

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

JOSÉ CARLOS VENTURIN

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE
ELÉTRICA DO SOLO COMO FERRAMENTA PARA
AGRICULTURA DE PRECISÃO**

**DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2020**

JOSÉ CARLOS VENTURIN

**DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
DO SOLO COMO FERRAMENTA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Marcio Alves de Souza
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

V469d Venturin, Jose Carlos

Desenvolvimento de um medidor de condutividade elétrica do solo como ferramenta para agricultura de precisão [recurso eletrônico] / Jose Carlos Venturin. -- 2020.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Cristiano Marcio Alves de Souza.

Coorientador: Eduardo Leonel Bottega.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2020.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Sensores. 2. Projeto de produto. 3. Eletrônica na agricultura. 4. Condutividade elétrica aparente do solo. I. Souza, Cristiano Marcio Alves De. II. Bottega, Eduardo Leonel. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO COMO FERRAMENTA PARA AGRICULTURA DE PRECISÃO

por

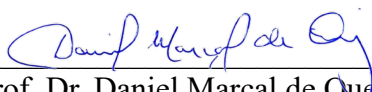
JOSÉ CARLOS VENTURIN

Dissertação apresentada como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

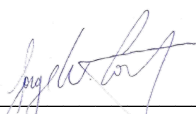
Aprovada em: 19/11/2020.



Prof. Dr. Cristiano Marcio Alves de Souza
Universidade Federal da Grande Dourados
(Orientador)



Prof. Dr. Daniel Marçal de Queiroz
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez
Universidade Federal da Grande Dourados

AGRADECIMENTOS

A Deus, Pai eterno e todo poderoso que através de Nosso Senhor e Salvador Jesus Cristo, me deu forças e me abençoou em toda essa caminhada, guiando meus passos em todos os momentos de minha vida.

Ao Cientista da Computação Esmael Dias Prado, Técnico em eletrônica da UFGD, que contribui na construção do circuito eletrônico do medidor.

À UFGD – Universidade Federal da Grande Dourados, pela oportunidade de fazer mestrado.

Ao PGEA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da FCA – Faculdade de Ciências Agrárias, pela estrutura de ensino fornecida.

Ao Prof. Dr. Cristiano Marcio Alves de Souza, pela orientação, ensinamentos e paciência durante o período do curso.

Ao Prof. Dr. Eduardo Leonel Bottega, da Universidade Federal de Santa Maria, pela coorientação em vários momentos do projeto, mesmo a distância sempre esteve pronto para ajudar.

Aos professores Daniel Marçal de Queiroz da Universidade Federal de Viçosa e Marcelo Marques Costa da Universidade Federal de Goiás, pela contribuição com informações relevantes para o projeto.

A minha família pelo incentivo, confiança em meu potencial, apoio e paciência que tiveram para que eu não desanimasse durante essa jornada.

Aos meus amigos e técnicos da UFGD, Jair Paulo Costa e David Correia da Silva por ter me ajudado e incentivado em vários momentos do projeto, principalmente no meu afastamento do trabalho assumindo várias atividades de minha responsabilidade, para que minha ausência não comprometesse o bom andamento das atividades da FAEN – Faculdade de Engenharia.

A todos os professores e colegas do PGEA, pelos ensinamentos e pela companhia e boa convivência, pelo auxílio nas atividades, pela amizade e momentos de descontração.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Fluxograma de funcionamento de um sistema de controle eletrônico da taxa de aplicação de fertilizantes.	5
FIGURA 2. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos: dois eletrodos de corrente (C1 e C2) e dois eletrodos potenciais (P1 e P2). ...	6
FIGURA 3. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo por indução eletromagnética, modelo EM-38.....	10
FIGURA 4. Equipamento mensurador de CEa utilizado no trabalho (a), esquema de funcionamento do equipamento (b).	11
FIGURA 5. Medidor portátil de condutividade elétrica aparente (Landmapper), utilizado no mapeamento da variabilidade espacial do solo.	12
FIGURA 6. Módulo do sensor higrômetro de solo para Arduino.	13
FIGURA 7. Ilustrando o microcontrolador e os seus recursos.	13
FIGURA 8. Fases do processo de projeto do medidor de CEa.	14
FIGURA 9. Estrutura de funções do sistema portátil para medição da CEa.	15
FIGURA 10. Sistema de medida de condutividade elétrica de “quatro pontos”.	16
FIGURA 11. Vista em perspectiva e em detalhes explodida da montagem mecânica do sensor.	18
FIGURA 12. Estrutura de funções do medidor MCEAS.....	19
FIGURA 13. Malha de pontos espacializados e o caminhamento para coleta de dados de CEa.....	22
FIGURA 14. Vista frontal do MCEAS – Medidor de condutividade elétrica aparente do solo.....	24
FIGURA 15. Vista frontal e de alguns componentes eletroeletrônicos do MCEAS.	25
FIGURA 16. Diagrama eletrônico do circuito de medição do medidor de condutividade elétrica aparente do solo.	27
FIGURA 17. MCEAS com a célula de acrílico e solução padrão de condutividade elétrica.....	28
FIGURA 18. Distribuição das leituras da CEa para o fator f_c igual a 1.	29
FIGURA 19. Distribuição das leituras para o fator f_c igual a 0,07.	30
FIGURA 20. Medidor MCEAS realizando leituras da CEa em um Latossolo Vermelho Distroférico depositado na caixa de madeira (A: lado esquerdo; B: lado direito), com determinador de umidade (C, D).	31
FIGURA 21. Leituras da CEa em caixa de solo com umidade de $0,433 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$	32
FIGURA 22. Leituras da CEa em caixa de solo com umidade de $0,319 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$	33
FIGURA 23. Coleta de dados com o MCEAS, em área de produção de grãos da Fazenda Experimental.....	33
FIGURA 24. Leituras da CEa em área de Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio	

direto de culturais anuais (soja → milho → soja → aveia).	35
FIGURA 25. Gráfico do semivariograma do modelo esférico.	36
FIGURA 26. Espacialização da distribuição espacial da CEa.....	37

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. Parâmetros de calibração do MCEAS com solução padrão	28
QUADRO 2. Médias da CEa obtidas usando o MCEAS nos dois lados da caixa de solo com diferentes umidades	31
QUADRO 3. Estatística descritiva dos dados da CEa de um Latossolo Vermelho Distroférico argiloso cultivado com aveia sob plantio direto.....	34
QUADRO 4. Parâmetros do semivariograma ajustado do modelo teórico para a CEa..	35

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Lista detalhada de peças da montagem mecânica do MCEAS.....	45
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEa	Condutividade Elétrica aparente do solo, $S\ m^{-1}$
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ADC	Conversor analógico-digital
A/D	Analógico digital
CI	Circuito integrado
EEPROM	Memória Somente de Leitura Programável Apagável Eletricamente
CPU	Unidade Central de Processamento
RAM	Memória de Acesso Aleatório
E/S	Entrada e saída
PWM	Controle por largura de pulso
PIC	Controlador de Interface Programável
ROM	Memória Somente para Leitura
UGD	Unidades de gestão diferenciada
SIG	Sistemas de informação geográfica
LAPROMAQ	Laboratório de Projeto de Máquinas
FCA	Faculdade de Ciências Agrárias
FAECA	Fazenda Experimental de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Grande Dourados
UFGD	Universidade Federal da Grande Dourados
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
$S\ m^{-1}$	Siemens por metro
PVC	Policloreto de polivinila
BNC	Conector Naval Britânico
MCEAS	Medidor de condutividade elétrica aparente do solo
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado
RTC	Relógio em tempo real
$\mu S\ cm^{-1}$	Microsiemens por centímetro
$mS\ m^{-1}$	Milisiemens por metro
kg	Kilograma

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Agricultura de precisão.....	3
2.2 Condutividade Elétrica Aparente do Solo	6
2.3 Equipamentos para medição da condutividade elétrica do solo.....	10
2.4 Sensores.....	12
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1 Local.....	14
3.2 Processo do projeto do sistema portátil para medição da CEa.....	14
3.3 Projeto do sensor	15
3.3.1 <i>Determinação da CEa</i>	15
3.3.2 <i>Construção do sensor</i>	16
3.4 Projeto do medidor de CEa - MCEAS	18
3.5 Desenvolvimento do software embarcado do medidor	19
3.6 Calibração do MCEAS	20
3.7 Coleta de dados e testes com o equipamento	21
3.8 Análise estatísticas e geoestatísticas.....	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Medidor de condutividade elétrica aparente do solo – MCEAS.....	24
4.2 Circuito eletrônico.....	25
4.3 Calibração do MCEAS.....	28
4.4 Teste do MCEAS com o solo em duas umidades.....	30
4.5 Estatística descritiva, geoestatística e mapeamento da CEa em área agrícola.....	33
5 CONCLUSÕES	38
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
7 APÊNDICES.....	43
APÊNDICE A	43
APÊNDICE B	44
APÊNDICE C	45
APÊNDICE D	46
APÊNDICE E.....	53

VENTURIN, José Carlos. **Desenvolvimento de um medidor de condutividade elétrica do solo como ferramenta para agricultura de precisão**. 2020. 53f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados.

RESUMO

As tecnologias de agricultura de precisão têm contribuído para aumento de produtividade, redução dos impactos ambientais e diminuição dos custos de produção. O sensor de condutividade elétrica aparente do solo é uma ferramenta importante para agricultura de precisão, reduzindo custo e tempo despendido com análises de solo, utilizadas nas tomadas de decisões das estratégias de altas produtividades. O mapeamento de atributos do solo por meio de amostragens diretas pode não apresentar vantajosa relação custo/benefício, dessa forma, a determinação de propriedades do solo que estão correlacionadas com as propriedades físicas e químicas do solo, como a condutividade elétrica aparente do solo (CEa), é preferível. O mapeamento da CEa é uma técnica com elevada aceitação em agricultura de precisão. Dessa forma, a utilização da tecnologia de medição da CEa utilizando sensores, pode possibilitar redução de custo e tempo. Assim, objetivou-se desenvolver um medidor portátil de condutividade elétrica aparente do solo para aplicações diversas em agricultura, e testá-lo em condições de campo visando sua aplicação como ferramenta para agricultura de precisão. O desenvolvimento do medidor de CEa foi dividido em quatro etapas, sendo a construção do sensor, o projeto do circuito eletrônico, a implementação do programa de controle do medidor e os testes em laboratório e em campo de produção agrícola. O desenvolvimento do sensor de CEa foi feito visando agilizar as medições, enquanto na construção do circuito eletrônico buscou-se precisão e exatidão nas medidas. De posse dos dados coletados com o medidor de CEa, pode-se analisar seus valores obtidos em solos seco e úmido, também para determinar a CEa em talhão de produção de soja/aveia. Com base nos valores obtidos foi gerado um mapa de CEa e analisada a variabilidade espacial dessa variável. Os resultados mostram que o medidor portátil de condutividade elétrica aparente do solo (MCEAS) apresenta potencial para ser aplicado na análise de variabilidade espacial dos solos em sistemas que utilizam agricultura de precisão. O MCEAS desenvolvido apresentou fácil operação e manuseio, rapidez na obtenção das medidas, realizando as leituras em uma faixa de operação equivalente às obtidas com medidores comerciais. Além disso, as leituras da

CEa do solo obtidas com o MCEAS apresentaram potencial para amostragem indireta de atributos do solo.

Palavras-chave: sensores, projeto de produto, eletrônica na agricultura.

VENTURIN, José Carlos. **Development of a soil electrical conductivity meter as a tool for precision agriculture**. 2020. 53f. Master Dissertation (Master in Agricultural Engineering), Federal University of Grande Dourados, Dourados, Brazil.

ABSTRACT

Precision farming technologies have contributed to increased productivity, reduced environmental impacts, and decreased production costs. The soil's apparent electrical conductivity sensor is an essential tool for precision agriculture, reducing cost and time spent on soil analysis used in decision making. The mapping of soil attributes using direct sampling does not present an advantageous cost/benefit ratio. Thus, the determination of soil properties correlated with the soil's physical and chemical properties, as the soil's apparent electrical conductivity (CEa) is preferable. CEa mapping is a technique with high acceptance in precision agriculture. Thus, the use of CEa measurement technology using sensors can enable cost and time reduction. Therefore, the objective was to develop a portable meter of apparent electrical conductivity of the soil for diverse applications in agriculture and test it in field conditions aiming for its use as a precision agriculture tool. The development of the CEa meter was divided into four stages: the construction of the sensor, the electronic circuit design, the implementation of the meter control program and tests in the laboratory, and in the agricultural production field. The sensor development was made to speed up the measurements; another hand, in the electronic circuit's construction, the precision and accuracy in the measures were sought. With the data collected with the CEa meter, it is possible to analyze its values obtained in dry and wet soils and determine the CEa in a soybean/oat production plot. Based on the values obtained, a CEa map was generated, and its spatial variability was analyzed. The results show that the portable meter of apparent electrical conductivity of the soil (MCEAS) can be applied in the analysis of spatial variability of soils in systems that use precision agriculture. The MCEAS presented easy operation and handling, speed in obtaining the measurements, performing the readings in an operating range equivalent to those obtained with commercial meters. Besides, the CEa readings obtained with MCEAS showed potential for the indirect sampling of soil attributes.

Keywords: sensors, product design, electronics in agriculture.

1 INTRODUÇÃO

Um dos conceitos que tem se tornado uma realidade em nosso país nos últimos anos é o da Agricultura de Precisão. Consolidado como uma prática agrícola que se utiliza de uma série de recursos tecnológicos para conhecer e manejar as lavouras com uma diversidade de relevos, solos, vegetação, entre outros fatores importantes na produção.

Os agricultores têm almejado o equilíbrio entre maiores índices produtivos e menores custos de produção, sem agredir o meio ambiente. Dessa forma, torna-se necessário aderir aos avanços tecnológicos que possibilitem um melhor gerenciamento do campo (COSTA, 2011). Diante dos desafios e limitações operacionais da coleta de amostras e ao custo das análises laboratoriais, os sensores de solo emergiram como uma técnica prática e complementar para se obter informações sobre os atributos do solo, em alta densidade espacial, sem produção de resíduos químicos e com custo reduzido (MOLIN et al., 2019).

Uma ideia equivocada na utilização da agricultura de precisão é que sua utilização demanda recursos de máquinas e equipamentos caros (BERNARDI et al., 2014). Nesse contexto a determinação da condutividade elétrica aparente do solo torna-se uma ferramenta amplamente utilizada para caracterizar a variabilidade espacial dos solos nas áreas cultivadas, devido a utilização de instrumentos não tão sofisticados, mas confiáveis e fáceis de utilizar. Outras técnicas foram incorporadas para minimizar custo e tempo, mas uma das que mais se adaptaram, por ser um método rápido e barato de se fazer uma pré-avaliação das propriedades físicas e químicas da área de lavoura, foi a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (RABELLO, 2009).

A proposta da agricultura de precisão consiste em manejar o campo levando em consideração a variabilidade espacial do sistema de produção, assim, bons resultados têm sido observados quando os fatores determinantes dessa variabilidade são relacionados ao solo (COSTA, 2011). Conhecer a variabilidade espacial de atributos do solo que afetam a produtividade das culturas e determinam os riscos de contaminação do ambiente, investigando as causas dessa variabilidade, são fatores importantes em um sistema de produção que vise sustentabilidade por meio do manejo regionalizado de insumos e práticas agrícolas, como é o sistema de agricultura de precisão (CORÁ et al., 2004).

Quando aplicada esta técnica, cujo princípio é analisar como o solo conduz

uma corrente elétrica a ele aplicada, pode-se delimitar áreas que apresentam solos com características semelhantes em uma lavoura. Os recentes avanços tecnológicos em sensores portáteis, para as medições das características de solo em escala de campo e em tempo real, têm atraído a atenção da pesquisa, na busca pela implementação bem sucedida da agricultura de precisão (ALVES et al., 2013).

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um medidor de condutividade elétrica aparente do solo para ser utilizado em condição de campo, realizando avaliações indiretas das propriedades de solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura de precisão

A intenção da agricultura de precisão (AP) é otimizar a produção agrícola, minimizando os efeitos ambientais prejudiciais. Primeiramente concebida em meados da década de 1980, as tecnologias necessárias para utilização da agricultura de precisão tornaram-se disponíveis em meados da década de 1990 com a consolidação dos sistemas de posicionamento global (GPS) e dos sistemas de informação geográfica (SIG) (CORWIN e LESCH, 2003).

A origem do termo “agricultura de precisão” está fundamentada no fato de que as lavouras não são uniformes no espaço nem no tempo. Assim, foi necessário o desenvolvimento de estratégias para gerenciar os problemas advindos da desuniformidade das lavouras com variados níveis de complexidade (MOLIN, 2015).

Mundialmente, o Brasil é um importante produtor de grãos, posição alcançada com o auxílio de pesquisas e programas de desenvolvimento, incluindo reprodução de plantas, mecanização e incorporação de novos métodos e técnicas de cultivo. É importante destacar a intensificação dos sistemas de plantio direto, e mais recentemente, o uso de sistemas de agricultura de precisão (MEDEIROS et al., 2018).

