

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
MESTRADO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

JOÃO ALEXANDRE BATISTA DA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO SOLO PARA
DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE MOLHAMENTO**

PONTA GROSSA
2013

JOÃO ALEXANDRE BATISTA DA CRUZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO SOLO PARA
DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE MOLHAMENTO**

Projeto de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, curso de Mestrado em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientação: Prof. Dr. Ivo Mario Mathias

PONTA GROSSA
2013

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

C957 Cruz, João Alexandre Batista da
Desenvolvimento de um sensor de umidade do solo para determinação da frente de molhamento/ João Alexandre Batista da Cruz. Ponta Grossa, 2013.
58f.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada - Área de Concentração: Computação para Tecnologias em Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Ivo Mario Mathias.

1.Dielétrico. 2.Capacitância. 3.Umidade do solo. 4.Sensor. 5.Arduino. I.Mathias, Ivo Mario. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Mestrado em Computação Aplicada. III. T.

CDD: 631.4

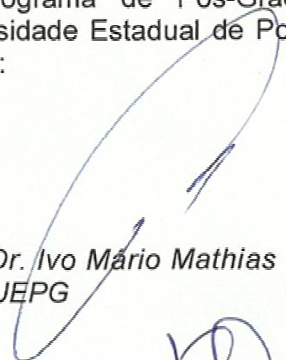
TERMO DE APROVAÇÃO

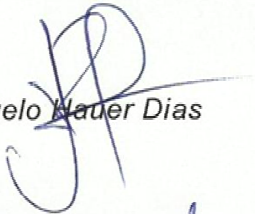
João Alexandre Batista da Cruz

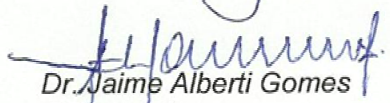
**“DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO SOLO PARA
DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE MOLHAMENTO”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


Dr. Ivo Mario Mathias
UEPG


Dr. Ariangelo Wauer Dias
UEPG


Dr. Jaime Alberti Gomes
CESCAGE

Ponta Grossa, 05 de setembro de 2013.

AGRADECIMENTOS

A Deus por sempre estar presente em minha vida.

A minha esposa Patrícia, mãe Roseli e irmãos Camila e Hernanipelo amor, carinho e apoio incondicional na compreensão nos momentos de ausência.

Aos professores Ivo Mario Mathias e Luis Miguel Schiebelbein pela sincera amizade, orientação e disposição de sempre querer ajudar.

RESUMO

O conhecimento e controle das propriedades do solo cultivo agrícola, obtidos a partir de sensores em sistema automatizado, ampliam as possibilidades de incremento dos resultados de uma cultura. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um sensor de medidas elétricas e de baixo custo, para determinação da umidade do solo; testar e avaliar a correlação entre as leituras e a umidade gravimétrica do solo, considerada padrão para a calibração de outros métodos. Para alcançar o objetivo proposto, buscou-se, em primeiro lugar, o estudo dos principais aspectos relacionados ao processo de interação água-solo-planta e os métodos de determinação existentes. Posteriormente, efetuou-se a confecção de protótipos de sensores em diferentes formatos e geometria. Foi também desenvolvido um sistema de medida e registro que permite a coleta dos dados e armazenamento num cartão de memória. Tendo como princípio o funcionamento dos sensores, o conceito de capacitância, que é obtido pelo efeito do campo elétrico, da carga de duas placas isoladas por um material dielétrico, que neste estudo é o solo com umidade. Assim, quando há variação na constante dielétrica, em função da quantidade de água presente nele, a capacitância do sistema também irá variar. Por fim, realizaram-se os ensaios para avaliar os sensores e circuitos construídos. Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando coeficiente de determinação de 99,14% para um sensor de placas coplanares não-convencional.

Palavras-chave: dielétrico, capacitância, umidade do solo, sensor, arduino.

ABSTRACT

The knowledge and control of soil properties in agricultural cultivation, obtained from sensors at automated system, extend the possibilities of increasing the results of a culture. This work aims to develop an electrical measure sensor at low cost to determine the soil moisture, test and evaluate the correlation between the readings and gravimetric soil moisture, considered standard to calibrate the other methods. To achieve the proposed objective, in the first place we sought to study the main aspects of the interaction process water-soil-plant and the existing methods of determination. Subsequently, we performed the fabrication of prototype sensors in different shapes and geometry. We have also developed a measurement and record system that enables us to collect the data and to store them in a memory card. Having the operation of the sensors as a beginning, the concept of capacitance is obtained by the effect of the electric field, the charge of two plates insulated by a dielectric material, which, therefore, in this study is the soil moisture. Thus, when there is a variation in the dielectric constant, depending on the amount of water present in it, the capacitance of the system will also vary. Finally, tests were performed to evaluate the sensors and circuitry construction. The results were satisfactory, with a correlation coefficient of 99.14% for a non conventional coplanar plates sensor.

Keywords: dielectric, capacitance, soil moisture, sensor, Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Composição típica do solo	12
Figura 2 - Água retida por capilaridade entre duas partículas	17
Figura 3 - Frente de Molhamento	18
Figura 4 - Capacitor de placas paralelas	22
Figura 5 - Arduino Mega 2560	28
Figura 6 - Sinal PWM	28
Figura 7 - Diagrama de bloco do CI 555.....	29
Figura 8 - Circuito com 555 em montagem astável utilizando capacitor variável	30
Figura 9 - Construção capacitor coplanar cilíndrico com uso de eletrofitas	33
Figura 10 - Primeiro desenho de sensor capacitivo	33
Figura 11 - Diagrama e gráfico de um circuito RC	34
Figura 12 - Sensores construídos a partir das placas de cobre	36
Figura 13 - Placa de extensão / Leitura e armazenamento da frequência	37
Figura 14 - Esquemático da placa.....	38
Figura 15 - Estufa e recipientes utilizados em ensaio no laboratório da fazenda escola	39
Figura 16 - Pesagem recipientes	40
Figura 17 - Instalação e teste do sensor	41
Figura 18 - Amostras no processo de secagem em estufa aerada.....	42
Figura 19 - Sensor de temperatura LM35DZ	43
Figura 20 - Coleta de dados e comunicação serial	43
Figura 21 - Correlação da frequência apresentada por um sensor de placa paralela e um de placa coplanar	48
Figura 22 - Correlação da umidade gravimétrica com a frequência no sensor paralelo	49
Figura 23 - Correlação da umidade gravimétrica com a frequência no sensor coplanar	50
Figura 24 - Correlação da umidade gravimétrica com a frequência no sensor coplanar	52
Figura 25 - Comparação do peso em relação a frequência	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Permissividade relativa de alguns constituintes do solo.....	24
Tabela 2 - Comparativo dos principais microcontroladores disponíveis nos Arduinos	27
Tabela 3 - Pesos dos recipientes	40
Tabela 4 - Pesos dos sensores.....	40
Tabela 5 - Configuração dos resistores e capacitores no circuito.....	44
Tabela 6 - Valores estimados da frequência.....	45
Tabela 7 - Valores obtidos com a leitura no circuito	46
Tabela 8 - Tabela parcial da frequência obtida entre sensor de placa paralela e coplanar	47
Tabela 9 - Capacitância e resistência em teste de imersão em ar, água e solo seco	48
Tabela 10 - Comparação da umidade gravimétrica em relação aos sensores	49
Tabela 11 - Dados do monitoramento da frequência e peso da amostra de solo.....	50
Tabela 12 - Custo no desenvolvimento do protótipo	53

LISTA DE SIGLAS

BNC	Conector (Bayonet Neil Concelman)
CC	Capacidade de campo
CI	Circuito integrado
CSV	Valores separados por caracteres (Comma-separated values)
Dr	Densidade Real
FDR	Reflectometria no domínio de frequência (frequency domain reflectometry)
I2C	Circuito Inter-integrado (Inter-Integrated Circuit)
Ma	Macroporosidade
MAPE	Erro percentual absoluto médio (Mean absolute percentage error)
Mi	Microporosidade
P	Porosidade total
PCB	Placa de circuito impresso (Printed circuit board)
PMP	Ponto de murcha permanente
PWM	Modulação por largura de pulso (Pulse-width modulation)
SD	Módulo de armazenamento de dados (Storage Data)
SIM	Módulo de identificação do assinante (Subscriber Identity Module)
SPI	Interface Serial de Periféricos (Serial Peripheral Interface)
TDR	Reflectometria no domínio do tempo (Time-domain reflectometer)
UFABC	Universidade Federal do ABC

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVOS	10
1.2.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	11
2.	REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1.	ESTRUTURA DO SOLO.....	12
2.2.	UMIDADE DO SOLO	13
2.2.1.	Porosidade do solo / adsorção / retenção.....	14
2.2.2.	Infiltração da água.....	15
2.2.3.	Ascensão por capilaridade	16
2.2.4.	Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.....	17
2.2.5.	Frente de molhamento	18
2.2.6.	Métodos de determinação da umidade do solo	19
2.2.7.	Método gravimétrico	20
2.3.	MANEJO DO SOLO.....	20
3.	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1.	CAPACITÂNCIA	22
3.1.1.	Dielétrico	23
3.1.2.	Reflectometria no domínio do tempo (TDR).....	25
3.1.3.	Reflectometria no domínio de frequência (FDR)	26
3.2.	PLATAFORMA ARDUINO	26
3.3.	CIRCUITO OSCILADOR.....	29
3.4.	MÉTODOS	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1.	DESENVOLVIMENTO DA PLACA E CIRCUITO	32
4.1.1.	Construção dos Sensores	32
4.1.2.	Construção do circuito de leitura e armazenamento dos dados	36
4.1.3.	Calibração do sistema.....	38
4.2.	RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO PRODUTO	44
4.2.1.	Teste de calibração do circuito com capacitor padrão	44
4.2.2.	Comparação do sensor paralelo com o sensor coplanar não-convencional.....	46
4.2.3.	Teste de máximos e mínimos do sensor	48
4.2.4.	Resposta do sensor à umidade gravimétrica do solo	49
4.3.	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CUSTO DO DESENVOLVIMENTO.....	53
5.	CONCLUSÕES	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica apresenta efeito direto sobre uma cultura, pois a sua falta ou excesso pode prejudicar o desenvolvimento e o crescimento ou ainda favorecer o surgimento de doenças ou parasitas. Portanto, quanto maior o armazenamento de água no solo, maior a chance de sucesso da cultura se desenvolver de forma satisfatória.

Considerando o solo como um grande reservatório de água, em que a quantidade de água varia com a umidade, percebe-se que diferentes sistemas apresentam comportamentos distintos quanto à captação, retenção e uso da água, nos quais a quantificação dessa medida pode determinar ações de irrigação complementar, drenagem ou mudanças do sistema de manejo, ajustando-se, assim, à necessidade da cultura.

O método mais comum de determinação da umidade é o gravimétrico, que consiste na retirada no campo de uma amostra do solo, permitindo que se determine o conteúdo de massa de água em relação à massa de terra seca. Esta técnica é amplamente utilizada para calibração dos outros métodos, tais como dispersão de nêutrons, atenuação gama, constante dielétrica, entre outros. O método gravimétrico, apesar de apresentar resultados precisos, tem como principais desvantagens, a lentidão no processo de secagem, sendo necessárias 24 horas em estufa e outros instrumentos em uma estrutura laboratorial, além de ser um método destrutivo, uma vez que é necessária a remoção de amostras do solo (ROQUE, 2008).

Assim, cada método de estimativa do teor de água no solo apresenta vantagens e desvantagens relacionadas ao investimento nos equipamentos, prazo para obtenção das análises, custo operacional da realização do processo de medição, grau de precisão e necessidade de calibração.

Neste cenário, o uso crescente de tecnologias aplicadas ao cultivo agrícola, tem auxiliado aos produtores encontrar a melhor relação custo por benefício, elevando os níveis de produtividade das culturas.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma solução eletrônica a partir de um sensor capaz de identificar e armazenar as informações sobre a umidade em diferentes profundidades no perfil do solo através do método indireto, a partir das propriedades do comportamento dielétrico do solo. Os objetivos específicos do trabalho estão descritos a seguir:

- Construir e testar placas/sensores capazes de sensibilizar-se ao comportamento capacitivo do conjunto solo/umidade e de fácil instalação.
- Correlacionar os valores da capacitância obtida pelo sensor no solo em relação ao teor de umidade do solo.
- Construir um circuito compatível com a plataforma arduino para registrar a coleta de dados das placas/sensores.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação de mestrado foi elaborada em cinco capítulos, articulados entre si e dispostos conforme segue:

No *Capítulo 1* é apresentada uma breve introdução delimitando o escopo dos objetivos realizados.

No *Capítulo 2* é apresentada uma revisão bibliográfica, conceituando as características que estruturam o solo em relação à determinação do teor umidade, citando as metodologias existentes.

No *Capítulo 3* são descritos o material e métodos utilizados no processo de construção e aferição dos sensores e placas capacitivas aplicados neste estudo, assim como os intervenientes que dificultaram a solução procurada. Também são abordados os meios elétricos e eletrônicos de determinação indireta e automatização do processo de coleta de dados.

No *Capítulo 4* são feitas as considerações acerca dos resultados encontrados pela pesquisa proposta neste trabalho.

E por fim o *Capítulo 5* descreve as conclusões sobre o trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. ESTRUTURA DO SOLO

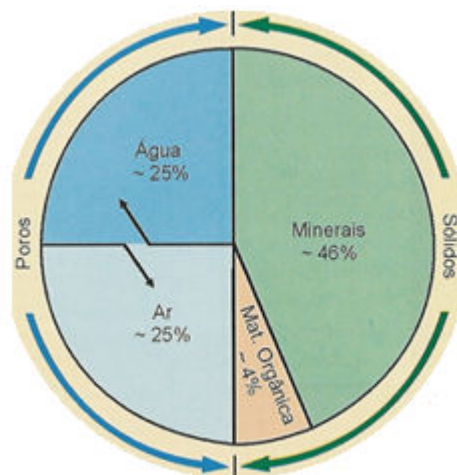
A variabilidade das características químicas, físicas, morfológicas e biológicas próprias de cada um dos tipos de solos encontrados nas diferentes regiões, determinam usos e manejos distintos, adequados às suas propriedades específicas, destacando-se como uma das características mais importantes relacionadas ao uso e manejo. A estrutura do solo constitui-se num agrupamento organizado em forma geométrica definida dos macro e microagregados do solo formados a partir das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) e demais componentes minerais e orgânicos (calcário, sais, matéria orgânica, entre outros), os quais resultam numa agregação de unidades estruturais compostas (CAPECHE, 2008).

De forma geral, o manejo e uso do solo também influenciam na estrutura do solo. O tráfego de máquinas nas atividades de manejo e preparo do solo normalmente aumentam a densidade do solo com a diminuição da porosidade total, em especial da macroporosidade (ARGENTON, ALBUQUERQUE, BAYER, & WILDNER, 2005).

Perdas na produtividade das culturas podem ser relacionadas a modificações na estrutura do solo acarretando a redução do conteúdo de água disponível, bem como a má aeração (TORMENA, ROLOFF, & SÁ, 1998).

A estrutura do solo pode ser classificada quanto à forma, grau de desenvolvimento e tamanho. Lepsch (2010) apresenta na Figura 1 uma composição típica do solo quanto ao percentual de água, ar, minerais e matéria orgânica.

Figura 1 - Composição típica do solo



Fonte: Figura adaptada de Lepsch (2010)

Capeche (2008) destaca ainda que na relação entre estrutura do solo, a dinâmica da água no solo e o crescimento vegetal são fatores que interferem no aumento da porosidade, atividade biológica no solo, melhor infiltração e armazenamento de água, provenientes de chuva ou irrigação.

