

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

Igor Tersigni da Costa Mello

**SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO PARA
MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO**

JABOTICABAL – SP
Julho / 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL

SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO PARA
MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO

Igor Tersigni da Costa Mello

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Coorientador: Prof. Alexandre Barcellos Dalri

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para graduação em Engenharia Agrônômica.

JABOTICABAL – SP
Julho / 2022

M527s	<p>Mello, Igor Tersigni da Costa</p> <p>Sensor de condutividade elétrica de baixo custo para manejo de fertirrigação / Igor Tersigni da Costa Mello. -- Jaboticabal, 2022</p> <p>23 p.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientador: Luiz Fabiano Palaretti</p> <p>Coorientador: Alezandre Barcellos Dalri</p> <p>1. Irrigação agrícola. 2. Automação. 3. Condutividade elétrica. I. Título.</p>
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CÂMPUS DE JABOTICABAL

DEPARTAMENTO:

ENGENHARIA E CIÊNCIAS EXATAS

CERTIFICADO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO

ACADÊMICO: IGOR TERSIGNI DA COSTA MELLO

CURSO: ENGENHARIA AGRÔNOMICA

ORIENTADOR:	PROF. Dr. LUIZ FABIANO PALARETTI
COORIENTADOR:	PROF. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

Local de realização do TCC: Departamento de Engenharia e Ciências Exatas - DECEEx

PERÍODO: I/2021 à I/2022

Aprovado com conceito: A B C

Este trabalho é recomendado para compor a base de dados CAPELO. Sim Não

Reprovado:

BANCA EXAMINADORA:

(Nomes)	(Assinaturas)
PROF. DR. LUIZ FABIANO PALARETTI	
PROF. DR. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA	
ENGº AGRº M.Sc. DANILO SILVA AMARAL	

Jaboticabal 22, 07, 2022

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 26, 8, 2022, ad referendum

Prof. Dr. DANISIO PRADO MUNARI
 Departamento de Engenharia e Ciências Exatas

Prof. Dr. Danisio Prado Munari
 Chefe do Depto. de Engenharia
 e Ciências Exatas

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou e acreditou que tudo isso sempre foi possível, e a minha Avó, Vera Lúcia, a qual se foi com o covid, mas sei que continua torcendo por mim.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV/UNESP, ao Departamento de Engenharia e Ciências Exatas e ao Grupo de Pesquisa em Irrigação e Meio Ambiente, GPIMA, por proporcionar tudo isto.

Meus singelos agradecimentos as pessoas que participaram diretamente no desenvolvimento deste projeto, me orientando e guiando por todo este processo.

A minha namorada Laura Roncoli Pan, que se dispôs a vir me ajudar tanto presencialmente quanto a distância, mostrando que tudo era possível

Aos meus amigos Matheus Araújo e Pedro Leonel, que se dispuseram a vir me ajudar em processos laboratoriais e com lógica de programação.

Ao meu companheiro Christian Freire Cardoso, ao qual compartilhei momentos de lutas e vitórias.

E ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti, que em momentos difíceis sempre soube quais eram os próximos passos, e conseguiu então me orientar.

RESUMO

SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE BAIXO CUSTO PARA MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO

Para o manejo eficiente de fertirrigação, necessita-se de uma aferição constante da condutividade elétrica. Isto é necessário para evitar que a concentração de sais se eleve à níveis que cause danos a cultura. Atualmente no mercado existem diversos sensores que aferem a condutividade elétrica (CE), todavia o preço de venda não é atrativo à pequenos produtores. Há uma necessidade de mercado e este trabalho visa suprir oferecendo uma sonda de baixo custo capaz de medir com um bom grau de confiabilidade a condutividade elétrica da solução do solo. Foi feito o uso de um conector macho de energia, padrão USA, que oferece duas hastes metálicas espaçadas. O microcontrolador desenvolvido consta de um sensor de condutividade elétrica acoplada a um sistema de aquisição de dados (“*open source*”). Para análise comparativa entre o sensor de leitura de bancada (padrão) e o microcontrolador foi realizada a análise de correlação e regressão linear para determinação dos coeficientes da equação e do coeficiente de determinação (r^2). Para a exatidão foi realizada a análise para a determinação do índice de concordância (d) e do índice de desempenho (c). As leituras obtidas com o microcontrolador obtiveram desempenho satisfatório, com modelo de regressão polinomial de terceiro grau, como melhor ajuste (maior coeficiente de correlação).