Em uma economia globalizada que busca cada vez mais eficiência e competitividade, a agricultura não poderia ficar alheia à evolução tecnológica. De acordo com Bernardi et al. (2014), as tecnologias de Agricultura de Precisão já são uma realidade no campo para os técnicos e produtores rurais, difundindo progressivamente o conhecimento de que existe uma variabilidade nas áreas de produção. Conforme Reis (2005), o sistema agrícola é dinâmico no espaço e no tempo e é influenciado por elementos referentes à planta, solo, clima e ações antrópicas. Aliado a isto, a globalização da economia e a necessidade de competitividade têm levado à otimização, cada vez mais necessária, deste sistema.

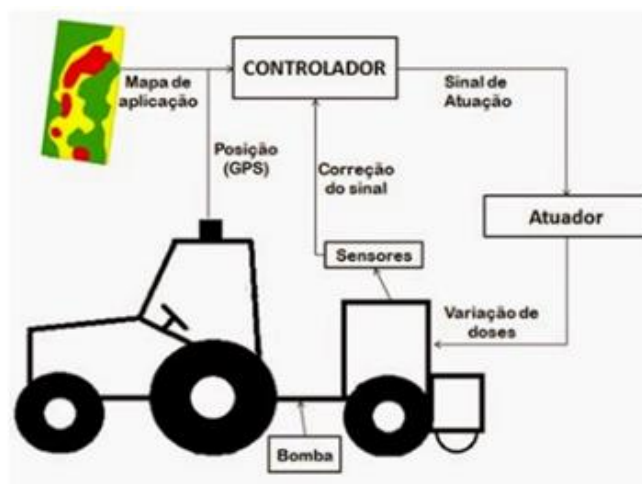
A evolução da informática, tecnologias em geoprocessamento, sistemas de posicionamento global por satélites e muitas outras tecnologias estão proporcionando à agricultura uma nova forma de se enxergar a propriedade, deixando de ser somente uma, mas sim, várias propriedades dentro da mesma, porém com características específicas (TSCHIEDEL et al., 2002). Devido a uma demanda crescente por alimentos e outros produtos derivados da agricultura com recursos naturais estão cada vez mais escassos, a

produção agrícola precisa ser otimizada, buscando à sustentabilidade e à segurança alimentar. A gestão dos cultivos deve buscar o máximo rendimento das culturas com o menor consumo de insumos possível, ou seja, com o consumo racional e otimizado desses. Nesse contexto, a agricultura de precisão se mostra prática essencial e ganha cada vez mais adeptos (MOLIN, 2015). Uma das otimizações, associada ao conceito de agricultura de precisão, está relacionada à aplicação de insumos, como exemplo, agrotóxicos e fertilizantes que se forem aplicados de maneira ineficiente geram problemas ambientais e aumento do custo de produção (REIS, 2005).

A agricultura de precisão é um conjunto de tecnologias destinadas ao manejo de solos, culturas e insumos, que visa um melhor e mais detalhado gerenciamento do sistema de produção agrícola em todas as etapas, desde a semeadura até a colheita (INAMASU et al., 2011). Por isso, a Agricultura de precisão tem como foco a gestão de sistema produtivo agrícola, considerando a variabilidade espacial e temporal. Para Medeiros et al. (2018), a AP se tornou-se uma importante ferramenta para produzir alimentos para atender às demandas da população global, para melhorar o retorno econômico e preservar o meio ambiente.

As mudanças na agricultura são necessárias para que se entenda a propriedade não homogênea e sim que se trate cada parte conforme as suas características específicas, fazendo com que o produtor tenha o conhecimento detalhado em cada parte da linha de produção ou cada metro quadrado da sua propriedade (TSCHIEDEL et al., 2002).

A agricultura de precisão, conforme o MAPA (2013), tem várias formas de abordagem, mas o objetivo é sempre o mesmo – utilizar estratégias para resolver os problemas da desuniformidade das lavouras e se possível tirar proveito dessas desuniformidades. São práticas que podem ser desenvolvidas em diferentes níveis de complexidade e com diferentes objetivos. Hoje, especialmente no Brasil, as soluções existentes estão focadas na aplicação de fertilizantes e corretivos em taxa variável, como demonstrado na Figura 1. Porém não se deve perder de vista que agricultura de precisão é um sistema de gestão que considera a variabilidade espacial das lavouras em todos seus aspectos: produtividade, solo (características físicas, químicas, compactação etc.), infestação de ervas daninhas, doenças e pragas.



Fonte: ROSSATO et al. (2012).

FIGURA 1. Fluxograma de funcionamento de um sistema de controle eletrônico da taxa de aplicação de fertilizantes.

A agricultura de precisão é uma tecnologia que consiste em aumentar a eficiência, com base no manejo diferenciado de áreas agrícolas. Como tecnologia, a agricultura se encontra em constante desenvolvimento, modificando técnicas existentes e incorporando novas técnicas que fornecerão ferramentas aos especialistas em manejo agrícola (REIS, 2005).

A grande quantidade de amostras para análise dos componentes físicos e químicos do solo, para verificar a variabilidade espacial deles, tem sido alvo de críticas por seu elevado custo, e em algumas situações economicamente inviável. Dessa forma, o uso de métodos indiretos que visam relacionar as propriedades do solo para uma análise espacial detalhada, e que visam reduzir o número de amostras coletadas e enviadas para análise em laboratório. Um desses métodos indiretos é o levantamento da Condutividade Elétrica Aparente (CEa) do solo, devido à sua capacidade em identificar a variabilidade de importantes características físicas e químicas do solo (TAUBINGER, 2016).

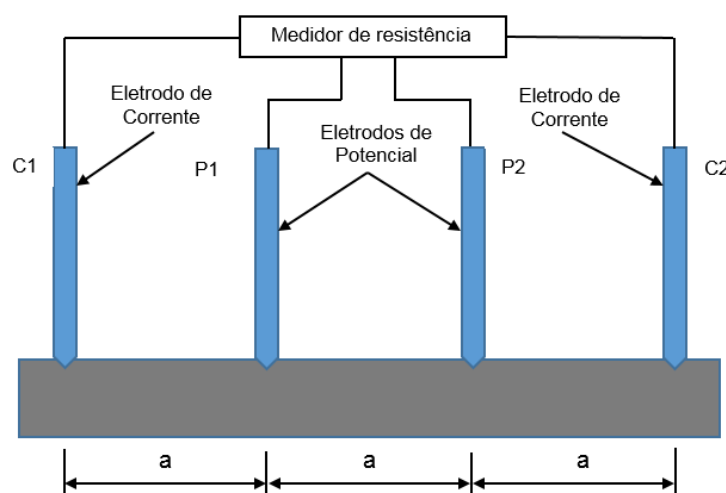
O uso de sensores para mapeamento de algumas propriedades de solo tem sido apontado como uma alternativa para melhorar a qualidade dos mapeamentos e reduzir os custos. Com esse objetivo, pesquisas vêm tentando adaptar os métodos utilizados em laboratórios para o uso em campo ou então desenvolvendo técnicas de mensuração indireta que permitam a estimativa de alguma propriedade do solo (MOLIN, 2015).

2.2 Condutividade Elétrica Aparente do Solo

Os sensores de solo apresentam diferentes princípios de mensuração, podendo ser elétrico e eletromagnético, óptico e radiométrico, mecânico, acústico, ou ainda apresentar conceitos de medição pneumática e eletroquímica (ADAMCHUK et al., 2004). Portanto, o sinal do sensor deve estar correlacionado com atributos do solo que tenham interesse agrônomo e a variável medida pelo sensor deve apresentar um padrão estável de variabilidade espacial ao longo do tempo.

Na agricultura moderna, a busca por aumento de produtividade agrícola torna necessário coletar cada vez mais informações e dados sobre as lavouras. Nesse contexto, o solo deve ser conhecido em detalhes. Uma grande frente de trabalho em solo tem sido a determinação da condutividade elétrica aparente (CEa) e hoje é uma técnica já incorporada às práticas de prospecção em alguns países. O mapeamento da CEa do solo está entre as tecnologias que ajudaram a levar a agricultura de precisão de um conceito a uma ferramenta potencial para abordar a questão da sustentabilidade agrícola (CORWIN e LESCH, 2003).

A determinação da CEa pode ser aplicada para amostra não uniforme e de dimensões não definidas, ou medidas diretas em campo, processo bastante utilizado em geofísica conhecido como “sistema de quatro pontos”. Este processo utiliza quatro hastes metálicas de material condutor de corrente elétrica, alinhadas em sequência com espaçamentos iguais, conforme ilustrado na Figura 2. Essa configuração é denominada Matriz de Wenner (CORWIN e LESH, 2003; BOTTEGA et al., 2011).



Fonte: Adaptado de Bottega (2011) e Wenner (1915).

FIGURA 2. Diagrama esquemático do método da resistividade elétrica com quatro eletrodos: dois eletrodos de corrente (C1 e C2) e dois eletrodos potenciais (P1 e P2).

Uma corrente elétrica é injetada nos dois eletrodos externos e a tensão é medida entre os dois eletrodos internos, a resistividade então é calculada com a seguinte expressão:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{C1P1} - \frac{1}{C2P1} - \frac{1}{C1P2} + \frac{1}{C2P2} \right) \quad (1)$$

em que,

ρ – resistividade, Ohm m⁻¹;

C1P1, C2P1, C1P2 e C2P2 – espaçamentos entre os eletrodos;

ΔV – diferença de potencial medida; e

I – corrente elétrica aplicada.

Se os espaçamentos entre C1 e P1, entre P1 e P2 e entre P2 e C2 for igual a **a**, simplifica-se a Equação 1 para:

$$\rho = \frac{2\pi a \Delta V}{I} \quad (2)$$

A condutividade elétrica aparente é definida como o inverso de resistividade, assim tem-se:

$$CE_a = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

em que,

CE_a – condutividade elétrica aparente do solo, S m⁻¹.

A condutividade elétrica aparente do solo é influenciada por uma combinação de propriedades físicas e químicas, incluindo sais solúveis, teor de argila e mineralogia, teor de água no solo, densidade do solo, matéria orgânica e temperatura do solo; consequentemente, determinações de CE_a têm sido usadas em escalas de campo para mapear a variação espacial de várias propriedades edáficas: salinidade, teor de argila ou profundidade para camadas ricas em argila, conteúdo de água no solo, profundidade dos depósitos de inundação e matéria orgânica (CORWIN e LESCH, 2005).

A capacidade de conduzir eletricidade depende da textura do solo, da capacidade de troca catiônica (CTC), da presença de água e sais e do teor de matéria

orgânica. Esses atributos poderiam ser estimados de forma indireta pela utilização de um sensor de condutividade elétrica aparente, desde que os demais pudessem ser isolados, o que não é possível. Em vez de quantificar cada variável, um mapa de condutividade elétrica aparente do solo em uma área pode ser utilizado para identificar qualitativamente a variabilidade espacial do solo para os fatores que invariavelmente mais afetam a condutividade elétrica aparente (MOLIN, 2015).

Mesmo a amostragem em malha sozinha não é suficiente para aplicar Agricultura de Precisão na sua plenitude. Para conhecer as áreas com detalhamento ainda maior é necessário usar sensores eletrônicos que capturam dados a cada poucos metros, sendo assim, um desses sensores que começa a ser empregado para caracterizar o solo em uma nova fase da agricultura de precisão é o que mede a condutividade elétrica aparente do solo (ALBUQUERQUE, 2017).

Além da amostragem em malha, ainda existem outras estratégias, como a amostragem direcionada e a amostragem por unidades de gestão diferenciada. Na amostragem direcionada, as subamostras são coletadas ao redor de um ponto georreferenciado com local predeterminado, guiado pela variabilidade de outro atributo. A escolha desses locais é baseada, geralmente, em mapas oriundos de uma informação coletada em alta densidade, como o mapa de condutividade elétrica do solo, mapa de produtividade ou imagem de satélite (MOLIN, 2015).

A variabilidade do solo com relação a fertilidade, tem recebido atenção especial por parte de produtores e pesquisadores, por causa dos efeitos diretos que impõe sobre a produtividade. Contudo, identificar com precisão essa variabilidade tem um custo elevado devido ao grande número de amostras de solo necessárias para garantir uma boa representação da área. Métodos geofísicos têm sido utilizados na agricultura para determinação da condutividade elétrica aparente do solo. Essa característica é relacionada a outros atributos químicos e físicos do solo, por isso é utilizada na avaliação da qualidade de solos (BRITO, 2014).

Um dos problemas enfrentados na agricultura de precisão é o número de amostras para definir as zonas de manejo dentro de uma mesma área. Em áreas pequenas, o número de amostras é pequeno e fácil de coletar, diferente de grandes áreas onde tem-se aumento do tempo e do custo. Nesse sentido, a medida da condutividade elétrica aparente do solo vem sendo muito usada e vem se tornando uma importante ferramenta para uma avaliação prévia da área a ser estudada, facilitando as definições das áreas de manejo (RABELLO et al., 2008).

Conforme Queiroz et al. (2017), mapear atributos do solo é uma importante etapa para gerenciar sistemas de agricultura de precisão, podendo utilizar as informações, como exemplo, prescrição de fertilizantes e calcário. Ainda, de acordo com os autores, o processo de amostragem do solo com análise laboratorial é utilizado para determinar os atributos do solo, que tem como inconveniente o custo e o tempo para processar amostras. Por isso, geralmente é realizada amostragens com baixa densidade de pontos de coleta, resultando em uma baixa precisão do mapeamento de atributos do solo.

Uma boa alternativa é usar sensores de solo, que apresentem baixo custo e que tenham resposta rápida. Com o uso de sensores de solo, é possível obter uma amostragem mais refinada, melhorando a resolução espacial dos mapas gerados. Vale destacar que o sensor de solo não mede o teor dos atributos do solo diretamente, mas sim, variações que estes causam no solo, em função de suas diferentes propriedades e concentrações.

O mapeamento de informações sobre atributos químicos e físicos dos solos, para ser confiável, depende da coleta de muitas amostras. Muitas vezes este processo pode apresentar custo elevado, tanto com o procedimento de campo quanto com as análises laboratoriais, o que se torna inviável em muitas lavouras (ALVES et al., 2013).

O mapeamento da condutividade elétrica do solo, apesar de não excluírem a necessidade de análise do solo em laboratório, fornecem uma orientação para que a amostragens seja efetuada de forma localizadas, orientada pelas diferenças nos valores de CEa representados nestes mapas (REIS, 2005).

Em laboratório, a CEa é determinada para um extrato aquoso de uma amostra de solo. Idealmente, seria desejável determinar as concentrações de solutos individuais em água do solo em toda a faixa de conteúdo de água do campo com uma medição rápida e fácil, mas métodos práticos não estão disponíveis atualmente para isso. Devido ao tempo, mão-de-obra e custo de obtenção de extratos de solução do solo, os avanços na medição da salinidade do solo nas últimas duas décadas mudaram para a medição de CEa do solo (CORWIN e LESCH, 2003).

A condutividade elétrica aparente de um solo pode ser medida diretamente ou indiretamente. Geralmente, medições diretas da condutividade do solo são feitas tracionando um implemento, equipado com eletrodos, através do campo. Já as medições indiretas, por indutância, são feitas tomando amostras de ponto usando um dispositivo portátil, sem que haja o contato de eletrodos com o solo (PLANT, 2001).

Os recentes avanços tecnológicos em sensores portáteis para as medições de características de solo em escala de campo e em tempo real, têm atraído a atenção da pesquisa, na busca pela implementação bem sucedida destas ferramentas na agricultura de precisão. Alguns equipamentos portáteis para medição da condutividade elétrica aparente do solo no campo têm sido utilizados na agricultura (ALVES et al., 2013).

2.3 Equipamentos para medição da condutividade elétrica do solo

A CEa do solo pode ser medida com equipamentos relativamente simples e com grande eficiência operacional. Portanto, essa técnica tem um custo relativamente baixo comparado com técnicas de medida de outras grandezas agrônômicas (RABELLO, 2009). Os equipamentos utilizados na medição da condutividade elétrica aparente do solo baseiam-se nas técnicas de contato com sistema quatro eletrodos (Figura 2) ou de indução eletromagnética (Figura 3).

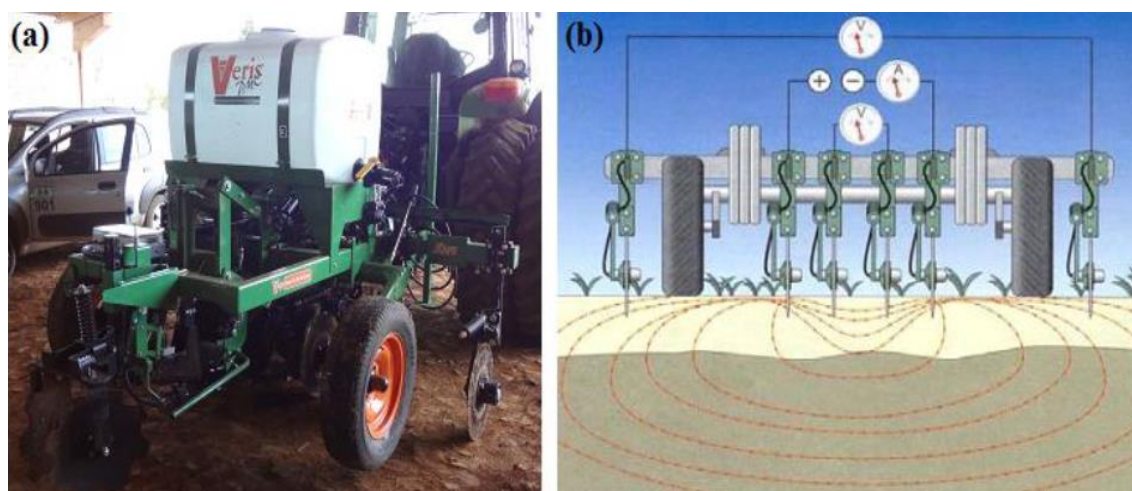


Fonte: Rabello (2009).