2.2. UMIDADE DO SOLO

Entre os componentes e condições necessárias que descrevem a fisiologia do crescimento e desenvolvimento vegetal nas interações do sistema planta-ambiente, a água desempenha papel de importância vital, estando relacionada ainda à produtividade e qualidade da produção. (LARCHER, 2004).

O solo armazena parte da água precipitada, sendo que fração desta percola para camadas mais profundas e outra escoar pela superfície, por dificuldade de penetração ou condição de saturação. Ao transcorrer o tempo, a quantidade de água disponível no solo para a planta vai estar em razão de sua capacidade de armazenamento e dinâmica da condutividade hidráulica (FRANCISS, 1980).

O abastecimento hídrico de uma comunidade vegetal não é oriundo exclusivamente pela precipitação, podendo ocorrer recursos no habitat como o lençol freático, escoamento de terrenos mais altos ou manejo de irrigação (LARCHER, 2004). A irrigação se faz necessária quando se deseja cultivar determinada espécie e as condições de pluviometria do período não geram volumes suficientes de água ou a distribuição não é adequada.

A região dos Campos Gerais tem como principal fonte de água no cultivo agrícola, o abastecimento pluvial, com um clima predominantemente subtropical úmido e índice pluviométrico médio de 1554 mm anuais e também média de evaporação de 930 mm (IAPAR, 2011).

Esses dados caracterizam a região para o não uso de manejos de irrigação justificados pelo alto custo de implantação e utilização, apresentando também a quantidade de água necessária, conforme BERNARDO; SOARES e MANTOVANI (2005) orientam:

A água necessária é a quantidade de água requerida pela cultura, em determinado período de tempo, de modo a não limitar seu crescimento e sua produção, nas condições climáticas locais, ou seja, é a quantidade de água necessária para atender à evapotranspiração e à lixiviação dos sais do solo. Pela própria definição de água necessária à cultura, a evapotranspiração constitui a maior e mais importante parte. A irrigação total necessária (ITN) pode, então, ser definida como a quantidade de água a ser suprida pela irrigação, de modo a complementar as precipitações efetivas, no atendimento à quantidade de água necessária à cultura.

Alguns teores de umidade têm denominação especial conforme sua aplicação. A umidade higroscópica é o teor de água de uma amostra de solo após secagem prévia ao ar ambiente e mantida em atmosfera saturada, usualmente 98% de umidade relativa a 25 °C de temperatura. Esse termo também é utilizado para designar a máxima quantidade de água, em porcentagem, que uma amostra de solo é capaz de absorver da atmosfera, em forma de vapor, e manter em equilíbrio com o ambiente (EMBRAPA, 1997).

2.2.1. Porosidade do solo / adsorção / retenção

O solo é um sistema trifásico formado por partículas sólidas, líquidas e gasosas, e a forma como estão arrançadas, vai determinar sua capacidade de retenção da umidade. Em sua quase totalidade, os meios terrosos ou rochosos apresentam descontinuidades em seu interior, com muita variabilidade de forma, tamanho e frequência, denominados de vazios ou poros (FRANCISS, 1980).

A estruturação do solo resulta em uma maior condição de estabilidade e porosidade, sendo (P) a porosidade total do solo, podendo-se separá-la em microporos (M_i) ou poros capilares e macroporos (M_a) (COSTA, NANNI, & JESKE, 1997).

O desenvolvimento radicular sofre influência direta das propriedades físicas do solo, sendo a densidade do solo um parâmetro para avaliar a compactação do solo (SILVA, R., REINERT, & REICHERT, 2000).

A característica de porosidade do meio permeável retém a água nos vazios sob a forma de água retida e água livre. Conforme descrito por Franciss (1980), a água retida permanece aderente à fase sólida, por isso quanto menor a dimensão dos vazios, maior é o percentual de água retida em relação à água total, podendo atingir praticamente 100% se esta dimensão for inferior a 10^{-2} mm, sendo que entre 10^{-4} a 10^{-2} mm, a água é de forma geral retida apenas pela capilaridade. No entanto, a água livre percola sob a ação da gravidade.

A alteração das propriedades físicas do solo devido à compactação aumentam a densidade, reduzindo a porosidade total, sendo maior este efeito sobre a superfície do solo, o que pode levar à redução na capacidade de retenção e conteúdo de água disponível. Valores de porosidade de aeração inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ apresentam limitação do crescimento radicular (TORMENA, ROLOFF, & SÁ, 1998).

A porosidade total do solo é caracterizada pelo volume de poros totais do solo ocupados pelo ar e/ou pela água. O cálculo da porosidade total utiliza-se de certas medidas

de densidade. A Densidade Real (D_r) ou Massa Específica Real (S), também conhecida como densidade de partículas, é a relação entre a massa de determinada amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas do solo. Geralmente, os resultados da densidade são expressos em gramas por centímetro cúbico, e variam, em média, entre os limites de 2,3 a 2,9 g/cm³ (EMBRAPA, 1997). Diferentes métodos são utilizados para determinar a porosidade total, sendo considerado um dos mais simples o uso dos valores da densidade conforme Equação 1, onde (S) é a densidade real e (S') a densidade aparente.

$$P = 100 \frac{(S - S')}{S} \quad (1)$$

A densidade real pode ser calculada pelo método do balão volumétrico e a densidade aparente pelo método do torrão ou método da proveta. Vale destacar que existem outros métodos, e que quase todos são baseados na obtenção dos valores de massa e volume de uma determinada amostra (TRAZZI, COLOMBI, OLIVEIRA, RANGEL, & PASSOS, 2009).

Libardi (2005) orienta que são dois os processos que descrevem a retenção de água num solo não saturado. No primeiro deles, ocorre a retenção pelo fenômeno da capilaridade dentro dos poros capilares do solo. No segundo processo, ocorre pelo fenômeno da adsorção, em que existe a retenção na superfície dos sólidos do solo como uma película presa à superfície já referida.

Gloaguen et al. (2009) relatam que a fração aquosa existente no solo é retida por forças matriciais, capilares e de adsorção, podendo então, ser classificada em água gravitacional ou livre, que está contida na macroporosidade do solo e água capilar, retida na força capilar, que está contida nos microporos, e ainda água adsorvida nos colóides¹ do solo, não disponível para as plantas.

2.2.2. Infiltração da água

Definida como a passagem da água através da interface solo-atmosfera, é mensurada pela taxa de infiltração, representando a quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo (PANACHUKI, 2003). Num evento de umedecimento, a estrutura do solo e o modo como a água atinge a superfície podem influenciar os parâmetros da infiltração devido ao selamento superficial provocado pelo impacto das gotas (CARDURO & DORFMAN, 1988).

¹ As partículas coloidais são, via de regra, menores do que 1 micrômetro (µm) de diâmetro e que possuem carga.

Nos solos com compactação, o aumento da dificuldade de infiltração da água pode favorecer o acúmulo de umidade superficial levando ao encharcamento do solo. Nestas condições os agregados ficam mais susceptíveis à desagregação e menor resistência à deformação, o que altera o tamanho das unidades estruturais da superfície favorecendo o escorrimento e erosão(CAPECHE, 2008).

Sobrinho et al. (2003) relatam que inicialmente a taxa de infiltração apresenta valor elevado, principalmente em solo inicialmente seco, e com o decorrer do tempo diminui até se tornar constante com a saturação do solo. Teixeira (2010) cita o uso de modelos ou métodos capazes de quantificar adequadamente a infiltração de água no solo, sendo alguns a partir de considerações físicas e outros, de forma empírica, entre os quais destaca os modelos de Kostiakov-Lewis(1945), Horton (1940) e Kostiakov(1932). Contudo os valores apresentam grande variabilidade tendo como principais causas os atributos do solo e da água, além do método utilizado na sua determinação.

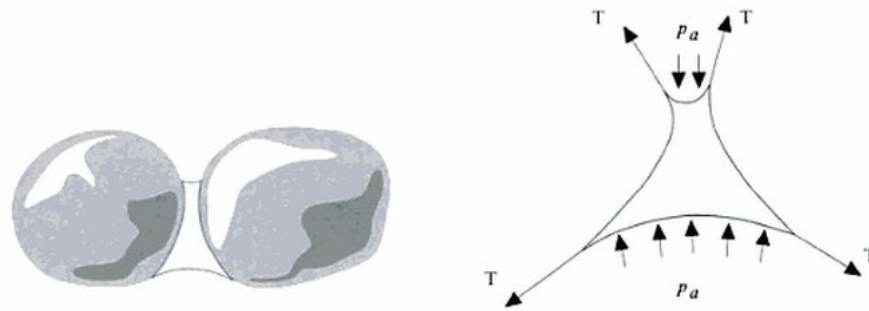
2.2.3. Ascensão por capilaridade

Os líquidos apresentam uma propriedade associada à superfície livre denominada tensão superficial, causada pela atração exercida entre as moléculas e que conforme Libardi (2005) destaca, explicamos fenômenos capilares.

As moléculas de um líquido que estão na superfície sofrem uma maior atração no sentido do interior, onde existe um maior número de moléculas. Devido a esta força, a superfície do líquido tem um comportamento semelhante a uma membrana elástica tensionada em todas as direções pela chamada tensão superficial. Esta, por não depender da direção, é uma grandeza escalar e tem as dimensões de uma força por unidade de comprimento. Para água em contato com ar, esta força, T , vale aproximadamente $7,3 \cdot 10^{-2}$ N/m. Uma das consequências da tensão superficial é a capilaridade. Em líquidos como a água, a capilaridade manifesta-se pela subida em tubos de diâmetro muito pequeno(FERNANDES, 2006).

É grande a complexidade dos fenômenos de capilaridade nos maciços terrosos, justificados principalmente pela variação muito acentuada dos diâmetros dos canalículos formados pelos poros do solo. A altura de ascensão capilar varia, assim, de ponto para ponto.

Figura 2 - Água retida por capilaridade entre duas partículas



Fonte: Figura adaptada de Fernandes (2006).

Com a retenção de água no solo devido aos microporos, as camadas superficiais apresentam um fluxo ascensional de água devido aos processos de evapotranspiração, ocasionando assim a capilaridade. (BARRETO, TESTEZLAF, & SALVADOR, 2011). A Figura 2 mostra a existência de água capilar retida nas zonas de contato interpartículas.

Conforme Mendonça C. *et al* (2003) descrevem a evapotranspiração é o termo utilizado para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água no solo e da transpiração das plantas.

2.2.4. Capacidade de campo e ponto de murcha permanente

Dentre as propriedades do solo fundamentais na compreensão e utilização de dados de umidade do solo, se destacam a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) que usualmente são considerados os limites máximo e mínimo, de água disponível no solo, sendo o primeiro a capacidade máxima do solo em reter água, acima do qual ocorrem perdas por percolação de água no perfil ou por escoamento superficial, resultando em desperdício quando se aplica irrigação de forma a complementar a necessidade de água da cultura. Já o segundo é o teor de umidade no qual a planta não consegue mais retirar água do solo. Todavia, deve-se considerar que a planta já estará com deficiência de água o que ocasionará redução do crescimento. Ambos os fatores variam conforme a classe do solo (FALKER, 2008).

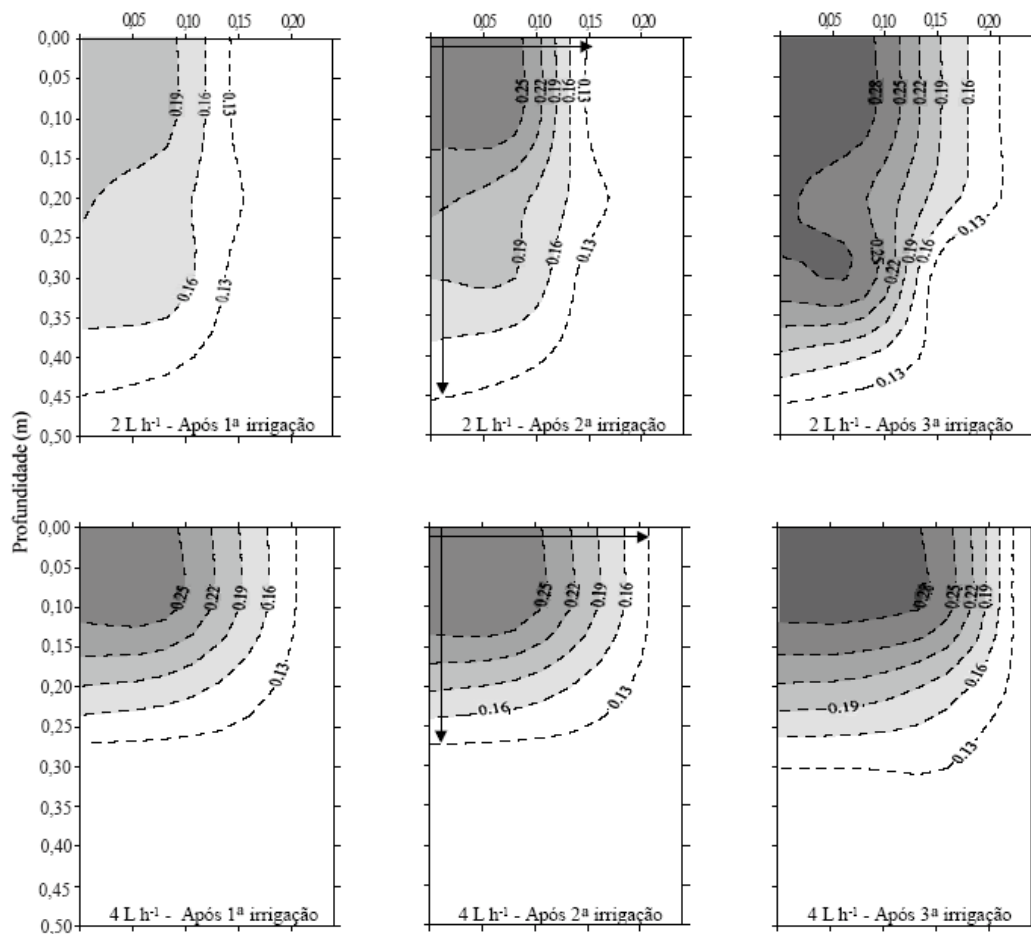
Vale ressaltar que como Bernardo, Soares e Mantovani (2005, p. 24) afirmam, a partir dos atuais conhecimentos sobre o movimento da água no solo, define-se que a capacidade de campo é um conceito arbitrário e não uma propriedade física do solo. Todavia não há uma faixa nítida de transição na redução da intensidade do movimento de água, tornando o conceito de CC pouco preciso.

2.2.5. Frente de molhamento

Nos diversos segmentos da ciência, é necessária a informação sobre o alcance da água em profundidade no perfil do solo, em função do tempo de chuva ou irrigação, e pode-se medir a infiltração acumulada em condições de campo. Porém, nesta medida não se obtém a distribuição da umidade na profundidade e nem a profundidade alcançada pela frente de molhamento. Assim, encontram-se muitas dificuldades na estimativa dessa profundidade, porque o processo de infiltração de água no solo tem características transientes (PREVEDELLO, 1999).

A evolução da frente de molhamento, conforme demonstra a Figura 3, está concentrada durante o processo de infiltração, na qual os perfis de umidade do solo estimados logo após a infiltração destacam a mudança crescente da frente de molhamento em relação à condição inicial (SOUZA & MATSURA, 2004).

Figura 3 - Frente de Molhamento



Fonte: Figura adaptada de Souza & Matsura(2004).

Libardi(2005) descreve, de maneira esquemática, a distribuição da água na profundidade, para um perfil de solo uniforme, ao se manter uma pequena carga hidráulica na superfície, separada por zonas. A primeira zona, de saturação, na qual presume-se o solo estar saturado;em sequência, a zona de transição, que apresenta rápido decréscimo do conteúdo de água, e a seguir, a zona de transmissão que é uma região na qual a água é transmitida com pequena variação no seu conteúdo, após a zona de umedecimento, que é uma porção do perfil com variação relativamente rápida de conteúdo de água, e por fim frente de molhamento compreendendo uma pequena região que representa o limite visível da penetração da água, na qual o gradiente de conteúdo de água sofre uma variação abrupta.

