80,4
Água (25°C)	78,5
Titânia	130
Titanato de estrôncio	310

Fonte: adaptado de Halliday et al. (2013)

Entende-se que para o mesmo par de placas paralelas, a capacitância obtida usando um dielétrico (de permissividade relativa ϵ_r) é ϵ_r maior do que se existisse vácuo (ou, aproximadamente, se existisse ar) entre as placas. Tendo-se que:

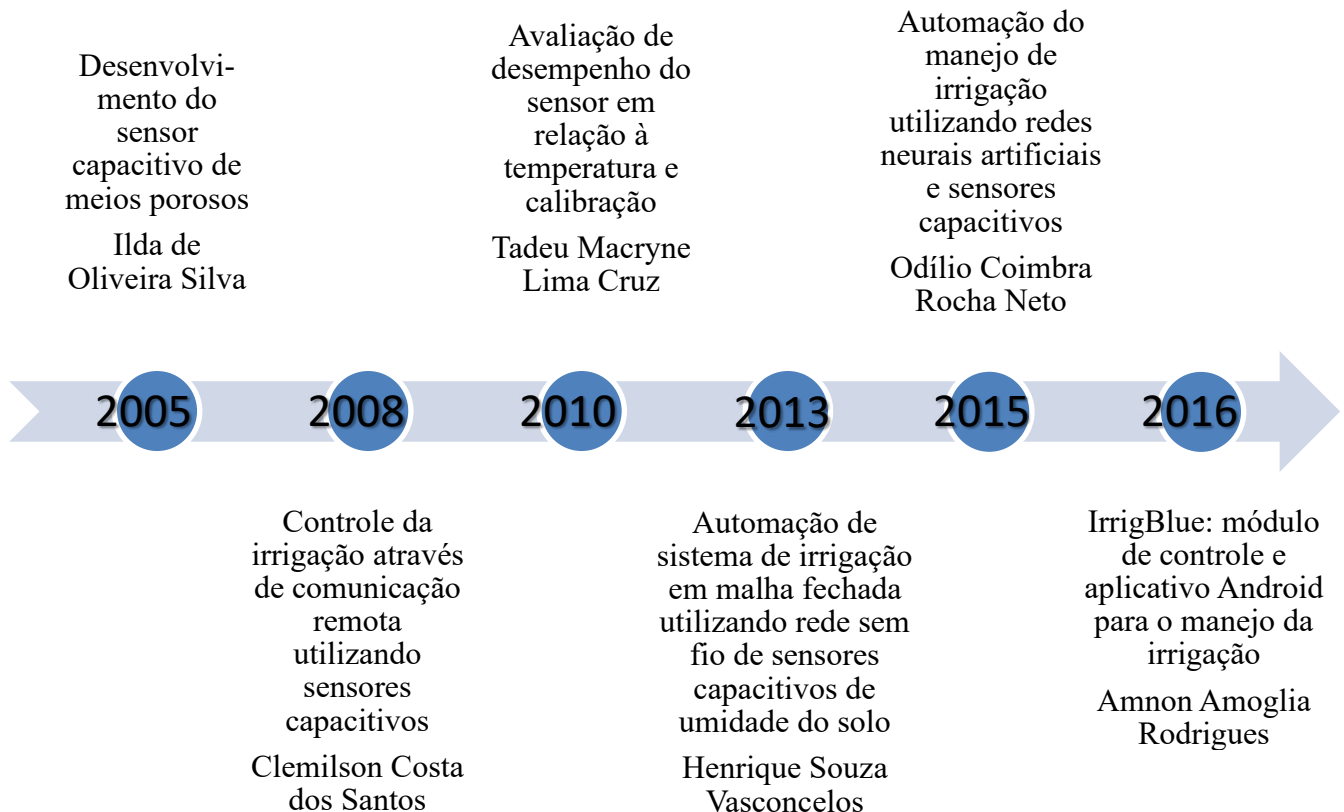
$$\frac{C}{C_0} = \frac{\frac{\epsilon * A}{d}}{\frac{\epsilon_0 * A}{d}} \therefore \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r \therefore C = C_r * C_0 \quad (6)$$

É verificado que essa relação entre ϵ e as capacitâncias fornece um excelente método experimental para determinar o valor de ϵ_r para diversos dielétricos.

A temperatura também pode influenciar nas condições do meio em que o sensor é inserido. Silva (2006) verificou uma variação da resposta do sensor capacitivo na ordem de

1,2% quando da variação de temperatura de 27,6°C a 31,6°C, não chegando a alterar a calibração dos sensores. Além dessa e outras avaliações, outros trabalhos foram desenvolvidos com o sensor capacitivo como é apresentado na figura 2.

Figura 2 – Linha do tempo de trabalhos com Sensor Capacitivo de Meios Porosos do grupo LEMA



Fonte: a autora

Santos (2008) desenvolveu redes de comunicação sem fio para o monitoramento em tempo real da umidade do solo, por meio dos Sensores Capacitivos em Meios Porosos, e da temperatura do solo, através de transdutores LM35 específicos para esse fim. A partir de ferramentas e componentes eletrônicos, foi gerado um sistema de aquisição de dados que possibilitou o controle automatizado do processo e a tomada de decisão quanto à necessidade de irrigação.

Cruz et al. (2010) avaliaram o efeito da temperatura sobre os Sensores Capacitivos em Meios Porosos, analisando o tempo de resposta e a sensibilidade do mesmo quando da medição do teor de água no solo. Para isso, foi gerada uma equação de calibração utilizando-se a relação entre o sinal de saída gerado pelo sensor e o método gravimétrico de determinação de

umidade no solo, sendo este realizado com o auxílio de um sistema de dados baseados em célula de carga. A sensibilidade do sensor capacitivo mostrou-se alta para baixos valores de umidade do solo. Porém, foram verificadas oscilações dos dados da célula de carga e do sensor capacitivo devido ao efeito da variação na temperatura ambiente.

Vasconcelos (2013) aplicou sensores capacitivos no controle automático da irrigação em malha fechada. Tal controle foi realizado por comunicação à distância por rede sem fio acionando válvulas hidráulicas e os sistemas motobomba. Para tanto foi desenvolvido um software, em linguagem Java de programação, que também monitorava e armazenava dados de umidade do solo e pressão do sistema, dados esses importantes no manejo da irrigação e na manutenção dos componentes do sistema.

Rocha Neto et al. (2015) apresentou uma metodologia de automatização do manejo eficiente de irrigação utilizando-se de ferramentas da inteligência artificial computacional. Foi determinado o tempo de irrigação da cultura da melancia pelo melhor resultado implementado por uma rede neural artificial, considerando o balanço hídrico volumétrico como método padrão de manejo da irrigação, utilizando-se os dados gerados pelos sensores capacitivos.

Rodrigues (2016) desenvolveu um aplicativo mobile para dispositivos Android para gerenciamento e controle de um sistema de irrigação. Esse sistema era composto de uma rede de sensores sem fio (RSSF) de coleta e transmissão de sinais emitidos pelos sensores capacitivos de umidade do solo para controle do sistema hidráulico em campo, possibilitando interface entre os módulos de campo e software de controle.

3.3 Permissividade dielétrica de uma solução aquosa

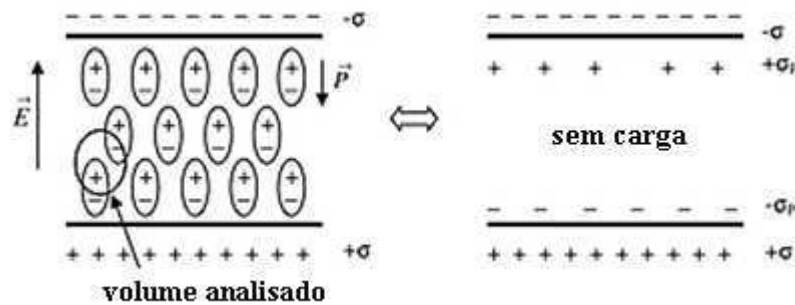
O desejável seria que não houvesse perdas nos materiais dielétricos, e assim eles pudessem armazenar mais cargas. Entretanto, em casos práticos, nenhum material (exceto o vácuo), comporta-se como um perfeito isolante, pois está associado com uma perda finita. Uma dessas perdas é a perda de condução, representada pelo fluxo das cargas através do dielétrico. A outra consiste em uma perda dielétrica e aumenta devido ao movimento de rotação das moléculas em um campo elétrico variante.

Ao se inserir um dielétrico entre as placas de um capacitor, como o material é isolante, os elétrons não conseguem deixar seus átomos e migrar para a placa positiva. Os prótons e elétrons de cada átomo se deslocam, entretanto para formar dipolos. Quando os dipolos se alinham, o material fica polarizado. Um exame mais minucioso do interior desse

material polarizado indica que as partículas negativas e positivas dos dipolos adjacentes se cancelam. Entretanto as cargas positivas na superfície mais próxima da placa negativa do capacitor, e as cargas negativas na superfície mais próxima da placa positiva do capacitor não se cancelam, o que resulta no aparecimento de um campo elétrico no interior do isolante. O campo elétrico total entre as placas ($\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{ar}} - \epsilon_{\text{dielétrico}}$) é menor devido à inserção do dielétrico. Portanto, o objetivo do dielétrico é criar um campo elétrico gerado pelas cargas livres das placas.

Quando um campo elétrico estático é gerado pela carga superficial (σ) do capacitor, ocorre um alinhamento das moléculas de água (dipolo permanente), considerando-se a água como sendo o material dielétrico dentro de um capacitor como ilustrado na figura 3. Na superfície ocorre um desbalanceamento de cargas que gera uma superfície adicional de cargas polarizadas (σ_P), neutralizando parcialmente a carga inicial. O campo elétrico (E) resultante dessa polarização de carga adicional é menor que o campo elétrico estático no vácuo, E_0 , numa determinada proporção ϵ_r ($\epsilon_r = E_0/E$) chamada permissividade relativa. Assim, quanto maior for a polarização, maior será a permissividade elétrica.

Figura 3 – Capacitor preenchido com material dielétrico.



Fonte: adaptado de Tarantino et al. (2009)

Quando um campo variante é propagado através do material, quando da inserção e um circuito oscilador, os dipolos alinhados oscilam, e uma onda de polarização se propaga através do material, sobrepondo-se ao campo de condução. Esse alinhamento manifesta-se como a parte real (em fase) da permissividade relativa (ϵ'_r). À medida que a frequência é aumentada, as moléculas que vão sendo alinhadas pelo campo alternativo, já não podem manter-se com a velocidade de alternância do campo. Esse processo é denominado relaxação do dipolo. Isso reduz a intensidade da polarização e dá origem a um intervalo de tempo entre o

campo aplicado e a onda de polarização. Tal deslocamento de fase consiste na parte imaginária da permissividade relativa (ϵ''_r) e causa dissipação da energia em forma de calor.

Com o aumento da temperatura, ocorre o aumento de colisões aleatórias entre os dipolos alinhados ao campo elétrico. Assim, a polarização diminui, estando a permissividade a uma baixa frequência. Enquanto isso, a movimentação dos dipolos é facilitada, aumentando a frequência com que ocorre a relaxação (TARANTINO et al., 2009). Como a água presente no solo não se encontra em seu estado puro, pois se apresenta em forma de solução contendo alguns íons nela dissolvidos, há a necessidade de se conhecer o comportamento da permissividade dielétrica de uma solução aquosa.

A condutividade elétrica causa perdas de energia (perda condutiva) além da perda devido à relaxação do dipolo (perda por relaxação). Isso é representado como uma permissividade equivalente:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r'(N, T) - j\epsilon_r''(N, T) - j \frac{\sigma_{dc}(N, T)}{2\pi f \epsilon_0} \quad (7)$$

Onde: ϵ_0 é a permissividade no espaço livre, σ_{dc} é a condutividade elétrica de corrente contínua e f é a frequência. De acordo com Stogryn (1971), ϵ'_r , ϵ''_r e σ_{dc} são dependentes da temperatura (T) e da normalidade (N), ou seja, concentração da solução aquosa. Observa-se que o aumento substancial da frequência reduz o efeito da concentração da solução analisada dada a sua divisão. Considerando-se circuitos em que o sinal da saída é em frequência, de forma proporcional à variação da capacitância do sensor, o aumento da frequência diminui os efeitos da perda capacitiva. Dessa forma, a parte imaginária da constante dielétrica diminui aproximando a constante dielétrica resultante do valor real. Todavia, o circuito fica mais propenso a ruídos com o aumento da frequência.

A condutividade elétrica e a frequência são parâmetros importantes a serem avaliados, pois têm efeito sobre a medição da permissividade complexa da água. A condutividade elétrica está associada com a parte imaginária da permissividade da água. Sobre o efeito da condutividade elétrica na medição da capacitância, Behzadi e Golnabi (2010) identificaram que a capacitância é diretamente proporcional à condutividade elétrica ao utilizar capacitores cilíndricos em soluções aquosas. Behzadi e Fekri (2013) identificaram que é possível medir precisamente a permissividade complexa a partir da medição da capacitância, resistência e do fator de perda submetidos a determinada frequência.

Quanto à influência da frequência, bem como da temperatura, nos valores da permissividade da água pura e de soluções foram verificadas por Kaatze (1989) avaliando os

valores fornecidos entre nove temperaturas de 0 a 50°C em frequências de 1,1 a 57 GHz, enquanto que Meissner e Wentz (2004) discutem as constantes dielétricas da água pura e do mar a partir de observações por frequências microndas de satélites. A permissividade complexa da água pura foi relatada em frequências de avaliação de 65 a 75 GHz a 25°C por Mattar e Bstckmastert (1990), em frequência de 9,355 GHz de 1 a 90°C por Barajas e Buckmastert, (1992) e em frequências inferiores a 1 THz por Liebe et al. (1991).

Existem diversas metodologias de medição da permissividade elétrica da água e o método capacitivo é uma delas. Assim, é possível realizar a medição da capacitância do meio utilizando-se um sistema composto por um sensor capacitivo e um instrumento de monitoramento das mudanças da capacitância. Uma ponte LCR é um equipamento que proporciona tal monitoramento, pois possibilita a medição e avaliação da precisão e qualidade de componentes indutivos (L), capacitivos (C) e resistivos (R) com sinais de frequência selecionáveis, além de fornecer o fator de dissipação e o índice de qualidade desses componentes (MINIPA, 2017).

Behzadi e Fekri (2013) avaliaram o efeito da frequência elétrica na medição da permissividade da água em diferentes condutividades elétricas a partir de um sensor capacitor cilíndrico inserido no meio avaliado. Eles identificaram uma diminuição na capacitância medida com o aumento da frequência de oscilação aplicada por um módulo LCR. Os autores utilizaram baixas frequências (100 Hz a 2kHz) a uma temperatura de 17,5°C. Com isso, observaram que a permissividade relativa complexa é proporcional à condutividade elétrica e que as soluções com maiores condutividades elétricas geram valores maiores de capacitância. Enquanto a água destilada apresentou capacitância de 3,83 μF e 0,04 μF , a solução salina (3,140 dS/m) apresentou capacitância de 7,98 μF e 4,11 μF nas frequências de 100 Hz e 2 kHz respectivamente. A água destilada como dielétrico na frequência de 500 Hz, apresentou uma permissividade relativa de $29,4 \cdot 10^6$.