FIGURA 3. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo por indução eletromagnética, modelo EM-38.

De acordo com Rabello (2009), na medição por indução eletromagnética, uma bobina de transmissão induz uma corrente de forma espiralada de sentido contrário no solo, a magnitude dessas espiras é proporcional a condutividade elétrica nas proximidades de cada espira. Cada espira de corrente gera um campo eletromagnético secundário que é proporcional ao valor da corrente fluindo dentro da espira. Uma fração do campo eletromagnético induzido, secundário, é detectada por outra bobina receptora, que é amplificado e convertido em uma saída de tensão. Este sinal é proporcional a condutividade elétrica do solo na região onde está a medir.

Para a mensuração da CEa do solo baseada na técnica de contato, Taubinder (2016) apresenta um estudo com um equipamento bastante conhecido, em uma área experimental, que mede a CEa pelo método do contato direto, o Veris MPS3 (Figura 4a). Ele utiliza como eletrodos discos de corte lisos que cortam os resíduos vegetais e penetram no solo a uma profundidade de 5 a 7 cm. Esse equipamento possui seis discos de corte, devidamente espaçados para promover leituras de CEa na camada de 0 a 30 cm (CEa Rasa) e 0 a 90 cm (CEa Profunda), em que dois discos são utilizados para aplicar a corrente elétrica alternada no solo e quatro discos, um par para cada profundidade, medem a diferença de potencial resultante (Figura 4).



Fonte: Taubinder (2016)

FIGURA 4. Equipamento mensurador de CEa utilizado no trabalho (a), esquema de funcionamento do equipamento (b).

Para exemplificar outro medidor de condutividade elétrica aparente do solo, Brito (2014) utilizou o aparelho portátil LandMapper[®] ERM-02 (Landviser LLC, League City, TX) (Figura 5). O dispositivo é composto por quatro eletrodos de prova, que foram penetrados no solo até a profundidade de aproximadamente 6 cm. Dois eletrodos transmitem uma corrente elétrica alternada, enquanto os outros dois medem a diferença de potencial elétrico.



Fonte: BRITO (2014).

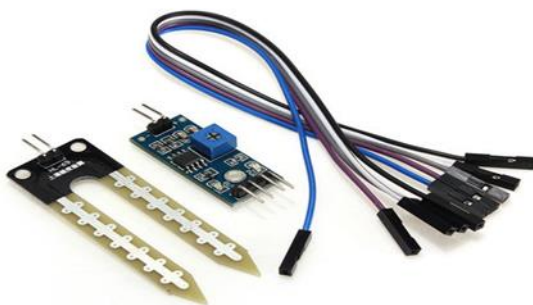
FIGURA 5. Medidor portátil de condutividade elétrica aparente (Landmapper), utilizado no mapeamento da variabilidade espacial do solo.

2.4 Sensores

Sensores são dispositivos capazes de detectar uma grande variedade de diferentes formas de energia, podendo converter sinais físicos em sinais elétricos, assim, os sensores são análogos aos sentidos humanos no que tange a capacidade de converter fenômenos físicos em sinais elétricos (PEREIRA, 2013).

Segundo Nunes (2020), o tipo ou a quantidade de sinal de saída do sensor depende do tipo de sensor a ser utilizado. No que se refere a alimentação, geralmente pode-se dividi-los em sensores passivos, que necessitam de uma fonte de alimentação externa para funcionar e sensores ativos, que geram uma tensão com seu próprio funcionamento. Como exemplo (Figura 6), tem-se um sensor utilizado para medir umidade do solo, por meio da resistência apresentada pelo solo consegue apresentar a umidade presente no mesmo.

Os sinais analógicos dos sensores devem ser convertidos em digitais antes de serem processados, para isso, um conversor analógico digital é um componente que fornece a representação digital de um sinal analógico em um instante do tempo (NUNES, 2020). O conversor de sinal A/D pode ser utilizado para proporcionar o isolamento dos sinais gerados pelo sensor e o computador ou microcontrolador. Isso ocorre pelo fato de a origem do sinal ser de uma propriedade ou grandeza que, se fosse imputada direta no equipamento, poderia queimá-lo (PEREIRA, 2013).

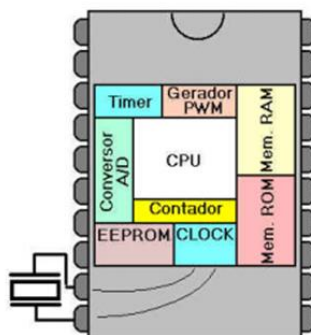


Fonte: FILIPEFLOP (2020)

FIGURA 6. Módulo do sensor higrômetro de solo para Arduino.

Um microcontrolador ou CI (circuito integrado) é programável e contém toda a estrutura (arquitetura) de um microcomputador, isto é, dentro de um microcontrolador pode-se encontrar uma CPU (Unidade Central de Processamento), memória RAM, memória EEPROM (Memória de leitura e escrita não volátil; portas de entrada/saída - Pinos de E/S). Inclusive muitos modelos de microcontroladores incorporam diferentes módulos "periféricos", como conversores analógico/digital (A/D), módulos PWM (controle por largura de pulso), módulos de comunicação serial ou paralelo e além de outros dependendo do dispositivo (OKI e MANTOVANI, 2013). Um sistema microprocessado (Figura 7) deve possuir:

- Um microprocessador;
- Memória ROM (onde fica gravado o programa principal);
- Memória RAM (utilizada como memória de rascunho pelo programa executado);
- Periféricos - Entrada e Saída (são os dispositivos conectados ao sistema, geralmente sensores e atuadores);
- Barramento - fios ou trilhas condutoras dos pulsos elétricos que permitem a interconexão dos componentes;
- Circuito gerador de CLOCK - circuito que gera um sinal cíclico em uma determinada frequência de tempo.



Fonte: Oki e Mantovani (2013).

FIGURA 7. Ilustrando o microcontrolador e os seus recursos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Projeto de Máquinas (Lapromaq) da Faculdade de Ciências Agrárias (FCA), e no Laboratório Oficina e Mecânica dos Materiais da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizada no município de Dourados, estado de Mato Grosso do Sul.

O trabalho de coleta de dados foi realizado na Fazenda Experimental de Ciências Agrárias (FAECA) da UFGD no município de Dourados, MS. O local situa-se em latitude de 22°14' S, longitude de 54°59' W e altitude de 434 m (RODRIGUES, 2014). O solo da área é um Latossolo Vermelho distroférico, classificado conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

3.2 Processo do projeto do sistema portátil para medição da CEa

Para desenvolver o projeto de maneira organizada e eficiente foi adotada as fases propostas por Pahl et al. (2005), que estão descritas na Figura 8. Na fase do projeto informacional se buscou informações sobre os tipos de medidores usados nas pesquisas científicas, sejam eles destinados ao uso em campo ou em laboratórios técnicos especializados, visando determinar parâmetros de estudos e requisitos para auxiliar no projeto conceitual.

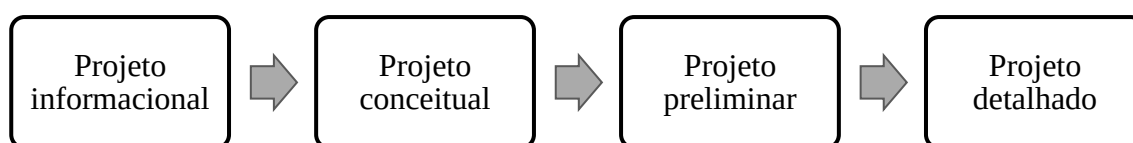


FIGURA 8. Fases do processo de projeto do medidor de CEa.

No projeto conceitual buscou o estabelecimento de estruturas de funções para o entendimento global e particularizado do sistema, a procura por soluções viáveis por meio do estado da arte obtido no projeto informacional, e suas combinações em variantes de concepção quando for o caso. As estruturas de funções foram adotadas para descrever as funções e as subfunções do sensor, do medidor, do visor e da saída para se exportar os dados coletados, conforme apresentado na Figura 9. O medidor de condutividade elétrica aparente do solo foi denominado de MCEAS.

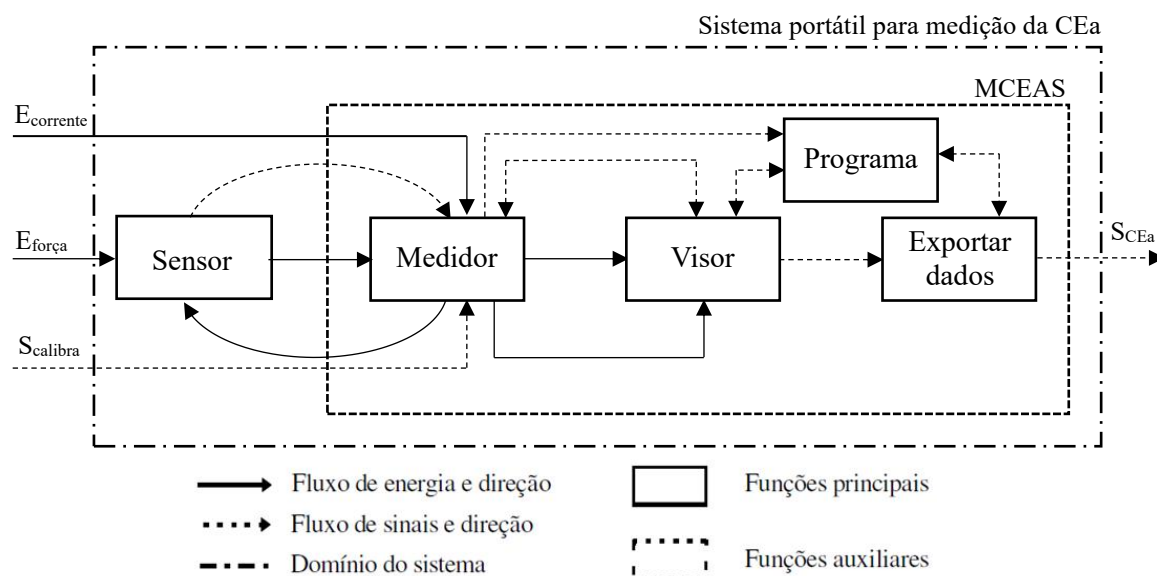


FIGURA 9. Estrutura de funções do sistema portátil para medição da CEa.

A partir da concepção selecionada, determinou-se o primeiro leiaute do sensor e do MCEAS, levando-se em consideração as formas, as técnicas de dimensionamento e os custos de aquisição das peças e elementos eletroeletrônicos.

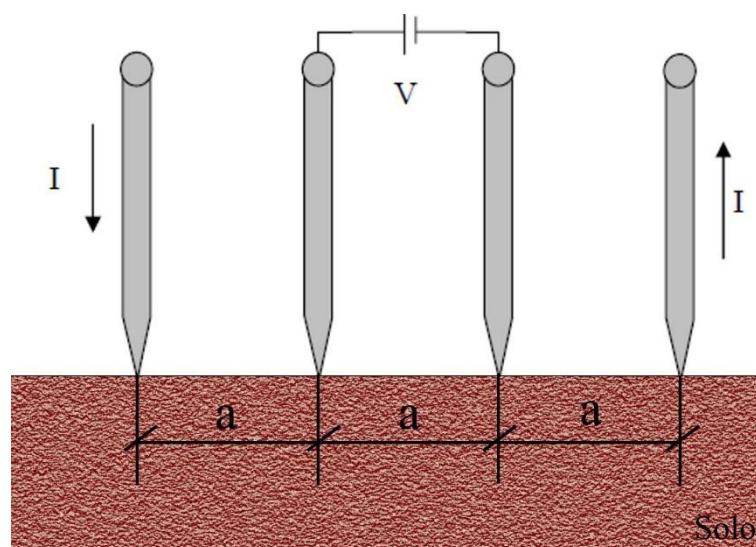
Quando o projeto foi totalmente estabelecido e a função global apresentada na Figura 9 foi atendida, pode-se usar modelos matemáticos de engenharia do elemento ou sistema para analisá-lo. Neste ponto tomou-se a decisão de prosseguir com o projeto e iterar para encontrar uma solução melhor retornando a uma etapa anterior, quando necessário.

Na fase do processo de projeto detalhado foram especificadas o arranjo, a forma, as dimensões e as propriedades das superfícies de todas as partes individuais e componentes do sistema sensor-medidor. Todos os desenhos das peças fabricadas e os documentos da programação computacional foram produzidos e estão mostrados no texto ou no Apêndice.

3.3 Projeto do sensor

3.3.1 Determinação da CEa

Para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo utilizou-se o método da resistividade elétrica. A condutividade elétrica foi obtida introduzindo no solo quatro eletrodos igualmente espaçados e em sequência. Nos eletrodos externos foi aplicada uma corrente elétrica, e a diferença de potencial foi medida nos eletrodos internos, conforme apresentado na Figura 10.



Fonte: Adaptado de Rabello et al. (2008).

FIGURA 10. Sistema de medida de condutividade elétrica de “quatro pontos”.

A resistividade obtida utilizando a Matriz de Wenner envolveu o uso dos quatro eletrodos, que foram colocados na superfície do solo ao longo de uma linha, e todos os eletrodos mantidos com mesmo espaçamento entre si (ADEYEMO et al., 2017). Para determinar a resistividade do solo foi usada a Equação 4 (WENNER, 1915).

$$\rho = \frac{2\pi \cdot a \cdot V}{I} \quad (4)$$

em que,

a – espaçamento entre eletrodos do sensor desenvolvido, m.

V – diferença de potencial medido entre as hastes centrais; e

I – corrente elétrica aplicada nas hastes externas do sensor.

A condutividade elétrica aparente do solo é inversamente proporcional a resistividade, sendo que ela foi calculada usando a Equação 3.

3.3.2 Construção do sensor

Os esforços esperados no sensor para sua penetração no solo foram calculados levando em conta uma resistência do solo à penetração de 4,0 MPa, que é considerado limitador da produção agrícola por Rosolem et al. (1999). Os cálculos foram realizados de acordo com o descrito em Budynas e Nisbett (2011) para falha por tensão normal

máxima e por carregamento crítico da fórmula de Euler para colunas semiesbeltas. Considerando que foi usada uma barra cilíndrica de 9,5 mm (eletrodos), que estava disponível no almoxarifado, se obteve um fator de segurança maior que 80. Então, para um fator de segurança igual a 10, o diâmetro correspondente para os eletrodos de aço inox seria de 5,7 mm. As propriedades do material adotado foram resistência última a tração de 601 MPa e módulo de elasticidade de 190 GPa, conforme descrito em Budynas e Nisbett (2011) para aço inox.

Para construção da estrutura de suporte do sensor compostos dos eletrodos (Figura 11) foram utilizados tubos e conexões de PVC e buchas torneadas de nylon, servindo tanto para travamento e reforço da estrutura, e para servir de eletroduto para os condutores.

O material utilizado na confecção dos eletrodos, que são introduzidos no solo (Figura 11, peça 2), foi o aço inox redondo com diâmetro de 3/8", que não sofre oxidação, mantendo assim, a capacidade de condução elétrica. Os eletrodos de aço inox foram torneados, em uma das pontas, com ângulo de 30°, para facilitar introdução no solo. Na outra extremidade do eletrodo foram torneadas 2 roscas: uma para se montar na barra de fixação de eletrodos (peça 1), que consiste em uma barra redonda de nylon de 25 mm, e a outra rosca para fixar os terminais de conexão elétrica (peça 8).

A bucha de fixação (Figura 11, peça 5) de PVC foi confeccionada para montagem da: porca do sensor (peça 4), calço BNC (peça 6), que serve para montagem do BNC fêmea. No restante da estrutura foram montadas as barras chatas de aço (peças 19 e 20), conexões e eletrodutos de PVC (peças 10, 11, 12, 13, 14, 15), partindo do suporte de nylon (peça 9), terminando na montagem no cabo (peça 17) juntamente com a caixa de montagem (peça 16), que abriga o conjunto eletrônico do medidor de CEa do solo. Os conectores BNC fêmea e macho e cabo coaxial (peça 18) mantem uma impedância constante, independentemente do comprimento do cabo.