2.2.6. Métodos de determinação da umidade do solo

São vários os métodos de determinação da umidade do solo, dos quais pode-se citar os métodos gravimétrico, nuclear, eletromagnético, tensiométrico, higrométrico e ótico. A melhor escolha está relacionada à disponibilidade de instrumentação e do nível de precisão necessários, pois cada um tem suas vantagens e desvantagens (SILVA, I., 2005).

De acordo com Bernardo; Soares e Mantovani (2005) a umidade do solo pode ser definida como a razão entre a massa de água e a massa de solo seco, sendo denominada umidade em peso (U_p), ou ainda como a razão entre o volume de água e o volume de solo, denominada umidade em volume (U_v). Assim, os autores afirmam que o volume de água armazenado é diretamente influenciado pela umidade do solo, logo é de imprescindível importância a determinação da umidade do solo para o acompanhamento das necessidades hídricas da cultura nas diferentes fases fenológicas.

Segundo Costa; Nanni e Jeske (1997), o excesso de água no solo pode acarretar condições redutoras prejudiciais à atividade biológica das raízes e microrganismos. Sobre o papel da água, Bezerra; Angelocci e Minami (1998) destacam a disponibilidade desta como um dos fatores ambientais de efeito marcante no desenvolvimento de diversas culturas que são sensíveis ao estresse hídrico.

O conteúdo de água do solo ou potencial de água do solo são medidas relacionadas à umidade do solo. O primeiro representa a massa ou o volume de água presente no solo, denominado conteúdo de umidade gravimétrica do solo (θ_g) quando expresso em função da massa, e denominado conteúdo de umidade volumétrica do solo (θ_v) quando expresso em função do volume. O segundo representa o estado energético da água retida no solo. Essa relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial é denominada

curva de retenção ou curva característica (DORNELES & RUVIARO, 2012). O potencial de água no solo (Ψ_m) regula os processos de transporte de água no sistema solo-planta-atmosfera, e mede a sucção necessária para extrair uma unidade de volume de água dos poros do solo em kPa (GUIMARÃES, SANTANA, OLIVEIRA, & THOMAZ JUNIOR, 2010).

2.2.7. Método gravimétrico

De acordo com estudo realizado por Correa e Rossetti (1984), a determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico é realizada com a pesagem e posterior secagem das amostras de solo em estufa, à temperatura de 105°C, durante um período de 24 horas ou até obter peso constante nas medições subsequentes. O cálculo é realizado pela razão entre o peso úmido e o peso seco conforme a Equação 2, onde respectivamente P_u é o solo úmido e P_s é o solo seco.

$$U(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} 100 \quad (2)$$

Apesar de o método de estufa ou gravimétrico ser lento, é adotado como padrão por utilizar instrumentação simples e fornecer grande precisão, limitado apenas pela precisão da balança (BERNARDO, SOARES, & MANTOVANI, 2005).

2.3. MANEJO DO SOLO

O manejo do solo interfere diretamente na sua estrutura, favorecendo ou não a compactação, aeração e capilaridade entre outras características, cujos fatores estão diretamente relacionados à capacidade de infiltração da água no solo. (PINHEIRO, TEIXEIRA, & KAUFMANN, 2009)

Percebe-se que, de acordo com o manejo agrícola aplicado, como o não-revolvimento do solo, aliado ao tráfego de máquinas, resulta em alterações na sua estrutura. Em um estudo do efeito da escarificação nas propriedades de um latossolo vermelho distrófico, observaram que as capacidades inicial e final, foram afetadas devido ao manejo do solo, comparado ao plantio direto (CAMARA & KLEIN, 2005).

Mendonça *et al.* (2009) destacam que “A capacidade de infiltração depende fundamentalmente da umidade antecedente, da natureza e do estado da estrutura do solo superficial, ela é facilmente afetada pelo tipo de vegetação e de manejo”.

Também Rabello; Vaz e Torre (2005) afirmam que “A determinação da umidade do solo é muito importante para o correto manejo da irrigação das culturas, bem como para a identificação de técnicas de manejo do solo, mais adequadas”.

Diversos fatores associados às propriedades físicas do solo e do manejo adotado interferem na infiltração de água do solo (CAMARA & KLEIN, 2005).

O aumento da capacidade de retenção do conteúdo de água no solo e redução da evaporação são observados com a cobertura por plantas e seus resíduos (ARGENTON, ALBUQUERQUE, BAYER, & WILDNER, 2005).

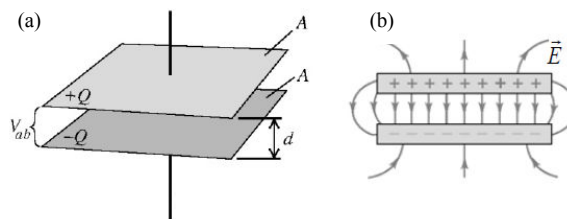
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CAPACITÂNCIA

Os capacitores são componentes amplamente utilizados nas mais variadas aplicações eletrônicas. São formados por dois condutores isolados por um dielétrico, os quais recebem a denominação de placas, independentemente da geometria que apresentem, tais como, disco, placas paralelas ou cilíndricas. Por definição, a capacitância de um capacitor é a relação entre a carga de um dos condutores e a diferença de potencial entre eles. (CELINSKI, 2008).

A finalidade do capacitor é armazenar energia elétrica. Os capacitores apresentam-se numa variedade de formas e tamanhos, cuja formação mais comum é a de duas placas paralelas, de área A , afastados a uma distância d , por um material isolante ou dielétrico, como na Figura 4-a, enquanto que na Figura 4-b está ilustrado o campo elétrico $\vec{E}$.

Figura 4 - Capacitor de placas paralelas



Nota: (a) Capacitor de placas paralelas e (b) vista lateral do campo elétrico $\vec{E}$
 Fonte: Figura adaptada de Fenômenos Eletromagnéticos/UFABC

Uma vez o capacitor carregado, suas placas possuem cargas iguais e opostas, $+Q$ e $-Q$, embora a carga do capacitor seja expressa por Q . Tendo em vista as placas serem condutoras, ocorre uma diferença de potencial V_{ab} entre elas. Assim a proporcionalidade entre a carga Q , e a diferença de potencial V_{ab} é expressa pela Equação 3, onde C é a constante de proporcionalidade, chamada de capacitância do capacitor, e representa uma medida da quantidade de carga que pode ser armazenada em suas placas. (BAUER, WESTFALL, & DIAS, 2012).

$$Q = CV_{ab} \quad (3)$$

Um capacitor possui a capacidade de 1 *farad* se uma carga de 1 *coulomb*² for depositada em suas placas com uma diferença de potencial de 1 *volt* entre elas. Como o *farad* é

²1 coulomb é a quantidade de carga elétrica carregada pela corrente de 1 ampere durante 1 segundo.

uma unidade muito grande, é usual encontrar componentes que utilizam seus submúltiplos, tais como *microfarad* ($1\mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$) e o *picofarad* ($1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$).

O módulo do campo elétrico de um capacitor pode ser escrito como na Equação 4, onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($\epsilon_0 \cong 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$) e σ é o módulo, valor absoluto, da densidade da carga superficial sobre cada placa.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (4)$$

A densidade, então, é igual ao módulo da carga Q dividida pela área A da placa. Desta forma, o módulo do campo elétrico, E , pode ser expresso pela Equação 5.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad (5)$$

Como o campo é uniforme e a distância entre as placas é d , a diferença de potencial entre elas é dada pela Equação 6.

$$V_{ab} = Ed = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{Qd}{A} \quad (6)$$

Portanto, a capacitância C , pode ser reescrita com a Equação 7.

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (7)$$

Pela relação anterior, pode ser visto que a capacitância C depende das dimensões do capacitor bem como da constante de permissividade do material dielétrico.

Nessa perspectiva, os sensores capacitivos são dispositivos capazes de detectar as variações de capacitância (CELINSKI, 2008).

A aplicação dos sensores capacitivos tem-se difundido bastante em pesquisas relacionadas à umidade do solo por ser um método não destrutivo (BARBOSA, 2011). Também Cruz et al. (2010) descrevem a técnica de capacitância elétrica como método capaz de medir o conteúdo de água através da permissividade dielétrica do solo.

3.1.1. Dielétrico

Como descreve Barbosa (2011), dielétricos são materiais que não conduzem ou conduzem pouquíssima corrente elétrica, usualmente materiais sólidos são aplicados, mas mesmo líquidos e gases podem servir como materiais isolantes.

O comportamento dielétrico de um dado material pode ser descrito pela permissividade que o material apresenta, também denominada, permissividade relativa, que é

a razão da permissividade do material em relação à permissividade do vácuo. Na Tabela 1 são apresentados valores de permissividade para alguns dos materiais constituintes do solo (SILVA, I., 2005).

Tabela 1 - Permissividade relativa de alguns constituintes do solo

MATERIAL	PERMISSIVIDADE RELATIVA
Ar	1
Água (20 °C)	80
Gelo (-3 °C)	3
Basalto	12
Granito	7 a 9
Silte seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: Curtis e Defandoff (1929, apud SILVA, 2005).

O uso de camadas de dielétricos incorporadas aos capacitores tem como objetivo melhorar seu desempenho em relação aos que contêm apenas ar ou vácuo entre suas placas. Os materiais dielétricos contendo moléculas polares, como a água, ao estarem sob ação de um campo elétrico sofrem polarização, o que resulta em alinhamento e redistribuição das cargas deste material. A aplicação de material dielétrico bipolar contribui para o incremento da capacitância, que expressa a quantidade de energia elétrica acumulada para uma dada tensão aplicada aos seus terminais. Os materiais dielétricos variam quanto a sua capacidade de ser polarizado por um campo elétrico, descrita pela permissividade do meio (ϵ)(SILVA, C., ANDRADE JUNIOR, & SOUZA, C., 2008).

A constante dielétrica (K) é o índice que expressa a permissividade do meio em relação à permissividade do vácuo (ϵ_0). Portanto, como apresentado na Equação 8, o valor de K para o vácuo igual a 1, e no ar, K é praticamente igual ao do vácuo.

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Conforme (ROQUE, 2008) a constante dielétrica é diretamente proporcional ao conteúdo de água e também SILVA, I. (2005) afirmam que o conteúdo de umidade do solo pode ser determinado pelo efeito na constante dielétrica ao medir-se a capacitância entre os dois eletrodos inseridos no solo, utilizando o mesmo como material dielétrico. Conforme demonstra a tabela 1, existe uma grande diferença entre a constante dielétrica do ar e da água, o que determina que a variação da constante dielétrica seja diretamente proporcional à variação da umidade. Métodos que utilizam a constante dielétrica do solo são amplamente

utilizados, nos quais os sensores capacitivos e os reflectômetros no domínio do tempo (TDR) são as técnicas mais comuns na medição da permissividade do solo.

Pereira et al. (2006) destacam que a determinação da umidade do solo a partir de propriedades físicas, no início da década de 80, quando se observou que a constante dielétrica possuía grande relação com o teor de água. Diversos trabalhos foram desenvolvidos utilizando o solo como dielétrico na determinação indireta de suas características.

Na aplicação em sensor capacitivo de teor de água, tem-se o solo como dielétrico poroso em um capacitor não fechado, onde a variação da capacitância depende exclusivamente do tipo e quantidade de matéria presente entre as placas (RÊGO SEGUNDO, 2010). Para o uso da capacitância elétrica em sensores, é possível considerar como parâmetro, a distância entre as placas do sensor, mas, para esta aplicação essa medida se torna inadequada, sendo mais conveniente utilizar a variação do meio dielétrico entre as placas do capacitor (BORIM & PINTO, 2006).

3.1.2. Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

Conforme Santana et al. (2012) descrevem, o equipamento TDR é composto por um testador de cabos e guias de ondas, denominadas sondas de TDR. Essas guias compostas basicamente pelo prolongamento de um cabo coaxial RG58 de 50 ohms que fica conectado a três hastes de aço inoxidável. O funcionamento ocorre pela emissão de um pulso eletromagnético pelo testador de cabos que percorre a extensão do cabo coaxial até as hastes, que representam um circuito aberto.

A técnica de TDR utiliza-se do efeito da umidade do solo sobre a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nas hastes introduzidas no solo, que ocorre devido a diferença entre as constantes dielétricas da água, do ar e do material sólido, no caso a matriz do solo (ROQUE, 2008).

A tomada de tempo transcorrida $t(s)$ entre a emissão e o retorno do pulso ressoante pela haste de comprimento $L(m)$ são dados na Equação 9 em que c é a velocidade da luz no espaço livre ($3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$) e K a constante dielétrica relativa ao meio.

$$K = \left(\frac{ct}{2L} \right)^2 \quad (9)$$

Camilo; Costa e Albuquerque (2003) assim como Santana et al. (2012) relatam que, devido ao alto custo para o monitoramento em vários pontos e diversas profundidades, alguns usuários estão confeccionando sondas, aplicando matérias de fácil obtenção, que é a

principal desvantagem do equipamento. O uso de reflectometria no domínio do tempo requer calibração a partir das propriedades intrínsecas de cada solo a fim de obter valores acurados e melhor desempenho do equipamento. A aplicação das equações recomendadas pelo fabricante e descritas na literatura não é adequada para alguns solos do Brasil, precisando de ajustes locais, devido a características peculiares de cada região.

Para o correto uso da TDR são necessárias calibrações para os diferentes tipos de solo, uma vez que traz como principal desvantagem pouco conhecimento sobre seu comportamento em solos tropicais (SANTOS, ZONTA, & MARTINEZ, 2010).

3.1.3. Reflectometria no domínio de frequência (FDR)

O funcionamento da técnica FDR é baseado na capacitância do solo (BARBOSA, 2011). Os sensores FDR, também conhecidos como sensores de umidade do solo por capacitância, podem se utilizar de sondas que são constituídas de um par de eletrodos que se comportam como um capacitor eletrônico. Ele então é conectado a um circuito LC, onde L é um indutor e C o capacitor, que resulta nos valores de frequência que dependem do valor da capacitância na matriz do solo, correspondendo a uma maior capacitância quanto maior for a umidade do solo e consequentemente menor frequência do circuito, conforme apresenta a Equação 10. Uma característica importante é que os sensores são construídos para oscilarem próximos a 100 MHz (ANDRADE JUNIOR, SILVA, & ROSSINI, 2007).

$$f = [2\pi\sqrt{LC}]^{-1} \quad (10)$$

3.2. PLATAFORMA ARDUINO

O uso de aquisição de dados assistida por computador ou circuito automatizado atualmente representa possibilidade de aplicação de técnicas de análise estatística em metodologias experimentais, melhorando a precisão dos resultados bem como a redução no tempo de coleta de dados, o que permite uma rápida conversão para representação em formato gráfico, proporcionando a observação de fenômenos, predizendo o resultado, contribuindo na formulação de hipóteses. A discussão dos resultados obtidos a partir da comparação do previsto nos modelos teóricos, permite efetuar os ajustes a fim de validá-los em um novo ciclo de testes dentro do dinamismo deste processo, face aos resultados práticos obtidos. (CAVALCANTE, TAVOLARO, & MOLISANI, 2011).

Barbosa (2011) destaca também a importância da utilização de um sistema de aquisição de dados que permita coletar amplas quantidades de dados emitidas por sensores para obter valores médios em larga escala e melhor precisão.