Angkawisittpan e Manasri (2012) propuseram um sistema para avaliar a concentração de açúcar em solução utilizando um sensor capacitivo. Esse sensor capacitivo era uma estrutura planar com estrutura interdigital ligada a eletrodos positivos e negativos, conectado a um resistor e a um circuito oscilador. A aplicação dessa tecnologia visava aplicabilidade em indústrias alimentícias no tocante à produção de sucos e vinhos na avaliação da concentração de açúcares. Dessa forma, mudanças capacitivas ou na permissividade relativa do meio analisado foram utilizadas como fatores de monitoramento dos materiais de estudo e na medição de suas propriedades. A capacitância do sensor era alterada devido às alterações de

concentração da solução analisada. Os autores observaram que variando as frequências de operação no gerador de função de 100 kHz a 800 kHz ao imergir o sensor em béquer com solução, as tensões de saída diminuam à medida que as concentrações de açúcar se elevavam. A faixa de operação de 120 a 300 kHz foi sugerida como a melhor para aplicação nesse processo.

Minet et al. (2010) desenvolveram uma técnica de modelagem do meio analisado que poderia ser utilizada para definir as funções de transferência de sinais da sonda. Essa técnica foi validada com medições realizadas em meios salinos. Foram preparadas 10 soluções de diferentes salinidades de 0,154 a 1,550 g.L⁻¹ de NaCl adicionadas em água desmineralizada. A condutividade elétrica e a temperatura da solução foram monitoradas com um condutivímetro. A formulação do modelo de Debye para água salina de Meissner e Wentz (2004) baseada na condutividade elétrica e na temperatura do meio foi utilizada para estimar os valores teóricos da permissividade e da condutividade. Foi considerada uma permissividade dielétrica constante na faixa de 10 MHz a 1 GHz.

As permissividades dielétricas e as condutividades elétricas avaliadas por Minet et al. (2010) apresentaram concordância entre seus valores medidos. Foram realizadas também medições em 10 diferentes umidades em areia e as permissividades geradas pelas inversas dos valores do FDR foram próximas às encontradas pelas medições realizadas com o TDR bem como houve grande aproximação dos valores de conteúdo de água volumétrico. A expressão utilizada nessa metodologia apresenta uma relação entre a umidade volumétrica do solo e a permissividade relativa do meio: $\theta_v = a\sqrt{\epsilon_r} + b$, de forma que o r^2 encontrado para técnica com o FDR foi de 0,965 e para o TDR de 0,948. Com o sensor FDR foi possível determinar a condutividade elétrica devido à sua dependência da frequência.

3.4 Permissividade dielétrica em meios porosos

Quando os eletrodos dos sensores são inseridos no solo, espera-se que seja formada uma dupla camada entre a interface do solo e a superfície do eletrodo de acordo com a teoria da dupla camada eletroquímica (GUAN et al., 2005). Assim, é essencial se considerar o efeito elétrico da dupla camada na modelagem dos dados de umidade do solo gerados pelos sensores capacitivos (BISWAS et al., 2005). Nesse caso uma dupla camada eletroquímica está presente nas interfaces do meio poroso. O modelo de Stern a descreve como uma fina camada de íons

de polaridade contrária mais próxima da superfície carregada do sólido e uma camada difusa mais distante e externa (NETTELBLAD, 1994).

Essa dupla camada é responsável pela alta permissividade do meio, e várias teorias explicam esse comportamento. Porém, em sua maioria, essas teorias assumem que as dispersões estão diluídas, negligenciando as interações entre as partículas carregadas, ou tratando o entorno de uma partícula como um meio efetivo. Assim, não podem ser diretamente aplicadas para meios porosos. Ainda porque se prevê a presença de uma superfície carregada no dióxido de silício, principal constituinte do solo, quando em meio a um eletrólito. Sem falar das argilas que possuem suas superfícies normalmente carregadas (NETTELBLAD, 1994).

Alguns estudos consideram a dupla camada elétrica do solo na predição da umidade do solo (JOHNSON et al., 2002; SÁNCHEZ et al., 2004; BISWAS et al., 2005; BOGENA et al., 2007; GNECCHI et al., 2008). Xu et al. (2013b) investigaram a influencia da dupla camada elétrica no modelo capacitivo de aferição da umidade do solo.

Biswas et al. (2005) e Xu et al. (2013a) consideraram os efeitos da dupla camada na modelagem de sensores capacitivos com eletrodos inseridos em várias soluções, exceto em solo. Gnechchi et al. (2008) propôs um modelo incluindo o contato da capacitância e a resistência de contato causados pela dupla camada, mas esse modelo foi ignorado no cálculo real. De forma geral, o circuito equivalente à dupla camada elétrica pode ser reduzido a um capacitor associado em paralelo a um resistor (GUAN et al., 2005).

A propriedade dielétrica de solos úmidos pode ser representada por uma função complexa dependente da frequência como segue (SÁNCHEZ et al., 2004):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_r(\omega) + j\varepsilon_i(\omega) \quad (8)$$

onde ε_r é a parte real de ε , ε_i é a parte imaginária de ε , ω é a frequência angular ($2\pi f$) e j equivale a $\sqrt{-1}$.

O termo ε_r consiste na medida da energia armazenada nos dipolos alinhados quando é aplicado um campo eletromagnético, é a permissividade do espaço livre e tem dependência significativa com quanto de umidade há no solo, a permissividade relativa do solo se torna maior tanto quanto a proporção de água no solo aumenta. Já ε_i é a medida do fluxo de energia dissipada no meio e que pode ser determinada pela condutividade do meio. Apesar de ambos serem influenciados pela quantidade de umidade, ε_r é determinado por uma maneira previsível pela umidade do solo, mas o ε_i não. Uma específica banda de frequência pode ser escolhida para gerar diferentes medidas, de forma que a influência da condutividade do solo e a relaxação

dielétrica nas propriedades do solo seja menor que em outras faixas de frequência (MA; MA, 2002; ZHAO, 2009; XING et al., 2010). Hilhorst (1998) identificou valores de ϵ_r em uma faixa de 2 a 50 a uma frequência de 20 MHz enquanto a condutividade variou de aproximadamente 0 a 1 dS.m⁻¹.

Avaliando a polarização de meios heterogêneos, Hoekstra e Delaney (1974) identificaram uma frequência de relaxação dos dipolos elétricos associados à interface de polarização sendo 27 MHz. Dessa forma, ao se realizar medições, frequências acima de 30 MHz eram utilizadas para que tais dipolos não respondessem ao campo elétrico aplicado, e assim não haveria contribuição para a constante elétrica medida. Dean et al. (1987), por exemplo, desenvolveram um sensor capacitivo operando em 150 MHz.

3.5 Condutividade elétrica

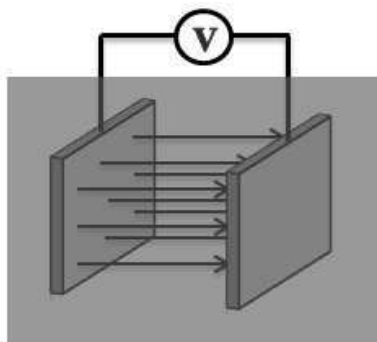
Condutividade é a unidade de medida da condução elétrica, uma propriedade que determinados materiais possuem de conduzir eletricidade. A condutividade elétrica é recíproca à resistividade elétrica, matematicamente expressa por:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} \quad (9)$$

onde L é o comprimento do material (m), R é a resistência do material ao fluxo de corrente elétrica (Ω) e A é a área da seção do material (m²). A unidade para a condutividade, σ , é mhos/metro ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) ou Siemens/metro (S.m⁻¹). Em um eletrólito, a condutividade é diretamente relacionada com o total de sais presentes dissolvidos na solução, pois quanto mais sais dissolvidos, mais alta é a condutividade de um eletrólito. Dessa forma, a condutividade é geralmente medida para deduzir a concentração de um analito.

Para a medição da condutividade de soluções aquosas, pode-se proceder utilizando se o esquema da figura 4, que consiste em dois eletrodos carregados, espaçados de uma distância fixa d.

A solução a ser analisada é disposta entre os eletrodos. Sob a aplicação de um potencial elétrico, uma corrente é gerada entre os eletrodos e o meio, e a magnitude dessa corrente é diretamente relacionada à condutividade elétrica da solução. Assim, a intensidade da corrente que flui no circuito é uma medida de condutividade da solução. Transdutores como esse medem, na realidade, a condutância da solução.

Figura 4 – Esquema de sensor de condutividade

Fonte: a autora

A vantagem desse sistema é a simplicidade de seu *design*. Entretanto, quando os eletrodos são inseridos na solução salina, efeitos de oxidação e redução são um problema. Além de a polarização das cargas ser pronunciada, se os mesmos eletrodos são utilizados para aplicar a tensão de entrada e medir a corrente resultante, a polarização pode ser minimizada, se não eliminada, utilizando-se uma estrutura diferente empregando quatro eletrodos (CASTRO, 2004).

A avaliação da condutividade elétrica a 25 °C é utilizada para monitoramento de soluções compostas com fertilizantes minerais destinados à hidroponia, tratamento de sementes e de soluções para pronto uso. Para isso utiliza-se o condutivímetro, equipamento convencional de determinação da condutividade elétrica, ajustado a partir da condutância de células fixadas em eletrodos. Esta medida serve como estimativa do teor total de sais em solução, baseada no princípio de que a resistência à passagem da corrente elétrica, sob condições padronizadas, diminui proporcionalmente com o aumento da concentração de sais.

Conforme observou Pincelli (2004), a condutividade elétrica depende principalmente da solução eletrolítica existente no solo. Solos com baixo teor de água apresentam elevada resistência elétrica. As partículas do solo e das rochas, na sua maioria, são isolantes elétricos, mas são capazes de conduzir a eletricidade através dos poros retentores de umidade e das camadas eletricamente carregadas nas suas superfícies. Dessa forma, a porosidade do solo, o formato e o tamanho dos poros, a respectiva quantidade de água retida, assim como, a distribuição dos poros no solo, afetam a condutividade elétrica. Além disso, a temperatura do solo, a quantidade e a composição dos colóides, e a densidade e o conteúdo de matéria orgânica.

A técnica da indução eletromagnética é uma forma não invasiva de medição da condutividade elétrica aparente do solo (EC_a). Os instrumentos utilizados geralmente têm um

transmissor e um receptor. Nessa técnica há a indução de correntes elétricas no meio avaliado de forma que sua amplitude é linearmente relacionada com a condutividade do solo, ao utilizar um campo magnético variável de frequências relativamente baixas com unidades em kHz. Assim, a magnitude dessas correntes é determinada medindo-se o campo magnético gerado (McNEILL, 1980).

A medição do teor de água no solo com sensores de umidade baseados em métodos eletromagnéticos é altamente dependente da condutividade elétrica, sendo também indicadores de salinidade do solo (HOOK et al., 2004; CARDENAS-LAILHACAR; DUKES, 2014). Como a água de irrigação com alto teor de sais aumenta a salinidade do solo e consequentemente a permissividades do solo, a permissividade dielétrica estimada é afetada, principalmente quando a condutividade elétrica ultrapassa determinado limite e passa a interferir na precisão das leituras. Ponciano et al. (2016), avaliando a estimativa de potássio presente no solo utilizando-se o TDR, sugeriu que fossem reduzidas incertezas associadas à medição de concentrações iônicas com TDR, reduzindo o intervalo de avaliação, levando-se em consideração o ponto em que ocorre uma brusca mudança da taxa de aumento da condutividade elétrica do solo.

3.6 Salinidade do solo

Os solos afetados por sais apresentam desvantagens por influenciar negativamente o desenvolvimento da cultura. A salinização ocorre devido ao acúmulo de sais na solução do solo, aumentando o potencial osmótico do mesmo, o que requer maior energia das plantas na absorção de água, diminuindo a capacidade de infiltração devido à dispersão das partículas do solo além de gerar toxidez às plantas (DUARTE et al., 2015).

Observa-se que as causas para o acúmulo de sais no solo são potencializadas por atividades antrópicas, muitas dessas vezes vinculadas ao mau manejo da irrigação, à qualidade da água utilizada e a não instalação de um sistema de drenagem ou sua ineficiência, quando há. Outro fator também é a aplicação exagerada de fertilizantes, principalmente os que apresentam alto grau de salinização. O índice de salinidade consiste na capacidade de materiais fertilizantes em aumentar a pressão osmótica da solução do solo, tomando-se como referência o índice igual a 100 para nitrato de sódio, aplicando-se o mesmo peso para ambos (DUARTE et al., 2015). Na tabela 2 pode-se verificar o índice de salinidade de diferentes fertilizantes.

Tabela 2 – Índice salino de diversos fertilizantes

Material Fertilizante	Índice de salinidade	Índice de salinidade por unidade de nutriente
Amônia anidra	47,1	0,572
Bifosfato de amônio	29,9	1,614
Carbonato de cálcio (Calcário)	4,7	0,083
Calnitro, 13,5%	105,9	8,475
Calnitro, 17,5%	109,4	6,253
Cianamida de cálcio	31,0	1,476
Cloreto de potássio, 50%	109,4	2,189
Cloreto de potássio, 60%	116,3	1,936
Cloreto de potássio, 63%	114,3	1,812
Cloreto de sódio	153,8	2,899
Dolomita (carbonato de cálcio e magnésio)	0,8	0,042
“Manure salts”, 20%	112,7	5,636
“Manure slts”, 30%	91,9	3,067
Fosfato de amônio (11-48)	26,9	2,442
Monofosfato de amônio	34,2	2,453
Monofosfato de cálcio	15,4	0,274
Nitrato amoniacal	61,1	2,982
Nitrato de amônio	104,7	2,990
Nitrato de cálcio	52,5	4,409
Nitrato de potássio	73,6	5,336
Nitrato de sódio	100,0	6,060
Solução nitrogenada, 37%	77,8	2,104
Solução nitrogenada, 40%	70,4	1,724
Sulfato de amônio	69,0	3,253
Sulfato de cálcio (gesso)	8,1	0,247
Sulfato de potássio	46,1	0,853
Sulfato de potássio e magnésio	43,2	1,971
Superfosfato, 16%	7,8	0,487
Superfosfato, 20%	7,8	0,390
Superfosfato, 45%	10,1	0,224
Superfosfato, 48%	10,1	0,210
“Uramon”	66,4	1,579
Ureia	75,4	1,618

Fonte: adaptado de Duarte et al. (2015)

O monitoramento da salinidade é uma técnica de apoio ao controle da salinidade do solo a partir da análise da concentração de determinados sais no solo. Os sais presentes no solo apresentam-se em forma de íons, principalmente devido à presença da água. A quantidade de sais presentes na água de irrigação pode ser expressa em partes por milhão (ppm) ou pela condutividade elétrica. Devido à praticidade e rapidez na determinação da concentração de sais

das águas destinadas à irrigação, a medição da condutividade elétrica (CE) tornou-se o procedimento padrão de medição.