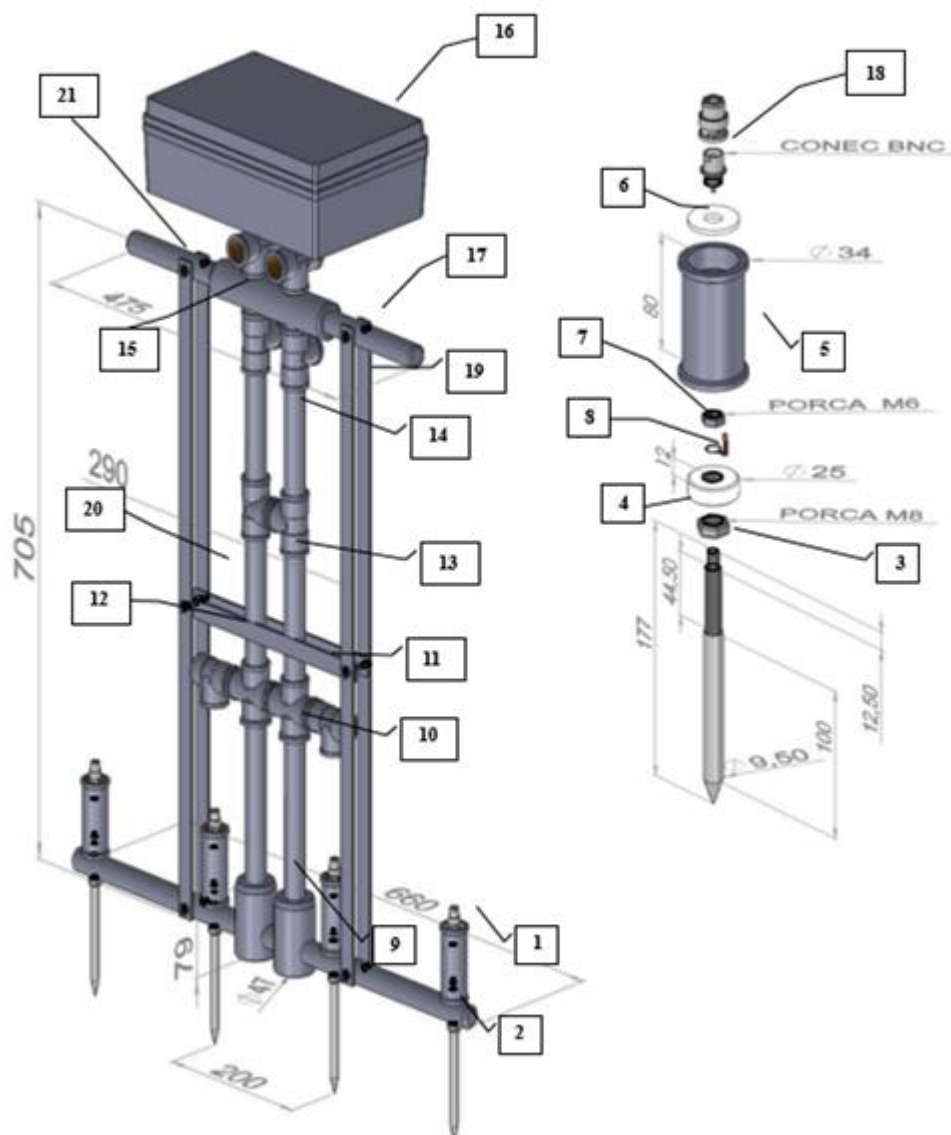


FIGURA 11. Vista em perspectiva e em detalhes explodida da montagem mecânica do sensor.

3.4 Projeto do medidor de CEa - MCEAS

Na Figura 12 está apresentado a estrutura de funções proposta para o medidor MCEAS. A estrutura foi composta por oito componentes, sendo eles: microcontrolador, conversor analógico-digital, relógio, memória, conversor para hexadecimal, comutador, visor e conversor serial.

O Conversor Analógico-digital transforma o sinal de saída do sensor para ser lido pelo microcontrolador. O conversor analógico para digital de precisão deve operar com fontes de alimentação de 2,7 a 5,25 V. O Conversor para Hexa é destinado a converter o código em C para hexadecimal, que é o sistema de numeração utilizado na programação

do microprocessador. O Conversor Serial/MC converte os sinais de uma porta serial para um sinal adequado ao microcontrolador. A função Relógio é um relógio em tempo real (RTC) que é capaz de fornecer informações de hora, minutos, segundos, dia, data, mês e ano. O Comutador contém quatro interruptores analógicos, independentes e controlados digitalmente, que podem controlar sinais digitais ou analógicos. A Memória é um circuito integrado com oito terminais, que é constituído por quatro memórias seriais e cujo funcionamento é compatível com o protocolo de comunicação entre circuitos integrados. Os dados da hora, data, fator K, resistividade e condutividade são armazenados na memória.

O microcontrolador é um dos principais componentes eletrônicos do MCEAS, que tem como principal vantagem a velocidade de processamento de 20 MHz, tendo assim uma frequência elevada para 48 MHz. Esse microcontrolador pode trabalhar com porta USB, suporte de 32 pontos de entrada e saída, e comunicação por porta serial.

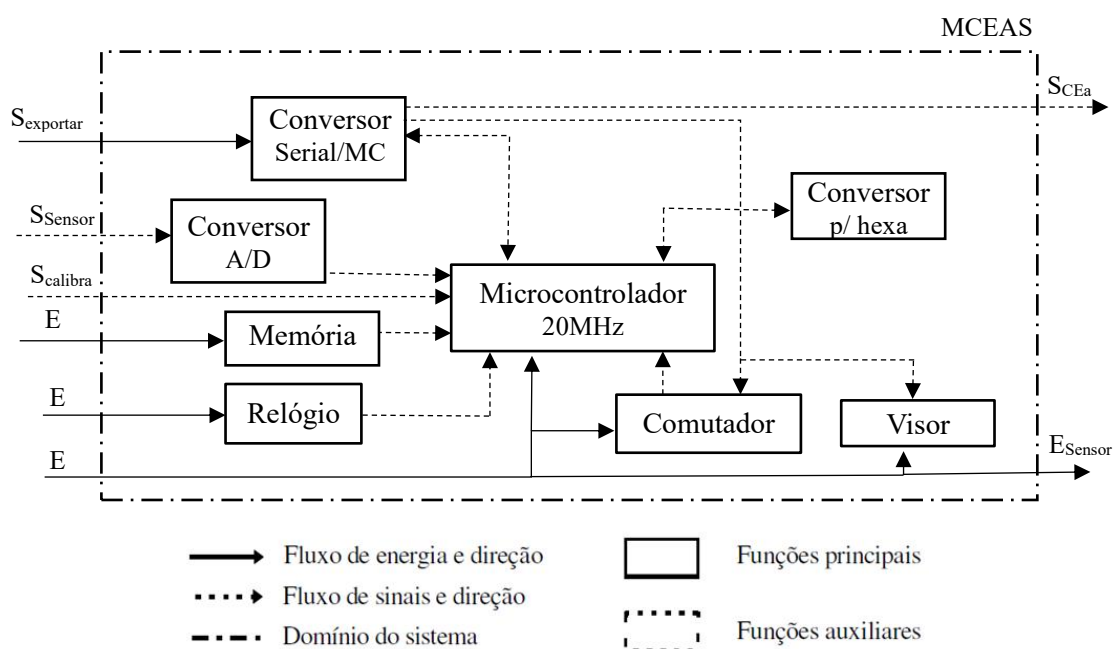


FIGURA 12. Estrutura de funções do medidor MCEAS.

3.5 Desenvolvimento do software embarcado do medidor

O sistema computacional embarcado do medidor possui um microprocessador capaz de realizar as tarefas específicas de controle e foi incluído em todas as soluções, tendo suas características alteradas como uma variante. Buscou-se diminuir os custos de aquisição deste componente, observando sistemas embarcados de outras aplicações de diferentes áreas, tais como, veículos, fornos micro-ondas,

dispositivos médicos, sistemas de automação, equipamentos laboratoriais e aqueles próprios dos medidores de condutividade elétrica de solução saturada.

Para aumentar a produtividade, o nível de abstração para o desenvolvimento do software embarcado foi conseguido com o uso de linguagens modernas, conforme recomendado por Torres et al. (2016). As rotinas de programação foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação em C++.

Os fluxogramas do software embarcado do medidor de CEa desenvolvido estão descritos no Apêndice D. Todo o diagrama do circuito eletrônico foi desenvolvido usando o software de diagramação EasyEDA.

O Programador (Programa - Figura 9) oferece uma maneira conveniente de programar PIC sem remover o chip da placa de desenvolvimento ou produção, combinado com o MPLAB IDE® (Integrated Development Environment), que é um software editor de projetos em ambiente de programação, que integra diversos ambientes de trabalho para programação, simulação e gravação de microcontroladores.

3.6 Calibração do MCEAS

O MCEAS foi calibrado utilizando uma solução padrão marca Simokit, com condutividade elétrica de $154 \mu\text{S cm}^{-1}$, em que a mesma foi colocada em uma célula de acrílico construída para essa finalidade (comprimento: 0,068 m; largura: 0,038 m; altura: 0,037 m), com eletrodos de aço inox igualmente espaçados a 0,020 m, processo similar utilizado por Costa (2011). De acordo com esse autor, a razão entre a área da seção transversal e o comprimento do condutor é chamado de coeficiente geométrico K (Equação 5).

$$K = 2\pi a \quad (5)$$

em que,

K – coeficiente geométrico.

O K foi calculado para a configuração de eletrodos em campo, e calibrado com solução teste quando utilizado em célula de medição em laboratório. O coeficiente geométrico calculado é de 1,257 para uma distância entre eletrodos de 0,20 m, enquanto para a célula de acrílico é de 0,126.

O fator de calibração foi determinado pela relação entre a leitura da condutividade elétrica de uma solução padrão feita com o uso do MCEAS e o valor da

condutividade certificada pelo fabricante da solução ou por outro equipamento calibrado. O fator de calibração foi calculado usando a Equação 6.

$$f_c = \frac{CE_1}{CE_0} \quad (6)$$

em que,

f_c – fator de calibração, adm.;

CE_0 – valor da condutividade elétrica da solução padrão, $S\ m^{-1}$;

CE_1 – valor médio da leitura da condutividade elétrica da solução padrão feita com o MCEAS, $S\ m^{-1}$.

Conhecendo-se o fator de calibração e combinando as Equações 3 e 6, então a CEa foi recalculada e seus valores corrigidos usando a Equação 7. Para comparar a CEa com a CE_0 usou-se o desvio percentual médio, que foi calculado usando a Equação 8.

$$CEa = \frac{CE_1}{f_c} \quad (7)$$

$$Dv = 100 \frac{\|CE_0 - \overline{CE}_1\|}{CE_0} \quad (8)$$

em que,

D_v – desvio percentual médio das leituras da CEa feito com o MCEAS, %;

$\overline{CE}_1$ – média das leituras da CEa, $mS\ m^{-1}$.

3.7 Coleta de dados e testes com o equipamento

Foram realizadas leituras com o MCEAS em uma caixa de madeira com dimensões (C x L x A) de 1,57 m x 0,52 m x 0,32 m que receberam a mesma massa de solo, com a finalidade de verificar a repetibilidade das leituras, e também, a capacidade de medição com variação de umidade.

A caixa foi dividida em 2 lados: direito e esquerdo, sendo que, as duas divisões da caixa foram preenchidas totalmente com a mesma amostra de um Latossolo Vermelho Distroférrico. Nos dois lados da caixa foram tomadas 20 leituras com o solo mais úmido e outras 20 com o solo menos úmido.

A determinação da umidade do solo foi feita utilizando um medidor fabricado pela empresa Falker, modelo HidroFarm HFM2010 (escala de 0 a 60%; precisão $\pm 3\%$), produzido.

A coleta de dados de condutividade elétrica (CE) com o MCEAS foi realizada na Fazenda Experimental da UFGD, em uma área de Latossolo Vermelho Distroférico argiloso cultivado com aveia sob plantio direto, para testar o equipamento em área de cultivo agrícola.

Para analisar os dados obtidos com o MCEAS usando a técnica de geoestatística, uma grade amostral foi gerada e composta por 50 pontos equidistantes, espaçados entre si em 10 m (Figura 13), conforme Yamamoto e Landim (2013) que recomendaram pelo menos 49 pontos. Adotou-se o número mínimo de pontos, pois a finalidade da aplicação da análise de geoestatística e do mapeamento foi avaliar o uso do MCEAS em condições de campo em área de cultivo intensivo de produção de grãos.

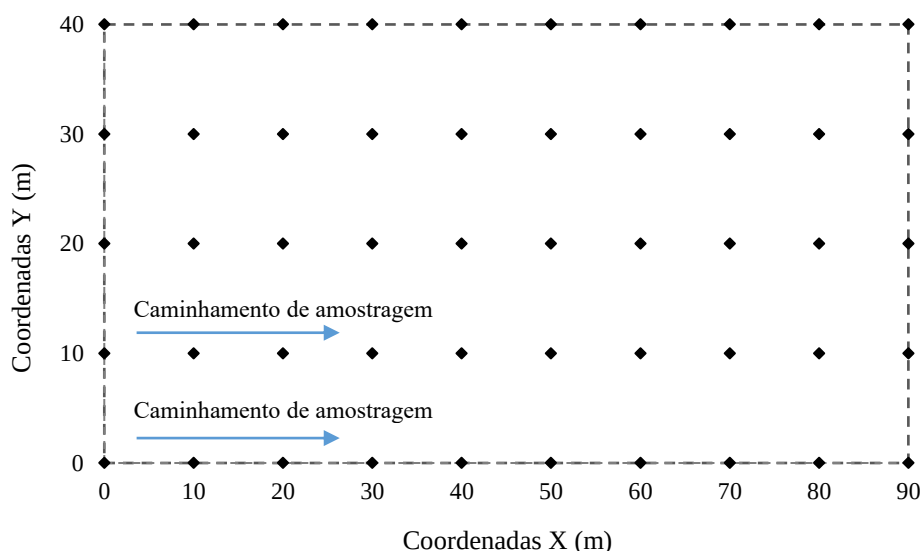


FIGURA 13. Malha de pontos espacializados e o caminhamento para coleta de dados de CEa.

3.8 Análise estatísticas e geoestatísticas

Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, calculando-se a média, mediana, amplitude, desvio padrão, variância, valor mínimo, valor máximo, coeficiente de assimetria e de curtose, em seguida os parâmetros do semivariograma buscando assim caracterizar a distribuição dos dados da CEa na área.

Nos semivariogramas ajustados da CEa foram determinados os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C_1$) e alcance (A), conforme descrito em Cortez et al. (2018).

A espacialização da CEa foi gerada por meio da interpolação utilizando os dados originais obtidos do campo, pelo método de Krigagem ordinário, adotando o

protocolo e modelos isotrópicos descritos por Isaaks e Srivastava (1989). A semivariância em cada ponto foi calculada conforme descrito em Coelho et al. (2018).

O índice de dependência espacial dos atributos (IDE) foi determinado (Equação 9) e classificado segundo Zimback (2001) para os seguintes intervalos: dependência espacial baixa para $IDE \leq 25\%$, moderada para $25\% \leq IDE \leq 75\%$ e forte para $IDE > 75\%$.

$$IDE = \frac{C1}{(C0+C1)} \quad (9)$$

As leituras da CEa foram avaliadas por meio de cartas de controle estatístico de processo, utilizando de valores individuais, que possuem linhas centrais (média geral), limites inferior (LIC) e superior de controle (LSC). Eles são calculados com base no desvio padrão das leituras da CEa, sendo LIC a média menos três vezes o desvio padrão, e LSC a média mais três vezes o desvio padrão (ARCOVERDE et al., 2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Medidor de condutividade elétrica aparente do solo – MCEAS

O desenvolvimento do projeto do MCEAS seguiu o planejado e o produto resultante é apresentado nas Figura 14. A caixa em PVC na parte superior do aparelho foi preparada para receber os componentes eletrônicos, que ficam protegidos de poeiras, umidade, impactos, entre outros. Ela pode ser facilmente removida do corpo do sensor e utilizada de forma portátil, se for o caso, com outro sensor.



FIGURA 14. Vista frontal do MCEAS – Medidor de condutividade elétrica aparente do solo.

O medidor desenvolvido apresentou funcionamento estável, boa funcionalidade e precisão, com um formato adequado para uso em campo, com peso aproximado de 5 kg, de fácil mobilidade e suficientemente robusto. Os botões interativos do menu permitem realizar as operações desejadas de forma rápida e fácil. Para aquisição de dados via computador utiliza-se um Cabo USB padrão RS232, que pode realizar a leitura instantânea ou realizar a leitura completa da memória do MCEAS.

O projeto contemplou os requisitos mecânicos, elétricos e eletrônicos buscando maximizar o uso de componentes comerciais, bem como de materiais de fácil

aquisição. Os desenhos detalhados de construção dos componentes mecânicos do aparelho encontram-se no Apêndice 1.

4.2 Circuito eletrônico

O circuito eletrônico do medidor MCEAS para medição da condutividade elétrica do solo foi constituído por componentes eletroeletrônicos, montado em caixa apropriada (Figura 15 e Figura 11 - peça 16), conforme diagrama do circuito elétrico está apresentado na Figura 16.