Construído sobre uma plataforma para prototipagem eletrônica baseada em softwares e hardwares livres, o Arduino consiste em uma placa de circuitos com um microcontrolador AVR da fabricante de circuitos eletrônicos Atmel, que permite a interação física entre o ambiente e o computador de forma simples, a partir de portas de entradas e saídas, aliado à versatilidade e baixo custo, o que vem destacando-o no cenário mundial.

O microcontrolador é programado através de comunicação, geralmente padrão USB, para funções específicas como por exemplo a leitura de informações externas de sensores, o controle de máquinas e diferentes automações. A linguagem de programação utilizada na elaboração dos programas para Arduino recebeu a denominação de *Wiring*, e, é baseada nos conceitos da linguagem C e C++.

Na Tabela 2 apresentamos os principais modelos de Arduino com seus respectivos microcontroladores e os valores correspondentes de memória disponíveis para o desenvolvimento de aplicações.

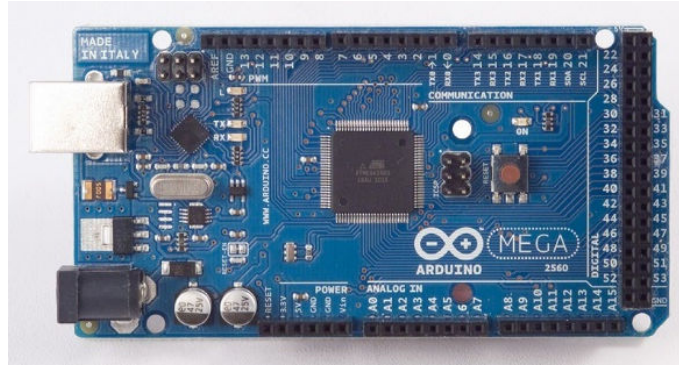
Tabela 2 - Comparativo dos principais microcontroladores disponíveis nos Arduinos

BOARDS	MICROCONTROLADOR	FLASH	EEPROM	RAM
Arduino Duemilanove	Atmega 168	16KB	512B	1KB
Arduino Uno	Atmega 328	32KB	1KB	2KB
Arduino Mega	Atmega 1280	128KB	4KB	8KB
Arduino Mega 2560	Atmega 2560	256KB	4KB	8KB

Fonte: O Autor

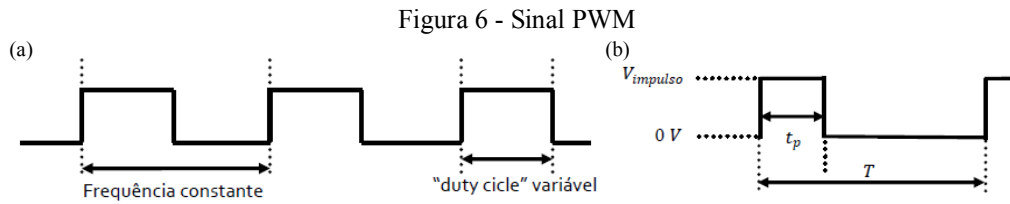
O Arduino Mega2560, conforme ilustra a Figura 5 tem um total de 54 portas digitais e 16 analógicas, onde no primeiro grupo é possível ler e escrever os dois estados da eletrônica digital, 0/1 ou *High/Low*, e no segundo grupo é possível ler e escrever sinais analógicos através do conversor de sinais. Algumas portas podem ser utilizadas com uma configuração em modos específicos conforme o folha de dados do fabricante descreve. Uma destas características é a possibilidade de trabalhar com a modulação por largura de pulso ou *Pulse-Width Modulation* (PWM).

Figura 5 - Arduino Mega 2560



Fonte: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

Conforme (SANTOS N. , 2009) afirma, o recurso PWM é muito importante, pois permite a partir de um sinal digital obter uma tensão analógica. O conceito de PWM é utilizado para descrever um sinal que possua uma frequência constante e um *duty cycle* variável, e que neste contexto é a fração de tempo em que o sistema está em estado ativo, conforme exemplifica a Figura 6-a.



Nota: (a) exemplo de um sinal PWM e (b) um pulso PWM

Fonte: Figura adaptada de Santos (2009)

A Equação 11 descreve a teoria deste fenômeno, onde T representa o período e $V(t)$ representa a tensão em função do tempo.

$$V_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (11)$$

E considerando, como na Figura 6-b, que t_p representa a duração de um pulso, e V_{pulso} representa a tensão do pulso no sinal, e aplicando o conceito de PWM, da Equação 11, tem-se a Equação 12.

$$V_{dc} = \left(\int_0^{t_p} V_{pulso} dt + \int_{t_p}^T 0 dt \right) \quad (12)$$

Resultando na Equação 13, onde observa-se que a tensão V_{dc} é diretamente proporcional ao *duty cycle*.

$$V_{dc} = \frac{t_p}{T} V_{pulso} \quad (13)$$

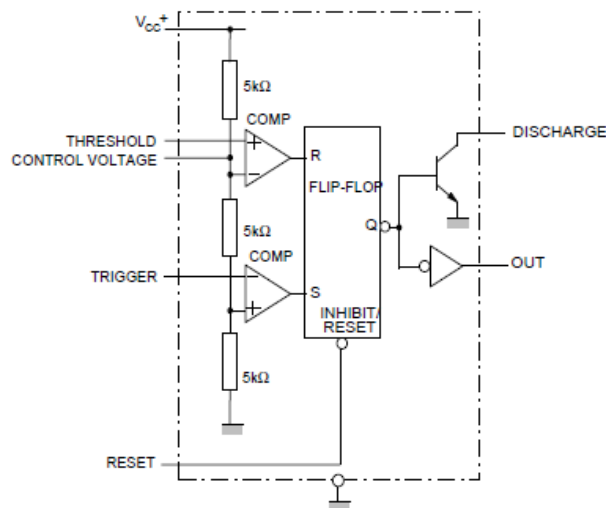
O Arduino também pode ter suas funcionalidades estendidas utilizando os *Shields* (escudos), que são placas de circuito contendo outros dispositivos, tais como, módulos de Ethernet, receptores GPS, displays de LCD, etc.

3.3. CIRCUITO OSCILADOR

O circuito integrado (CI) 555 é largamente utilizado em projetos de osciladores, contadores digitais e circuitos temporizadores. O 555 é um circuito integrado analógico-digital popular muito versátil.

Conforme a Figura 7 apresenta no diagrama de blocos, o CI tem uma combinação de comparadores lineares e *flip-flops* digitais, na qual uma conexão em série de três resistores determina os níveis de tensão de referência para os dois comparadores. A saída desses comparadores habilita ou desabilita a unidade de flip-flop, e a saída dele então é aplicada a um estágio do amplificador de saída e também opera um transistor cujo coletor tem a função de descarregar o capacitor de temporização. Usualmente é fabricado em encapsulamento de oito pinos (BOYLESTAD & NASHELSKY, 2004).

Figura 7 - Diagrama de bloco do CI 555



Fonte: Folha de dados NE555

Uma aplicação comumente utilizada do CI temporizador 555 é operando como um multivibrador astável ou circuito de *clock*. Nesta configuração, o circuito gera pulsos a partir da carga e descarga do capacitor.

A duração dos estados do pulso é determinada pela Equação 14 e 15.

$$T_L = 0,693 R_B C \quad (14)$$

$$T_H = 0,693 C (R_A + R_B) \quad (15)$$

Logo, a soma dos intervalos de tempo em estado alto e baixo do pulso, respectivamente T_H e T_L , resultam em T , que é um ciclo ou período, como apresenta a Equação 16.

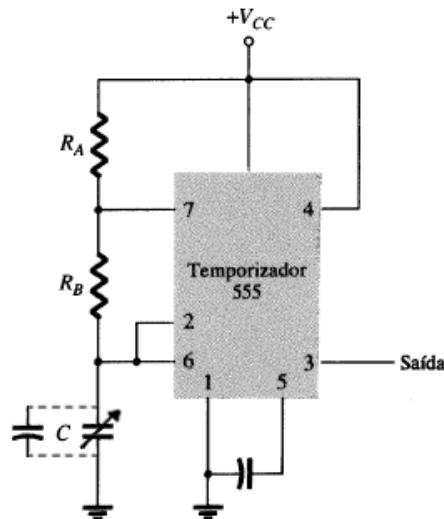
$$T = \text{período} = T_L + T_H \quad (16)$$

A frequência é calculada a partir da Equação 17, que demonstra a dependente dos valores resistores R_A , R_B e do capacitor C .

$$f = \frac{1}{T} \cong \frac{1,44}{(R_A + 2R_B) C} \quad (17)$$

Na Figura 8, observamos a adaptação do capacitor padrão na montagem com o 555 para aplicação de um sensor para obter o comportamento de um capacitor variável, neste caso o sensor instalado no solo, cuja capacitância estará relacionada ao teor de umidade no dielétrico.

Figura 8 - Circuito com 555 em montagem astável utilizando capacitor variável



Fonte: Figura adaptada de Boylestad & Nashelsky (2004, p. 512)

Vale ressaltar que em uma aplicação como esta, a leitura é obtida de forma indireta, a qual necessariamente deve-se atentar para o processo de calibração pela correlação dos valores obtidos por algum outro método padronizado, a fim de garantir a precisão dos valores obtidos.

3.4. MÉTODOS

Gil (2008) orienta que de modo geral o experimento representa o melhor exemplo de pesquisa científica, onde o escopo experimental consiste em identificar o objeto

de estudo, selecionar as variáveis que poderiam influenciá-lo, observando as formas de controle para monitorar os efeitos que produz no objeto.

No estudo experimental, conforme destaca Gerhardt e Silveira (2009), pode ser desenvolvida em laboratório, com a reprodução do ambiente a fim de representar as mesmas condições da situação real.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DESENVOLVIMENTO DA PLACA E CIRCUITO

4.1.1. Construção dos Sensores

Iniciou-se o primeiro teste avaliando o efeito da condutância em relação à umidade do solo baseado no método de Bouyoucos, e para tal foram confeccionados pequenos blocos de gesso com dois eletrodos inseridos e separados por uma distância conhecida. O uso de um multímetro digital foi necessário para mensurar a condutância a partir da maior ou menor resistência apresentada pelo meio.

Os blocos foram inseridos em um recipiente com água onde absorvem ou perdem umidade até que a massa dos blocos adquira equilíbrio, e simultaneamente efetuou-se o acompanhamento das leituras no equipamento testador. Entretanto neste teste observou-se grande variabilidade na leitura devido a maior ou menor aeração da massa de gesso provocado pela falta de homogeneidade da mistura. Outra desvantagem do método foi adormecer no tempo de resposta durante o processo de saturação e secagem. Resultados como esses também foram encontrados na revisão da bibliografia, em que autores relatam pouca precisão relacionada à condutância devido à grande interferência de outras propriedades do solo.

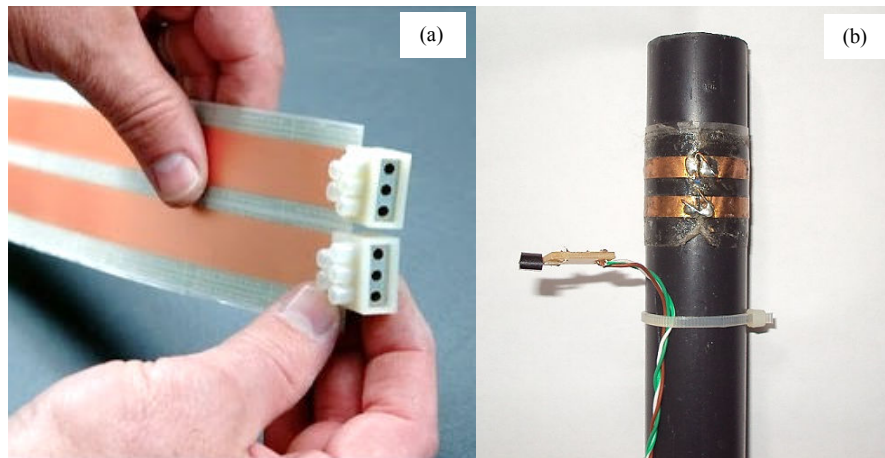
Desta forma, buscou-se na construção do sensor, escolher materiais de fácil obtenção e baixo custo que apresentassem resultados satisfatórios quanto à sensibilidade ao teor de água do solo, velocidade de leitura, praticidade e resistência mecânica no processo de inserção no solo.

Foi testado o uso da eletrofitas, um produto baseado em cabos de cobre planos e paralelos para a condução de eletricidade, dimensionados conforme a corrente que será aplicada, como no exemplo da Figura 9-a, e tem como recomendação a aplicação em locais onde não se pode ou não se deseja quebrar paredes para a instalação de eletrodutos ou eletrocalhas. Fixada no perímetro externo de um eletroduto anti-chama de PVC rígido de 3/4", conforme a Figura 9-b demonstra, a eletrofitas foi conectada por solda de estanho em cabos dentro do referido tubo até o multímetro para aferição dos valores no ensaio. O protótipo apresentou grande dificuldade no isolamento, bem como na instalação dos tubos, principalmente no atrito do processo de inserção no solo. E ainda, devido a pequena área

decircunferência da região cobreada, não apresentou leituras significativas relacionadas à capacitância.

A partir desses resultados optou-se por confeccionar placas finas como as utilizadas em circuitos impressos (PCI). Estas placas são fabricadas sobre uma base de fenolite, que é um laminado plástico bastante utilizado pela indústria como isolante elétrico, sendo recoberto por uma fina camada de cobre metálico que pode ser aplicado em um ou ambos os lados. Para o ensaio foi selecionada a placa com apenas coberta unilateral.

Figura 9 - Construção capacitor coplanar cilíndrico com uso de eletrofita



Nota: (a) eletrofita aplicada em reparos residenciais e (b) teste com eletrofita em eletroduto de pvc
Fonte: O autor

Foram então efetuados testes em diferentes dimensões e formas com o objetivo de avaliar o comportamento e sensibilidade até alcançar o resultado atual. O primeiro desenhoteve formato ondulado com distância e espessura em medidas equiláteras, econectorização no padrão BNC em cabo coaxial RG58 de 50 ohms, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Primeiro desenho de sensor capacitivo



Fonte: O autor

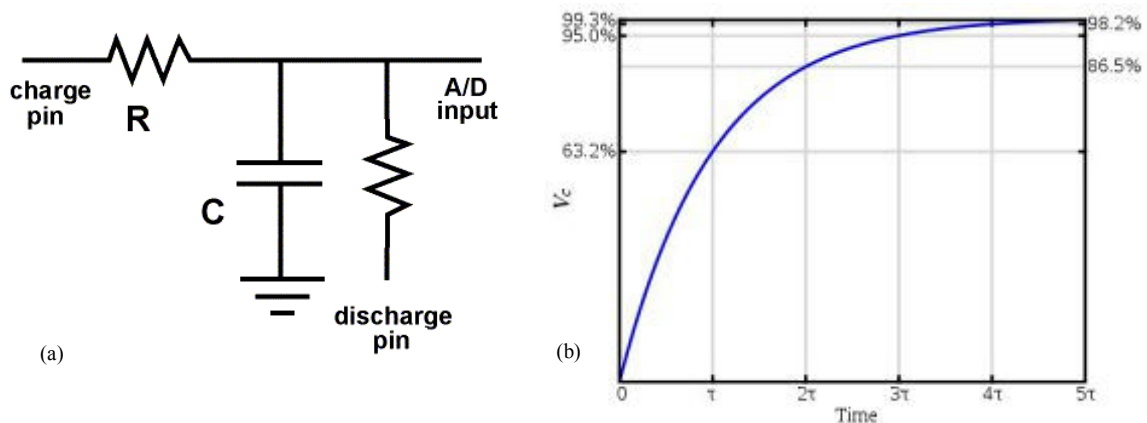
Em todo processo de confecção das placas foi utilizado o método não industrial, que faz uso da transferência térmica do *layout* do circuito impresso a laser para a superfície de cobre da placa e posterior corrosão em banho com solução de percloroeto férrico, que dissolve o cobre deixando apenas as áreas cobertas do desenho.