Palavras-chave: Automação; Baixo custo; Fertirrigação.

ABSTRACT
LOW COST ELECTRICAL CONDUCTIVITY SENSOR FOR
FERTIRRIGATION MANAGEMENT

For the efficient management of fertigation, a constant measurement of electrical conductivity is required. It is necessary to not cause a excessive salinity in the soil.. Today on the market there are several sensors that measure electrical conductivity (EC), but many of these are at a price level that is not attractive to small producers. There is a need that this work aims to meet by offering a low cost probe capable of delivering this data with a good degree of reliability. So developing a probe with a male power connector, US standard, which offers us two spaced metallic rods. The developed microcontroller consists of an electrical conductivity sensor coupled to a data acquisition system ("open source"). For comparative analysis between the bench reading sensor (standard) and the microcontroller, correlation analysis and linear regression were performed to determine the coefficients of the equation and the coefficient of determination (r^2). For accuracy, the analysis was performed to determine the agreement index (d) and the performance index (c). The readings obtained with the microcontroller had satisfactory performance, with a third degree polynomial regression model, as the best fit (higher correlation coefficient).

Keywords: Automation; Fertirrigation; Low cost.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Tabela de Resistência a Salinidade pelas culturas.....	5
FIGURA 2 – Esquema de ligação sensores com arduino	9
FIGURA 3 – Sensor de Condutividade Elétrica	10
FIGURA 4 – Pesagem de NaCl	11
FIGURA 5 – Curva de Calibração 1.....	15
FIGURA 6 – Curva de Calibração 2.....	15
FIGURA 7 – Curva de Calibração Final.....	16

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	3
2.1 Automação.....	3
2.2 Fertirrigação.....	4
2.3 Salinidade do Solo.....	4
3. HIPÓTESE.....	7
4. OBJETIVO.....	8
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	14
7. CONCLUSÃO.....	17
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	18
9. APÊNDICE	20
Anexo A – Código de programação	20

1. INTRODUÇÃO

A agricultura é considerada uma atividade de risco, pois ela depende de diversos fatores, como por exemplo a água. A irrigação apesar de aumentar o custo de produção, tende a reduzir esse risco e a aumentar a produtividade. Sendo assim, muitas das vezes a irrigação vem sendo utilizada para produzir em certas áreas que antes seria inviável sua produção (BASSOI, 2021).

Atualmente, dos 1,6 bilhão de hectares de solos agrícolas cerca de 310 milhões de hectares possuem infraestrutura hídrica dedicada à irrigação. A produção agrícola destas áreas corresponde a 20% da superfície agricultada no mundo, e provê mais de 40% da produção agrícola mundial (COSGROVE; COSGROVE, 2012).

O Brasil apresenta uma área agrícola de cerca de 46,6 milhões de hectares, sendo que destes cerca de 4,45 milhões de hectares são irrigados, representando então 9,5% de toda a área agrícola (PAULINO, 2011).

Com as projeções futuras acerca do aumento populacional e a escassez de recursos naturais, deve-se desenvolver técnicas e produtos mais eficientes para suprir garantir a segurança hídrica e alimentar mundial, otimizando o uso de insumos, produzindo com sustentabilidade ambiental e financeira.

Uma das formas de otimizar o uso de fertilizantes e água na agricultura é a fertirrigação. Nesta técnica, os fertilizantes solubilizados em água são aplicados via sistema de irrigação (MEDEIROS et al., 2012; HASSANLI et al., 2010).

No Brasil, são encontrados sistemas de fertirrigação principalmente em ambientes protegidos, comumente em sistema de produção de olerícolas, destacando as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Haja vista que em ambientes protegidos não há influência da chuva no balanço hídrico, não lixiviando nutrientes no solo, estes ambientes estão propensos a serem salinizados caso haja um uso excessivo de fertilizantes, se assemelhando com o que ocorre nas regiões semiáridas do Brasil (MEDEIROS, 2012).