Dentre as diretrizes para a interpretação da qualidade da água para irrigação segundo Ayers e Westcot (1985), no tocante aos problemas relacionados com a salinidade do solo considera-se com grau de restrição moderada amostras numa faixa de 0,7 a 3,0 dS/m, enquanto valores inferiores ou superiores a esse representam, respectivamente, nenhuma ou severa restrição ao uso na irrigação.

Segundo Castro (2004), a condutividade elétrica é um fator intrínseco do material, assim como outros fatores como a densidade e a porosidade. A grande utilidade da condutividade elétrica do solo é devido ao seu uso como uma ferramenta em potencial para auxiliar na investigação da variabilidade espacial dos atributos do solo.

Referente à qualidade dos solos quanto à quantidade de sais nele presente, há uma classificação dos solos em quatro grupos: normais, salinos, salinos-alcalinos ou salinos-sódicos e solos alcalinos ou sódicos, cujos critérios de classificação estabelecidos pelo laboratório de Salinidade dos Estados Unidos são apresentados na tabela 3. Os valores de condutividade elétrica da solução do solo estão expressos em dS/m, unidade equivalente a milimhos/cm, a 25°C e PST representa a percentagem de sódio trocável.

Tabela 3 – Parâmetros básicos para a classificação de um solo segundo o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos

Denominação	CE _{ES} (dS/m)	PST	pH	Recuperação
Normal	<4	<15	4 a 8,5	
Salino	>4	<15	= 8,5	Lixiviação dos sais
Salino-alcalino ou salino-sódico	>4	>15	8,5 < pH < 10	Aplicação de corretivos e lixiviação dos sais
Alcalino ou sódico	<4	>15	8,5 < pH < 10	Aplicação de corretivos e lixiviação dos sais

Fonte: Bernardo et al. (2006)

Na tabela 4 são apresentadas as consequências sofridas pelas culturas diante de diferentes condições de salinidade segundo o laboratório de Salinidade dos Estados Unidos. A condutividade elétrica do extrato de saturação, ou condutividade elétrica do extrato da pasta saturada, é utilizada para determinar as classes de salinidade do solo.

Tabela 4 – Classes de salinidade em função da condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{ES})

Classes de salinidade	CE_{ES} (dS/m)	Efeito sobre as culturas
Não salino	<2	Efeitos não significantes da salinidade
Ligeiramente salino	2 – 4	Rendimentos de culturas muito sensíveis são restringidos
Moderadamente salino	4 – 8	Rendimento de muitas culturas é restringido
Muito salino	8 – 16	Apenas culturas tolerantes têm rendimento satisfatório
Extremamente salino	>16	Apenas algumas culturas muito tolerantes conseguem produzir

Fonte: Richards (1954)

4 METODOLOGIA

4.1 Avaliação dos eletrodos dos Sensores Capacitivos de Umidade em Meios Porosos em soluções salinas

Os Sensores Capacitivos de Umidade em Meios Porosos (SCUMP) utilizados nesse trabalho foram desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA), do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará (UFC). O mesmo consiste em duas placas retangulares confeccionadas em fibra de vidro, com seu circuito eletrônico interno integrado impresso na parte superior. Uma fina camada de cobre define os eletrodos do capacitor, sendo impermeabilizadas de forma a evitar sua oxidação e eliminar a condução elétrica de carga, pelo meio dielétrico (RENDE; BIAGE, 2002; CRUZ et al., 2010). Nesse primeiro momento, foram utilizados somente os eletrodos sob a base isolante do mesmo, excluindo-se o seu circuito elétrico. Esse procedimento fez-se necessário para se identificar a capacitância (C) gerada diante da imersão das placas em diferentes soluções salinas.

Considerando-se as características construtivas do sensor, que possui área de formação do campo elétrico uniforme (A) equivalente a 0,0025 m² e distância entre os eletrodos do capacitor (d) de 0,005 m, tendo-se também a permissividade do vácuo (ϵ_0) de valor 8,8542.10⁻¹² enquanto que a permissividade relativa (ϵ_r) é dependente do meio, observa-se teoricamente que:

$$C = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{d} = \frac{(0,0025 \text{ m}^2) \cdot 8,8542 \cdot 10^{-12} \cdot \epsilon_r}{0,005 \text{ m}} = 4,4271\epsilon_r \quad (10)$$

Considerou-se a constante dielétrica do ar (ϵ_{ar}) como sendo igual a 1 enquanto que a constante dielétrica da água ($\epsilon_{\text{água}}$) foi obtida pela equação 11 (WEAST, 1986) seguinte devido estar em função da temperatura (T).

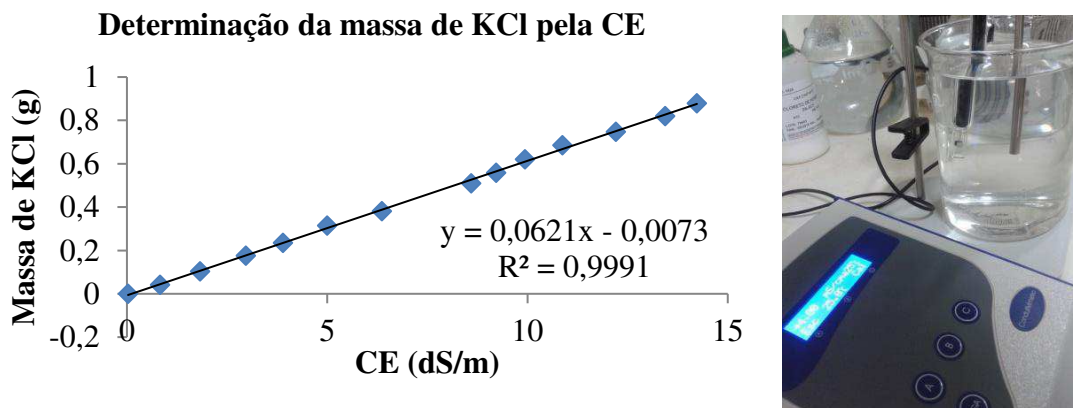
$$\epsilon_{\text{água}} = 78,54[1 - 4,579 \cdot 10^{-3}(T - 25) + 1,19 \cdot 10^{-5}(T - 25)^2 - 2,8 \cdot 10^{-8}(T - 25)^3] \quad (11)$$

Diante das capacitâncias medidas, seria possível se identificar que as diferentes características do meio (permissividade relativa) influenciariam nas repostas mediante a mudança da salinidade do meio onde as placas capacitivas fossem inseridas. Dessa forma, foi

feita a verificação do desempenho das placas capacitivas no fornecimento de dados quando submetido a um meio salino.

Foram preparadas soluções em diferentes concentrações para se atingir condutividades elétricas, tomando-se como padrão dez concentrações de cloreto de potássio (KCl) com 0, 0,5, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 12 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. O KCl foi escolhido devido à sua aplicação nas avaliações de salinidade de soluções, sendo tal procedimento apresentado em MAPA (2013). Para isso foi preparada uma curva relacionando-se a quantidade de soluto a ser dissolvida em determinado volume de água destilada para se atingir o valor de condutividade elétrica desejado na solução, como pode ser observado na figura 5.

Figura 5 – Relação entre a massa de KCl a ser dissolvida em 100 mL de água a partir da condutividade elétrica da solução desejada



Fonte: a autora

Para se determinar a relação entre a concentração de cloreto de potássio (KCl) na solução e a condutividade elétrica da mesma, foram realizados ensaios preliminares com a preparação de soluções de KCl, de forma que foram solubilizadas massas diferentes de KCl em água destilada para posterior medição determinação das respectivas CEs utilizando-se um condutivímetro de bancada. Submetendo-se os resultados à análise de regressão, chegou-se à equação abaixo onde [KCl] corresponde à concentração de KCl em $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ e CE à condutividade elétrica da solução em $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

$$[KCl] = \frac{CE - 4,5333 \cdot 10^{-6}}{0,00621} \quad (12)$$

Tendo-se como base essa calibração, foram pesadas as massas da amostra sólida, em balança com precisão de 0,1 mg, transferindo-as para balão volumétrico de capacidade

adequada. Posteriormente foi adicionado o volume de água de acordo com a concentração desejada, realizando-se a homogeneização. Assim, foi realizada a leitura da condutividade das soluções das amostras, lavando com água e enxugando bem a célula de condutividade após cada determinação.

Essas soluções preparadas em volume fixo de 2 L em balão volumétrico foram colocadas em béquer para prosseguimento das avaliações. A temperatura foi mantida em $25^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ para minimizar sua influência nos dados fornecidos pelo sensor. Essa temperatura é importante e consiste num padrão de medição, pois foi considerada a condutividade elétrica das soluções corrigida para 25°C , que foi medida com condutivímetro de bancada. Dessa forma, seria possível relacionar os valores encontrados pelo sensor capacitivo e pelo condutivímetro.

A magnitude da capacitância (C) das placas capacitivas no sistema foi medida utilizando-se uma ponte LCR (Minipa, MXB-821) (Figura 6), excitada por um sinal senoidal, num range de frequência variável de 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz e 10 kHz. É importante salientar que nesse momento, trabalhava-se somente com as placas que compunham o capacitor do sensor, sem o circuito do mesmo. Assim, foram gerados um campo elétrico uniforme e valores diferentes de capacitância a serem correlacionados com as diferentes concentrações das soluções preparadas como apresentado anteriormente.

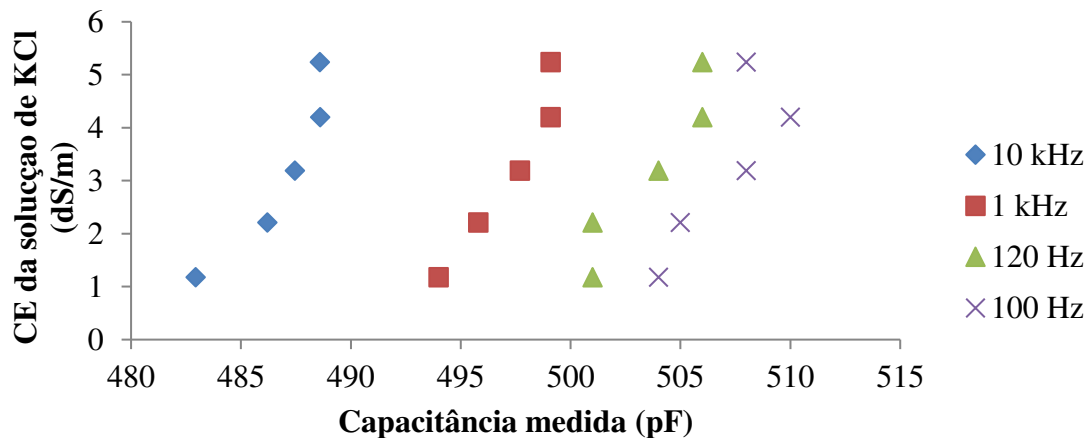
Figura 6 – Leituras realizadas com as placas capacitivas utilizando-se a ponte LCR



Fonte: a autora

Desse modo, a partir de testes preliminares foi possível identificar que soluções a determinadas condutividades elétricas geravam valores diferentes nos eletrodos do sensor capacitivo a depender da frequência de trabalho utilizada na ponte LCR como se observa na figura 7. A diminuição da frequência de oscilação do LCR gerou o aumento dos resultados de capacitância, enquanto que o mesmo resultado decorria do aumento da concentração salina da solução. Assim, a capacitância elétrica é diretamente proporcional à condutividade elétrica do meio e inversamente proporcional à frequência elétrica de oscilação do circuito.

Figura 7 – Comportamento da capacitância das placas do sensor diante da variação da frequência de oscilação do sinal da ponte LCR



Fonte: a autora

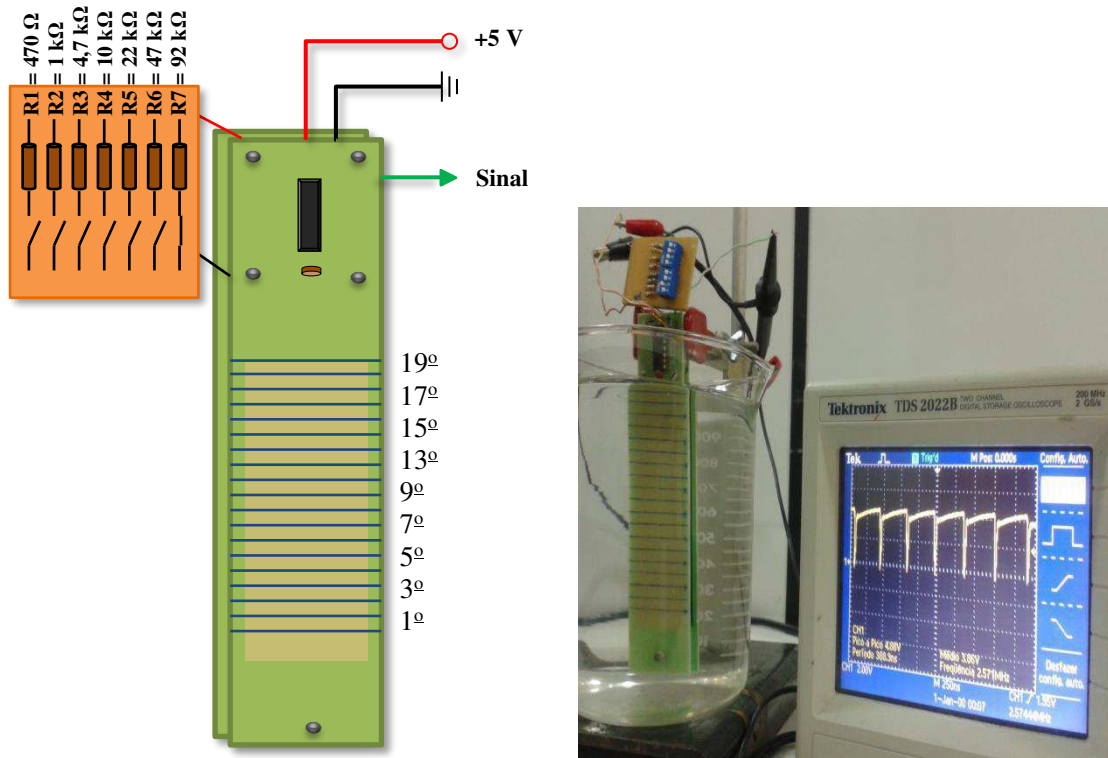
4.2 Alteração de resistência do circuito eletrônico para avaliação de desempenho ótimo em meio salino

O circuito foi modificado para gerar frequências na faixa de Hz a MHz utilizando-se um oscilador RC implementado com um circuito integrado como “multivibrador”, procedendo-se com a retirada do divisor de frequência do circuito, pois assim seria realizada a leitura da frequência total gerada pelo circuito. Os *datasheets* desses componentes eletrônicos foram consultados para servir de base para a montagem do circuito eletrônico em teste.