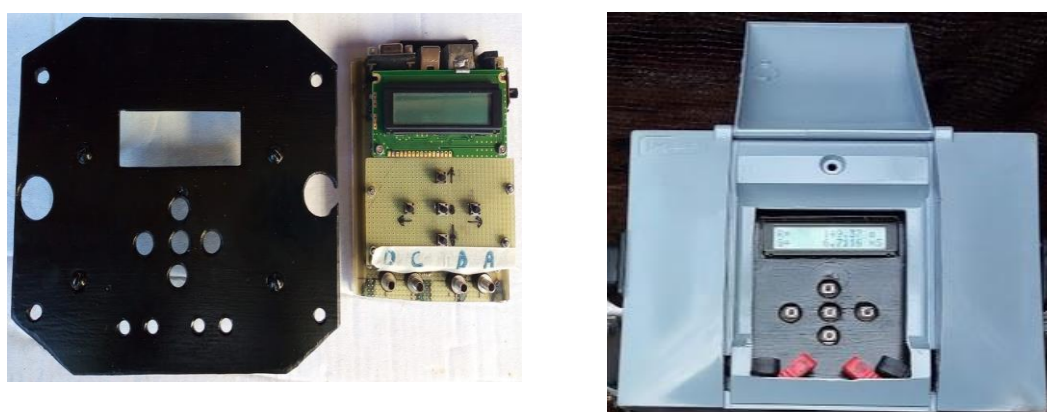


FIGURA 15. Vista frontal e de alguns componentes eletroeletrônicos do MCEAS.

A descrição dos principais componentes eletrônicos com especificações técnicas (datasheet's) e justificativas, e o circuito eletrônico (Figura 15) são apresentados a seguir:

- **Microcontrolador PIC18F4550** – Um dos principais componentes eletrônicos do MCEAS, que tem como principal vantagem a velocidade de processamento que foi acrescida de um oscilador de 20MHz-xtal1 (datasheet), tendo assim uma frequência elevada para 48MHz. Recursos principais (datasheet): trabalhar com porta USB, velocidade entre 1,5 a 12 MB s⁻¹, suporte de 32 pontos de entrada e saída, e comunicação por porta serial;
- **Programador PIC-ICSP** – oferece uma maneira conveniente de programar PIC sem remover o chip da placa de desenvolvimento ou produção, combinado com o MPLAB IDE[®] (Integrated Development Environment), que é um software editor de

projetos em ambiente de programação, que integra diversos ambientes de trabalho para programação, simulação e gravação de microcontroladores;

- **Circuito Integrado MAX 232** – converte os sinais de uma porta serial para um sinal adequado a um microcontrolador;
- **Memória 24LC1025** – é um circuito integrado com oito terminais, cujo funcionamento é compatível com o protocolo de comunicação entre CIs, ele é constituído por quatro memórias seriais, 128 kB cada CI, sendo utilizada apenas um bloco com capacidade de 64 kB. Os dados são armazenados em pacotes de 20 bytes, portanto, tem-se uma capacidade de 3200 linhas de dados, que armazenam a hora, data, o fator K, resistividade e condutividade;
- **Relógio RTC DS1307** – é um relógio em tempo real (RTC) que possui calendário completo, é capaz de fornecer informações de hora, minutos, segundos, dia, data, mês e ano. Para o funcionamento, além da alimentação da placa, utiliza uma bateria CR2032 para poder permitir que os dados fiquem armazenados mesmo com a falta de energia;
- **Comutador analógico 74HC4066** – contém quatro interruptores analógicos de alta velocidade, independentes e controlados digitalmente, podem controlar sinais digitais ou analógicos; e invertem o sentido da corrente para evitar efeito galvanômetro;
- **Conversor ADS1240** – conversor analógico para digital (A/D) de precisão, operando com fontes de alimentação de 2,7 V a 5,25 V, projetado para aplicações de medição de alta resolução, converte o sinal analógico dos sensores para digital para o microcontrolador.

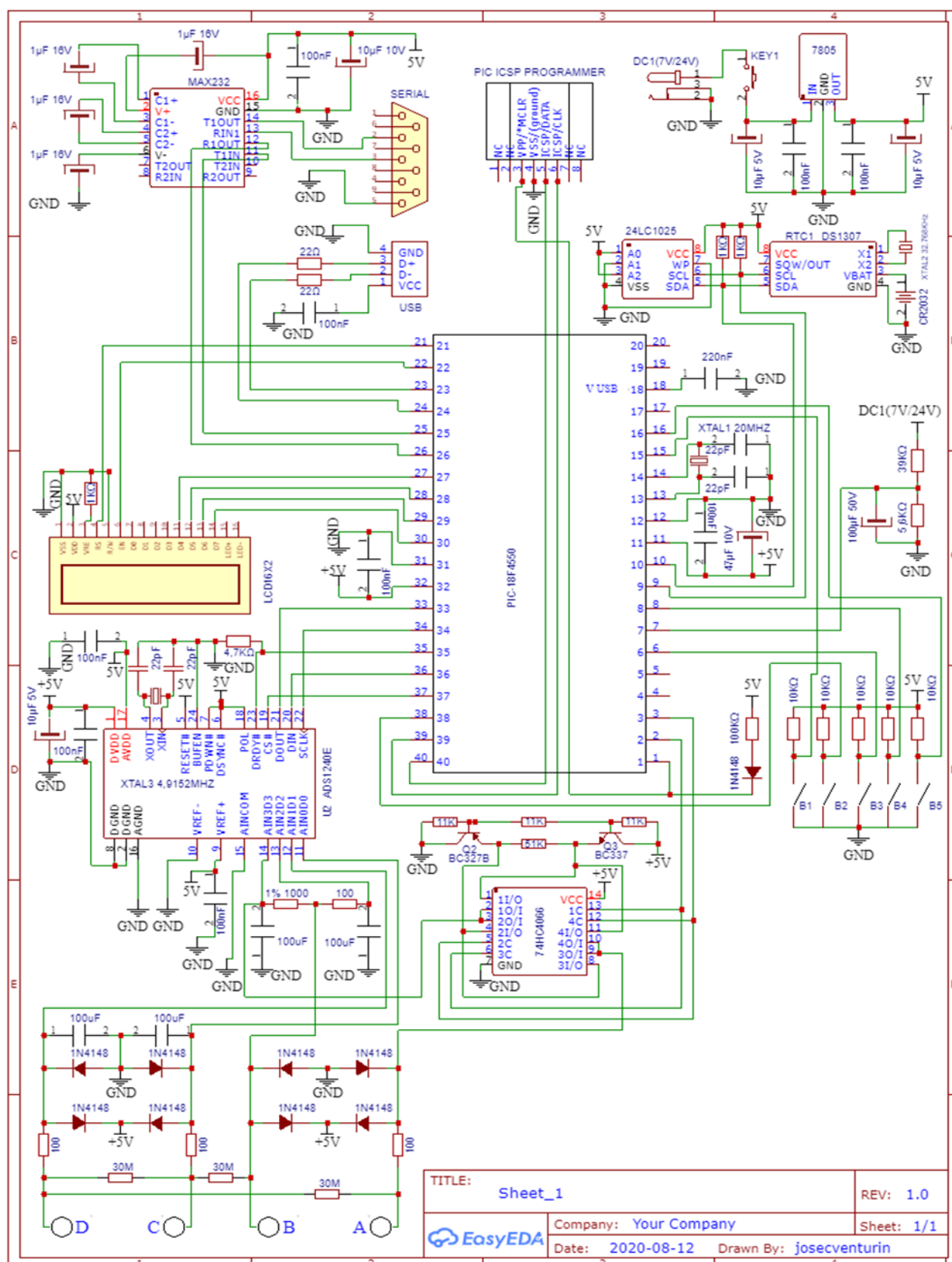


FIGURA 16. Diagrama eletrônico do circuito de medição do medidor de condutividade elétrica aparente do solo.

4.3 Calibração do MCEAS

Para obtenção do coeficiente geométrico da célula de medição (Figura 17), foram realizadas 10 leituras na solução de calibração com o MCEAS com fator geométrico K igual a 1, como padrão no medidor. Foram determinados (Quadro 1) os parâmetros: média, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria (Cs) e coeficiente de curtose (Ck). Os valores de CV são considerados baixos, mostrando que o MCEAS foi capaz de coletar os dados com excelente precisão, por apresentar repetibilidade nas leituras. O valor de Ck menor que zero aponta que função de distribuição é mais achatada do que a distribuição normal, revelando dispersão dos dados em relação à média.



FIGURA 17. MCEAS com a célula de acrílico e solução padrão de condutividade elétrica.

QUADRO 1. Parâmetros de calibração do MCEAS com solução padrão

Leituras com o MCEAS (mS m ⁻¹)	Média ----- (mS m ⁻¹) -----	DP	CV (%)	Cs	Ck
$f_c = 1,00$	1,07564	0,0043	0,40	0,62	-1,01
$f_c = 0,07$	15,53385	0,1624	1,04	-0,30	0,04

CV: Coeficiente de Variação; DP: Desvio padrão; Cs: Coeficiente de assimetria, Ck: Coeficiente de curtose.

A solução de padrão possuía condutividade elétrica de $154 \mu\text{S cm}^{-1}$ ($0,0154 \text{ S m}^{-1}$). Dividindo o valor da média das leituras pelo valor da solução padrão, tem-se o fator de calibração (f_c) da célula de medição de $0,069846753 \cong 0,07$. O valor de f_c de 0,07 foi usado no MCEAS, e em seguida realizado mais 10 leituras.

Considerando a condutividade elétrica da solução padrão de $15,4 \text{ mS m}^{-1}$ e comparando-a à média de $15,53385 \text{ mS m}^{-1}$ obtida com o uso do medidor MCEAS ajustado para um f_c de 0,07, obteve-se um desvio percentual médio de 0,86% entre as leituras. Com base nesse erro, considera-se uma exatidão satisfatória das leituras da CEa feitas com o MCEAS, além de apresentar um baixo CV (Quadro 1).

O histograma apresentado na Figura 18 e o valor de C_s menor que -1 mostra a distribuição assimétrica dos dados de leitura, adotando o valor padrão (*default* do MCEAS) de f_c igual a 1. Quando o valor de f_c foi aquele calibrado usado a solução de condutividade elétrica padrão, os dados foram simétricos em relação às médias das medidas da condutividade elétrica do solo (Figura 19), com C_s próximo a zero. Observa-se um maior desvio padrão para f_c de 0,07, que pode ser atribuída ao ajuste do fator ter sido arredondado de 0,0698 para 0,07, devido a programação do MCEAS usar 2 casas decimais para f_c , e pela amostragem ter sido feita em outros pontos de coleta diferentes daqueles da primeira coleta ($f_c = 1$).

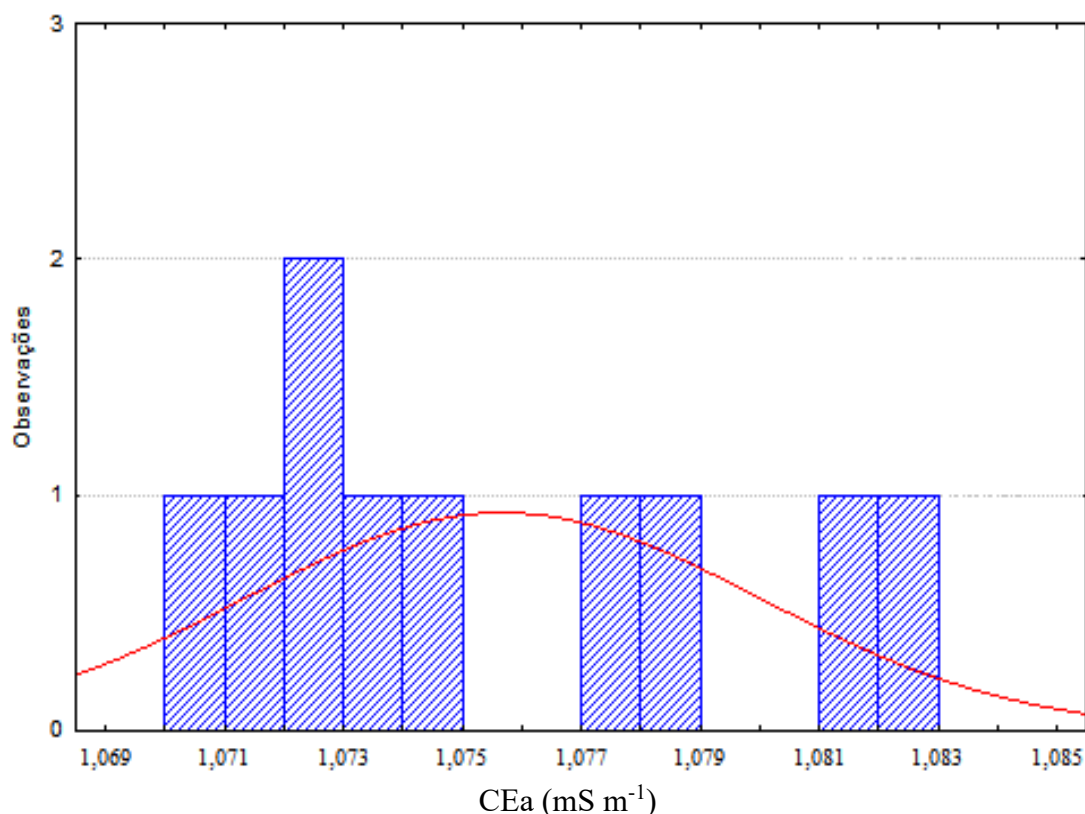


FIGURA 18. Distribuição das leituras da CEa para o fator f_c igual a 1.

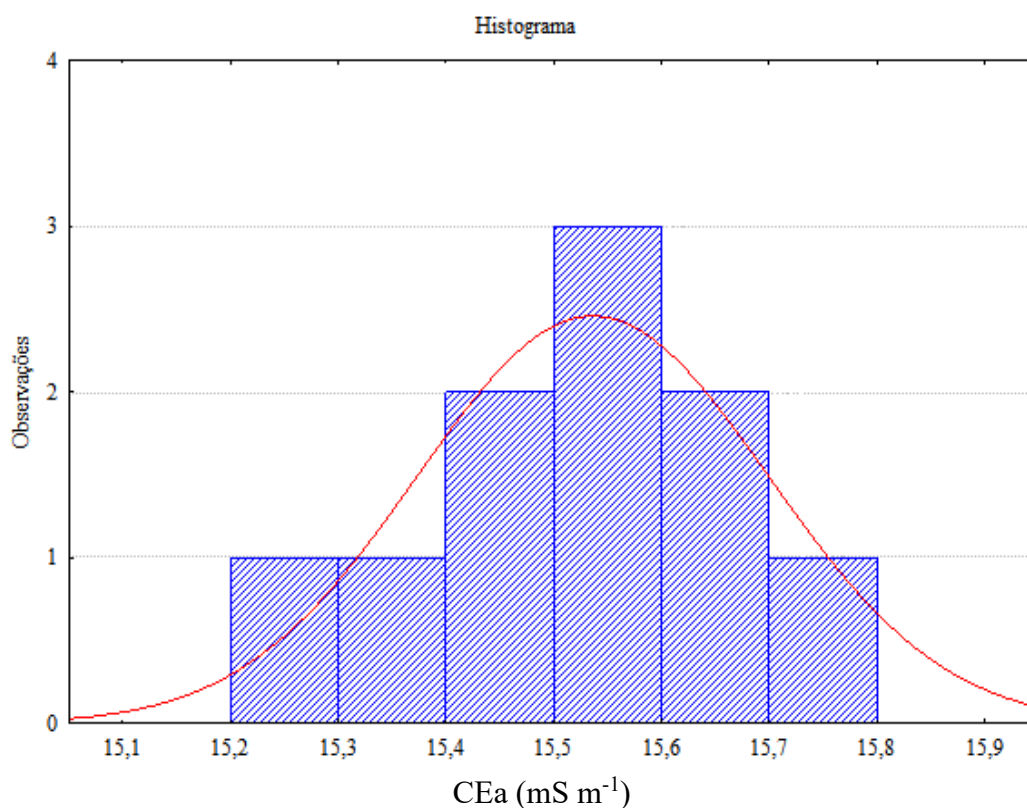


FIGURA 19. Distribuição das leituras para o fator f_c igual a 0,07.

4.4 Teste do MCEAS com o solo em duas umidades

A Figura 20 mostra a caixa de madeira construída com duas divisões (esquerda e direita) para que as amostras de solo ficassem isoladas uma da outra. Foram realizadas 40 leituras: 20 leituras para cada valor de umidade de solo e 10 leituras em cada lado da caixa.

A análise das médias das leituras em solo úmido mostra (Quadro 2), que não há diferença significativa entre as médias das leituras das CEa, entretanto quando as leituras foram feitas em solo menos úmido observou diferença entre as médias da CEa. Verifica-se que a variação da umidade do solo menor que $0,007 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, não causou diferença entre as médias de CEa obtidas usando o MCEAS, por outro lado no solo menos úmido observa-se variação da umidade do solo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ocasionando diferença entre as leituras de CEa. Isso demonstra que o MCEAS é sensível a pequenas alterações da umidade do solo, alterando a leitura da CEa.