Para o controle desta salinidade em sistemas fertirrigados, vem-se mostrando essencial no sistema o manejo da condutividade elétrica (CE) por meio do uso de sensores. Condutividade elétrica é retornada pela aferição da quantidade de íons na solução do solo, que indica o grau de salinização do meio, para que seja feita uma adubação mais eficiente e se reduza os riscos de salinização do solo (QUEIROZ et al., 2009).

Sendo assim, nota-se o quão importante é a aferição e monitoramento da condutividade elétrica em sistemas de fertirrigação, por outro lado, o monitoramento exige o uso de sensores de condutividade elétrica que, na maioria das vezes, onera os custos e não atrai o produtor rural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Automação

Com o advento da agricultura digital, e com o crescente uso de equipamentos com IoT (Internet das coisas), o agronegócio vem evoluindo toda a cadeia produtiva, desde a identificação de áreas que tem necessidade de aplicação de algum defensivo, georreferenciamento, irrigação e diversos outros processos (TALAVERA et al, 2017).

Já é possível encontrar no campo, diversos tipos de automação, como: monitoramento do ar, do solo, da água, da planta, de animais, controle de irrigação (irrigação, fertirrigação e quimigação), condições climáticas do ambiente, estimativa de produção e germinação de sementes (TALAVERA et al., 2017).

Um sistema autônomo tende a eliminar os possíveis erros humanos no campo, sendo assim tornando o mesmo mais eficiente. Inoportunamente, estes sistemas estão concentrados em países mais desenvolvidos e, ou com grandes produtores rurais, fazendo com que os pequenos produtores rurais se limitem a sistemas convencionais, sem o uso de novas tecnologias (GUIMARÃES et al., 2011). Além do agravante do valor destes produtos, a falta de intuitividade e a falta de capacitação dos agricultores familiares fazem com que se mantenha esta discrepância (GUIMARÃES et al., 2011).

Para a automação destes processos existem plataformas de fácil acesso para a comunicação do sistema. Uma plataforma embarcada amplamente difundida no Brasil é o Arduíno, sendo este comercializado a um preço acessível ao público em geral, possibilitando a conciliação de diferentes sensores com válvulas e equipamentos elétricos (CUNHA, 2015).

2.2. Fertirrigação

Fertirrigar é o ato de injetar os nutrientes no sistema de irrigação, levando-os para as plantas solubilizado em água. Fornecendo os mesmos no momento adequado, para melhor aproveitamento da cultura. Por meio da fertirrigação conseguimos um manejo mais eficiente dos nutrientes no sistema. (CARRIJO et al, 2004).

Uma diferença significativa entre fertirrigação e a adubação convencional via solo é o tempo de ativação destes nutrientes no solo, pois os mesmo quando aplicados via solo necessitam de certa umidade para a penetração dos mesmos no solo e posteriormente serem adsorvidos. Todavia, se injetados via fertirrigação, os mesmos já são direcionados a zona radicular das plantas (COELHO, 2008).

Com a fertirrigação, é possível reduzir a lixiviação, diminuir a compactação do solo, devido ao menor fluxo de máquinas, reduzir a mão de obra das operações, injetar os nutrientes próximos da zona radicular das plantas e controlar a profundidade de aplicação destes insumos (CARRIJO et al, 2004).

2.3. Salinidade do Solo

As primeiras pesquisas acerca dos efeitos da salinidade do solo para produção agrícola datam da década de 70, onde começaram a ser feitas correlações com algumas variáveis, onde nota-se a influência da temperatura na condutividade elétrica, variando também com os tipos de íons ali dispostos (RHOADES, 1993).

Com a busca pelo aumento da produtividade, para suprir a demanda de alimentos, em todo o mundo observa-se o aumento de áreas salinizadas. Posto que, o manejo inadequado de adubação e água desafiam a agricultura manter um cultivo intensivo de forma sustentável (RIBEIRO et al., 2003).

A salinização do solo é oriunda do acúmulo de sais e limita a absorção de água pela planta devido ao potencial osmótico. Além do mais, alguns íons podem ser tóxicos, podendo ocorrer interferência dos sais no metabolismo da planta. Sendo este um problema comumente encontrado em regiões com déficit hídrico e, ou problemas de drenagem. Este cenário é acentuado nas regiões áridas e semiáridas. No Brasil, este problema é acentuado na região nordestina (GHEYI, 2000).