Foram determinados os resistores que, no circuito RC com as placas capacitivas, geravam valores de frequência compatíveis ao circuito e que fossem livres de ruído. Essa primeira determinação foi realizada utilizando-se um trimpot de precisão e, depois de

identificadas as resistências de trabalho, foi confeccionada uma placa com resistores a serem acionados em cada leitura desejada. Assim, os resistores escolhidos para esse trabalho foram os seguintes de valor nominal: $470\ \Omega$, $1\ \text{k}\Omega$, $4,7\ \text{k}\Omega$, $10\ \text{k}\Omega$, $22\ \text{k}\Omega$, $47\ \text{k}\Omega$ e $91\ \text{k}\Omega$. Estes valores comerciais de resistências que possibilitam praticidade na variação da frequência de leitura. Assim foram montados três sensores, ressaltando-se que a área de contato com o meio, a distância entre as placas e a temperatura foram mantidas constantes durante as medições. Na medição das resistências e da temperatura com auxílio de um termopar foi utilizado um multímetro (Minipa, ET-2042D). No tocante ao volume da solução analisado, foram realizadas 19 marcações distantes em $0,5\ \text{cm}$ uma das outras para limitar o nível da solução e caracterizar o conteúdo de água ao redor do sensor durante as medições, para cada condutividade elétrica. Dessa forma seria possível estabelecer uma relação entre o meio capacitivo preenchido com a solução e a resposta do sensor em diferentes profundidades (Figura 8).

Figura 8 – Representação do sensor capacitivo

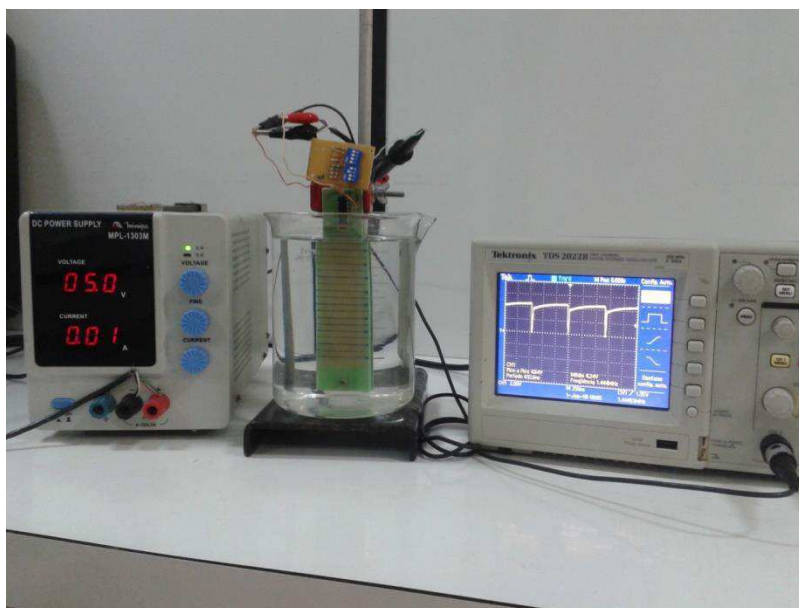


Fonte: a autora

Para realizar as medições com o sensor capacitivo de umidade desenvolvido na Universidade Federal do Ceará (SILVA et al., 2005), foram utilizadas uma fonte de alimentação

(Minipa, MPL-1303M) para manter a tensão de entrada em 5 V e um osciloscópio (Tektronix, TDS 2022B) de dois canais com fundo de escala de 200 MHz e 2Gs/s para medição dos valores de frequência gerados pelo circuito como apresentado na figura 9.

Figura 9 – Esquema de medição das soluções em diferentes salinidades com o sensor capacitivo



Fonte: a autora

4.3 Avaliação de desempenho dos protótipos em meios porosos

Nessa fase do trabalho, foram avaliados os sinais obtidos pelo sensor quando inserido um meio poroso (solo) entre suas placas capacitivas. O solo utilizado foi proveniente de uma área anexa ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação, na Universidade Federal do Ceará (UFC). Esse solo tem classificação como Podzólico-Vermelho-Amarelo equivalente eutrófico, de textura franco-argilo-arenosa (SILVA, 2006). Uma amostra composta do solo foi coletada para fins de caracterização em laboratório quanto às suas propriedades físicas como está apresentado na tabela 5.

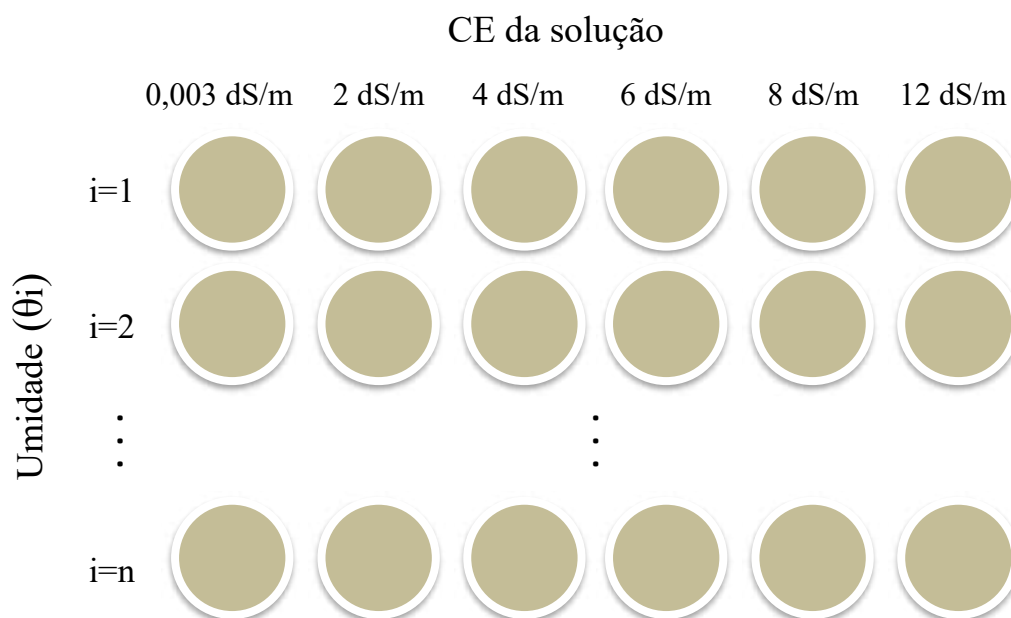
As demais amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas, peneiradas em malha de 2 mm e depositadas dentro de tubos de PVC de 100 mm e 25 cm de altura. Na parte inferior do tubo foi colocado um cap perfurado além de um tecido na parte interna formando um material permeável, impedindo somente a perda de solo.

Tabela 5 – Resultados da análise do solo

Profundidade (cm)	Composição granulométrica (g/kg)				Densidade (g/cm ³)		Classificação textural	CE (dS/m)
	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	Global	Partícula		
0 - 10	392	422	96	90	1,53	2,81	Areia franca	0,18

Fonte: a autora

As amostras foram depositadas nos tubos de PVC com o sensor inserido juntamente ao solo formando blocos a condições específicas de umidade e condutividade elétrica das soluções de KCl preparadas de 0,003 (água destilada), 2, 4, 6, 8 e 12 dS/m (Figura 10). Isso foi possível através da saturação das amostras nas soluções salinas de forma ascendente, para evitar a formação de bolsas de ar. Nessa etapa do trabalho, foram analisadas as variáveis elétricas aferidas pelo sensor capacitivo diante da aplicação das soluções e da medição da umidade do solo, este último comparado com método termogravimétrico ao final das avaliações.

Figura 10 – Croqui do experimento de medição com o sensor capacitivo

Fonte: a autora.

Como é ilustrado na Figura 11, foi realizada uma marcação no interior do tubo a 0,17 m do fundo delimitando o nível do solo a ser inserido, de forma a se controlar a densidade global do mesmo em cada tubo. Sendo assim, como era conhecido o volume a ser preenchido, equivalente a 1282,3 cm³, eram pesadas as amostras de solo seco no valor de 2026,03 g de

forma a se obter uma densidade do solo de $1,58 \text{ g/cm}^3$. O sensor foi inserido juntamente ao solo para garantir a presença do solo entre as placas capacitivas. Após a saturação e posterior alcance da capacidade de campo pelo solo dos blocos, os mesmos foram levados à estufa para favorecer a perda de água por evaporação. Em intervalos de 1 e 2 horas, era realizada a leitura da frequência de saída do sensor, quando a temperatura se estabilizava em 33°C depois da retirada da estufa, temperatura essa aferida com um termopar. Também se procedia com a pesagem de cada bloco para posterior relação com a umidade em base de massa e de volume do solo, de forma que se partiu da umidade de capacidade de campo até uma faixa de aproximadamente 19% b.v. (em base volumétrica). Na pesagem foi utilizada uma balança de precisão (AdventurerTM, modelo ARD110) com capacidade máxima de 4100 g.

Figura 11 – Esquema de trabalho para avaliação da resposta do sensor em solo



Fonte: a autora

A medição da condutividade elétrica do solo também foi realizada em laboratório pelos métodos do extrato de saturação (CE_{ES}) e pelo método 1:1 ($CE_{1:1}$). Para isso foram reservadas quantidades dos solos que compunham os blocos em cada salinidade para secarem ao ar. Pelo método da condutividade elétrica do extrato de saturação, ou da pasta saturada, na avaliação dos sais solúveis, foram preparadas as pastas de saturação para a obtenção do extrato em sistema a vácuo e no extrato da pasta saturada mediu-se a condutividade elétrica (CE a $25^{\circ}C$). Já no método de determinação 1:1, foram pesadas 20 g de cada solo e adicionados 20 mL de água destilada (considerando-se a densidade da água de 1 g.mL^{-1}), deixando-se formar corpo de fundo durante uma hora e verificando-se a condutividade do sobrenadante com condutivímetro de bancada.

4.4 Análise estatística dos dados

Para se conhecer a significância do efeito da salinidade no sensor, os dados foram tratados estatisticamente, sendo analisadas as correlações das variáveis estudadas. Tabelas e gráficos foram confeccionados com suplemento para análise de dados do programa Microsoft Excel versão 2010, para auxiliar a interpretação dos resultados obtidos. Também foi utilizado o programa Stata/MP, versão 13.0 da StataCorp LP, para as análises de regressão simples e múltipla.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Respostas das placas capacitivas

As avaliações das placas capacitivas foram realizadas numa configuração em que a ponte LCR fornecia frequência de oscilação do sinal de 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz e 10 kHz, de forma que fosse fornecida a capacitância do meio analisado. Observou-se um melhor comportamento dos dados gerados ao se configurar a ponte LCR para gerar leituras das amostras com frequência de 10 kHz, a uma temperatura ambiente de 25°C. Essa frequência elétrica e os resultados de capacitância fornecidos serviram de parâmetro na avaliação do valor da constante dielétrica esperada para cada meio estudado. Foram utilizadas três placas capacitivas nas medições, e dessa forma foram obtidos os valores apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Resultados de capacitância gerados com ponte LCR configurada com frequência de oscilação de 10 kHz a 25°C

Medição	Placa 1	Placa 2	Placa 3
	Água destilada		
I	446,92 pF	300,02 pF	314,02 pF
II	446,45 pF	300,24 pF	314,19 pF
III	445,77 pF	300,75 pF	314,12 pF
Média	446,38 pF*	300,34 pF*	314,11 pF ^{ns}

* Significativo pelo teste t_d a 0,05; ns – não significativo

Ao montar a análise de variância (ANOVA) dos dados obtidos de capacitância considerando-se cada placa capacitiva como um tratamento, foi possível identificar que houve diferença estatística entre pelo menos dois tratamentos, considerando-se como padrão o valor calculado de 4,43 pF para testes em ar e de 354 pF em água destilada, dados esses provenientes da equação 10. Behzadi e Fekri (2013) apresentaram que a capacitância dependia da permissividade complexa e de sua geometria o sensor capacitivo cilíndrico de forma que a capacitância do ar medida foi de 0,16 pF.

Realizando-se um teste de Dunnett, para comparar o valor padrão com os demais resultados gerados pelas placas capacitivas em diferentes frequências, observou-se que somente a placa capacitiva 3 não diferiu a nível de 5% de significância do valor esperado em água destilada. Isso significa que a placa capacitiva 3 poderia ser utilizada para medições da capacitância de determinado meio, gerando valores precisos nesse nível de frequência.

Realizando-se a razão entre cada medição de capacitância e o valor padrão para o ar (4,43 pF), tal procedimento embasado na equação 6, foi possível verificar qual seria a constante dielétrica da água fornecida por cada sensor, como está apresentado na tabela 7. Pode-se verificar melhor aproximação para a placa 3, lembrando-se que o valor esperado para a constante dielétrica da água ($\epsilon_{\text{água}}$) é de 80.

Tabela 7 – Determinação da constante dielétrica da água considerada para cada placa capacitiva a partir da capacitância medida em frequência de 10 kHz no LCR

Medição	Placa 1	Placa 2	Placa 3
Calculado	Ar		
	4,43 pF		
Média $\epsilon_r(\text{água})$	Água destilada		
	446,38 pF	300,34 pF	314,11 pF
	100,76	67,80	70,90

A figura 12 apresenta os resultados obtidos pela medição da capacitância das placas capacitivas do sensor em diferentes soluções de KCl utilizando-se a ponte LCR em diferentes frequências de trabalho. As barras apresentam o desvio padrão das medidas obtidas em triplicata. É possível identificar que o aumento da frequência resultou na diminuição das medidas de capacitância. Além disso, observa-se uma tendência de aumento da capacitância com o aumento da CE até 4 dS/m, enquanto que valores maiores de condutividade elétrica da solução aparentam não influenciar a variação da capacitância medida, em quaisquer das frequências de oscilação.

Ocorreu uma menor dispersão dos dados quando se aumentou a frequência de oscilação da ponte LCR. Na figura 13 pode-se observar o comportamento dos resultados diante da faixa de maior influência da salinidade na capacitância, bem como a curva equação de regressão gerada em cada frequência. Todos os modelos seguiram uma tendência polinomial de segundo grau de forma que a o aumento da capacitância é proporcional ao aumento da salinidade do meio aquoso. Behzadi e Golnabi (2010) também identificaram o aumento da capacitância com o aumento da condutividade elétrica ao utilizar capacitores cilíndricos em soluções aquosas.