Esse formato de placa foi testado em um circuito RC, em que R é um resistor e C um capacitor, e nesta configuração obtém-se, a partir do chaveamento dos terminais do capacitor, o tempo gasto em segundos, para carregar 63,2% da tensão elétrica de carga como resultado da Equação 18. O diagrama do circuito utilizado é apresentado na Figura 11-a.

$$T_C = R C \quad (18)$$

A curva com a relação entre o tempo e o percentual de carregamento do capacitor é dada na Figura 11-b.

Figura 11 - Diagrama e gráfico de um circuito RC



Nota: (a) diagrama circuito RC utilizado no Arduino e (b) gráfico do tempo de carga do capacitor
 Fonte: <http://www.arduino.cc>

Observou-se que o tempo de carga no circuito se elevava muito quando o sensor era inserido em solo saturado, reduzindo assim o número de possíveis leituras por intervalo de tempo. Também o uso dos conectores BNC não se mostraram satisfatórios pelo volume proporcionalmente grande, dificultando o isolamento e manipulação nos recipientes de ensaio.

Logo, foi ajustado o formato de confecção das placas em um desenho retangular para aumentar a área cobreada e a utilização de um circuito baseado em oscilador que apresentou maior sensibilidade e rapidez na tomada de tempo, conforme detalhado mais à frente.

O formato plano retangular atendeu a proposta de construção de sensores baseados na semelhança do comportamento dos capacitores, os quais têm na sua estrutura convencional placas paralelas com um material dielétrico separando-as, e com o objetivo de estabelecer uma relação entre o modelo padrão e o não convencional, foi realizado um ensaio comparando ambos os modelos. O sensor de placas paralelas apresentou-se pouco viável para a inserção no solo, pois é necessário o preenchimento com solo do espaço entre as placas, isto é o dielétrico, o que causa alteração na sua estrutura no momento da instalação, como também a possibilidade de ocorrer embolsas de ar ou vazios que alterariam os resultados. Desta forma, optou-se pelo desenho para capacitores não convencionais de placas coplanares, o qual, quando comparado com o modelo convencional, apresentou bons resultados e correlação de valores.

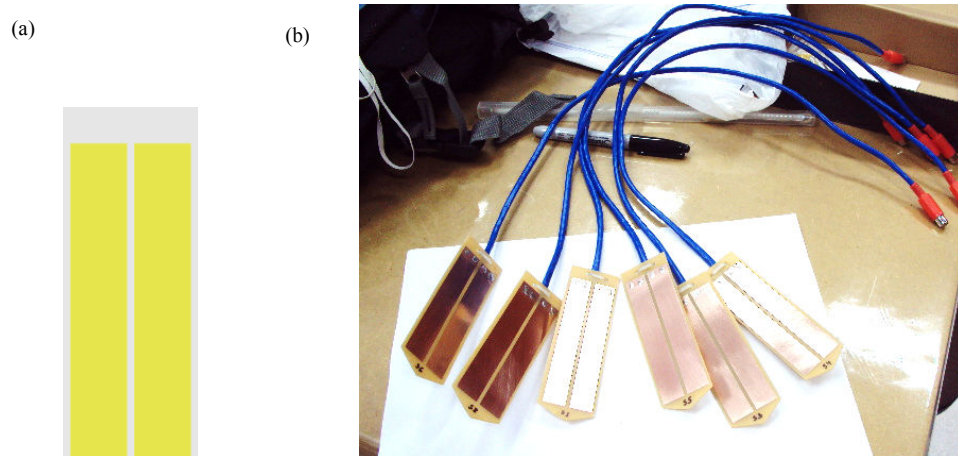
Para o correto funcionamento dos sensores com efeito capacitivo, é necessário isolar as placas com material fino que não permita a condutância e que afete o mínimo possível o campo elétrico resultante da carga acumulada nas placas. Portanto, foram testados diversos materiais isolantes de uso comum, entre eles: película plástica aderente, verniz isolante do tipo usado nos enrolamentos de motor elétrico, verniz marítimo, tinta automotiva e o composto Isol2 utilizado na proteção de superfícies em contato com solo úmido. Após o processo de aplicação finalizado, e devidamente respeitado o período de cura dos materiais, cada um foi testado quanto ao comportamento face ao ar, em terra seca, em terra saturada e em recipiente com água, a fim de obter os valores de resistividade e capacitância em cada um dos meios.

O produto que obteve melhor resultado foi um verniz bicomponente, que é associado a um catalizador, mas foi necessária aplicação de três camadas para conseguir eliminar a condutância em meios saturados, pois a cada incremento de uma camada observou-se a interferência no campo elétrico com a redução dos valores da capacitância. O processo de pintura ocorreu por banho de imersão e secagem em estufa aquecida a 45 °C. O verniz tem como função proteger a camada de cobre contra a oxidação e eliminar a condutância no contato com o solo ou umidade. O isolamento das placas apresentou resistência superior a ordem de grandeza de 60 MΩ, cuja verificação foi realizada por um multímetro digital.

Na montagem do sensor, a fixação dos cabos foi realizada com cola de contato e amarração com fita *hellerman* dando maior resistência à eventual tração do cabo. Foi aplicada ainda, uma cobertura com resina plástica no lado posterior ao cobre, o que protege a furação existente da passagem da conectorização dos fios com a solda.

Após alguns ensaios, foi necessário ajustar o desenho com espaçamentos nas bordas, devido ao atrito com o solo na inserção do sensor, o que acarretou falha em algumas leituras por apresentar condutância. O resultado final obtido conforme Figura 12-a são placas coplanares com duas áreas de cobre de 10 cm de comprimento por 1,5 cm de largura perfazendo uma área total de 30 cm² e separadas por 2 mm.

Figura 12 - Sensores construídos a partir das placas de cobre



Nota: (a) desenho do formato da placa e (b) placas confeccionadas em PCI
Fonte: O autor

4.1.2. Construção do circuito de leitura e armazenamento dos dados

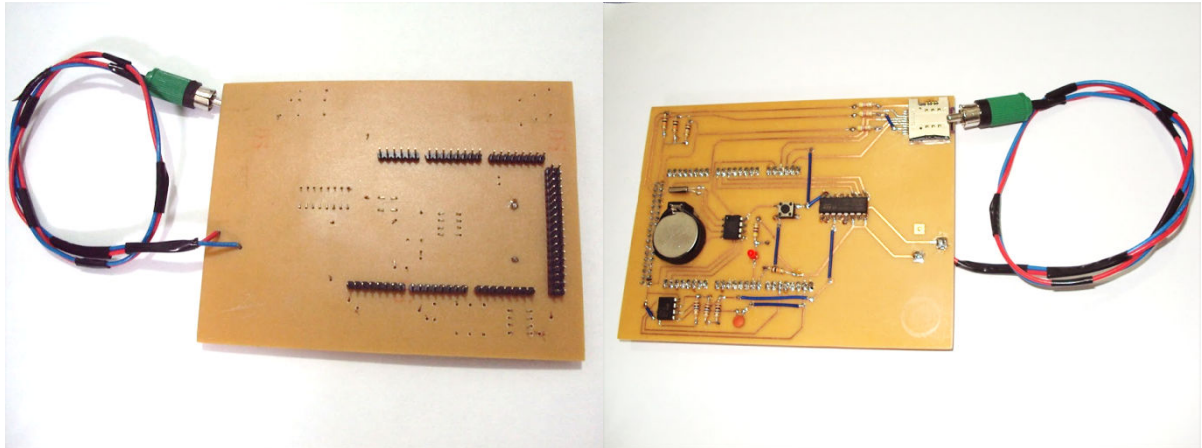
O primeiro circuito desenvolvido seguiu o padrão RC. Os testes foram feitos através de uma *protoboard*, também conhecida por matriz de contato ou placa de ensaio, comumente utilizada para montagem rápida de circuitos sem a necessidade de soldagens ou elaboração de desenho de placas em PCI.

Neste primeiro caso, foi realizada a programação do microcontrolador de forma a efetuar o chaveamento dos pinos de carga e descarga do circuito, mensurando o tempo necessário para atingir a tensão equivalente ao 63,2% da carga aplicada. Este protótipo apresentou duração do tempo de carga longo para o monitoramento em solos saturados.

Com a mudança do padrão de um circuito RC para um circuito temporizador que apresenta maior número de detalhes, foi necessário elaborar um circuito mais completo com o uso do software de desenho de layout, Eagle 6.3 (*Easily Applicable Graphical Layout Editor*) e sequencialmente o uso da transferência térmica e corrosão da área cobreada com a solução apropriada.

A placa foi construída respeitando as dimensões e configuração de pinagem para compatibilização como placa de expansão, também conhecida como *shield*, do arduino mega, conforme resultado demonstrado na Figura 13.

Figura 13 - Placa de extensão / Leitura e armazenamento da frequência



Fonte: O autor

No circuito da Figura 14 que representa o esquemático da placa, foi utilizado o componente HCF4051 para a multiplexação das portas de leitura, o que permite a captura de vários sensores, expandindo, assim, o número de possíveis coletas de dados.

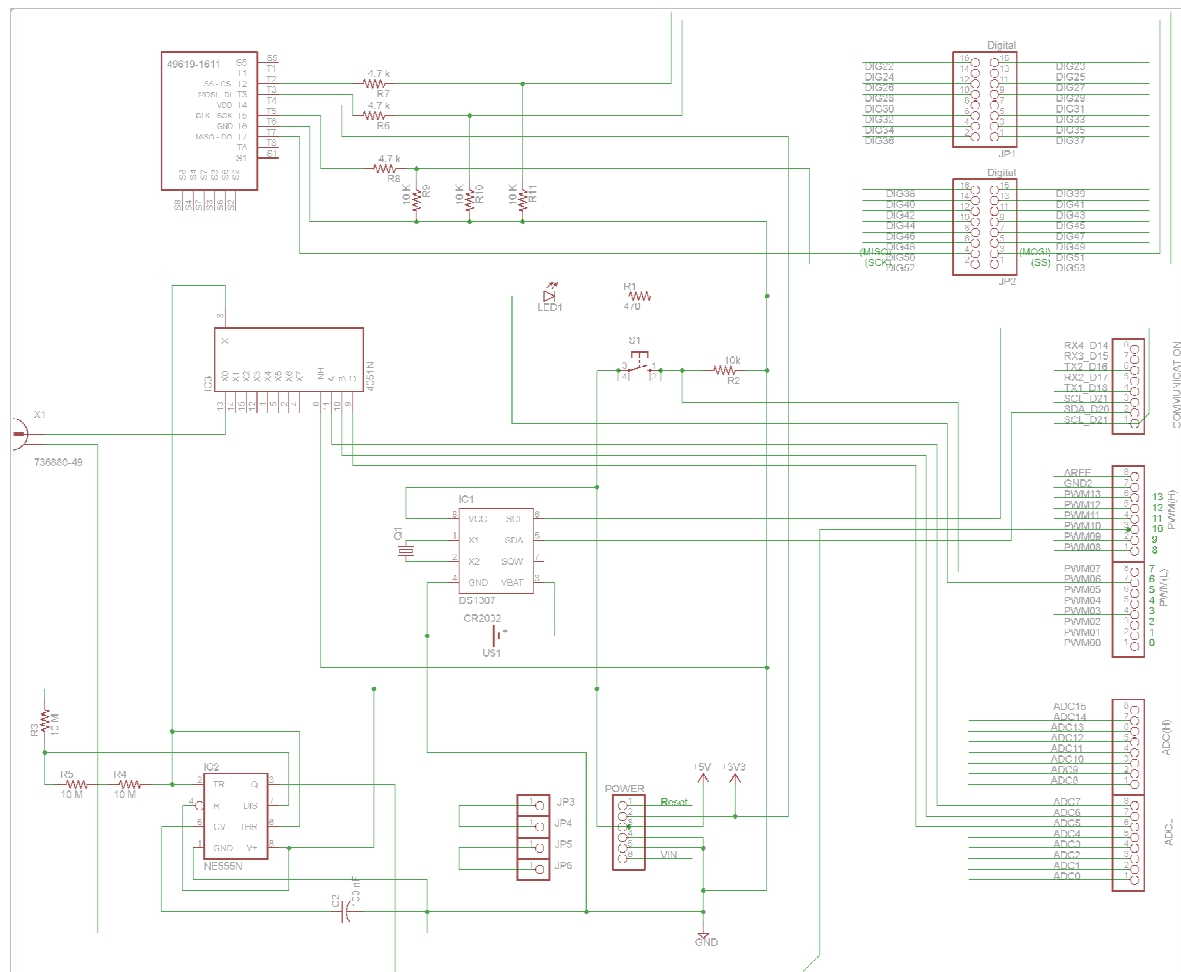
O componente *Molex Memory Card Connectors 8P Micro SD/SIM* utilizado na gravação do cartão de memória foi importado da empresa *Mouser Eletronics* e por não fazer parte da biblioteca padrão da ferramenta, precisou primeiramente ser elaborado para posterior utilização do seu desenho símbolo e esquemático na construção da placa. Para comunicação entre o microcontrolador e o cartão de memória foi utilizado o protocolo *Serial Peripheral Interface (SPI)*. Caracteriza-se por ser uma comunicação de dados serial e síncrona, entre um ou mais periféricos e que utiliza quatro pinos para a conexão (MISO, MOSI, SCK e SS).

Ocorre também a inclusão de um DS1307 ligado a uma bateria com o objetivo de manter de forma independente e autônoma as informações de data e horário do circuito, sem necessidade de alimentação externa. O componente utiliza interface *Inter-Integrated Circuit (I2C)*, com apenas dois pinos na conexão (SCL, SDA).

O CI 555 neste circuito está configurado de modo astável e com a saída do pino 6 juntamente com o segundo resistor ($R4$), que apresenta comportamento como o de um capacitor variável, aplicado, neste caso, como placas de sensores, ligado ao multiplexador que permite então a seleção do sensor que será avaliado utilizando apenas um temporizador. A

saída do pino 3 então é ligada à porta digital 10 do microcontrolador para captura do tempo dos pulsos gerados pelo 555. A duração dos pulsos depende do valor da capacitância obtida no sensor instalado no meio em análise, que neste caso é o solo. Estes pulsos são lidos pelo programa gravado no microcontrolador que utiliza a função *pulseIn()* para determinar a duração em que o pulso apresenta sinal alto e baixo, e assim obter a frequência pela medida indireta da capacitância obtida pelas placas sensores. A função trabalha com valores desde 0.1010^{-6} segundos até 3 minutos de duração conforme descrição da linguagem do arduino.

Figura 14 - Esquemático da placa



Fonte: O Autor

O programa desenvolvido e gravado no microcontrolador utiliza variáveis globais para definir os parâmetros de leitura, onde por *default* foi indicado realizar 10 leituras calculando a média que será registrada.