Diferentes culturas apresentam diferentes sensibilidades a salinidade do solo, sendo esta sensibilidade variável dependendo do estágio fenológico em que a planta se encontra, do clima e das práticas culturais adotadas. (Maas, 1986);

Cultura	Nome científico ²	SL ³ (dS m ⁻¹)	b % por dS m ⁻¹	Classe de tolerância ⁴
Fibra, grão e culturas especiais				
Algodão	<i>Gossypium hirsutum</i>	7,7	5,2	T
Amendoim	<i>Arachis hypogaea</i>	3,2	29,0	MS
Arroz	<i>Oryza sativa</i>	3,0 ⁵	12,0	S
Cana-de-açúcar	<i>Saccharum officinarum</i>	1,7	5,9	MS
Caupi	<i>Vigna unguiculata</i>	4,9	12,0	MT
Cevada	<i>Hordeum vulgare</i>	8,0	5,0	T
Fava	<i>Vicia Faba</i>	1,6	9,6	MS
Feijão	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,0	19,0	S
Gergelim	<i>Sesamun indicum</i>			S
Girassol	<i>Helianthus annuus</i>			MS*
Milheto, foxtail	<i>Setaria italica</i>			MS
Milho	<i>Zea mays</i>	1,7	12,0	MS
Soja	<i>Glycine max</i>	5,0	20,0	MT
Sorgo	<i>Sorghum bicolor</i>	6,8	16,0	MT
Trigo	<i>Triticum aestivum</i>	6,0	7,1	MT

Cultura	Nome científico ²	SL ³ (dS m ⁻¹)	b % por dS m ⁻¹	Classe de tolerância ⁴
Forrageiras				
Alfafa	<i>Medica sativa</i>	2,0	7,3	MS
Aveia (forrageira)	<i>Avena sativa</i>			MS*
Capim Bermuda	<i>Cynodon</i>	6,9	6,4	T
Capim Buffel	<i>Cenchrus ciliaris</i>			MS*
Caupi (Forrageira)	<i>Vigna unguiculata</i>	2,5	11,0	MS
Cevada (Forrageira)	<i>Hordeum vulgare</i>	6,0	7,1	MT
Milho (Forrageira)	<i>Zea mays</i>	1,8	7,4	MS
Trigo (forrageira)	<i>Triticum aestivum</i>	4,5	2,6	MT
Hortaliças e fruteiras				
Aspargo	<i>Asparagus officinalis</i>	4,1	2,0	T
Feijão	<i>Phaseolus vulgaris</i>	1,0	19,0	S
Beterraba vermelha	<i>Beta vulgaris</i>	4,0	9,0	MT
Repolho	<i>B. oleracea capitata</i>	1,8	14,0	MS
Cenoura	<i>Daucus carota</i>	1,0		S
Pepino	<i>Cucumis sativus</i>	2,5	6,9	MS
Berinjela	<i>S. melongena esculentum</i>	1,1		MS
Alface	<i>Lactuca sativa</i>	1,3	12,0	MS
Melão	<i>Cucumis melo</i>	2,2	7,5	MS
Cebola	<i>Allium cepa</i>	1,2		S
Pimentão	<i>Capsicum annuum</i>	1,5	12,0	MS
Batata	<i>Solanum tuberosum</i>	1,7		MS
Espinafre	<i>Spinacia oleracea</i>	2,0	16,0	MS
Abobrinha, scallop	<i>Cucurbita pepo melopepo</i>	3,2	9,4	MS
Abobrinha, zucchini	<i>C. pepo melopepo</i>	4,7	33,0	MT
Morango	<i>Fragaria sp.</i>	1,0	11,0	S
Batata doce	<i>Ipomoea batatas</i>	1,5	9,9	MS
Tomate	<i>L. esculentum</i>	2,5	9,0	MS

¹ Esses dados servem apenas como indicativo da tolerância relativa entre culturas. Tolerância absoluta depende do clima, das condições do solo e práticas culturais.

² Os nomes botânicos e comuns em inglês, conforme a convenção de "Hortus Third", quando possível.

³ Em solos gipsíferos, as plantas toleram CE_{ca} cerca de 2 dS m⁻¹ acima do indicado.