Figura 12 – Medidas de capacitância obtidas pela ponte LCR para diferentes condutividades elétricas da solução em diferentes frequências de oscilação

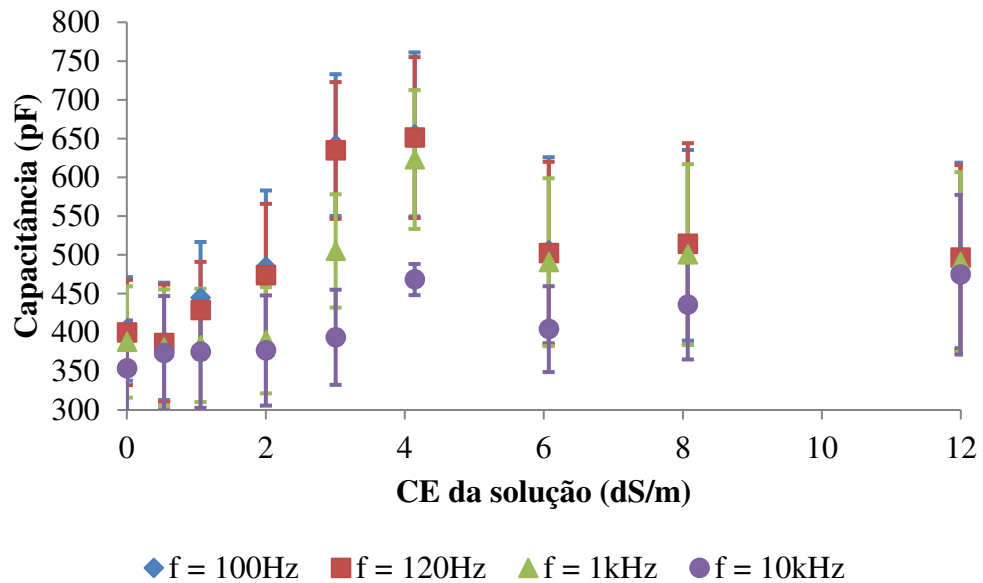
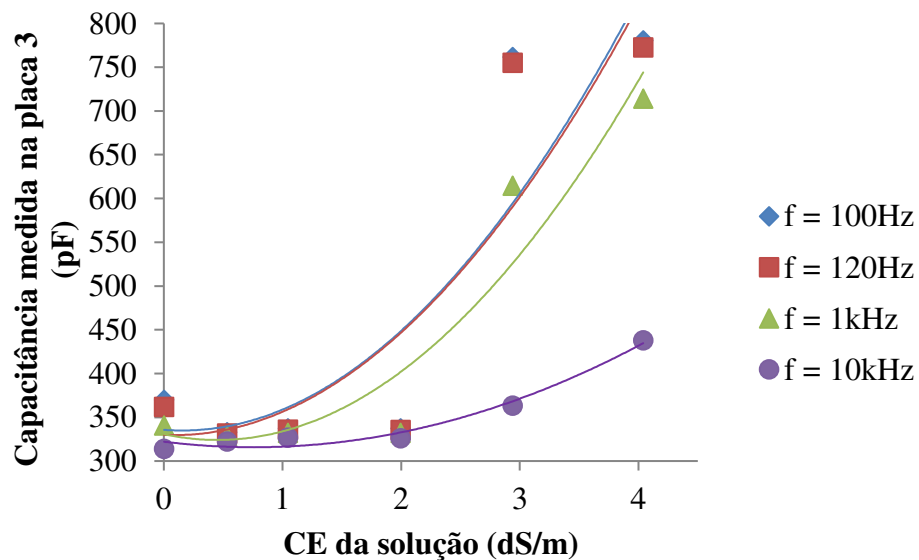


Figura 13 – Resultados obtidos para a placa capacitiva 3 em diferentes frequências de oscilação da ponte LCR



Frequência (f)	Equação	R ²
100 Hz	$C = 33,504CE^2 - 10,438CE + 335,7$	0,8131
120 Hz	$C = 32,142CE^2 - 5,8021CE + 329,93$	0,8148
1 kHz	$C = 32,618CE^2 - 29,473CE + 330,74$	0,9093
10 kHz	$C = 11,03CE^2 - 16,714CE + 322,13$	0,9749

É possível inferir que o aumento da frequência diminui o efeito da condutividade elétrica do meio na medição da capacitância. Assim, a utilização de frequências maiores tenderá a minimizar o efeito da salinidade da solução na aquisição de dados. Por outro lado, espera-se que haja uma boa correlação entre os dados gerados pelo sensor em baixas frequências e as concentrações das soluções salinas, podendo-se utilizar esse artifício para indicar níveis de salinidade do meio.

Behzadi e Fekri (2013) encontraram comportamentos similares identificando que o aumento da condutividade elétrica aumentou a capacitância das medições enquanto que houve uma diminuição da capacitância medida quando se procedeu com o aumento da frequência na faixa de 100 Hz a 2 kHz. Além disso, os autores observaram que, em baixas frequências, o sensor capacitivo mostrou-se um bom instrumento de medição das propriedades elétricas das soluções analisadas.

Observa-se que maiores frequências de oscilação possibilitaram o melhor ajuste da equação gerando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9749 para a frequência de 10 kHz, por exemplo. Vale salientar que quanto mais próximo de 1 se encontrar o R^2 , mais o modelo de estimativa descreve o comportamento real da variável avaliada.

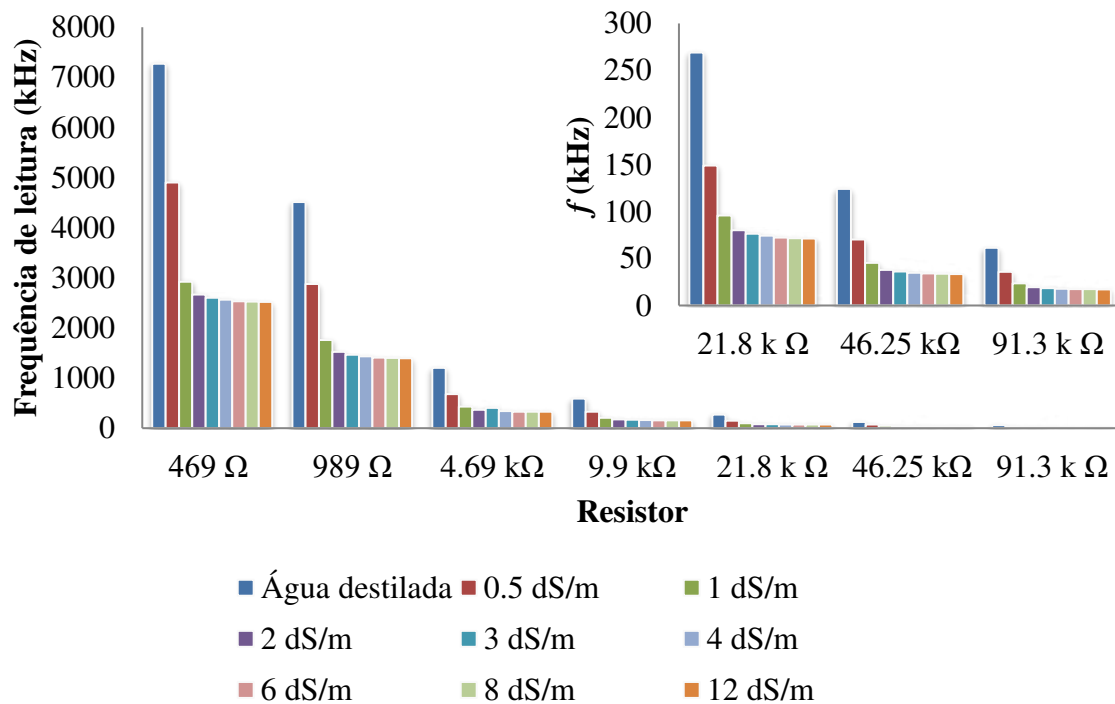
5.2 Teste com circuito de diferentes resistores em solução aquosa

Nessa etapa foram utilizados três sensores montados com os diferentes resistores adicionados ao seu circuito eletrônico. Foram obtidas as leituras de frequência dos sensores capacitivos em solução aquosa de cloreto de potássio (KCl) em oito diferentes concentrações nas salinidades de 0,5 a 12 dS/m, além da água destilada (0,0017 dS/m), totalizando assim as nove condutividades elétricas da solução (CE_{SS}). Ao realizar-se a comparação entre as médias de leitura em triplicata, pôde-se verificar que não houve diferença significativa entre os três sensores utilizados (Sensor 1, Sensor 2 e Sensor 3) ao nível de 1% de significância (ANEXO A), ficando garantido que houve 99% de confiança da equivalência entre as leituras apresentadas pelos sensores sob as mesmas condições.

As leituras realizadas nos sensores indicaram que a depender da resistência elétrica utilizada ocorria variação na grandeza da frequência de resposta dos sensores. Quando ativada a menor resistência (469 Ω), apresentaram-se resultados de 2,34 MHz a 7,39 MHz enquanto que com resistor de aproximadamente 92 k Ω foram geradas frequências de 16,63 kHz a 62 kHz.

Assim, ocorreu uma diminuição da frequência de resposta à medida que se aumentavam as resistências elétricas do circuito, como é apresentado na figura 14. Os valores máximos de frequência para cada resistor corresponderam às amostras com água destilada, enquanto que os mínimos se relacionaram às soluções de maior concentração.

Figura 14 - Respostas do sensor em kHz com a alteração da resistência do circuito na análise de diferentes salinidades da solução



Resistências	469 Ω	989 Ω	4,69 kΩ	9,9 kΩ	21,8 kΩ	46,25 kΩ	91,3 kΩ
<i>f</i> mínimo (kHz)	2437,9	1347,78	314,658	150,867	68,9064	32,0159	16,6329
<i>f</i> máximo (kHz)	7394,9	4613,38	1237,46	606,645	276,88	128,361	62,9944

As amplitudes de frequência alcançadas quando do uso do resistor de 469 Ω e do resistor de 92 kΩ estão compreendidas na faixa de frequências onde a condutância da água destilada apresenta valor constante como é apresentado por Rusiniak (2004). Desse modo, tais variações ocorridas na capacitância são fortemente relacionadas à quantidade de sais presentes nas soluções aquosas analisadas.

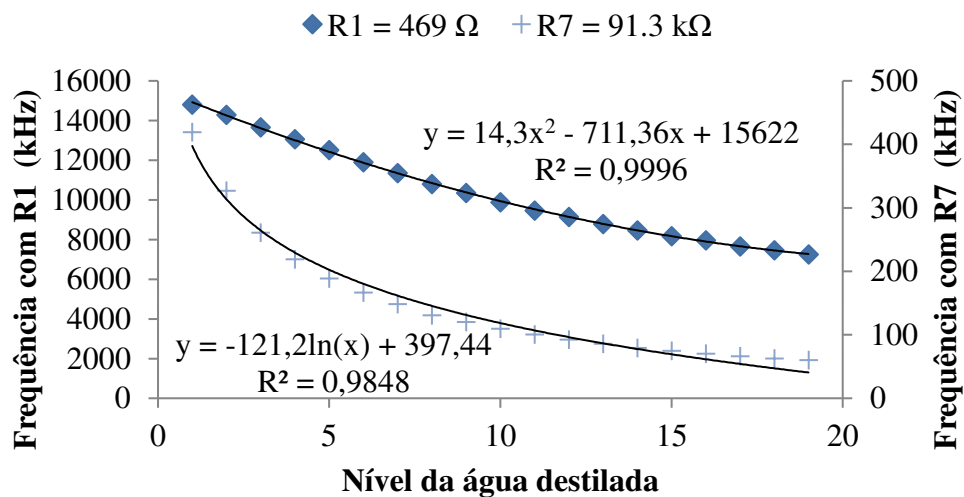
É possível identificar o comportamento dos dados de frequência de saída dos sensores para cada salinidade na figura 15. Nesses resultados, vale salientar que toda a placa capacitiva estava imersa na solução.

Observa-se que houve um comportamento proporcional entre os circuitos com diferentes resistências. Houve grande sensibilidade no fornecimento de dados pelos sensores na água destilada e a 0,5 dS/m em relação às outras soluções salinas, sendo que estas não diferiram entre si ao nível de 5% significância (ANEXO B). Além disso, todas as curvas apresentam comportamento potencial da condutividade elétrica da solução em relação à resposta do sensor em frequência elétrica. Thompson et al. (2007) descobriram que a medição de conteúdo de água do solo obtida usando um sensor de capacitância foi sensível a mudanças na salinidade do solo quando a condutividade elétrica da solução do solo foi superior a 1,8 dS.m⁻¹.

5.2.1 Avaliação da influência do nível da solução nas leituras do sensor

Realizando-se as variações no nível da solução durante as leituras, observou-se uma relação mais linear entre as respostas com o circuito de menor resistência elétrica. Com o aumento das resistências, e conseqüente diminuição da frequência de saída, as curvas apresentaram comportamento potencial como é apresentado na figura 17, da realização dos testes com água destilada.

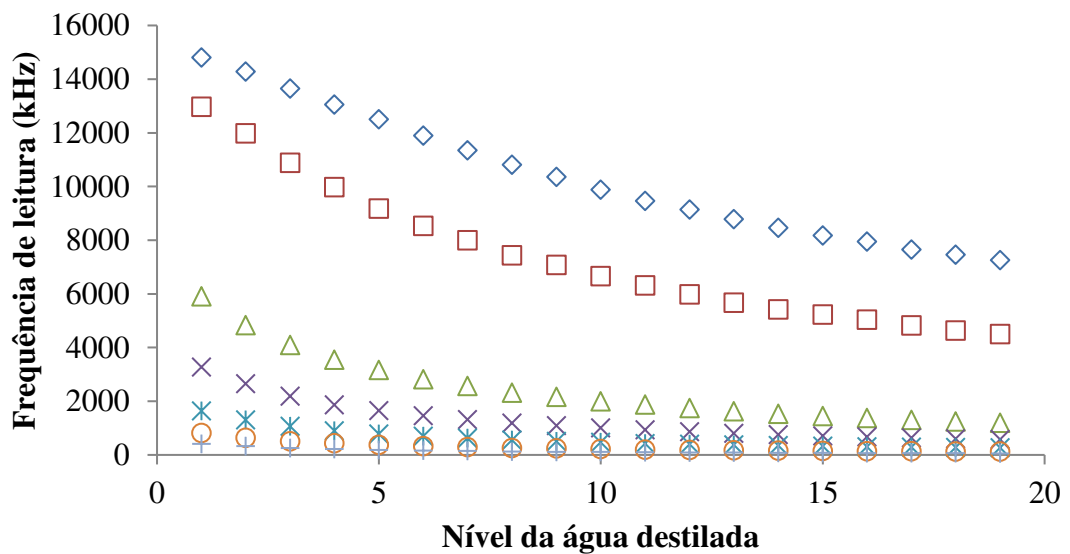
Figura 17 - Respostas dos sensores quando da variação do nível de água destilada para diferentes resistências do circuito elétrico



Enquanto ocorre o aumento da salinidade da solução, as curvas dos sensores apresentam comportamento potencial e diminuição dos valores de frequência na resposta dos sensores como apresentado na figura 18b, para uma condutividade elétrica de 4 dS/m. O valor mínimo de frequência medido foi de 60,58 kHz utilizando-se o resistor de 91,3 kΩ e máximo

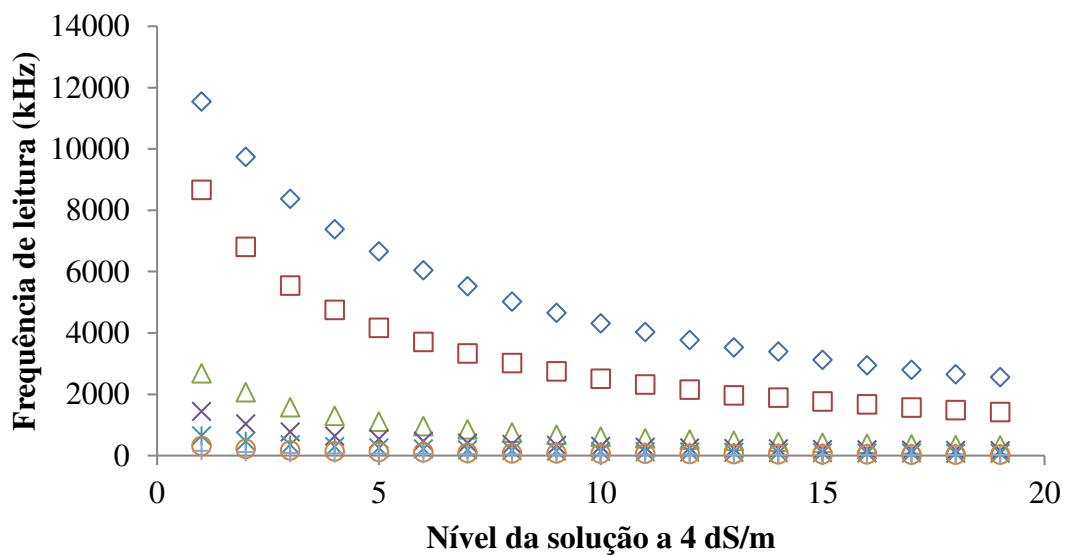
de 14,80 MHz com o resistor de 469 Ω para diferentes níveis de água destilada. Enquanto que na solução de 4 dS/m, os valores máximo e mínimo de frequência encontrados foram de 11,55 MHz e 17,74 kHz para os resistores de 469 Ω e 91,3 k Ω respectivamente.