FIGURA 20. Medidor MCEAS realizando leituras da CEa em um Latossolo Vermelho Distroférico depositado na caixa de madeira (A: lado esquerdo; B: lado direito), com determinador de umidade (C, D).

QUADRO 2. Médias da CEa obtidas usando o MCEAS nos dois lados da caixa de solo com diferentes umidades

Lado da caixa de solo	Solo + úmido		Solo - úmido	
	Umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	CEa (mS m^{-1})	Umidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	CEa (mS m^{-1})
Esquerdo	0,430	6,44 a	0,317	5,31 a
Direito	0,437	6,46 a	0,321	5,11 b

Médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Com relação ao estado de umidade, como era de se esperar, o solo mais úmido apresentou maiores valores de CEa do que o solo menos úmido. Conforme Freeland (1989) e afirmado por Hoffmann et al. (2015), a condutividade elétrica do solo depende muito

da solução eletrolítica existente no solo ao nível das suas partículas sólidas, geralmente os solos secos têm resistência muito alta, onde os minerais do solo aparecem como isolantes. Apesar disso, em alguns solos podem aparecer uma pequena corrente conduzida através da superfície das partículas. Portanto, a condutividade elétrica aparente de um solo está diretamente associada a sua umidade e ao teor de sais dissolvido nele (FREELAND, 1989). Alguns resultados recentes de pesquisas conduzidas no Brasil têm mostrado boa correlação entre a condutividade elétrica e o teor de argila do solo (MAPA, 2013).

Os gráficos (Figuras 21 e 22) fornecem pontos dispostos dentro dos limites superior (LSC) e inferior (LIC) de controle e dispostos de forma não aleatória, considera-se que não existem evidências de que o processo esteja fora de controle. Observa-se que os dados da CEa estão dispostos entre os limites estabelecidos do intervalo, exceto uma observação. Observa-se que embora pareça que há indícios de falta de aleatoriedade dos dados, ressalta-se que esse fato pode ser atribuído ao fato do sensor ter sofrido pequenos movimentos estando penetrado no solo com valores significativos de umidade.

O desvio percentual dos dados em torno da média foi de 2,95% para o solo com $0,433 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, que é um valor inferior à precisão de 3% oferecida pela maioria dos equipamentos comerciais. Quando o MCEAS foi usado no solo com $0,319 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de umidade, o desvio percentual dos dados também foi inferior a 3% equivalendo a um intervalo de controle da precisão para CEa de $5,05$ a $5,37 \text{ mS m}^{-1}$.

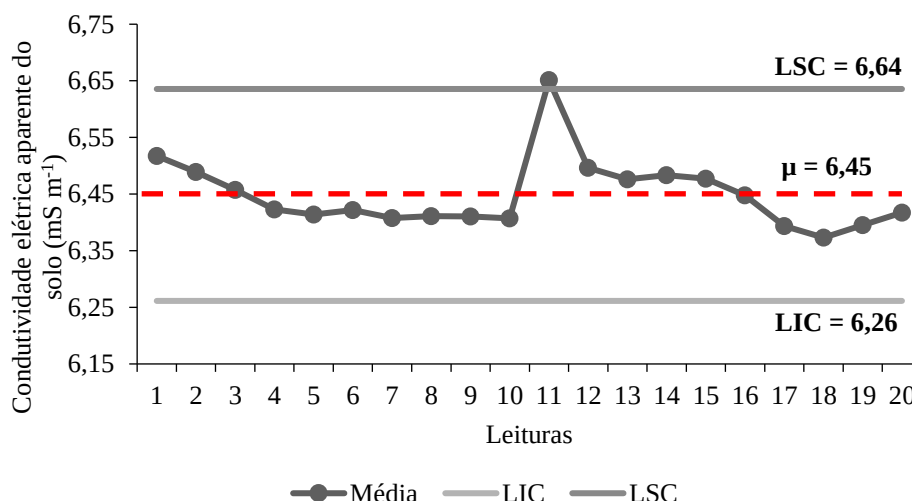


FIGURA 21. Leituras da CEa em caixa de solo com umidade de $0,433 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

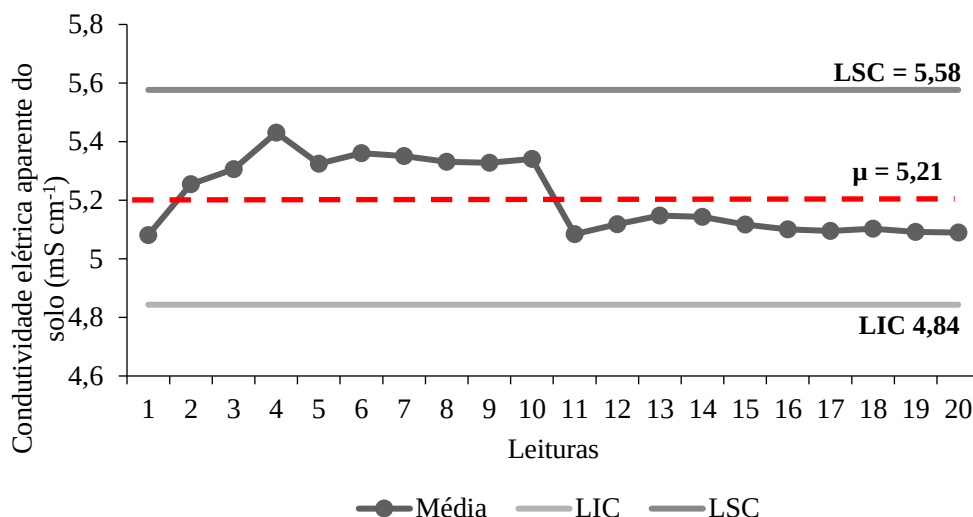


FIGURA 22. Leituras da CEa em caixa de solo com umidade de $0,319 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

4.5 Estatística descritiva, geoestatística e mapeamento da CEa em área agrícola

Uma coleta de dados de CEa com o uso do MCEAS foi realizada na Fazenda Experimental da UFGD (Figura 23), em uma área de Latossolo Vermelho Distroférico argiloso cultivado com aveia sob plantio direto, o local do ponto inicial situa-se em latitude de $22^{\circ}13'59''$ S, longitude de $54^{\circ}59'59''$ W e altitude de 411 m.

Para cada ponto amostrado, a área foi limpa de matéria orgânica superficial e plantação. As leituras foram obtidas com o mesmo operador para evitar erros de manuseio e garantir uma estabilização das leituras com o MCEAS. As leituras foram realizadas em condições de solo ao ar livre, para produzir um mapa de condutividade elétrica do solo nessa área específica.



FIGURA 23. Coleta de dados com o MCEAS, em área de produção de grãos da Fazenda Experimental.

Após a estabilização do medidor com o modo leitura contínua do MCEAS, foram realizadas no modo simples de leitura 3 medidas para cada ponto, obtendo os resultados apresentados no Quadro 3. Os dados da CEa variaram entre 4,08 e 12,39 mS m⁻¹. Essa faixa é semelhante àquela observada por Bottega et al. (2017) em um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de cultivo em plantio direto de soja.

QUADRO 3. Estatística descritiva dos dados da CEa de um Latossolo Vermelho Distroférico argiloso cultivado com aveia sob plantio direto

Parâmetros	CEa (mS m ⁻¹)
Média	7,55
Mediana	7,43
Amplitude	8,31
Desvio padrão	1,91
CV	25,3%
Variância	3,66
Mínimo	4,08
Máximo	12,39
Cs	0,25
Ck	-0,45

CV: Coeficiente de Variação; DP: Desvio padrão; Cs: Coeficiente de assimetria, Ck: Coeficiente de curtose.

Considerando os dados dos estudos realizados por Machado et al. (2006) e Bottega et al. (2017) com diferentes medidores e sensores, o MCEAS apresentou uma faixa de medição de condutividade elétrica dentro do esperado para aplicação e análises diversas em agricultura de precisão.

Os parâmetros para o semivariograma experimental foram ajustados aos modelos teóricos de semivariância da CEa e estão apresentados no Quadro 4. O coeficiente de variação (CV) de 25,3% demonstra a importância de estudar a variabilidade da CEa na área para futuras intervenções agrônomicas, assim como, o coeficiente de curtose (ck). Esses parâmetros demonstram a capacidade do MCEAS na verificação de desuniformidades da área estudada, consequência do manejo agrícola implementado na área.

O gráfico de dispersão dos dados de CEa seguiram tendência que demonstra que o processo de coletas de dados esteve sob controle, onde todos os dados se

mantiveram dentro dos limites superior (LSC) e inferior (LIC) de controle pré-estabelecidos para o intervalo seguro de coleta (Figura 24).

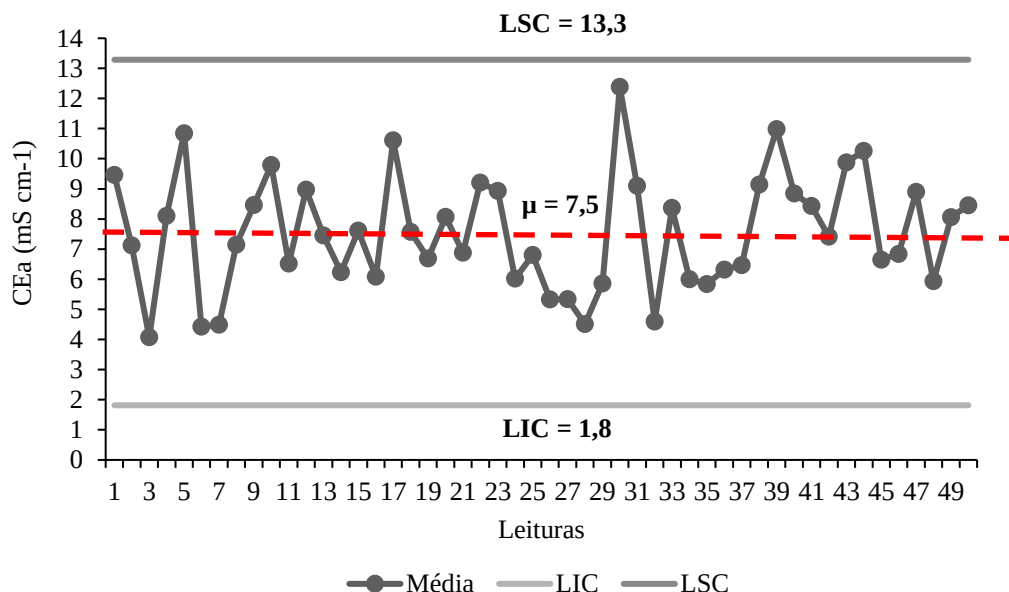


FIGURA 24. Leituras da CEA em área de Latossolo Vermelho Distroférico sob plantio direto de culturais anuais (soja → milho → soja → aveia).

Os parâmetros do Semivariograma ajustado do modelo teórico para a CEA estão apresentados no Quadro 4 e na Figura 25. O efeito pepita do modelo esférico da CEA foi de 0,7, o alcance de 15,10 m, a soma de quadrados do resíduo de 0,233 (Quadro 4). O índice de dependência espacial dos atributos (IDE) foi determinado e classificado como forte, segundo Zimback (2001) para IDE > 75%. Quanto maior o valor do IDE, menor é o valor do efeito pepita em relação ao valor do patamar, ou seja, mais forte é a dependência espacial (BOTTEGA, 2011). O modelo esférico foi aquele mais adequado para semivariograma da CEA, enquanto Bottega et al. (2017) encontraram o modelo gaussiano.

QUADRO 4. Parâmetros do semivariograma ajustado do modelo teórico para a CEA

Mo	C _o	C _o + C	A (m)	R ²	SQR	ADE (%)
Esf.	0,7860	3,740	15,10	0,43	0,233	79

Mo: Modelo; Esf.: Modelo esférico; Co: Efeito pepita; Co+C: Patamar; A: Alcance; r²: Coeficiente de determinação; SQR: Soma de quadrados do resíduo; IDE: Índice da dependência espacial.

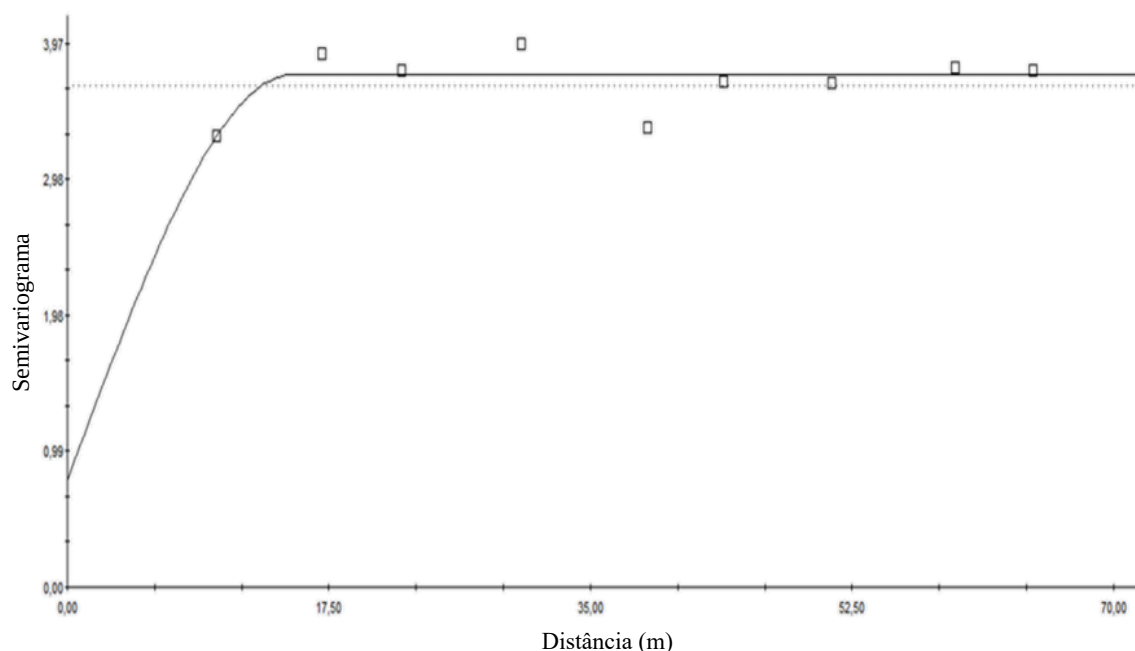


FIGURA 25. Gráfico do semivariograma do modelo esférico.

Os valores de alcance podem influenciar na qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação, assim, estimativas feitas com interpolação por krigagem ordinária utilizando valores de alcances maiores tendem a ser mais confiáveis, apresentando mapas que representem melhor a realidade (CORÁ et al., 2004). Isso demonstrando que no solo da fazenda amostrado neste trabalho tem-se maiores alterações na CEa ao se deslocar na área do que aquelas obtidas por Bottega et al. (2017).

A variação nas leituras encontradas na área da fazenda experimental da UFGD, pode ser explicado pelo fato de a área estar situada paralela (coordenada x da Figura 22) a uma via de acesso de veículos (solo seco e compactado), manobra do trator próximas (coordenada y), declividade e pela variação do conteúdo de água no solo da camada superficial, o que é esperado tendo em vista a presença de maior teor de matéria orgânica superficial e a presença do sistema radicular da aveia com maior densidade.

A Figura 26 ilustra a distribuição espacial da CEa em solo cultivado com aveia em sucessão a soja. A maior parte da área sob cultivo da aveia apresentava CEa entre 6,1 e 10,5 mS m⁻¹, tendo ainda uma pequena área com valores superiores a 5,0 mS m⁻¹. Embora essa área seja pequena para se justificar o número grande de amostragem para fertilidade, a finalidade do estudo da variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente de um solo agrícola constantemente cultivado foi de avaliar o MCEAS nessas condições de campo.

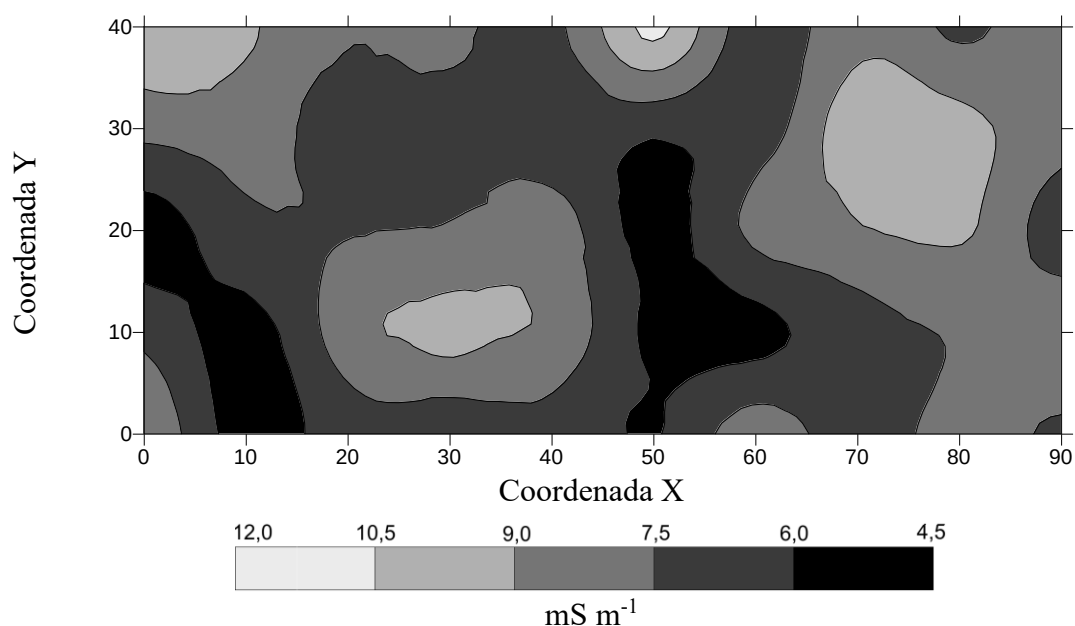


FIGURA 26. Espacialização da distribuição espacial da CEA.