⁴ T = Tolerante, MT = Moderadamente Tolerante, MS = Moderadamente Sensível e S = Sensível. Classes com * são estimativas

⁵ Como arroz é cultivado sob condições de inundação, os valores se referem às condutividades elétrica da água do solo, enquanto plantas estão inundadas. Menos tolerantes durante fase de plântula

Figura 1 – Tolerância a salinidade de diferentes culturas (fornecida por Maas, 1986. Adaptada por Dias, 2016).

Para se evitar a salinização do solo, o monitoramento da concentração dos sais aplicados é uma estratégia interessante, no entanto, os custos para tal são altos. Uma forma mais simples de acompanhar o efeito dos sais no solo é pela medida da condutividade elétrica (CE), e para isso se dispõem de sensores de contato direto e indução eletromagnética.

Para o monitoramento da condutividade elétrica são utilizados dois tipos de sensores, sendo eles de contato direto e de indução eletromagnética. Sensores de contato direto devem estar em contato direto com a matriz ou solução do solo e os de indução eletromagnética não exigem este contato direto. (RHOADES & CORWIN, 1984).

3. HIPÓTESE

Entendendo o funcionamento de um condutímetro, que pela variação na resistividade de um meio nos retorna à condutividade elétrica (CE) por meio de cálculos matemáticos Leis de Ohm (equações 1 e 2), onde:

$$R = \frac{U}{I} \quad 1$$

$$R = \frac{\rho \times L}{A} \quad 2$$

em que:

R: resistência, Ω

U: diferença de potencial elétrico (ddp), Volts

i: intensidade da corrente elétrica, Ampere

ρ : resistividade do condutor, $\Omega.m$

L: comprimento, m

A: área de secção transversal, m^2

Com o auxílio de um controlador com uma lógica de programação, possibilita-se a criação de um sistema simples de mensuração de condutividade elétrica para monitoramento da EC, que pode subsidiar o produtor rural na tomada de decisão e no manejo racional de fertilizantes.

4. OBJETIVO

Neste projeto o objetivo foi o de desenvolver um sensor de condutividade elétrica com hastes metálicas paralelas acopladas em um sistema de emissão e captação de uma corrente elétrica de 5v, controlada pelo Arduino UNO.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Este projeto foi desenvolvido na UNESP - Jaboticabal, no departamento de Engenharia Rural.

Para a comunicação desta sonda, foi utilizado um microcontrolador Arduino UNO (Figura 01), o qual por meio de uma porta analógica recebia valores de corrente (mV) e por meio de um código de programação (Anexo A), em linguagem C, retornava os valores de condutividade elétrica em mS cm^{-1} .

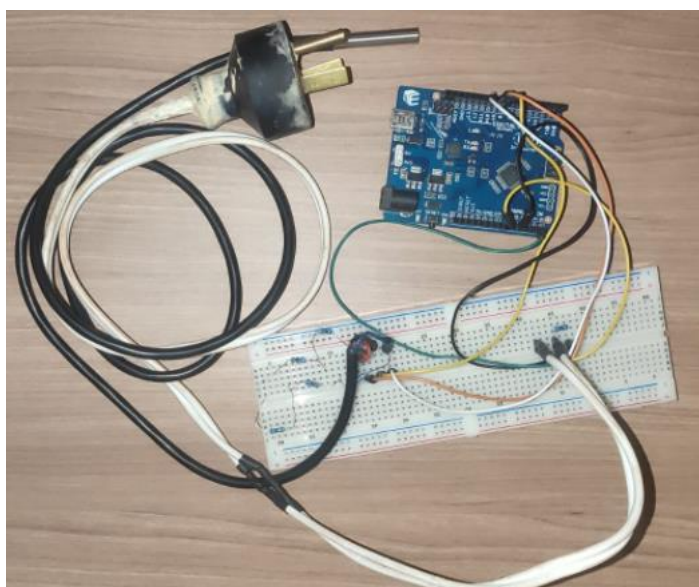


Figura 2 - Arduino conectado ao sensor de condutividade elétrica e de temperatura

Para desenvolver esta lógica de programação, fez-se necessário conhecer as resistências presentes nos pinos, as quais são disponibilizadas pelo fabricante, sendo esta cerca de 25 Ohms.

Posteriormente, necessitamos de uma resistência conhecida, que nos fornecerá um bom grau de confiabilidade em certos parâmetros. Neste caso foi utilizado um resistor de 1000 Ohms, o qual satisfaz as necessidades deste projeto.