Figura 18 - Respostas dos sensores quando da variação do nível da solução com condutividade de 0,0017 dS/m (A) de 4 dS/m (B) para diferentes resistências do circuito elétrico



◇ 469 Ω □ 989 Ω △ 4.69 k Ω × 9.9 k Ω * 21.8 k Ω ○ 46.25 k Ω + 91.3 k Ω

(A)



◇ 469 Ω □ 989 Ω △ 4.60 k Ω × 9.9 k Ω * 21.8 k Ω ○ 46.25 k Ω + 91.3 k Ω

(B)

Kizito et al. (2008) avaliaram sensores capacitivos ECH2O TE e EC quanto à sensibilidade à condutividade elétrica do meio, além da temperatura e umidade utilizando-se uma frequência de trabalho de 70 MHz. Foram preparadas soluções salinas com KCl em água deionizada até cerca de 12 dS.m^{-1} , onde foram parcialmente inseridos os sensores para avaliar o grau de interferência de diferentes condutividades elétricas em relação às diferentes profundidades de imersão das placas no meio. Observou-se que o erro foi menor para condutividades elétricas inferiores a 2 dS.m^{-1} . Verificou-se também que o ECH2O TE apresentou um modelo exponencial de resposta relativo ao conteúdo de água. Baker e Lascano (1989) por sua vez, identificaram um comportamento linear para as leituras com o TDR em diferentes frações do sensor imersas no meio. Apesar de esse teste de imersão ser rápido, os autores não o sugerem como sendo suficiente na calibração para estimar o conteúdo de água no solo.

5.3 Teste com circuito de diferentes resistores em solo

Na tabela 8 são apresentados os valores da condutividade elétrica medida nos solos de cada bloco montado após saturação com solução de saturação de KCl a diferentes concentrações (CE_{SS}) obtidos pela pasta de saturação (CE_{ES}) e pelo método 1:1 ($CE_{1:1}$). É possível observar que houve uma diminuição quanto à condutividade aplicada em solução e as medida no solo, de forma que o complexo sortivo do solo atuou interagindo com os íons adicionados à solução do solo. De modo geral, os valores obtidos pelo método 1:1 foram inferiores aos provenientes da medição no extrato de saturação do solo.

Tabela 8 – Valores de condutividade dos solos utilizados nos testes após saturação em solução salina

Amostra	CE_{SS}	CE_{ES}	$CE_{1:1}$
Bloco 1	0,003 dS/m	0,3228 dS/m	0,0923 dS/m
Bloco 2	2,19 dS/m	0,6737 dS/m	0,3465 dS/m
Bloco 3	4,11 dS/m	1,1060 dS/m	0,5213 dS/m
Bloco 4	6,23 dS/m	2,0300 dS/m	1,3970 dS/m
Bloco 5	8,3 dS/m	3,1700 dS/m	1,7080 dS/m
Bloco 6	11,95 dS/m	3,7500 dS/m	2,5700 dS/m

Tais resultados exprimem grande relação com a quantidade de sais presentes no solo, porém é importante salientar que a concentração dos mesmos na solução do solo é

variável, pois depende da quantidade de água presente. Então a salinidade na solução do solo será variável e dependente da quantidade de água presente, sendo esta representada pela umidade do solo.

Os dados gerados por cada sensor apresentaram dependência quanto ao efeito da salinidade da solução do solo. Considerando o método 1:1 para determinação da condutividade elétrica do solo mais prático que o método pelo extrato de saturação, utilizaram-se esses resultados para indicar a salinidade nas regressões geradas. Na tabela 9 são apresentados os valores dos coeficientes da regressão linear de ajuste de dados da frequência de leitura dos sensores dependente da condutividade elétrica de 1:1 ($CE_{1:1}$).

Tabela 9 – Coeficientes encontrados para regressão com transformação de dados do tipo $Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(X)$ para os valores de resposta em frequência em função da $CE_{1:1}$

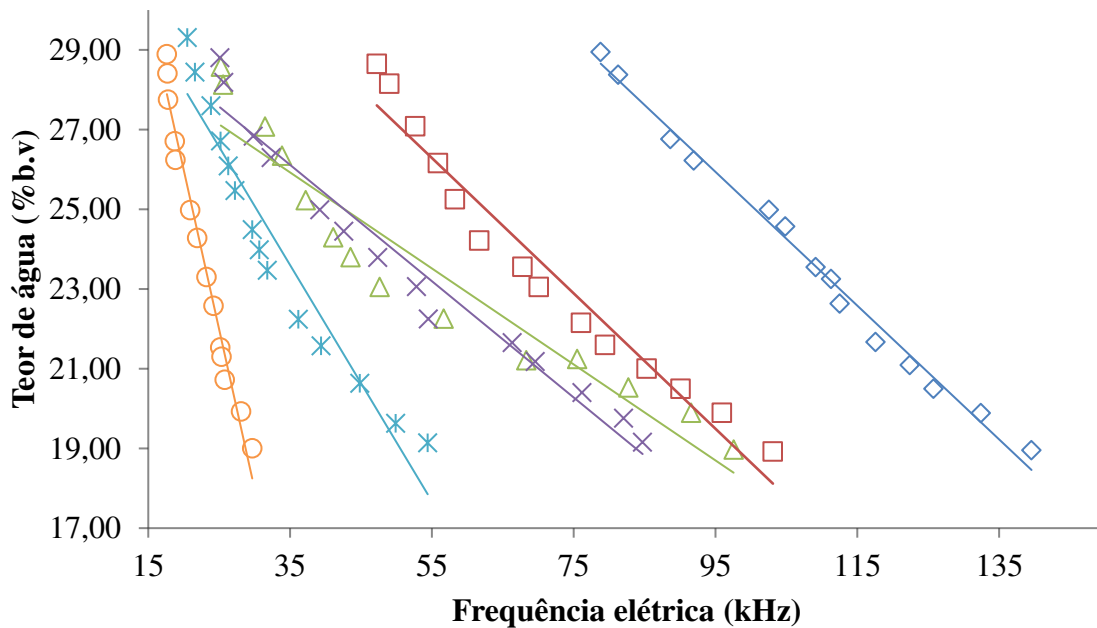
Resistor	β_1	β_0	R^2 ajustado
R1	-2658,606	5446,413	0,6408
R2	-1858,452	3502,598	0,6411
R3	-440,6362	853,2573	0,6368
R4	-209,7673	409,7321	0,6390
R5	-95,30728	187,0197	0,6393
R6	-44,86672	88,18304	0,6388
R7	-22,92772	45,03767	0,6408

Leinauer e Green (2011) identificaram que sensores TDR e FDR apresentaram uma alta precisão no fornecimento de dados nos níveis de salinidade do solo onde a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{ES}) era menor que 4 dS m^{-1} . Entretanto a precisão diminuiu em níveis de salinidade maiores 4 dS.m^{-1} . Observa-se que os resultados obtidos quando do acionamento do resistor 2 ($1 \text{ k}\Omega$) geraram os maiores valores para o R^2 ajustado (ANEXO C) e, apesar de não ser tão significativo para tal, os sinais de saída dos sensores poderiam indicar indiretamente níveis de salinidade do solo.

Considerando o efeito da salinidade do solo na medição da umidade, foi identificado que haveria alteração na equação de calibração do sensor a depender da CE como é apresentado na figura 19, com o acionamento do resistor 7 ($1 \text{ k}\Omega$). Observa-se que a salinidade interferiu nos coeficientes lineares das equações e, além disso, o aumento da condutividade elétrica gera diminuição nos sinais de saída para uma mesma umidade do solo de forma bastante significativa.

Ao comparar os sensores TDR e FDR, Hamed et al. (2006) encontraram que as leituras de umidade do solo obtidas com o sensor FDR foram significativamente influenciadas pelo tipo de solo, mas apenas ligeiramente afetadas pelos níveis de salinidade do solo usando três diferentes solos com condutividades elétrica com níveis de 0,70, 1,46 e 1,88 dS.m⁻¹. Observa-se na figura 19 que para a umidade de 19 %b.v. houve uma diferença de quase 100kHz quando se comparam os sinais para as CEs de 0,09 e 2,57dS/m. Assim, em solos com variação no aporte de sais, seria necessário realizar a medição da CE1:1 e a partir daí, selecionar a equação de calibração pertinente.

Figura 19 – Relação entre o teor de água no solo e o sinal de frequência elétrica dos sensores para diferentes condutividades elétricas



◇ 0,09 dS/m □ 0,34 dS/m △ 0,52 dS/m × 1,40 dS/m * 1,71 dS/m ○ 2,57 dS/m

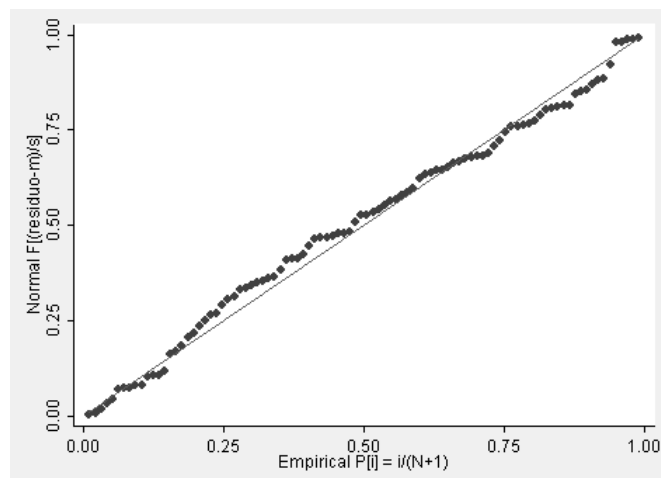
CE 1:1 (dS/m)	Função	R ²
0,09	$\theta = -0,1678f + 41,875$	0,9906
0,34	$\theta = -0,1699f + 35,63$	0,9569
0,52	$\theta = -0,1204f + 30,14$	0,9154
1,4	$\theta = -0,2963f + 33,971$	0,9322
1,71	$\theta = -0,2963f + 33,971$	0,9322
2,57	$\theta = -0,8009f + 42,006$	0,9754

Conforme relatado por Muñoz–Carpena et al. (2005), a frequência de operação dos sensores FDR abaixo de 100 MHz alterou a permissividade geral dos minerais do solo, e, conseqüentemente, a temperatura, salinidade, densidade do e teor de argila afetaram as medições do teor de água no solo usando FDR. Como nesse trabalho não foi possível alcançar tal magnitude de frequência para viabilizar a diminuição do efeito da salinidade, foi importante o entendimento do seu efeito na geração de sinais. Assim, foi encontrada uma regressão que fosse mais representativa do comportamento do sinal gerado pelo sensor quando da variação da umidade e da condutividade elétrica:

$$f = \frac{3013,778}{\theta} + 0,4251852 \cdot \theta \cdot CE_{1:1} - 29,851 \cdot \ln(CE_{1:1}) - 94,40293 \quad (13)$$

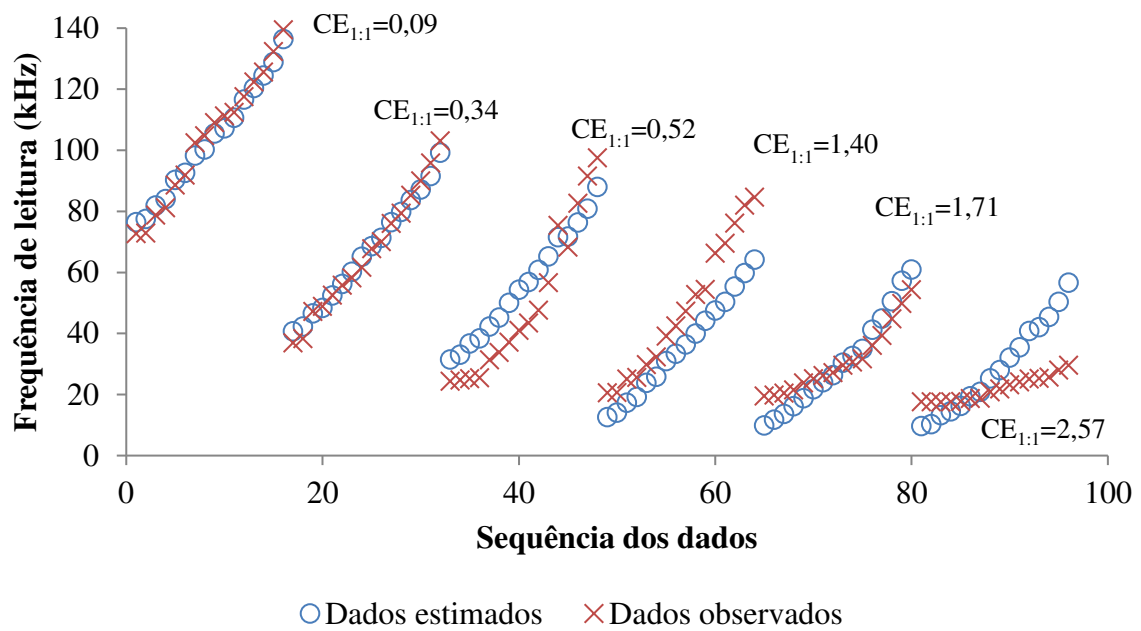
Tal equação foi gerada a partir do circuito com o acionamento do resistor 7 (1 k Ω) que gerou o maior R² ajustado (0,9185) em relação aos outros resistores (ANEXO D). A partir da análise de variância (ANOVA) pôde-se assumir que os coeficientes da reta de regressão eram estatisticamente significativos, tendo assim impacto sobre o sinal de saída gerado pelo sensor. Uma forma de eliminar o efeito de uma dessas variáveis, seria proceder com a escolha de mais outro resistor, assim poderia ser realizada a manobra de calibração do sensor utilizando-se de um sistema de duas equações linearmente independentes. Foi verificada a normalidade dos resíduos como é apresentado na figura 20.