Estudo conduzido por Bottega et al. (2011), em um solo predominante do tipo Latossolo Vermelho distroférico submetido ao sistema de rotação de culturas e plantio direto, com a condutividade elétrica aparente do solo sendo obtida introduzindo na superfície do solo quatro eletrodos igualmente espaçados (0,20 m), configuração denominada Matriz de Wenner. Nesse estudo obteve uma condutividade elétrica média de $6,64 \text{ mS m}^{-1}$, valor mínimo de $1,02 \text{ mS m}^{-1}$ e máximo de $9,90 \text{ mS m}^{-1}$.

Em outro estudo conduzido por Costa (2011), em um Latossolo Vermelho Amarelo, no ano agrícola 2009/2010, a área foi cultivada com milho, e no ano agrícola 2010/2011 cultivada com soja, utilizando um aparelho portátil de medição de condutividade elétrica na configuração matriz de Wenner, obteve uma condutividade elétrica média de $7,245 \text{ mS m}^{-1}$, valor mínimo de $4,245 \text{ mS m}^{-1}$ e máximo de $10,630 \text{ mS m}^{-1}$.

Um trabalho apresentado por Flores et al. (2018), com objetivo de analisar a variabilidade espacial da condutividade elétrica em duas profundidades do solo pelo equipamento Veris de medição contínua e sua correlação com a produtividade da cultura do algodão; as classes de solo que predominam na área são classificadas como Latossolo e Neossolo, com texturas variando de média a arenosa, sendo manejada no sistema plantio direto a mais de 10 anos com o cultivo do algodão, apresentou: condutividade elétrica média de $2,5 \text{ mS m}^{-1}$, valor mínimo de $0,5 \text{ mS m}^{-1}$ e máximo de $4,5 \text{ mS m}^{-1}$.

5 CONCLUSÕES

Um medidor portátil de condutividade elétrica aparente do solo, denominado MCEAS, foi desenvolvido com sucesso, atendendo os requisitos de facilidade de operação e manuseio, rapidez na obtenção das medidas, operação equivalente as faixas de leituras obtidas com medidores comerciais e exatidão nas suas medidas.

O medidor portátil MCEAS é capaz de mensurar a condutividade elétrica aparente do solo em área de cultivo agrícola, fornecendo dados para confecção de mapas temáticos da sua variabilidade espacial na área e sua correlação com a geração de zonas de manejo do solo.

Os resultados mostram o grande potencial do MCEAS, como ferramenta auxiliar na caracterização dos solos e como ferramenta para agricultura de precisão, visando o manejo localizado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T., UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.44, n.1, p.71-91, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>

ADEYEMO, I.A.; OJO, B.T.; RAHEEM, W.O. Comparison of thickness and depth resolution power of Wenner and Schlumberger arrays: a case study of Temidire Quarters, Akure, Nigeria. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v.5, p.233-239, 2017. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.53016>

ALBUQUERQUE, M. Medição de condutividade elétrica do solo. **Página Rural**, 2017. Disponível em: <<http://www.paginarural.com.br/artigo/2555/medicao-de-condutividade-eletrica-do-solo>>. Acesso em: 11 julho 2019.

ALVES, S. M. de F.; ALCÂNTARA, G. R.; REIS, E. F. dos; QUEIROZ, D. M. de; VALENTE, D.S.M. Definição de zonas de manejo a partir de mapas de condutividade. **Bioscience Journal**, v.29, n.1, p.104-114, 2013. <http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13687>

ARCOVERDE, S.N.S.; SOUZA, C.M.A. de; CORTEZ, J. W.; MACIAK, P.A.G.; NAGAHAMA, H.J. Qualidade e variabilidade espacial na semeadura do milho de segunda safra. **Energia na Agricultura**, v.32, p.386-392, 2017. <http://dx.doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n4p386-392>

BERNARDI, A. C.; INAMASU, R. Y.; RABELLO, L. M. **Agricultura de precisão: um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p.

BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. de A.; QUEIROZ, D. M. de; SOUZA, C. M. A. de; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência a penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, p.331-336, 2011. <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i2a882>

BOTTEGA, E.L.; QUEIROZ, D.M.; PINTO, F.A.C.; SOUZA, C.M.A. de; VALENTE, D.S.M. Precision agriculture applied to soybean: Part I - Delineation of management zones. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, p.573-579, 2017. <https://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.05.p38>

BRITO, M. D. **Condutividade elétrica aparente do solo como ferramenta à silvicultura de precisão**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2014.

BUDYNAS, R.G.; NISBETT, J.K. **Elementos de máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Porto Alegre: McGraw-Hill, 2011. 1084p.

COELHO, A.L. de F.; QUEIROZ, D.M. de; VALENTE, D.S.M.; PINTO, F. de A. de C. An open-source spatial analysis system for embedded systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.154, p.289-295, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.019>

CORA, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600010>

CORTEZ, J.W.; MATOS, W.P.S.; ARCOVERDE, S.N.S.; CAVASSINI, V.H.; VALENTE, I.Q.M. Spatial variability of soil resistance to penetration in no tillage system. **Engenharia Agrícola**, v.38, n.5, p.697-704, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v38n5p697-704/2018>

CORWIN, D.; LESCH, S. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. IN: Symposium on Use of Soil Electrical Conductivity in Precision, p.455-471, 2003.

CORWIN, D.L.; LESCH, S.M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, p.11-43, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>

COSTA, M. M. **Condutividade elétrica do solo como ferramenta para agricultura de precisão em uma área sob cerrado**. Viçosa, 2011. 89f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.

FLORES, J.P.M.; DALMOLIN, R.S.D.; HORST, T.Z.; MOURA-BUENO, J.M.; ROSIN, N.A. Condutividade elétrica aparente do solo correlacionada com a produtividade de culturas. XII Reunião Sul-Brasileira de Ciências do Solo, Xanxerê, 2018. **Anais da XII Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo**, Xanxerê. 4p. 2018.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2006. 370p.

INAMASU, R.Y.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. de C. **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. 334p.

FILIPEFLOP. **Sensor de umidade do solo higrômetro**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-umidade-do-solo-higrometro/>>. Acesso em: 11 ago. 2020.

FREELAND, R.S. Review off soil moisture sensing using soil electrical conductivity. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.6, p.2190-2194, 1989.

HOFFMANN, R. M.; GEBLER, L.; FURTADO, A. M. Correlação entre a umidade do solo e condutividade elétrica em um latossolo bruno da região de vacaria. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Caxias do Sul. **Anais eletrônicos...** CONBEA 2015.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. Oxford University Press, New York. 1989. 561p.

MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; VALENCIA, L.I.O.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.; MEDARI, B.E.; MEIRELLES,

M.S.P. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, n.6, p.1023-1031, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000600019>

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de precisão**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília: Mapa/ACS, 2013. 36p.

MEDEIROS, W. N.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M. de; PINTO, F. de A. de C.; ASSIS, I. R. de. Condutividade elétrica aparente do solo em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v.49, n.1, p.43-52, 2018. <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/4262/1689>

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. 1.ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOLIN, J.P.; TAVARES, T.R. Sistemas de sensores para mapear atributos da fertilidade do solo: desafios, avanços e perspectivas em solos tropicais brasileiros. **Engenharia Agrícola**, v.39, p.126-147, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep126-147/2019>

NUNES, A. C. **Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados em tempo real utilizando a PRU da Beaglebone Black [DIS]**. 2020. Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, 2020.

OKI, N.; MANTOVANI, S. C. A. **Microcontroladores - PIC**. Curso de Engenharia Elétrica. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira- Departamento de Engenharia Elétrica. 2013.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. **Projeto na engenharia**. São Paulo: Blucher, 2005, 411p.

PEREIRA, R. B. de O. **Implementação por sistemas embarcados de protótipo parametrizável para coleta de dados microclimáticos georreferenciados**. 2013. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física Ambiental, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá-MT, 2013.

PLANT, R. E. Site-specific management: the application of information technology to crop production. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 30, p. 9-29, 2001.

QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K.; SANTOS, E. D. T. Development and test of a low cost portable soil apparent electrical conductivity sensor using a Beaglebone Black. ASABE-American Society of Agricultural and Biological Engineers **Paper 1700062**, 2017. <https://doi.org/10.13031/aim.201700062>.

RABELLO, L. M. **Condutividade elétrica do solo: tópicos e equipamentos**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009. 19 p.

RABELLO, L. M; INAMASU, R. Y.; JUNIOR, A. L.; NETO, A. T.; MOLIN, J. P.; SIMÕES, M. dos S. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo adaptado a um

implemento agrícola (subsolador). In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP, 2008, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2008. p.22-35.

REIS, L. R. **Utilização da condutividade elétrica para estabelecimento de zonas de manejo em um Latossolo amarelo-escuro**. Viçosa, 2005. 58f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa. 2005.

RODRIGUES, F. de S. **Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em área sob sistema plantio direto**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, MS, 2014.

ROSOLEM, C.A.; FERNANDEZ, E.M.; ANDREOTTI, M.; CRUSCIOL, C.A.C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.5, p.821-828, 1999.

ROSSATO, F. P.; MACHADO, O. D. da C.; ALONÇO, A. dos S.; FRANCK, C. J.; FRANCETTO, T. R. Rendimento potencializado. **Cultivar Máquinas**, v. 122, p. 10-13, set. 2012.

TAUBINGER, L. **Condutividade elétrica aparente, atributos do solo e variabilidade espacial de produtividade das culturas de milho e feijão**. Guarapuava, 2016. 66 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, 2016.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, v.32, n.1, p.159-163, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782002000100027>

WENNER, F. A. Method of measuring earth resistivity. **Bulletin of the Bureau of Standards**, v.12, p.469-478, 1915. <https://doi.org/10.6028/bulletin.282>

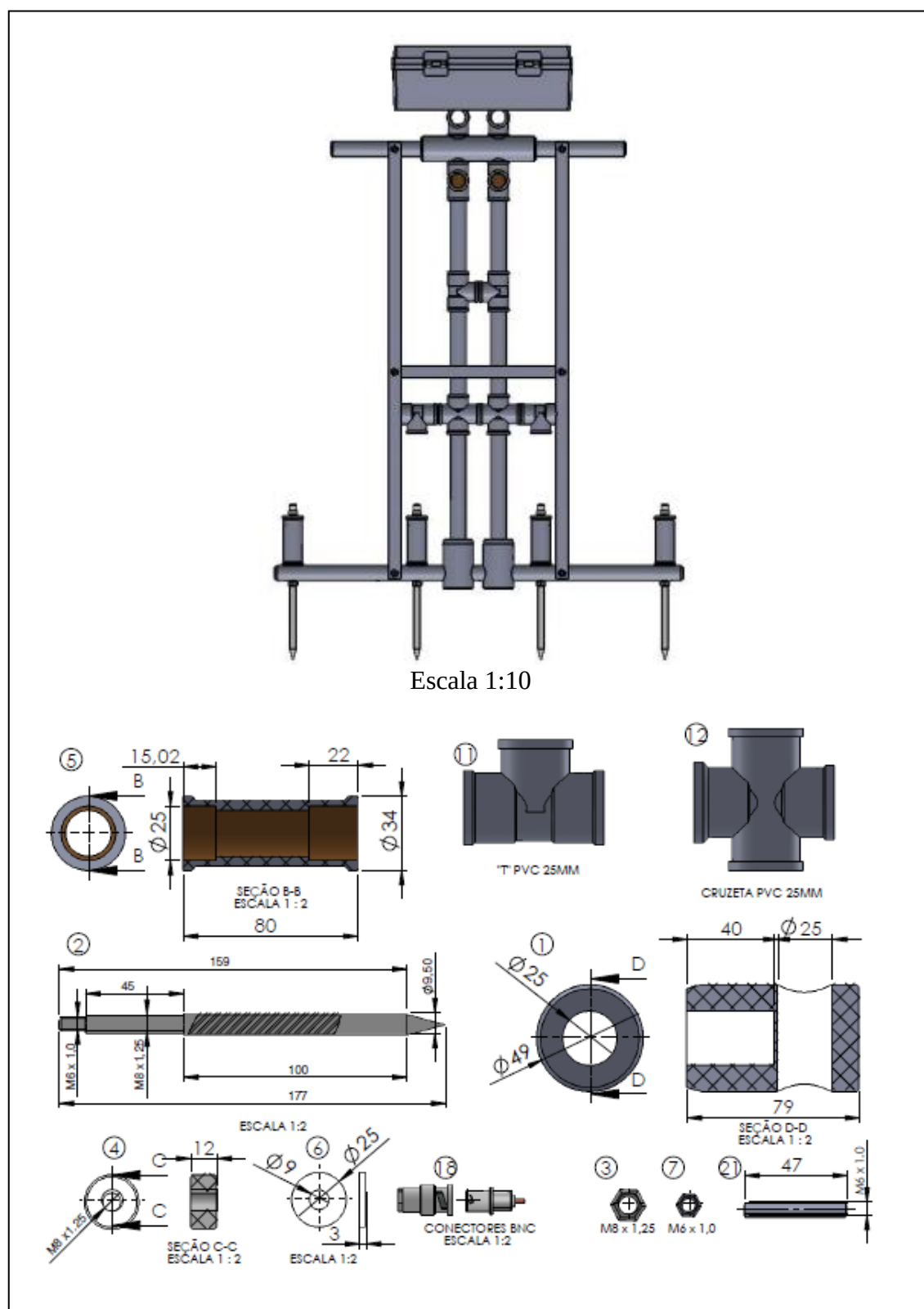
YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

7 APÊNDICES

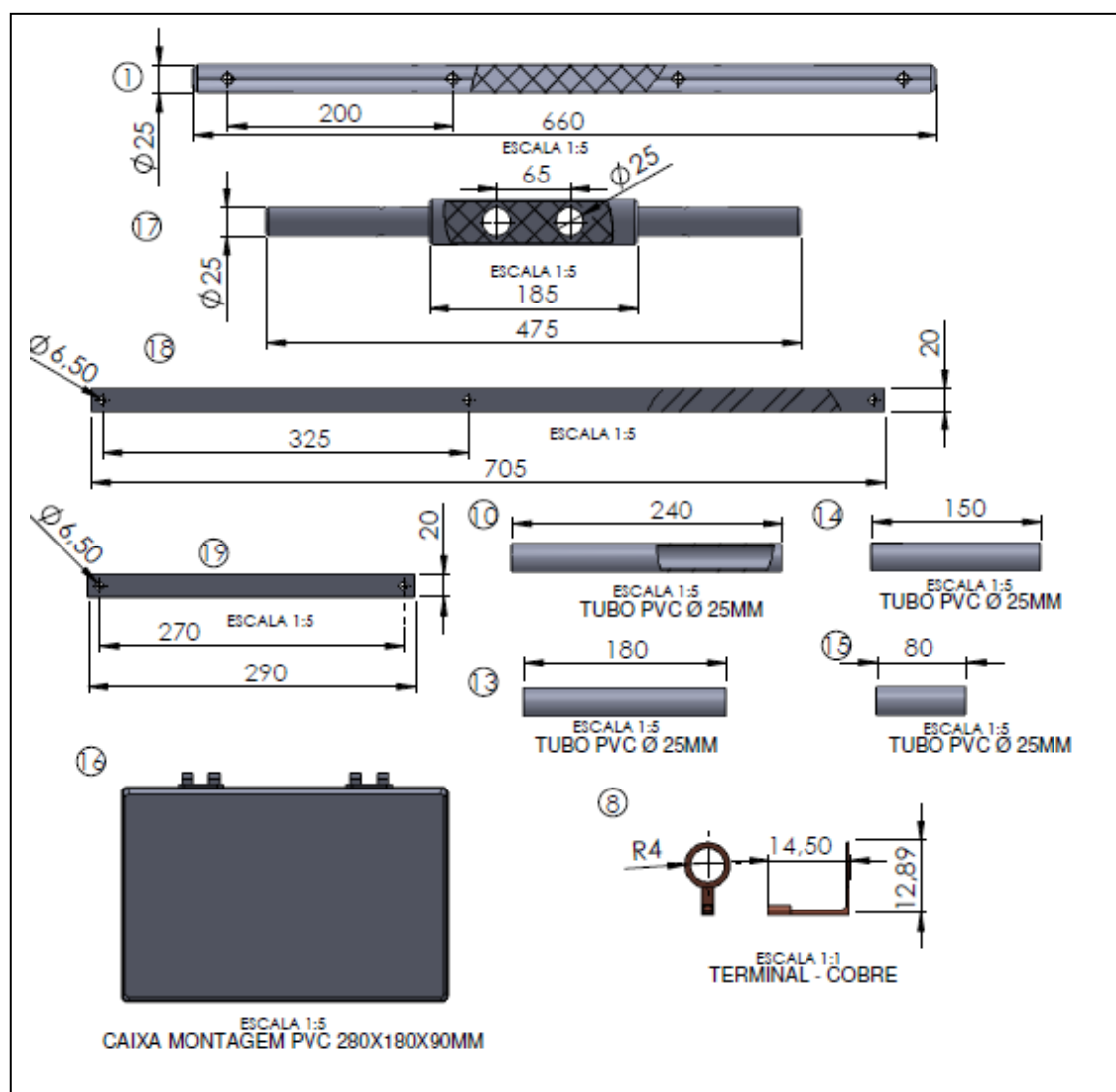
APÊNDICE A

Desenho técnico mecânico do sensor.