Primeiramente foi testado um plug com hastes cilíndricas, mas o mesmo oscilava muito os resultados, sendo assim inviabilizando seu uso. Foi utilizado um plug padrão antigo US, o qual custou em 2021, 25,00R\$. Todavia, o pino de aterramento, localizado no centro do plug não foi utilizado neste projeto. A impermeabilização fez-se necessária para que a corrente não atravessasse em outros pontos, se limitando assim somente nas hastes. (Figura 2)



Figura 3 - Sonda totalmente impermeabilizada, evidenciando as hastes utilizadas para leitura.

O funcionamento deste plug se dá pelo fato de que é controlado a emissão e captação desta corrente elétrica de 5v, controlado pelo Arduino UNO. A

variação desta corrente captada pode ser correlacionada com uma curva de CE previamente calibrada, fazendo com que posteriores medidas sejam precisas.

Para calibração foi utilizada uma curva de CE com as seguintes concentrações, sendo utilizado o NaCl como sal: água deionizada (S0); solução com 1g de NaCl L⁻¹ (S1); solução com 2g de NaCl L⁻¹ (S2); solução com 3g de NaCl L⁻¹ (S3) e com 4g de NaCl L⁻¹ (S4).

Com a utilização de um condutímetro de bancada foram aferidas as condutividades elétricas das soluções, obtendo-se: S0 - 0,00288 mS cm⁻¹; S1 - 1,578 mS cm⁻¹; S2 - 3,14 mS cm⁻¹; S3 - 4,26 mS cm⁻¹ e S4 - 5,22 mS cm⁻¹, para as concentrações de S0 à S4 (Figura 3).



Figura 4 - Pesagem de NaCl para as soluções.

Para avaliar o melhor ajuste das leituras realizadas com o sensor em desenvolvimento com as realizadas pelo sensor de bancada foi realizada a correlação de Pearson para verificar o funcionamento/calibração da sonda. Sendo a equação ($Y = a + bx$) e, determinação do coeficiente de determinação (r^2).

A interpretação destes indicam que quanto mais o coeficiente de regressão linear (a) se aproxima de zero; coeficiente angular (b) se aproxima da

unidade e maior o coeficiente de determinação, mais precisa são as leituras com o sensor em desenvolvimento, o coeficiente de determinação indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total.

A verificação do erro proporcional entre a leitura da EC pelo sistema em desenvolvimento em relação ao sensor de bancada, foi realizada pelo cálculo do erro padrão de estimativa (EPE), conforme Jensen, Burman e Allen (1990) (equação 3).

Para a interpretação, quanto menor o valor de EPE mais próximo estão os valores medidos em ambos os sensores (equação 3).

$$EPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad 3$$

em que:

EPE = erro-padrão da estimativa, mS cm⁻¹;

Y_i = leitura da condutividade elétrica do sensor de bancada, mS cm⁻¹;

X_i = leitura da condutividade elétrica do sensor em desenvolvimento, mS cm⁻¹;

Para a exatidão das leituras do sensor em desenvolvimento foi realizada a análise para a determinação do índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985) (equação 4) e do coeficiente de correlação (r) (equação 5). Posteriormente obtém-se o índice de desempenho (c) (equação 6), que corresponde à multiplicação do coeficiente de correlação (r) com o índice de concordância (d).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{X}|) + (|X_i - \bar{X}|)]^2} \quad 4$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{X}|)(|Y_i - \bar{Y}|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad 5$$

$$c = r \times d \quad 6$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste de Willmott;

Y_i = leitura da condutividade elétrica do sensor de bancada, mS cm^{-1} ;

X_i = leitura da condutividade elétrica do sensor em desenvolvimento, mS cm^{-1} ;

\bar{X} = média da condutividade elétrica do sensor em desenvolvimento, mS cm^{-1} ;

\bar{Y} = da condutividade elétrica do sensor de bancada, mS cm^{-1} ;

n = número de observações;

r = coeficiente de correlação de Pearson;

c = coeficiente de confiança ou desempenho.