Figura 19 – Representação da normalidade dos resíduos para a regressão em função de θ e $CE_{1:1}$



A disposição dos dados gerados por essa equação é apresentada na figura 21 onde é possível identificar a diferenciação das faixas de dados devido à condutividade elétrica. Observa-se que para as maiores condutividades, não houve um ajuste tão elevado como para as menores CEs.

Figura 21 – Representação dos dados obtidos das leituras realizadas pelo sensor em relação aos estimados a partir da equação 13



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observou-se que as placas capacitivas baseadas no sensor capacitivo de meios porosos apresentam sensibilidade à salinidade quando inserido em soluções aquosas com salinidade até 4 dS/m de condutividade elétrica. Houve diferença significativa na medição realizada em solução aquosa entre as condutividades abaixo de 1 dS/m e as demais CEs avaliadas. Foi identificado que não houve diferença significativa quanto à atenuação do efeito da salinidade nas medições realizadas pelo sensor em solução ou em solo quando da utilização de diferentes resistores no circuito RC. Nas medições em solo, as respostas de leitura do sensor apresentaram dependência da salinidade e da umidade do meio.

Sugere-se que sejam avaliados outros circuitos osciladores que gerem valores de frequência além das avaliadas nesse estudo para identificar atenuação ou evidência da condutividade elétrica do meio nas medições realizadas pelas placas capacitivas do sensor, também necessárias em maior quantidade.

REFERÊNCIAS

- ANGKAWISITTPAN, N.; MANASRI, T. Determination of Sugar Content in Sugar Solutions using Interdigital Capacitor Sensor, **Measurement Science Review**, Berlin, v. 12, n. 1, 2012.
- AYERS, R. S.; WESTCOT. Water quality or agriculture (Revised) Rome, **FAO: Irrigation and Drainage Paper n. 29**, Food and Agriculture Organization of the United Nations, p. 174, 1985.
- BAKER, J. M.; LASCANO, R. J. The spatial sensitivity of time domain reflectometry, **Soil Science Journal**, [s.l.], v. 147, p. 378–383, 1989.
- BARAJAS, O.; BUCKMASTERT, H. 9.355 GHz complex permittivity of water from 1°C to 90°C, **Journal of Physics: Condensed Matter**, [s.l.], v. 4, p. 8671-8682, 1992.
- BEHZADI, G.; FEKRI, L. Electrical Parameter and Permittivity Measurement of Water Samples Using the Capacitive Sensor, **International Journal of Water Resources and Environmental Sciences**, [s.l.], v. 2, p. 66-75, 2013.
- BEHZADI, G.; GOLNABI, H. Investigation of electrical conductivity effects on the capacitance measurement of water liquids by cylindrical capacitive sensor, **Journal of Applied Sciences**, [s.l.], v. 10, p. 261-268, 2010.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa: UFV, p. 625, 2006.
- BISWAS, K.; SEM, S.; DUTTA, P.K. Modeling of a capacitive probe in a polarizable medium. **Sensors and Actuators A: Physical**, [s.l.], v. 120 p. 115-122, 2005.
- BOGENA, H.R.; HUISMAN, J.A.; OBERDÖRSTER, C.; VEREECKEN, H. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 344, p. 32-42, 2007.
- CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M. Effect of temperature and salinity on the precision and accuracy of landscape irrigation soil moisture sensor systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v. 141, 2014.
- CASTRO, C. N. **Definição de unidades de gerenciamento do solo por meio da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas**. 131 f. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- CHAVANNE, X.; FRANGI, J. P. Presentation of a Complex Permittivity-Meter with Applications for Sensing the Moisture and Salinity of a Porous Media, **Journal Sensors**, [s.l.], v. 14, 2014.
- CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F. Avaliação de Sensor Capacitivo para o Monitoramento do Teor de Água do Solo, **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.33-45, 2010.

- DEAN, T.J.; BELL, J. P.; BATY, A.T.P. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part 1. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 93, p. 67-78, 1987.
- DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F.; MIRANDA, J. H.; MEDEIROS, J. F.; COSTA, R. N. T.; GHEYI, H. R. **Fundamentos de drenagem agrícola**, 356 p., Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade: Fortaleza, Ceará, 2015.
- FARES, A.; HAMDHANI, H.; JENKINS, D.M. Temperature-Dependent Scaled Frequency: Improved Accuracy of Multisensor Capacitance Probes. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 71, p. 894-900, 2007.
- GNECCHI, J. A. G.; TIRADO, L.F.; CAMPOS, G. M. C.; RAMIREZ, R. D.; GORDILLO, C. F. E. Design of a soil moisture sensor with temperature compensation using a backpropagation neural network. **Electronic, Robotics and Automotive Mechanics Conference**. Morelos, Mexico, p. 553-558, 2008.
- GUAN, C. S.; DU, A. L.; YANG, Y. G. **High-Energy Chemical Power**. 1 ed., Chemical Industry Press, Beijing, China, 2005.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**, volume 3: eletromagnetismo, 9 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- HAMED, Y., SAMY, G., PERSSON, M. Evaluation of the WET sensor compared to domain reflectometry. **Hydrological Sciences Journal**, [s.l.], v. 51, p. 671–681, 2006.
- HILHORST, M. **Dielectric Characterisation of Soil**. Ph.D. Thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands, 1998.
- HOEKSTRA, P.; DELANEY, A. Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 79, p. 1699-1708, 1974.
- HOOK, W.R., FERRÉ, T.P.A., LIVINGSTON, N.J. The effect of salinity on the accuracy and uncertainty of water content measurement. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 68, p.47–56, 2004.
- JOHNSON, P. M.; THIEL, D. V.; JAMES, D.A. Contributions to the measured capacitance by the dielectric properties of water in insulated electrode soil moisture sensors. Proceeding of the **1st IEEE International Conference on Sensors**. Orlando, Florida, USA, p. 495-498, 2002.
- KAATZE, U. Complex Permittivity of Water as a Function of Frequency and Temperature, **Journal of Chemical and Engineering Data**, [s.l.], v. 34, p. 371-374, 1989.
- KIZITO, F.; CAMPBELL, C.S.; CAMPBELL, G.S.; COBOS, D.R.; TEARE, B.L.; CARTER, B.; HOPMANS, J.W., Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor, **Journal of Hydrology**, [s.l.], v. 352, p. 367–378, 2008.
- LEINAUER, B., GREEN, R. Water management technologies. In: S.T. Cockerham and B. Leinauer, editors, **Turfgrass Water Conservation**. Publ. 3523. Univ. of California Div. of Agric. and Natural Resources, Richmond, CA. p. 101–112, 2011.

LIEBE, H.; HUFFORD, G.; MANABE, T. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz, **International Journal of Infrared and Millimeter Waves**, Beijing, China, v. 12, p. 659-675, 1991.

MA, X. Y.; MA, J. C. The maximum electromagnetic frequency of soil moisture dielectric measurement method. **Journal of Soil and Water Conservation**, [s.l.], v. 9, p. 82-86, 2002.

MAPA, **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**, Brasília, 2013.

MATTAR, K.; BSTCKMASTERT, H. 25°C complex permittivity of water from 65 to 75 GHz, **Journal of Physics D: Applied Physics**, [s.l.], v. 23, p. 1464-1467, 1990.

McNEILL, J. D. Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers, **Technical Note TN-6**, Mississauga, Ontario, Canada: Geonics Ltd., 1980.

MEISSNER, T.; WENTZ, F. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s.l.], v. 42, p. 1836-1849, 2004.

MINET, J.; LAMBOT, S.; DELAIDE, G.; HUISMAN, J.A.; VEREECKEN, H.; VANCLOOSTER, M., A Generalized Frequency Domain Reflectometry Modeling Technique for Soil Electrical Properties Determination, **Vadose Zone Journal**, [s.l.], v. 9, p. 1063–1072, 2010.

MINIPA, **Proposta técnica: Ponte LCR de bancada modelo MXB-821**. Disponível em: <http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Manuais/pontelcr.pdf> Acesso em 23 de julho de 2017.

MUÑOZ-CARPENA, R., RITTER, A., BOSCH, D.D. Field methods for monitoring soil water status. In: J. Alvarez-Benedi and R. Muñoz-Carpena, editors, **Soil-water-solute process characterization**. CRC Press, Boca Raton, Fl. p. 167–195, 2005.

NETTELBLAD, B.; NIKLASSON, G. A. Dielectric relaxations in liquid-impregnated porous solids, **Journal of Materials Science**, [s.l.], v. 32, 1997.

NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review, **Computers and Electronics in Agriculture**, [s.l.], v. 31, p. 213-37, 2001.

PINCELLI, A. L. S. **Desenvolvimento e ensaios de um sistema de mensuração de condutividade elétrica do solo**. 96 f. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

PONCIANO, I. M.; MIRANDA, J. H.; COOKE, R. A.; GRAH, V. F.; SILVA, A. J. P. Metrological assessment of TDR performance for measurement of potassium concentration in soil solution, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.20, n.4, p.343-349, 2016.

RENDE, A.; BIAGE, M. Characterization of capacitive sensors for measurements of the moisture in irrigated soils. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science**. Rio de Janeiro, v.24, n.3, p.226-223, 2002.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and Improvement of Saline and Saline and Alkali Soils.** (Agricultural Handbook No. 60). US Department of Agricultural. US Government printing office. Washington. DC, 1954.

ROCHA NETO, O. C., TEIXEIRA, A. S., BRAGA, A. P. S., SANTOS, C. C., LEÃO, R. A. O. Application of artificial neural networks as an alternative to volumetric water balance in drip irrigation management in watermelon crop. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p. 266-279, 2015.

RODRIGUES, Amnon Amoglia. **IrrigBlue: módulo de controle e aplicativo android para o manejo da irrigação.** 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

RUSINIAK, L. Electric properties of water. New experimental data in the 5Hz- 13 MHz frequency range, **Acta Geophysica Polonica**, [s.l.], v. 52, p. 63-76, 2004.

SÁNCHEZ, P. A.; UPADHYAYA, S. K.; VEJA, J. A.; JENKINS, B. M. Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications. **T. ASABE**, Michigan, v. 47, n. 4, p. 1281-1287, 2004.

SANTOS, C. C. **Sistema de sensoriamento remoto de umidade e temperatura do solo para irrigação de precisão.** 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

SILVA, I. O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo,** 2006. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SILVA, I. O.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFISTULA, F. J. F.; LEÃO, R. A. O. Development of a capacitive sensor for monitoring soil moisture. 2005 ASAE MEETING, 2005. Tampa Bay, Florida. **Anais [...]** Proceedings of the 2005 ASAE Meeting, 2005.

STACHEDER, M.; KOENIGER, F.; SCHUHMANN, R. New Dielectric Sensors and Sensing Techniques for Soil and Snow Moisture Measurements, **Sensors Journal**, [s.l.], v. 9, p. 2951-2967, 2009.

TARANTINO, A.; RIDLEY, A. M.; TOLL, D. G. Field measurement of suction, water content, and water permeability In.: TARANTINO, A. et al. (eds.), **Laboratory and Field Testing of Unsaturated Soils.** London: Springer, 214 p., 2009.

THOMPSON, R.B., GALLARDO, M., FERNÁNDEZ, M.D., VALDEZ, L.C., MARTÍNEZ-GAITÁN, C. Salinity effects on soil moisture measurements made with a capacitance sensor. **Soil Science Society of America Journal**, [s.l.], v. 71, p.1647-1657, 2007.

TOPP, G.; DAVIS, J.; ANNAN, A. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 16, p. 574-582, 1980.

VASCONCELOS, H. S. **Automação de sistema de irrigação em malha fechada utilizando rede sem fio de sensores capacitivos de umidade do solo,** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Agrícola, 76 f., Fortaleza, 2013.

WEAST, R.C. **Handbook of physics and chemistry**. CRC press, Boca Raton, FL, 1986.

XING, Z.; ZHENG, W. G.; SHEN, C. J.; YANG, Q.; SUN, G. The measurement of soil water content using the dielectric method. **2010 World Automation Congress**. Kobe, Japan, p. 241-245, 2010.

XU, Y.; YI, W. D.; JWO, K. W. Research on the electrical model of a capacitive soil moisture sensor. **2012 Asian Pacific Conference on Energy, Environment and Sustainable Development**. Kuala Lumpur, Malaysia, p. 917-925. 2013a.

XU, Y.; YI, W.; JWO, K.; HU, Z. Influence of Electrical Double Layer in the Electrical Model for Capacitance- based Soil Moisture Sensor on Measuring Soil Moisture, **Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology**, [s.l.], v. 6, n. 24, p. 4630-4636, 2013b.

ZHAO, Y. D. Study on soil water content real-time measuring method and sensor structure. **4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications**. Xian, China, p. 3815-3818, 2009.

**APÊNDICE A – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS DAS LEITURAS GERADAS PELOS
TRÊS SENSORES EM SOLUÇÕES AQUOSAS A DIFERENTES
CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS**

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

$H_1: \mu_i \neq \mu_k, \text{ para } i \neq k$

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
SENSOR 1 (A)	189	169308.3	895.8113	1954528
SENSOR 2 (B)	189	173245.5	916.6429	2048738
SENSOR 3 (C)	189	165209.7	874.1253	1858181

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	170855.3	2	85427.67	0.043724 ^{NS}	0.957222	4.64297782
Dentro dos grupos	1.1E+09	564	1953816			
Total	1.1E+09	566				

** Significativo pelo teste F a 0,01; *Significativo pelo teste F a 0,05; ns – não significativo

Interpretação: Como $F(0,0437) < F_{\text{crítico}}(4,643)$ aceita-se H_0 de forma que se pode afirmar que os valores gerados por SENSOR 1, SENSOR 2 e SENSOR 3 não diferem entre si.