4.1.3. Calibração do sistema

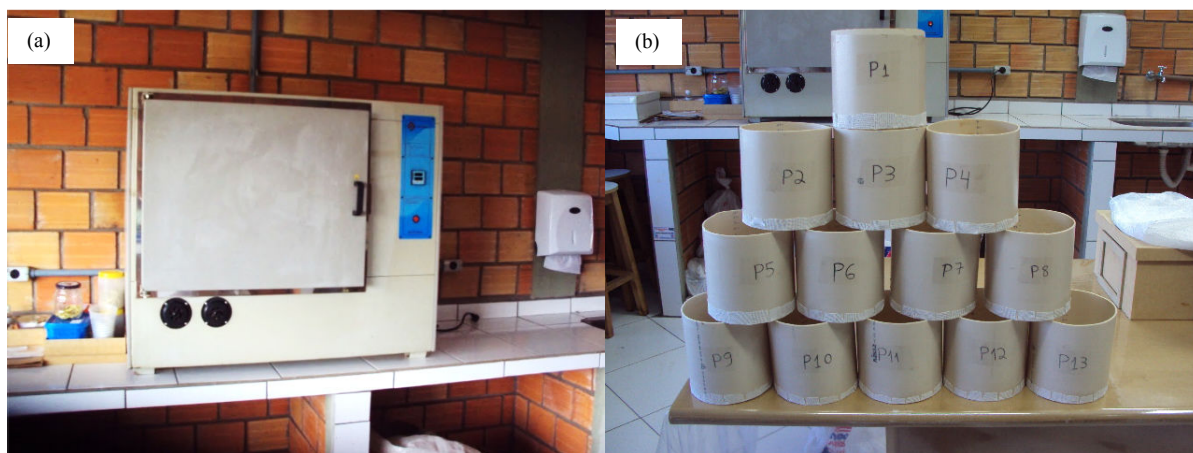
Um sistema de medição pode ser definido como o conjunto de instrumentos e recursos, acoplado a outros equipamentos que o compõe, necessários para executar uma

medição específica. Todavia, a leitura da saída de um sistema de mediação não representa necessariamente uma relação direta com a grandeza que se quer medir, sendo necessário fazer a calibração do sistema.

Esta calibração pode ser definida como o conjunto de operações que estabelecem, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição e os valores correspondentes as grandezas estabelecidas por padrão.

Na calibração do sistema, para o armazenamento o solo utilizado na aferição, foram confeccionados recipientes cilíndricos construídos a partir de tubos de PVC com 15 cm de altura total e 15 cm de diâmetro, perfazendo uma capacidade volumétrica de $2297,29 \text{ cm}^3$. Foram colocadas marcas em unidade de centímetro na face interior do recipiente para servir como régua de graduação na colocação do solo, em quantidade igualitária, nas várias amostras. Na extremidade inferior, foi fixada uma tela de poliéster com furação de 1 mm em conjunto com o uso de papel filtro qualitativo com objetivo de evitar a perda de material durante a movimentação do processo de umidificação e pesagem das amostras. A Figura 15-b mostra os recipientes já concluídos e identificados.

Figura 15 - Estufa e recipientes utilizados em ensaio no laboratório da fazenda escola



Nota: (a) estufa utilizada no laboratório da fazenda escola e (b) recipientes construídos para o ensaio
Fonte: O autor

Cada recipiente e sensor descrito acima foram pesados individualmente em uma balança de precisão como na Figura 16. Foram utilizadas duas balanças de precisão diferentes, disponíveis em cada laboratório nos momentos distintos em que ocorreram as pesagens.

A primeira balança é da marca Balmak, modelo ELC-25, cuja carga mínima é 40 g e carga máxima de até 10 Kg com graduação de 2 g e na carga máxima de 25 Kg com graduação de 5 g. E uma segunda balança, da marca Brinox, modelo 2922/100, com carga

máxima de 5 Kg e graduação em 1 g. Ambas com tara subtrativa e mostrador digital de cristal líquido e possibilidade de pesagem em três unidades de massa (g, kg, lb).

Figura 16 - Pesagem recipientes



Fonte: O autor

Foram empregados planilhas eletrônicas para registrar os dados coletados no processo de preparação bem como na determinação e avaliação dos resultados dos testes em ensaios realizados. Os valores obtidos na pesagem dos recipientes e sensores estão registrados na Tabela 3 e Tabela 4 respectivamente.

Tabela 3 - Pesos dos recipientes

Recipiente	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13
Peso (Kg)	0,286	0,298	0,298	0,300	0,296	0,288	0,290	0,288	0,292	0,290	0,288	0,288	0,286

Fonte: O autor

É possível observar ainda na Tabela 3 que o processo de construção dos recipientes apresentou variação máxima de 0,014 g, o que representa menos de 5% da média, e na Tabela 4a construção dos sensores apresentou variação de até 0,003 g o que representa 13,21% da média. Tendo utilizado um processo manual na confecção, pode-se afirmar que esta diferença não é significativa, pois os referidos valores são subtraídos no cálculo da massa de solo corretamente identificados.

Tabela 4 - Pesos dos sensores

Sensor	S1	S2	S3	S4	S5	S6	T1	T2	T3	T4
Peso (Kg)	0,023	0,022	0,022	0,023	0,023	0,025	0,023	0,022	0,022	0,022

Fonte: O autor

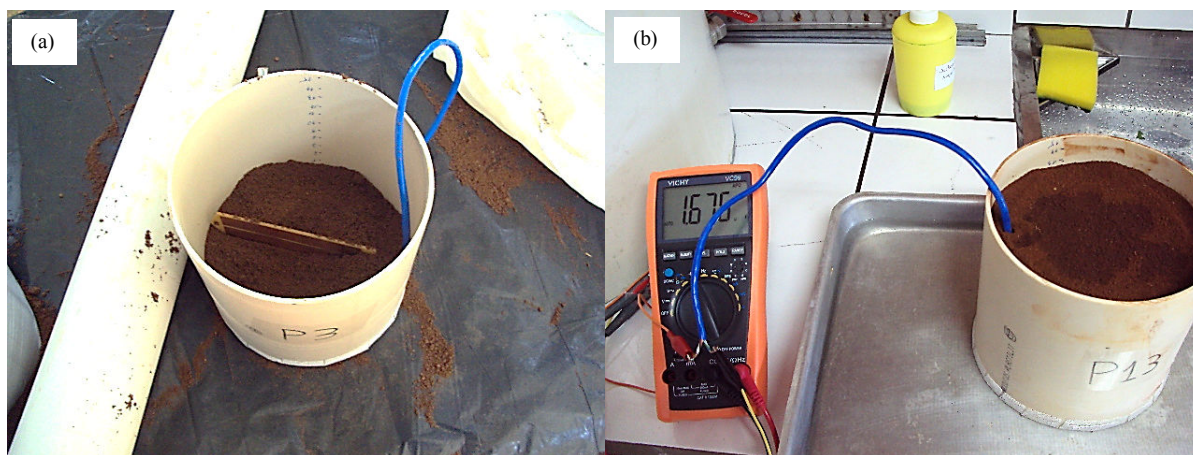
Após obter o volume dos recipientes, foram retiradas amostras de solo deformadas na profundidade de 0 a 0,20 m, em volume necessário para cada recipiente. As amostras de solo foram postas para secar ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2mm para retirada das raízes e torrões, acondicionadas em sacos plásticos, com aproximadamente 10 L de solo cada.

O solo utilizado é proveniente de uma área externa da Fazenda Escola Cescage, cuja classificação é latossolo vermelho-amarelo, localizado nas coordenadas médias latitude 25,177418 S e longitude 50,113285 O, e com uma altitude média de 832 m.

Na instalação, os sensores foram posicionados lateralmente após a colocação de solo seco, acima do PMP, em 5 cm a fim de evitar criar uma barreira de retenção e interferir no movimento de percolação ou ascensão capilar da água conforme a Figura 17-a. Os recipientes foram então completados com solo até a marcação de 13 cm de altura, distribuindo assim de forma igualitária a quantidade de material ao redor do sensor. Não foi aplicada nenhuma compactação do solo neste processo, sendo apenas acondicionado pela força gravitacional.

Após devidamente instalados, foi realizada a pesagem e coleta dos dados através do multímetro e registro pela placa leitora, para posterior análise. Sequencialmente os recipientes com as amostras de solo foram hidratadas com água por ascensão capilar até apresentarem saturação visual. A frente de umedecimento atingiu a altura do cilindro num tempo médio de 30 minutos, onde após a observação permaneceu pelo período de mais 60 minutos até haver o equilíbrio e não mais redução do nível de água do recipiente inferior. Este processo pode ser visto na Figura 17-b.

Figura 17 - Instalação e teste do sensor



Nota: (a) instalação do sensor no recipiente (b) teste de sensor, umedecimento por ascensão capilaridade

Fonte: O autor

Todos os valores lidos foram anotados em planilha eletrônica para serem comparados e correlacionados com os dados registrados no cartão de armazenamento da placa.

A próxima etapa consistiu em deixar os recipientes com amostra de solo em repouso quando perderam o excesso de umidade por evaporação. As leituras de umidade foram realizadas diariamente seguidas de pesagem das amostras. No momento em que as amostras atingiram valores próximos ao limite inferior de disponibilidade de água, os recipientes foram levados à estufa à temperatura de 60 °C pelo período de 24 horas, onde permaneceram após mais um ciclo de novas leituras e secagem até atingirem a massa constante. A Figura 18 mostra três amostras em processo de secagem em uma estufa aerada.

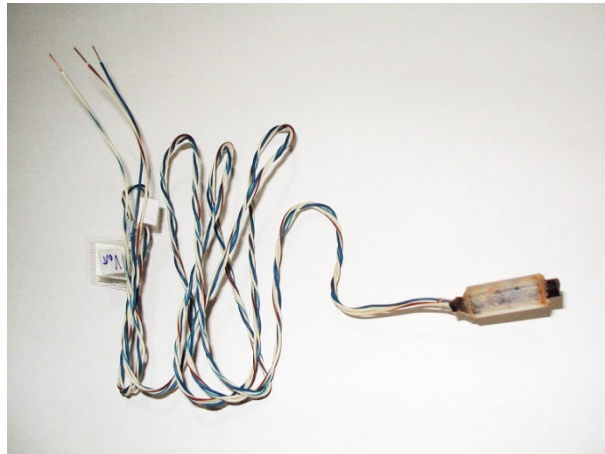
Figura 18 - Amostras no processo de secagem em estufa aerada



Fonte: O autor

Para a leitura dos valores, foi necessário aguardar o esfriamento da massa de solo, pois a temperatura elevada interferiu na medida de frequência capturada pela placa a partir dos sensores inseridos. Esta interferência foi observada ao utilizar água aquecida em uma amostra de solo, monitorada, através de um sensor de temperatura, LM35DZ, Figura 19, anexado ao circuito da placa, no qual pode-se verificar que a temperatura elevada alterou as propriedades do material isolante, apresentando comportamento instável e flutuante, quanto ao isolamento e capacitância. Este efeito se reestabelecia após o resfriamento.

Figura 19 - Sensor de temperatura LM35DZ



Fonte: O autor

O processo de secagem, pesagem e coleta de dados foram repetidos para cada amostra até não apresentar mais redução do peso. Na Figura 20 observa-se a coleta de dados pela placa e acompanhamento dos valores lidos pela comunicação serial.

Figura 20 - Coleta de dados e comunicação serial



Nota: (a) coleta de dados (b) exemplo da leitura por comunicação serial

Fonte: O autor

A saída de dados do sistema, foi formatado como um arquivo CSV (*Comma-separated values*), com os delimitadores, ponto e vírgula (;) e o símbolo pipe (|).

As amostras que não apresentaram conformidade nos resultados esperados, foram descartadas e utilizadas na identificação do erro ocorrido, para assim corrigir as demais, quando pertinente. Notou-se que estas amostras com problemas tiveram como principal fator gerador de erro o material isolante.

4.2. RESULTADOS E VALIDAÇÃO DO PRODUTO

4.2.1. Teste de calibração do circuito com capacitor padrão

Para verificar o comportamento da frequência no sistema, foram utilizados capacitores comuns, tipo cerâmico e eletrolítico, em conjunto com um multímetro digital com a função de capacímetro e ohmímetro, para comparar os valores previstos e obtidos na leitura do circuito. A Tabela 5 apresenta os valores dos resistores e capacitores em cada uma das configurações do circuito que foram testadas.

Uma particularidade observada nestes valores é o fato de que para melhorar a precisão dos resultados, os componentes também foram medidos antes da participação nos testes, e de forma geral, todos demonstraram variação em relação aos valores comerciais. Estes valores aferidos também foram utilizados nas equações, com caráter comparativo. Os resistores apresentaram erro percentual absoluto médio entre 1,70% e 1,82%, e os capacitores de 11,70%.

O erro percentual absoluto médio (MAPE) é a média de todos os erros absolutos percentuais, o que fornece uma indicação do tamanho médio do erro, expresso como uma porcentagem, independentemente do erro ser positivo ou negativo. É considerada como uma das medidas de erro para se avaliar os métodos de previsão.

Tabela 5 - Configuração dos resistores e capacitores no circuito

Ref.	R1 (Ω)	Aferido R1 (Ω)	R2 (Ω)	Aferido R2 (Ω)	Legenda C	C (pF)	Aferido C (pF)
1	1.000.000	976.000	10.000.000	10.020.000	101	100	100
2	1.000.000	976.000	10.000.000	10.020.000	104	100.000	60.000
3	1.000.000	976.000	10.000.000	10.020.000	102	1.000	1.000
4	1.000.000	976.000	10.000.000	10.020.000	101	100	100
5	1.000.000	976.000	10.000.000	10.020.000	102	1.000	1.000
6	470.000	473.600	1.000.000	976.000	101	100	100
7	470.000	473.600	1.000.000	976.000	102	1.000	1.000
8	680.000	681.000	1.000.000	976.000	101	100	100
9	680.000	681.000	1.000.000	976.000	102	1.000	1.000
10	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	471	470	320
11	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	104	100.000	66.400
12	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	101	100	100
13	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	331	330	150
14	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	151	150	150
15	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	201	200	200
16	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	681	680	540
17	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	104	100.000	46.600
18	1.000.000	976.000	1.000.000	975.000	TESTE	117.400	117.400
19	220.000	221.000	220.000	221.000	TESTE	117.400	117.400
20	220.000	221.000	220.000	221.000	TESTE	1.000.000	1.000.000

A maior amplitude na variação dos capacitores é notada, quanto menor é o valor de capacitância, pois nestes casos é necessário o uso de equipamento com escala mais sensível, e também o sistema está sujeito a diversas interferências externas, inerentes às situações encontradas fora de um ambiente laboratorial controlado.

A configuração dos valores dos resistores, $R1$ e $R2$, determina, em conjunto com o capacitor, o valor da duração dos pulsos, que resultará na obtenção da frequência. Esta proporcionalidade entre resistores e capacitores é o delimitadora faixa de frequência resultante, e que deve estar de acordo com os limites inferiores e superiores da capacidade de leitura do sistema.

A partir de cada configuração foram calculados os valores estimados da frequência, para os valores comerciais e os valores obtidos com a aferição do multímetro digital de cada componente, conforme demonstra a Tabela 6.

Tabela 6 - Valores estimados da frequência

Ref.	f (Hz)	p/Aferido f (Hz)	TL (μ S)	p/Aferido TL (μ S)	TH (μ S)	p/Aferido TH (μ S)	p/Aferido TL + TH
1	685,7	685,2	693	694	762	762	1.456
2	0,7	1,1	693.000	416.632	762.300	457.214	873.845
3	68,6	68,5	6.930	6.944	7.623	7.620	14.564
4	685,7	685,2	693	694	762	762	1.456
5	68,6	68,5	6.930	6.944	7.623	7.620	14.564
6	5.830,0	5.936,7	69	68	102	100	168
7	583,0	593,7	693	676	1.019	1.005	1.681
8	5.373,1	5.469,0	69	68	116	115	182
9	537,3	546,9	693	676	1.164	1.148	1.825
10	1.021,3	1.537,9	326	216	651	433	649
11	4,8	7,4	69.300	44.865	138.600	89.776	134.640
12	4.800,0	4.921,4	69	68	139	135	203
13	1.454,5	3.280,9	229	101	457	203	304
14	3.200,0	3.280,9	104	101	208	203	304
15	2.400,0	2.460,7	139	135	277	270	406
16	705,9	911,4	471	365	942	730	1.095
17	4,8	10,6	69.300	31.486	138.600	63.005	94.492
18	4,1	4,2	81.358	79.324	162.716	158.730	238.054
19	18,6	18,5	17.899	17.980	35.798	35.960	53.940
20	2,2	2,2	152.460	153.153	304.920	306.306	459.459

A variação da amplitude entre o resultado estimado, a partir do valor comercial em relação ao valor calculado pela aferição dos componentes, apresentou erro percentual absoluto médio de 23,24% para a frequência, 12,90% para o tempo de alta do pulso e 13,14% para o tempo de baixa do pulso. Mesmo não sendo valores elevados é necessária uma avaliação quanto à seleção dos valores utilizados no cálculo da estimativa.