Os coeficientes de confiança (c) serão interpretados de acordo com Camargo e Sentelhas (1997) como: ótimo ($c > 0,85$); muito bom ($0,76 < c < 0,85$); bom ($0,66 < c < 0,75$); mediano ($0,61 < c < 0,65$), sofrível ($0,51 < c < 0,60$), mau ($0,41 < c < 0,50$) e péssimo ($c < 0,40$).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com as aferições feitas pelo sensor de bancada, e posteriormente com o sensor desenvolvido, foi feita uma correlação entre os dois, nos retornando então uma curva de calibração. Sendo que, no primeiro ponto trabalhamos com soluções próximas a 25°C, para que não haja a necessidade de correção com temperatura.

A análise da regressão das leituras sem tratamento demonstraram que a maior diferença de EC feitas pelo sensor de bancada e o desenvolvido foi de 0,70 mS cm⁻¹ observada na solução de 4g (NaCl) L⁻¹ e a menor, de -0,05 mS cm⁻¹ na solução controle (Figura 4).

Após uma série de novas aferições, obtivemos uma média aritmética das leituras muito próximas, nos entregando uma curva de calibração mais satisfatória em usos a longo prazo, como pode ser observado na figura 5, com a maior diferença de 0,16 na solução de 1g (NaCl) L⁻¹ e a menor, de 0,01 na solução de 2g (NaCl) L⁻¹

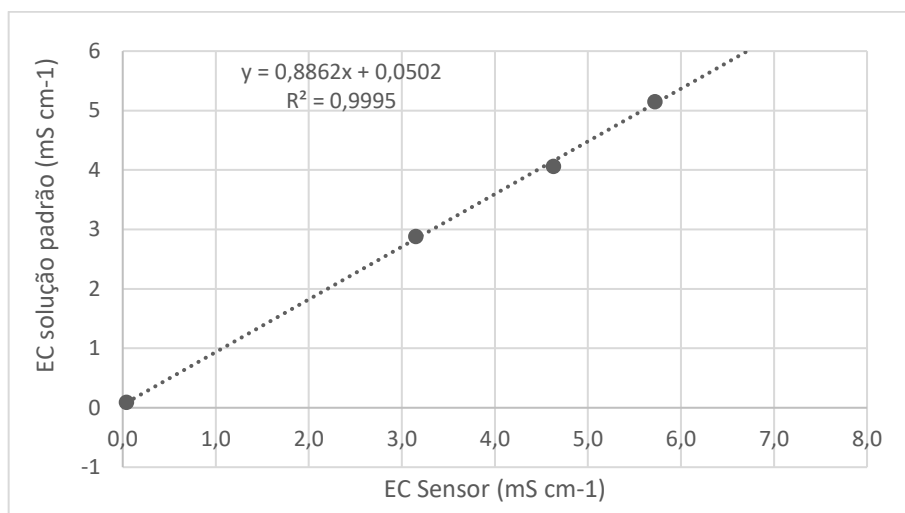


Figura 5 – Equação de ajuste das leituras feitas com o sensor de bancada e o desenvolvido.

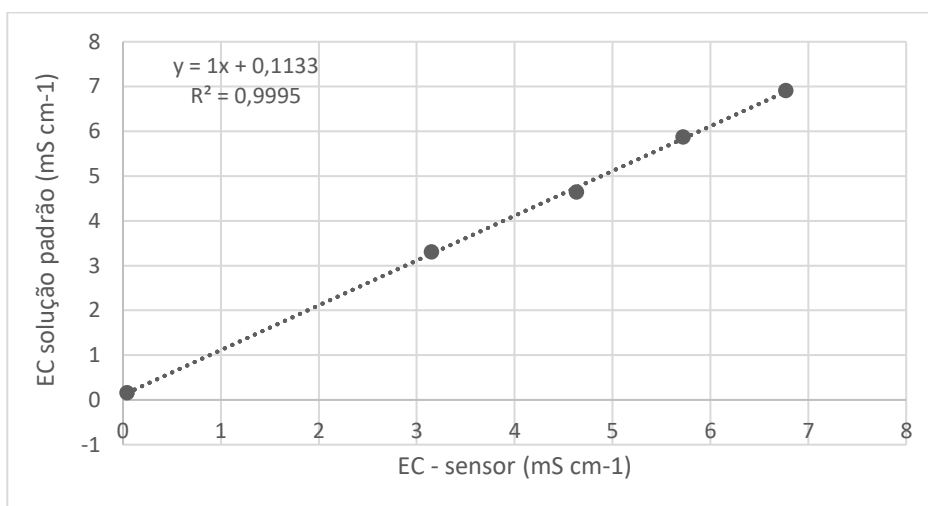


Figura 6 – Equação de ajuste das leituras feitas com o sensor de bancada e o desenvolvido após a correção de temperatura.