**APÊNDICE B – TESTE DE MÉDIAS PARA AS LEITURAS NORMALIZADAS DOS
SENSORES EM SOLUÇÕES A DIFERENTES CES**

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
0.0017 dS/m	7	7	1 ^A	4.11E-33
0.53 dS/m	7	4.136963	0.590995 ^B	0.002238
1.04 dS/m	7	2.612797	0.373257 ^C	0.000353
2.14 dS/m	7	2.223342	0.31762 ^C	0.000675
3.06 dS/m	7	2.175497	0.310785 ^C	0.000843
4.03 dS/m	7	2.077279	0.296754 ^C	0.000817
6.04 dS/m	7	2.031905	0.290272 ^C	0.000884
8.02 dS/m	7	2.016299	0.288043 ^C	0.000913
11.95 dS/m	7	2.004933	0.286419 ^C	0.000925
469 Ω	9	4.19461	0.466068 ^a	0.051199
989 Ω	9	3.940856	0.437873 ^a	0.055533
4.69 kΩ	9	3.664079	0.40712 ^a	0.058076
9.9 kΩ	9	3.561905	0.395767 ^a	0.059795
21.8 kΩ	9	3.565833	0.396204 ^a	0.059774
46.25 kΩ	9	3.623384	0.402598 ^a	0.059136
91.3 kΩ	9	3.728347	0.414261 ^a	0.057932

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Conduktividades elétricas	3.202044	8	0.400255	2015.893	6.31E-58	2.138229
Resistores	0.036352	6	0.006059	30.51421	8.67E-15	2.294601
Resíduo	0.00953	48	0.000199			
Total	3.247926	62				

APÊNDICE C – REGRESSÕES $f = \beta_0 + \beta_1 \ln(CE_{1:1})$ PARA CADA RESISTÊNCIA ELÉTRICA

Source	SS	df	MS	Number of obs = 96		
Model	864870004	1	864870004	F(1, 94) =	170.20	
Residual	477667269	94	5081566.69	Prob > F =	0.0000	
Total	1.3425e+09	95	14131971.3	R-squared =	0.6442	
				Adj R-squared =	0.6404	
				Root MSE =	2254.2	

rl	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lnce11	-2658.606	203.7874	-13.05	0.000	-3063.231	-2253.981
_cons	5446.413	242.7596	22.44	0.000	4964.408	5928.417

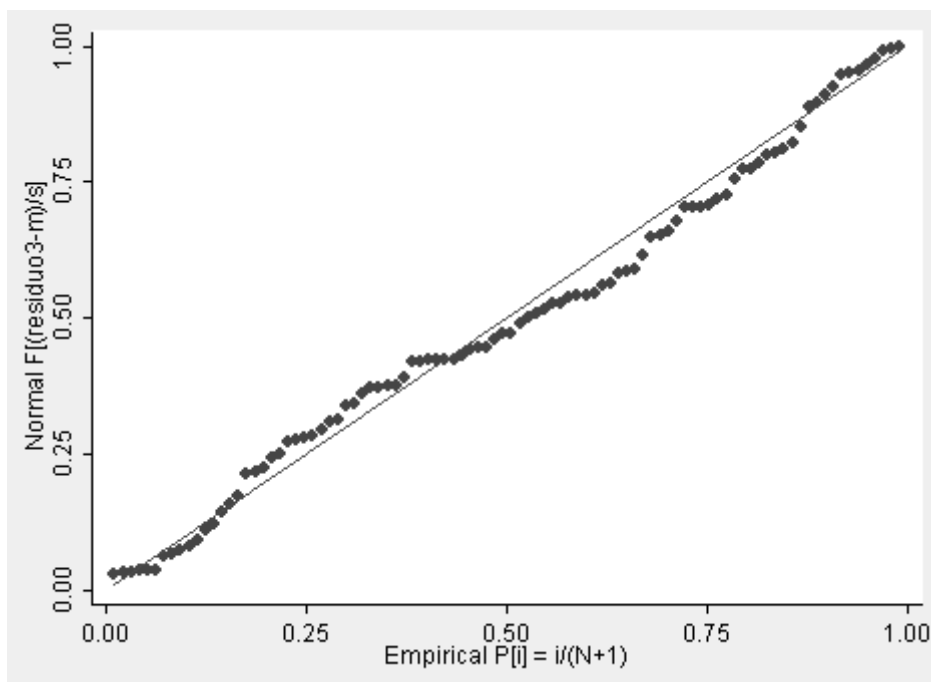
$$f(R1) = -2658,606 \cdot \ln(CE11) + 5446,413$$

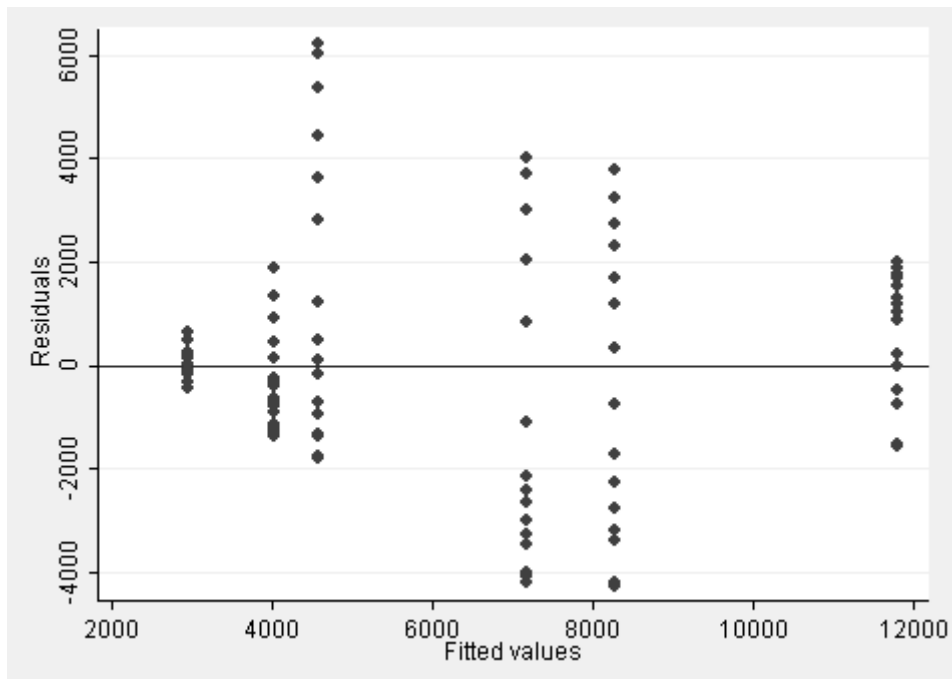
Shapiro-Francia W' test for normal data

Variable	Obs	W'	V'	z	Prob>z
residuo3	96	0.97768	1.964	1.331	0.09162

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
residuo4	96	0.97561	1.946	1.474	0.07029





Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: fitted values of r1

chi2(1) = 0.39

Prob > chi2 = 0.5337

White's test for Ho: homoskedasticity

against Ha: unrestricted heteroskedasticity

chi2(2) = 20.28

Prob > chi2 = 0.0000

Cameron & Trivedi's decomposition of IM-test

Source	chi2	df	p
Heteroskedasticity	20.28	2	0.0000
Skewness	7.71	1	0.0055
Kurtosis	0.56	1	0.4523
Total	28.55	4	0.0000

Variable	VIF	1/VIF
ln cell	1.00	1.000000
Mean VIF	1.00	

Source	SS	df	MS	Number of obs = 96		
Model	422615381	1	422615381	F(1, 94) =	170.71	
Residual	232705006	94	2475585.17	Prob > F =	0.0000	
				R-squared =	0.6449	
				Adj R-squared =	0.6411	
Total	655320387	95	6898109.33	Root MSE =	1573.4	

r2	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lnce11	-1858.452	142.2386	-13.07	0.000	-2140.87	-1576.033
_cons	3502.598	169.4402	20.67	0.000	3166.17	3839.025

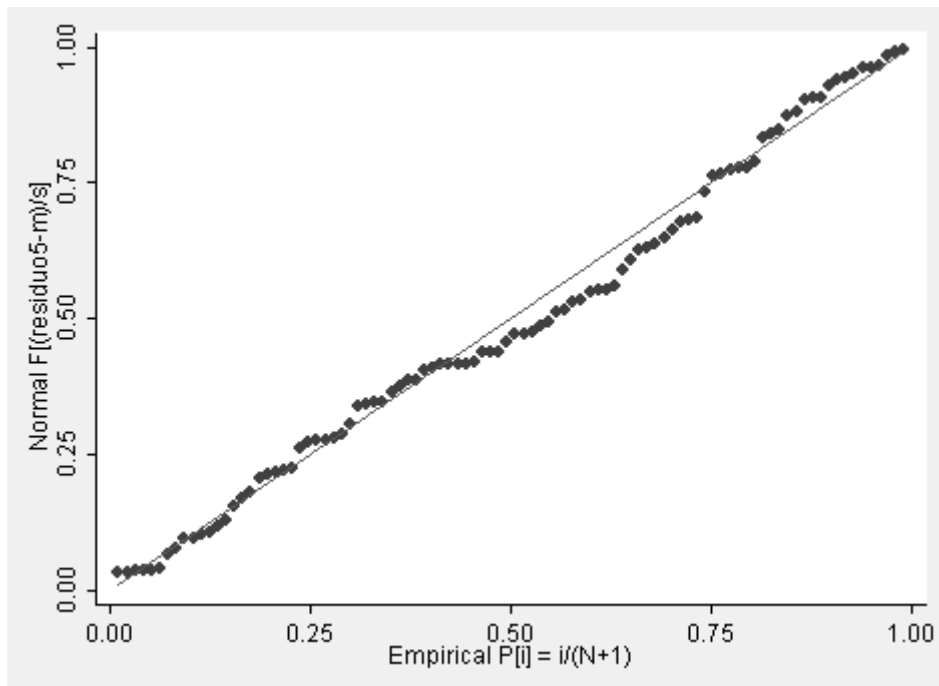
$$f(R2) = -1858,452 \cdot \ln(CE11) + 3502,598$$

Shapiro-Francia W' test for normal data

Variable	Obs	W'	V'	z	Prob>z
residuo5	96	0.98504	1.317	0.543	0.29372

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
residuo5	96	0.98132	1.490	0.883	0.18859



Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance
 Variables: fitted values of r2

chi2(1) = 3.79
 Prob > chi2 = 0.0517

White's test for Ho: homoskedasticity

against Ha: unrestricted heteroskedasticity

chi2(2) = 15.46
 Prob > chi2 = 0.0004

Cameron & Trivedi's decomposition of IM-test

Source	chi2	df	p
Heteroskedasticity	15.46	2	0.0004
Skewness	5.01	1	0.0252
Kurtosis	0.57	1	0.4520
Total	21.03	4	0.0003

Source	SS	df	MS	Number of obs =	96
Model	23757629.5	1	23757629.5	F(1, 94) =	167.59
Residual	13325150.6	94	141756.921	Prob > F =	0.0000
Total	37082780	95	390345.053	R-squared =	0.6407
				Adj R-squared =	0.6368
				Root MSE =	376.51

r3	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
lnce11	-440.6362	34.03696	-12.95	0.000	-508.2173 -373.055
_cons	853.2573	40.54616	21.04	0.000	772.7519 933.7626

$$f(R3) = -440,6362 \cdot \ln(CE11) + 853,2573$$

Source	SS	df	MS	Number of obs =	96
Model	5384164.82	1	5384164.82	F(1, 94) =	169.18
Residual	2991584	94	31825.3617	Prob > F =	0.0000
Total	8375748.82	95	88165.777	R-squared =	0.6428
				Adj R-squared =	0.6390
				Root MSE =	178.4

r4	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
lnce11	-209.7673	16.12743	-13.01	0.000	-241.7887 -177.7459
_cons	409.7321	19.21163	21.33	0.000	371.587 447.8773

$$f(R4) = -209,7673 \cdot \ln(CE11) + 409,7321$$

Source	SS	df	MS	Number of obs = 96		
Model	1111462.87	1	1111462.87	F(1, 94) =	169.36	
Residual	616909.302	94	6562.86492	Prob > F =	0.0000	
Total	1728372.17	95	18193.3913	R-squared =	0.6431	
				Adj R-squared =	0.6393	
				Root MSE =	81.012	

r5	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lnce11	-95.30728	7.323612	-13.01	0.000	-109.8485	-80.76608
_cons	187.0197	8.724174	21.44	0.000	169.6976	204.3417

$$f(R5) = -95,30728 \cdot \ln(CE11) + 187,0197$$

Source	SS	df	MS	Number of obs = 96		
Model	246315.333	1	246315.333	F(1, 94) =	169.79	
Residual	136367.389	94	1450.7169	Prob > F =	0.0000	
Total	382682.721	95	4028.23917	R-squared =	0.6437	
				Adj R-squared =	0.6399	
				Root MSE =	38.088	

r6	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lnce11	-44.86672	3.443261	-13.03	0.000	-51.70339	-38.03004
_cons	88.18304	4.101748	21.50	0.000	80.03892	96.32715

$$f(R6) = -44,86672 \cdot \ln(CE11) + 88,18304$$

Source	SS	df	MS	Number of obs = 96		
Model	64322.7154	1	64322.7154	F(1, 94) =	170.49	
Residual	35463.4238	94	377.270466	Prob > F =	0.0000	
Total	99786.1393	95	1050.38041	R-squared =	0.6446	
				Adj R-squared =	0.6408	
				Root MSE =	19.423	

r7	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
lnce11	-22.92772	1.755921	-13.06	0.000	-26.41414	-19.44129
_cons	45.03767	2.091722	21.53	0.000	40.88451	49.19083

$$f(R7) = -22,92772 \cdot \ln(CE11) + 45,03767$$

**APÊNDICE D – REGRESSÃO $f(\theta, CE_{1:1})$ PARA CIRCUITO COM O
RESISTOR 7 (92 k Ω)**

Source	SS	df	MS	Number of obs =	96
Model	91905.9377	3	30635.3126	F(3, 92) =	357.66
Residual	7880.20158	92	85.6543649	Prob > F =	0.0000
Total	99786.1393	95	1050.38041	R-squared =	0.9210
				Adj R-squared =	0.9185
				Root MSE =	9.255

r7	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]
invubv	3013.778	171.172	17.61	0.000	2673.816 3353.741
lncell	-29.851	1.9846	-15.04	0.000	-33.79259 -25.90942
ucell	.4251852	.1034109	4.11	0.000	.2198023 .6305681
_cons	-94.40293	9.183679	-10.28	0.000	-112.6425 -76.16335

Shapiro-Francia W' test for normal data

Variable	Obs	W'	V'	z	Prob>z
residuo	96	0.98155	1.624	0.955	0.16971

Shapiro-Wilk W test for normal data

Variable	Obs	W	V	z	Prob>z
residuo	96	0.98296	1.360	0.680	0.24819

Breusch-Pagan / Cook-Weisberg test for heteroskedasticity

Ho: Constant variance

Variables: fitted values of r7

chi2(1) = **1.17**

Prob > chi2 = **0.2788**

White's test for Ho: homoskedasticity

against Ha: unrestricted heteroskedasticity

chi2(9) = **60.69**

Prob > chi2 = **0.0000**

Cameron & Trivedi's decomposition of IM-test

Source	chi2	df	p
Heteroskedasticity	60.69	9	0.0000
Skewness	8.41	3	0.0383
Kurtosis	1.85	1	0.1742
Total	70.95	13	0.0000