Foi observado na Tabela 7 que os valores da frequência obtidos pelo circuito, em que destacam-se o erro percentual absoluto médio de 23,78% para o cálculo com o valor comercial e 18,79% para os valores corrigidos pela aferição inicial, demonstrando que é possível melhorar o resultado a partir da calibração e aferição dos componentes do circuito. Devido a este fato os valores obtidos foram ajustados na parametrização das variáveis, durante a elaboração do programa do microcontrolador.

Tabela 7 - Valores obtidos com a leitura no circuito

Ref.	f (Hz)	Erro relativo (%)	Erro relativo p/Aferido (%)	TL (μ S)	TH (μ S)	TL + TH	Capacitância p/Freq. (pF)
1	384,6	0,44	0,44	1.082	1.518	2.600	178
2	1,0	0,53	0,08	462.161	491.009	953.170	65.310
3	60,2	0,12	0,12	7.882	8.717	16.599	1.137
4	384,6	0,44	0,44	1.082	1.518	2.600	178
5	60,2	0,12	0,12	7.882	8.717	16.599	1.137
6	3690,0	0,37	0,38	106	165	271	161
7	543,2	0,07	0,09	738	1.103	1.841	1.093
8	3355,7	0,38	0,39	103	195	298	163
9	506,3	0,06	0,07	739	1.236	1.975	1.080
10	1045,7	0,02	0,32	311	645,3	956	471
11	7,6	0,59	0,03	44.188	86.775	130.963	64.452
12	4028,5	0,16	0,18	74	174,23	248	122
13	1498,8	0,03	0,54	214,35	452,87	667	328
14	2882,3	0,10	0,12	106,61	240,33	347	171
15	2180,7	0,09	0,11	144	314,57	459	226
16	737,9	0,05	0,19	445,03	910,21	1.355	667
17	10,2	1,12	0,04	33.330	65.146	98.476	48.464
18	4,0	0,02	0,05	83.582	166.485	250.067	123.068
19	18,1	0,03	0,02	18.454	36.917	55.371	120.263
20	2,1	0,03	0,02	156.645	315.289	471.934	1.025.015

Ainda, na Tabela 7, foram calculados os valores da capacitância a partir da Equação 17 com os valores da frequência obtidos, o que resultou em um desvio médio padrão de 33,22%.

4.2.2. Comparação do sensor paralelo com o sensor coplanar não-convencional

Na Tabela 8, pode-se observar alguns cálculos da frequência obtidos durante a medição simultânea de duas amostras de solo, as quais encontravam-se nas mesmas condições de umidade e que receberam a mesma quantidade de água. Cada uma representando os dados a partir de um sensor de placas, sendo um formado pelas placas paralelas e o outro por placas coplanares.

Tabela 8 - Tabela parcial da frequência obtida entre sensor de placa paralela e coplanar

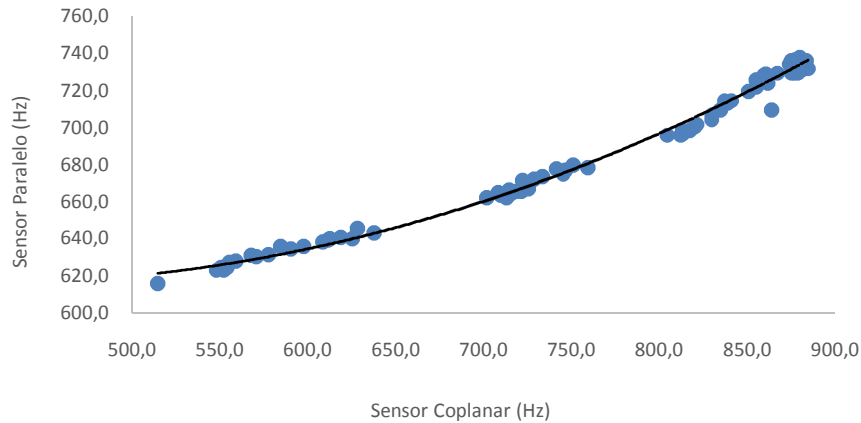
Sensor de Placa Paralela			Sensor de Placa Coplanar		
Th (μ S)	Capacitância (nF)	Frequência (Hz)	Th (μ S)	Capacitância (nF)	Frequência (Hz)
938	0,693	709,254	770	0,569	864,000
907	0,670	733,495	759	0,561	876,522
910	0,673	731,077	758	0,560	877,678
909	0,672	731,881	757	0,560	878,838
912	0,674	729,474	759	0,561	876,522
908	0,671	732,687	759	0,561	876,522
912	0,674	729,474	757	0,560	878,838
906	0,670	734,305	757	0,560	878,838
907	0,670	733,495	760	0,562	875,368
908	0,671	732,687	755	0,558	881,166
908	0,671	732,687	758	0,560	877,678
906	0,670	734,305	758	0,560	877,678
906	0,670	734,305	759	0,561	876,522
908	0,671	732,687	760	0,562	875,368
909	0,672	731,881	758	0,560	877,678
909	0,672	731,881	758	0,560	877,678
910	0,673	731,077	758	0,560	877,678
908	0,671	732,687	755	0,558	881,166
906	0,670	734,305	756	0,559	880,000
907	0,670	733,495	758	0,560	877,678
908	0,671	732,687	755	0,558	881,166
905	0,669	735,116	757	0,560	878,838
907	0,670	733,495	754	0,557	882,334
903	0,668	736,744	759	0,561	876,522
908	0,671	732,687	760	0,562	875,368
907	0,670	733,495	755	0,558	881,166
908	0,671	732,687	758	0,560	877,678
907	0,670	733,495	758	0,560	877,678
905	0,669	735,116	757	0,560	878,838
907	0,670	733,495	760	0,562	875,368
904	0,668	735,929	758	0,560	877,678
909	0,672	731,881	758	0,560	877,678
905	0,669	735,116	757	0,560	878,838
906	0,670	734,305	757	0,560	878,838
905	0,669	735,116	754	0,557	882,334

A partir da comparação das frequências da Tabela 8, o resultado foi ajustado através de um polinômio de segunda ordem, que é dado pela Equação 19.

$$y = 0,0006x^2 - 0,4597x + 711,86 \quad (19)$$

Nesta comparação verificou-se um elevado coeficiente de determinação, $R^2 = 0,9944$, como demonstra a curva na Figura 21.

Figura 21 - Correlação da frequência apresentada por um sensor de placa paralela e um de placa coplanar



Pode-se concluir que o formato coplanar apresentou relação muito satisfatória quando comparado ao formato padrão, em paralelo.

4.2.3. Teste de máximos e mínimos do sensor

A verificação do processo de construção dos sensores foi realizada com um teste de imersão em ar, água e solo seco, a fim de obter os valores máximos e mínimos para a capacitância, bem como a condutância, para avaliar o isolamento do material de cobertura. Os dados obtidos encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Capacitância e resistência em teste de imersão em ar, água e solo seco

	Ar		Água Imerso		Solo Seco	
	R (Ω)	C (nF)	R (Ω)	C (nF)	R (Ω)	C (nF)
Placa Modelo (3,0x10x0,5) cm	-	0,27	20 M	0,69	-	0,28
Placa Modelo (1,5x10x0,2) cm	-	0,30	-	0,40	-	0,33
Placa Modelo (3,0x10x0,5) cm Paralelo	-	0,03	-	0,91	-	0,07

Nota-se que os valores da capacitância encontrados no ar e no solo seco são muito próximos, apresentando variação na imersão em água, o que demonstra o maior valor da constante dielétrica da água em relação ao solo.

Este procedimento foi repetido para cada placa confeccionada nos diferentes formatos e materiais de isolamento.

4.2.4. Resposta do sensor à umidade gravimétrica do solo

Para calcular a umidade do solo, foi utilizado o método gravimétrico. Este é um método considerado como padrão para a calibração de sensores de umidade do solo. Durante o processo de secagem ou umidificação, em cada pesagem foi realizada a leitura a partir do sistema do circuito desenvolvido.

Tabela 10 - Comparação da umidade gravimétrica em relação aos sensores

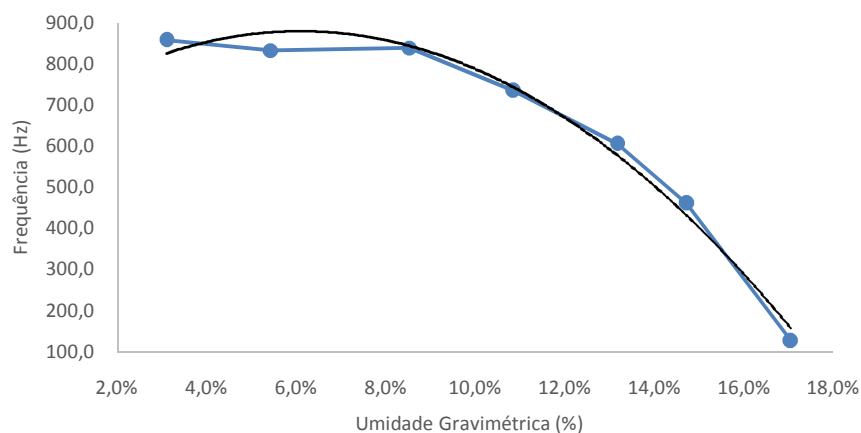
Umidade (%)	Volume Água (ml)	Frequência - coplanar (Hz)	Frequência - paralelo (Hz)
17,05%	210	694,024	126,551
14,73%	180	754,642	461,564
13,18%	150	790,510	606,285
10,85%	120	843,758	736,110
8,53%	90	864,343	840,236
5,43%	60	856,584	833,975
3,10%	30	851,710	859,535

Observando os resultados obtidos nos testes que avaliaram a frequência em relação à umidade gravimétrica, como apresentado na Tabela 10, um polinômio de segunda ordem, Equação 20, foi ajustado aos dados do experimento para correlacionar o teor de água do solo aos sinais digitais correspondentes à frequência do sensor de placas paralelas.

$$y = -60287x^2 + 7344,5x + 657,81 \quad (20)$$

O coeficiente de determinação apresentou valor de $R^2 = 0,9868$, como demonstra a curva da Figura 22.

Figura 22 - Correlação da umidade gravimétrica com a frequência no sensor paralelo

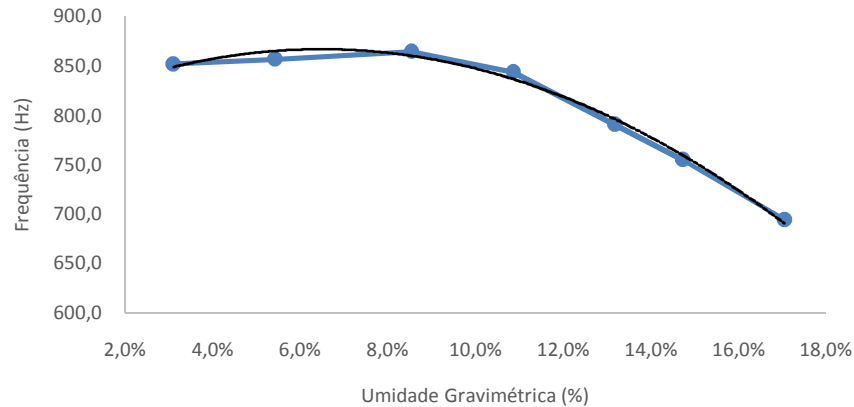


Da mesma forma, um polinômio de segunda ordem, Equação 21, foi ajustado aos dados correspondentes à frequência do sensor coplanar.

$$y = -15716x^2 + 2035,3x + 800,6 \quad (21)$$

O coeficiente de determinação apresentou valor de $R^2 = 0,9914$, como demonstra a curva da Figura 23.

Figura 23 - Correlação da umidade gravimétrica com a frequência no sensor coplanar



No ensaio registrado na Tabela 11, o monitoramento, a partir da saturação com água, do percentual de umidade numa amostra de solo, em processo de secagem ao ar, e concluído numa estufa, quando os valores, de frequência e umidade, obtidas na coleta demonstram uma perda média diária de 1,79% de umidade até o décimo primeiro dia. No dia posterior a amostra foi colocada para secagem na estufa onde perdeu mais 15,3% de umidade e se manteve estável.

Tabela 11 - Dados do monitoramento da frequência e peso da amostra de solo

Ref.	Dia Nº	Frequência (Hz)	Peso (g)	Umidade (%)	Obs. (solo)
0	0	280,7246	2852,0	6,20	Seco
1	0	163,2201	3625,5	35,00	Saturado
2	0	159,4023	3597,0	33,94	
3	0	146,3153	3562,5	32,66	
4	0	147,3000	3562,0	32,64	
5	0	144,6841	3560,5	32,58	
6	0	146,0939	3554,5	32,36	
7	0	146,4696	3548,5	32,14	
8	0	151,2292	3541,0	31,86	
9	0	149,1269	3546,0	32,04	
10	0	148,0059	3533,0	31,56	
11	1	147,8913	3524,5	31,24	
12	1	146,8523	3529,5	31,43	
13	1	146,4143	3527,5	31,35	
14	1	145,6918	3516,5	30,94	
15	1	141,5196	3500,0	30,33	
16	1	141,1596	3503,0	30,44	
17	1	138,5737	3494,5	30,12	
18	1	137,6526	3494,5	30,12	

19	1	132,7435	3493,0	30,07	
20	1	129,6344	3483,5	29,72	
21	1	131,2726	3473,5	29,34	
22	1	133,4599	3468,5	29,16	
23	2	132,8900	3447,5	28,37	
24	2	121,8273	3429,0	27,69	
25	2	122,7793	3435,0	27,91	
26	2	127,3753	3423,5	27,48	
27	3	134,4884	3408,0	26,90	
28	3	141,3681	3416,5	27,22	
29	3	121,4010	3387,5	26,14	
30	3	126,7706	3391,0	26,27	
31	4	129,2324	3390,0	26,23	
32	4	123,7614	3383,0	25,97	
33	5	126,3484	3370,5	25,51	
34	5	122,5415	3347,5	24,65	
35	6	126,2242	3325,0	23,81	
36	6	117,7254	3302,0	22,96	
37	7	126,6293	3278,5	22,08	
38	7	115,9536	3245,5	20,85	
39	8	123,1605	3223,5	20,03	
40	8	136,6776	3200,0	19,16	
41	9	140,3251	3184,0	18,56	
42	9	132,4336	3166,0	17,89	
43	10	148,2927	3163,0	17,78	
44	11	118,1808	3096,5	15,30	
45	12	608,4311	2685,5	0,00	Estufa
46	13	594,3572	2694,0	0,32	
47	13	589,3169	2698,0	0,47	
48	14	558,5892	2696,5	0,41	

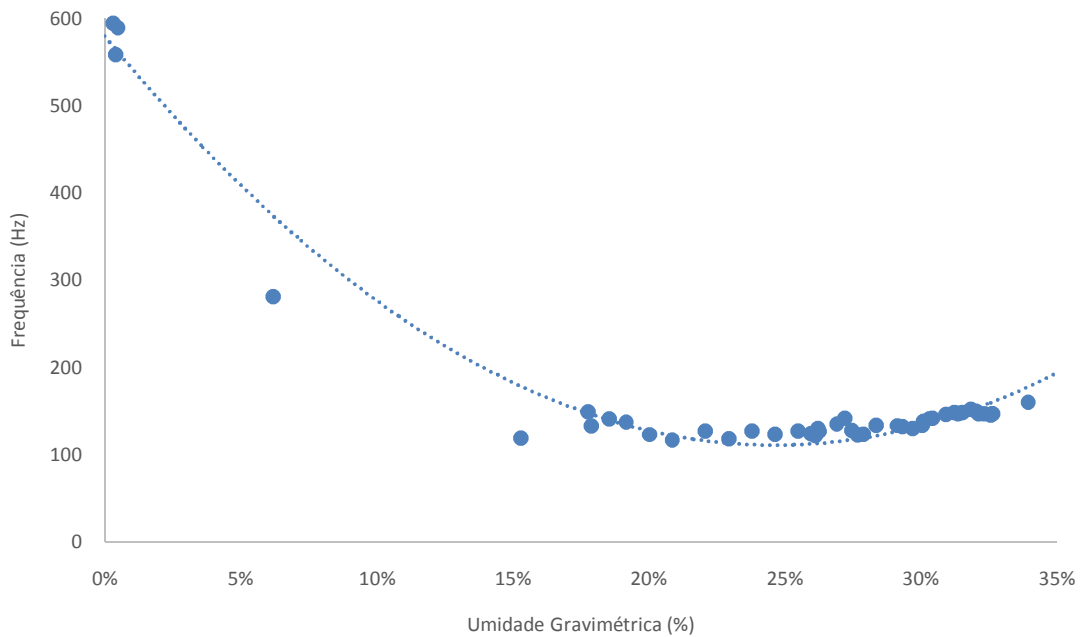
O ensaio teve duração de quatorze dias, onde no décimo segundo, a mostra foi colocada em estufa para secagem total. Diante disso, um polinômio de segunda ordem, Equação 22, foi ajustado aos dados correspondentes à frequência do sensor.

$$y = 7722,3x^2 - 3806,8x + 580,18 \quad (22)$$

O coeficiente de determinação apresentou valor de $R^2 = 0,9743$, como demonstra a curva da Figura 24.