APÊNDICE B

Desenho técnico mecânico do sensor.



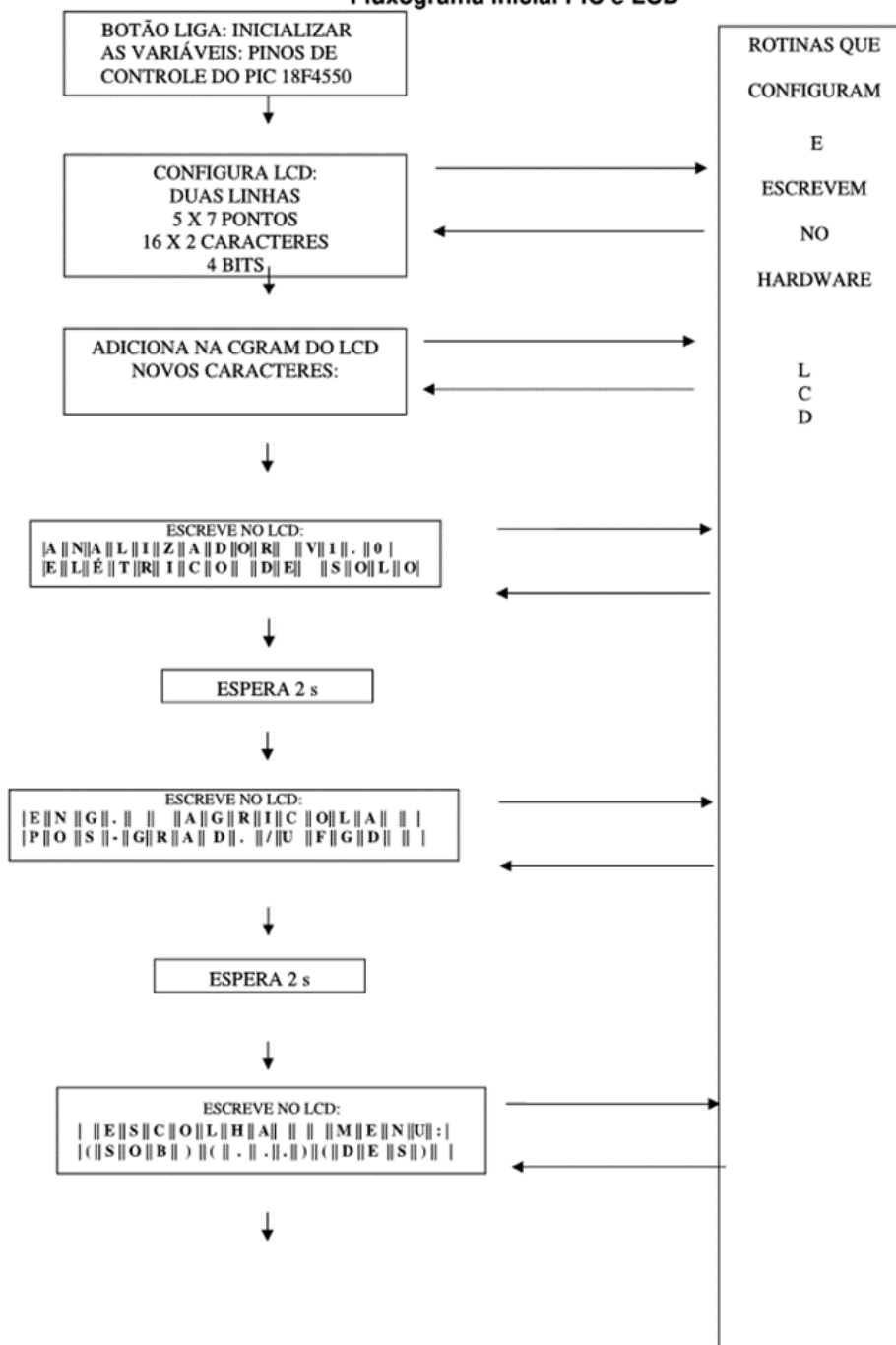
APÊNDICE C

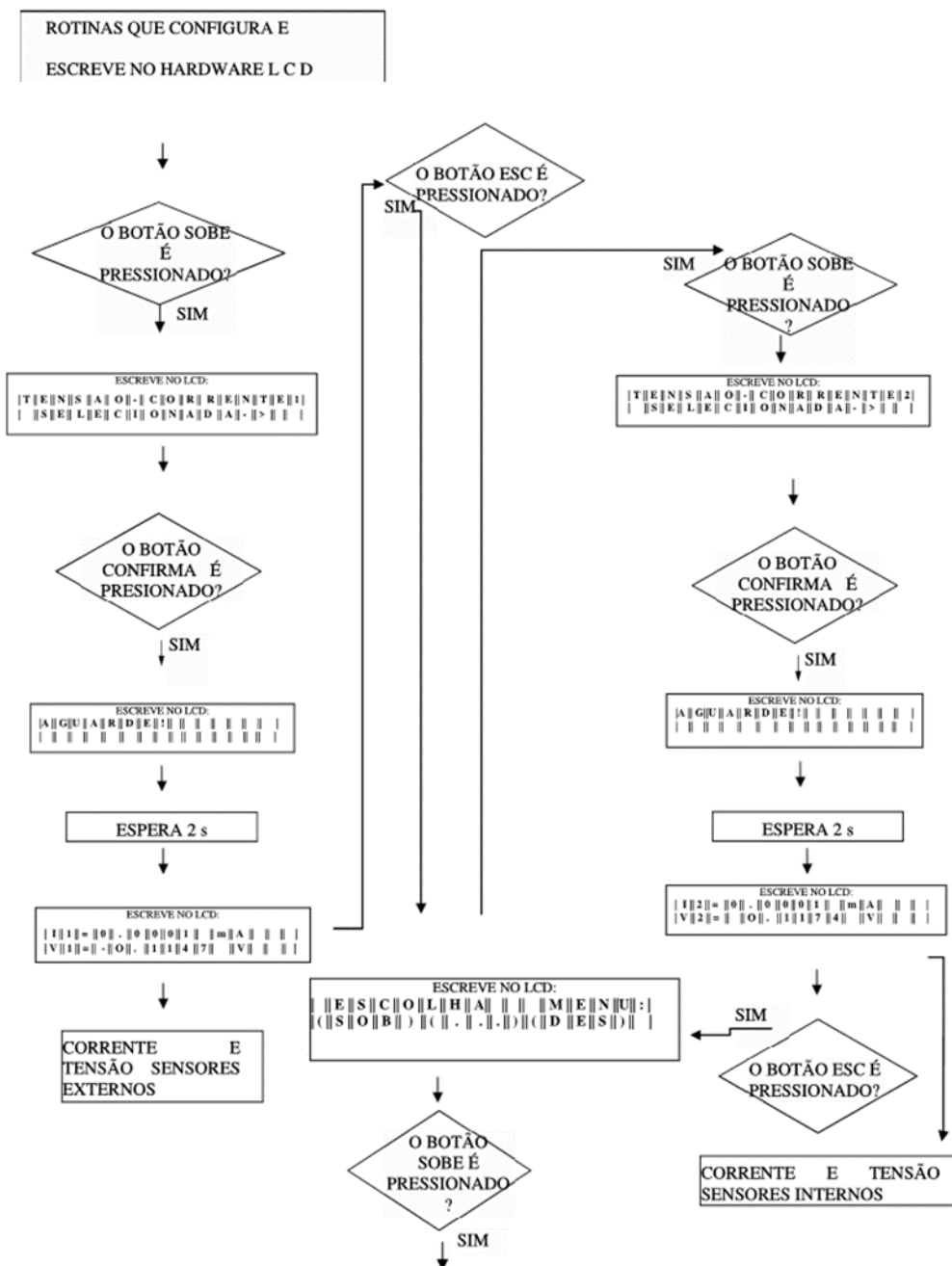
TABELA 1. Lista detalhada de peças da montagem mecânica do MCEAS

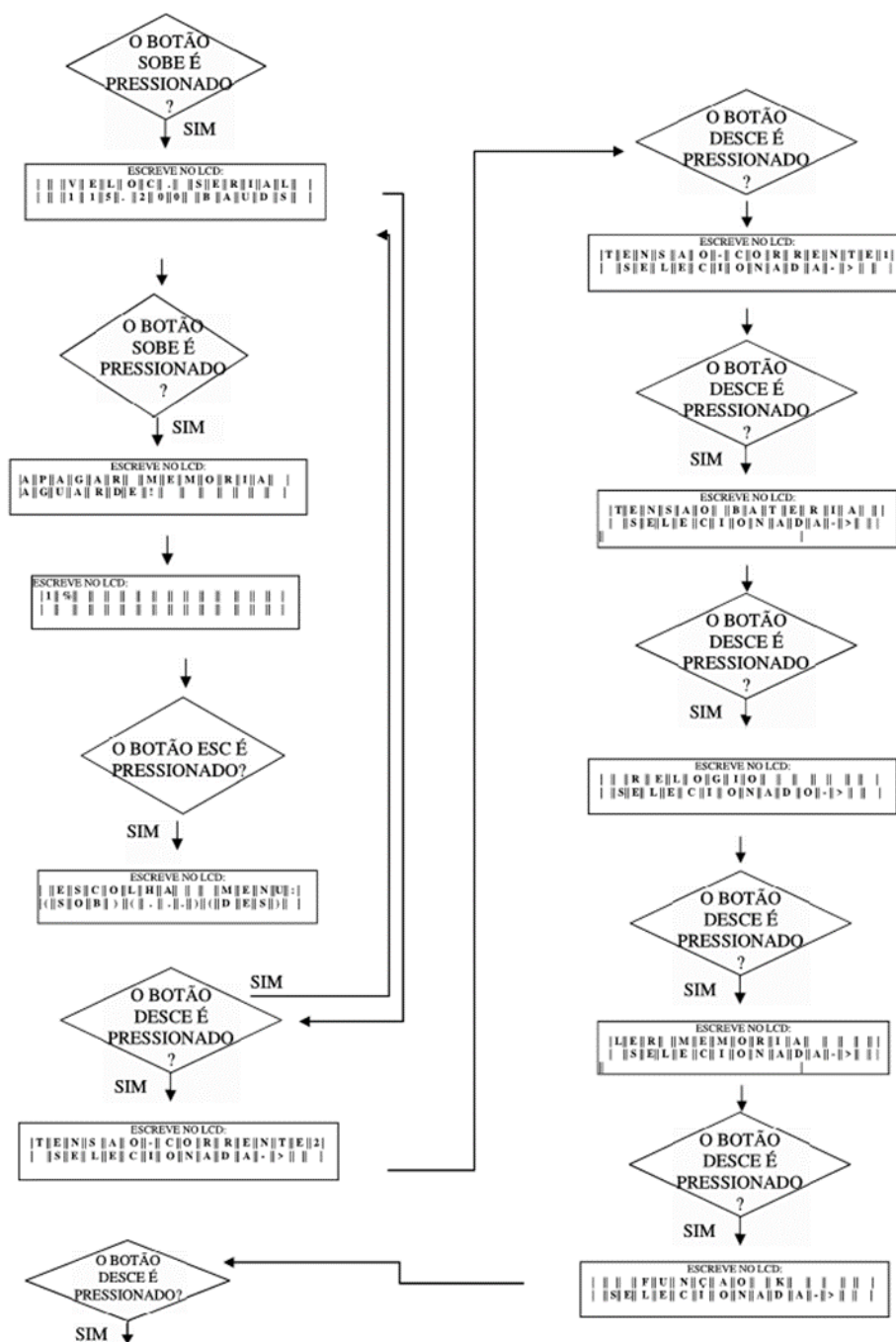
Nº da peça	Quant.	Descrição/Material
1	1	Barra de fixação dos eletrodos - nylon $\varnothing 25$ mm (torneada)
2	4	Sensor de aço inox $\varnothing 3/8''$ (torneada)
3	4	Porca do sensor – sextavada de alumínio m8 x 1,25
4	4	Porca do sensor – nylon $\varnothing 25$ mm (torneada)
5	4	Bucha fixação BNC – PVC de $\varnothing 25$ mm (torneada)
6	4	Calço BNC – nylon de $\varnothing 25$ mm
7	4	Porca terminal – aço m6 x 1.0
8	4	Terminal – latão (adaptado pelo autor)
9	2	Suporte – nylon com $\varnothing 2''$ (torneada)
10	2	Tubo 240 mm – PVC $\varnothing 25$ mm
11	8	Te de PVC com $\varnothing 25$ mm
12	2	Cruzeta - PVC de $\varnothing 25$ mm
13	2	Tubo de 180 mm – PVC de $\varnothing 25$ mm
14	2	Tubo de 150 mm – PVC de $\varnothing 25$ mm
15	2	Tubo de 80 mm – PVC de $\varnothing 25$ mm
16	1	Caixa montagem componentes eletrônicos – PVC de 280x180x90mm (adquirida)
17	1	Cabo - nylon $\varnothing 2''$ (torneada)
18	4	Conectores BNC – macho e fêmea
19	4	Barra chata de aço carbono $3/4''$ x 705mm
20	4	Barra chata de aço carbono $3/4''$ x 290mm
21	6	Parafuso tipo prisioneiro m6 x 47mm com porcas sextavadas

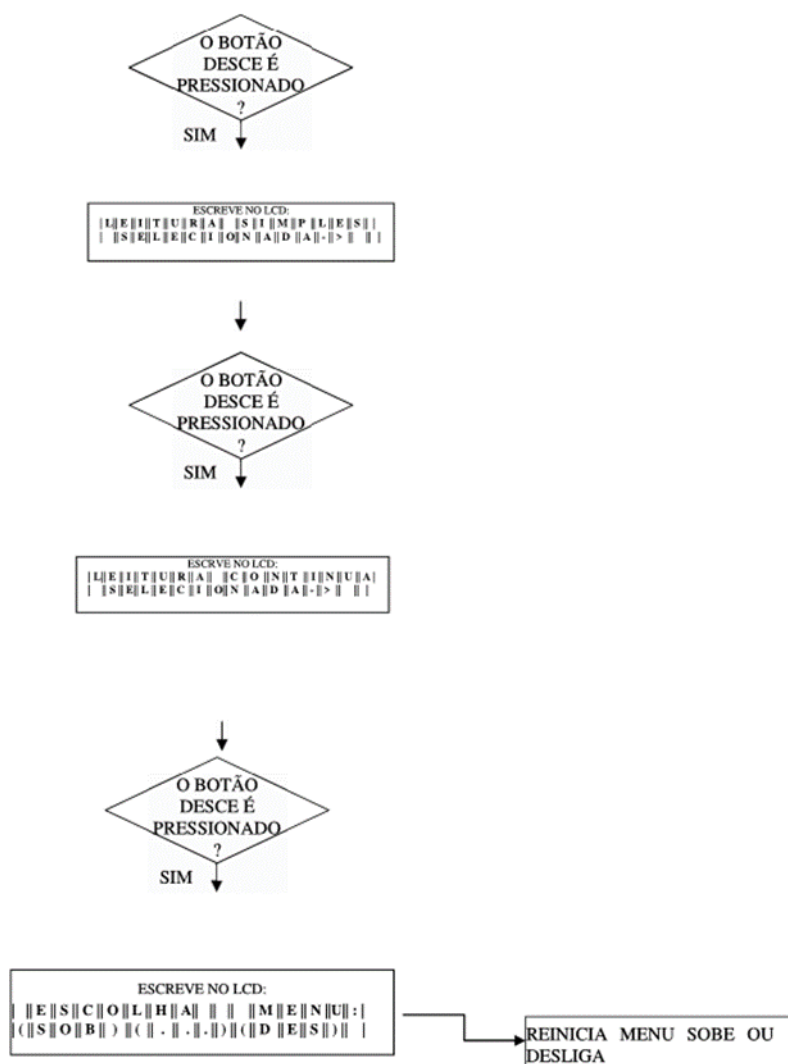
APÊNDICE D

Fluxograma inicial PIC e LCD









APÊNDICE E

LEITURA DE MEDIDAS VIA PORTA SERIAL