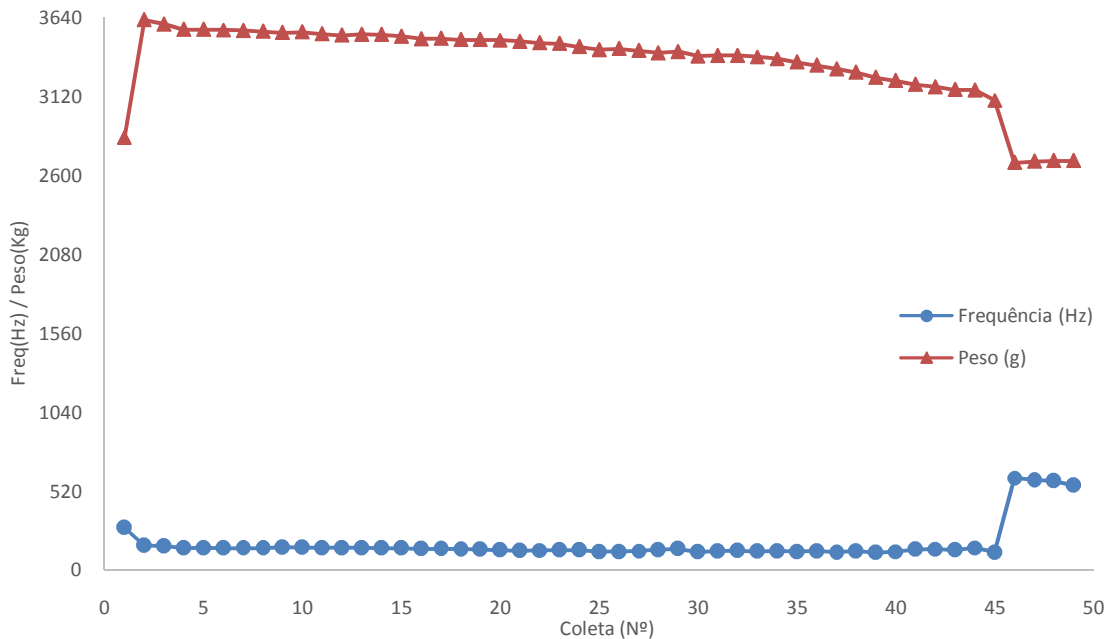
Este resultado indica que o comportamento da variação da frequência é explicado pela existência da forte relação com a umidade do solo.

Figura 24 - Correlação da umidade gravimétrica com a frequência no sensor coplanar



A curva apresentada, no gráfico da Figura 24, entre intervalo de 0% até 15% representa o processo de secagem, acelerado, realizado em estufa, utilizado para extrair toda umidade da amostra. Também pode-se destacar que o intervalo acima de 15% e até 35% representa o período de perda de água pelo processo natural no ambiente.

Figura 25 - Comparação do peso em relação a frequência



De acordo com a Figura 25, percebe-se que a relação entre o peso é inversamente proporcional a frequência.

4.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O CUSTO DO DESENVOLVIMENTO

A composição do custo para o desenvolvimento do sistema, composto pelo *shield* e sensores, apresentou baixo custo conforme apresenta a Tabela 12. Os componentes, materiais e mão de obra necessários para a confecção de 8 sensores e 1 unidade da placa registradora é aproximadamente R\$ 574,95 (quinhentos e setenta e quatro reais e noventa e cinco centavos).

Tabela 12 - Custo no desenvolvimento do protótipo

Descrição dos Componentes	Qtde	VL. Unitário (R\$) ³	Total
Arduino Mega 2560	1	179,00	179,00
Placa Fenolite (10x15)	3	3,12	3,12
Cabo (2m)	9	1,30	1,30
Conector RCA	9	0,36	0,36
DS1307	1	6,15	6,15
Crystal 32,768 Khz	1	0,47	0,47
CD4051	1	0,98	0,98
NE555	1	0,59	0,59
Slot Card (U\$)	1	8,30	8,30
Resistores	11	0,20	0,20
Barras de Pinos	4	0,38	0,38
Led	1	0,30	0,30
Capacitor cerâmico	1	0,10	0,10
Bateria 3v CR2032	1	0,86	0,86
Suporte Bateria	1	0,59	0,59
Materiais para construção da placa (corrosão, transferência, etc)	1	30,00	30,00
Verniz BI Componente	1	22,25	22,25
Mão de obra ⁴	40	8,00	320,00
			574,95

Efetuada uma análise na distribuição dos custos observa-se que o custo de mão de obra representa 56% do total, assim uma produção em maior número tende a diluir este valor melhorando a relação do custo em relação aos componentes eletrônicos já que a maioria deles tem baixo valor comercial.

Em comparação com outros sistemas existentes no mercado o sistema pode ser uma alternativa a pequenos produtores.

³ Preços médios cotados em setembro de 2012.

⁴ Calculado pela média do valor hora pago a um técnico de eletrônica em setembro de 2012.

5. CONCLUSÕES

A partir dos testes realizados, foi possível demonstrar que o desenvolvimento de um sensor capacitivo com formato coplanar, utilizando materiais de baixo custo e uso comum, é viável e apresenta bons resultados na determinação da umidade do solo para uso agrícola.

Quanto à análise dos dados obtidos, a resposta dos sensores capacitivos apresentou uma tendência polinomial de segundo grau com elevados valores de coeficiente de determinação.

Por outro lado, observou-se que a precisão dos componentes elétricos e eletrônicos, que constituem o sistema, interferem diretamente na qualidade dos resultados, o que torna necessário uma aferição inicial para a composição da configuração a ser aplicada.

Os resultados experimentais em estufa e com água aquecida mostraram que a temperatura altera as propriedades do material isolante, afetando diretamente a leitura da capacitância e condutância do sensor, portanto, novos estudos que explorem outros materiais isolantes, podem melhorar esta interferência, aprimorando o sistema de coleta de dados.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE JUNIOR, A., SILVA, C., & ROSSINI, D. (2007). Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do Litoral Piauiense. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* , 2 (4), 303-307.
- ARGENTON, J., ALBUQUERQUE, J., BAYER, C., & WILDNER, L. (2005). Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de latossolo vermelho sob sistema de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* .
- BARBOSA, M. (2011). Calibração e uso de sensores FDR para determinação da umidade e salinidade em dois tipos de solos. 85.
- BARRETO, C., TESTEZLAF, R., & SALVADOR, C. (2011). Ascensão capilar de água em substratos de coco e de pinus. *Revista Bragantia - Instituto Agrônomo de Campinas* , 71 (3), 385-393.
- BAUER, W., WESTFALL, G., & DIAS, H. (2012). *Física para Universitários*. Bookman.
- BERNARDO, S., SOARES, A., & MANTOVANI, E. (2005). *Manual de Irrigação* (7º ed.). Editora UFV.
- BEZERRA, F., ANGELOCCI, L., & MINAMI, K. (1998). Relações Água-Solo-Planta-Atmosfera: Deficiência Hídrica em vários estádios de desenvolvimento da batata. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* .
- BORIM, A., & PINTO, C. (2006). Medição de umidade no solo através de sensores capacitivos. *Revista de Ciência Exatas e Tecnologia* , 1 (1).
- BOYLESTAD, R., & NASHELSKY, L. (2004). *Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos* (8 ed.). São Paulo: Pearson Prentice Hall.
- CAMARA, R., & KLEIN, V. (2005). Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água.
- CAMILO, L., COSTA, É., & ALBUQUERQUE, P. (2003). Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* , 7 (1), 173-176.
- CAPECHE, C. (2008). Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista. *Comunicado Técnico - Embrapa* (51).
- CARDURO, F., & DORFMAN, R. (1988). Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem. 216.
- CAVALCANTE, M., TAVOLARO, C., & MOLISANI, E. (2011). Física com Arduino para iniciantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física* , 33 (4).
- CELINSKI, V. (2008). *Desenvolvimento de sensor elétrico de contato e correlações com atributos do solo visando à agricultura de precisão*. Botucatu - SP.

- CORREA, J., & ROSSETTI, A. (Mar de 1984). Comparação entre o método das pesagens e o método gravimétrico na determinação do conteúdo de umidade atual dos solos no estado do Amazonas. 03. EMBRAPA - UEPAE - Manaus.
- COSTA, A., NANNI, M., & JESKE, E. (1997). Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murchamento permanente por diferentes metodologias. *Unimar*.
- CRUZ, T., TEIXEIRA, A., CANAFÍSTULA, F., SANTOS, C., OLIVEIRA, A., & DAHER, S. (2010). Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. *Engenharia Agrícola*, 30 (1), 33-45.
- DORNELES, J., & RUVIARO, C. (2012). Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH20 para manejo de irrigação. *Revista Eletrônica de Extensão da URI*, 8 (14), 210-218.
- EMBRAPA. (1997). Manual de Métodos de Análise de Solo. 2º, 212.
- FALKER. (Dez. de 2008). Aplicações do HidroFarm - Nota de Aplicação - HFM 2010 - N.1. 5.
- FERNANDES, M. (2006). *Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundamentais* (Vol. 1). FEUP.
- FRANCISS, F. (1980). *Hidráulica de Meios Permeáveis Escoamento em Meios Porosos*. Editora Interciência.
- GERHARDT, T. E., & SILVEIRA, D. T. (2009). *Métodos de pesquisa*. Porto Alegre: Editora da UFRGS.
- GIL, A. C. (2008). *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social* (6º ed.). São Paulo: Editora Atlas S.A.
- GLOAGUEN, T., PEREIRA, F., GONÇALVES, R., & PAZ, V. (2009). Sistema de extração sequencial da solução na macro e microporosidade do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13 (5), 544-550.
- GUIMARÃES, P., SANTANA, M., OLIVEIRA, I., & THOMAZ JUNIOR, J. (2010). Proposta de procedimento para calibração de sensores e medidores de umidade do solo (soil moisture). *ENQUALAB - Congresso da Qualidade em Metrologia*.
- IAPAR. (2011). *SMA - Sistema de Monitoramento Agroclimático do Paraná*. Acesso em 22 de 10 de 2011, disponível em http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm
- LARCHER, W. (2004). *Ecofisiologia Vegetal*. São Carlos, SP.
- LEPSCH, I. F. (2010). *Formação e Conservação dos Solos* (2ª ed.).
- LIBARDI, P. (2005). *Dinâmica da Água no Solo*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.

- MENDONÇA C., J., SOUZA, E., BERNARDO, S., DIAS, G., & GRIPPA, S. (2003). Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7 (2), 275-279.
- MENDONÇA, L., VÁSQUEZ, M., FEITOSA, J., OLIVEIRA, J., FRANCA, R., VÁSQUEZ, E., et al. (Jan/Mar de 2009). Avaliação da capacidade de infiltração de solos submetidos a diferentes tipos de manejo. *Eng Sanit Ambient*.
- PANACHUKI, E. (2003). Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária. 67. Mato Grosso do Sul: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.
- PEREIRA, S., OLIVEIRA FILHO, D., MANTOVANI, E., RAMOS, M., & MARTINS, J. (2006). Reflectometria no domínio do tempo na determinação do conteúdo de água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10 (2), 306-314.
- PINHEIRO, A., TEIXEIRA, L., & KAUFMANN, V. (2009). Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 4 (2).
- PREVEDELLO, C. (1999). Estimativa da profundidade da frente de molhamento a partir da curva de infiltração. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 4 (3), 17-21.
- RABELLO, L., VAZ, C., & TORRE NETO, A. (2005). Sensor Capacitivo para Sondagem da Umidade no Perfil de Solo. *Comunicado Técnico - Embrapa* (71).
- RÊGO SEGUNDO, A. (2010). Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para o uso em irrigação. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)*, 65.
- REICHARDT, K. (1985). *Processo de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. Campinas: Fundação Cargil.
- ROQUE, W. (2008). Desenvolvimento de um multi-sensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)*, 45.
- SANTANA, J., COELHO, E., SILVA JUNIOR, J., SANTANA JUNIOR, E., & VEINROMBER JUNIOR, L. (2012). Desempenho de sondas de TDR manufaturadas de diferentes comprimentos de hastes. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (36), 1123-1129.
- SANTOS, M., ZONTA, J., & MARTINEZ, M. (2010). Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 34, 299-307.
- SANTOS, N. (2009). Arduino Introdução e Recursos Avançados. *Departamento de Engenheiros Navais Ramo de Armas e Electrónica*.
- SILVA, C., C., ANDRADE JUNIOR, A., & SOUZA, C., C. (2008). Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental.

- SILVA, I., I. (2005). Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo. 86.
- SILVA, R., V., REINERT, D., & REICHERT, J. (2000). Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. *Ciência Rural* , 30 (6), 1065-1068.
- SOBRINHO, T., VITORINO, A., SOUZA, L., GONÇALVES, M., & CARVALHO, D. (2003). Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* , 7 (2), 191-196.
- SOUZA, C., & MATSURA, E. (2004). Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* , 8, 7-15.
- TEIXEIRA, C., Damé, R., Terra, V., Reisser Junior, C., Simonete, M., & Brixner, G. (Nov. de 2010). Estimativa da infiltração de água através de modelos empíricos em um Argissolo Vermelho Amarelo sob cultivo de pessegueiro. Santa Maria, RS.
- TORMENA, C., ROLOFF, G., & SÁ, J. (1998). Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* .
- TRAZZI, P., COLOMBI, R., OLIVEIRA, P., RANGEL, O., & PASSOS, R. (Out de 2009). Análise da porosidade total de um argissolo vermelho - amarelo sob diferentes coberturas vegetais. IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação.
- VIEIRA, S. (1999). *Estatística para a qualidade*. Editora Campus.