O erro padrão de estimativa foi de 0,126 indicando a proximidade das leituras entre o sensor de bancada e o desenvolvido.

O índice de concordância de Wilcoxon (d) de 1,00 indica a exatidão das leituras realizadas pelo sensor desenvolvido e o coeficiente de desempenho (c) de 0,84 é considerado “muito bom”.

Com o uso da curva de calibração, de um coeficiente de variação de condutividade elétrica para soluções nutritivas em relação a temperatura ($1,9\%/1^{\circ}\text{C}$) obteve-se um resultado satisfatório.

Visando deixá-lo mais preciso, foi feita uma lógica onde foram utilizadas as 10 últimas leituras, descartando as 2 maiores e as 2 menores. Das 6 que restaram foi feita a média aritmética que retro abasteceu o programa do sistema de aquisição de dados, corrigindo automaticamente, embora a leitura tenha ficado mais lenta ela se mostrou mais estável, que pode ser observado na variável “ECM” (Anexo A).

Devido ao fato de que em soluções pouco salinas ($EC \leq 1$) o sensor acabava superestimando os valores, foi ajustado um modelo polinomial de terceiro grau com coeficiente de correlação muito bom (Figura 6), que entregava leituras mais próximas dos dados padrões, devido ao seu grau polinomial maior.

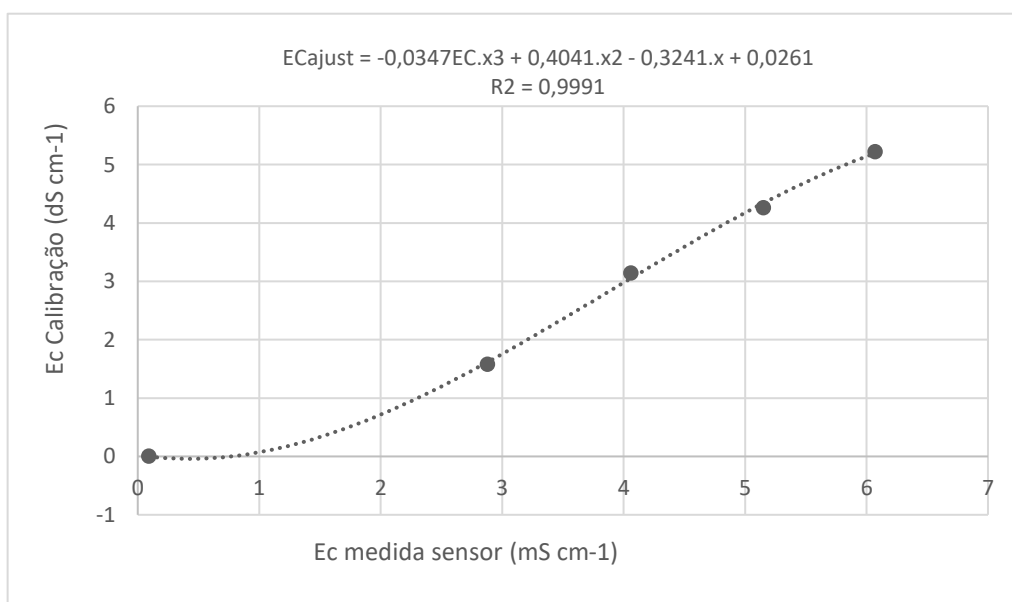


Figura 7 – Equação padrão para uso no sensor de condutividade elétrica desenvolvido.

Este mesmo em prática se mostrou mais estável, porém a curva mostra-se errônea pois o sensor acaba nos retornando dados de CE negativa, sendo esta recomendada só, e somente só, para soluções com condutividade acima de 1 mS cm^{-1} .

Obtivemos com leituras póstumas uma variação máxima de 5% com relação as soluções calibradas, sendo este um valor muito satisfatório. Esta variação se deve possivelmente a oxidação que ocorre com o uso corriqueiro da sonda. Este problema pode ser solucionado com o uso de uma lixa convencional.

7. CONCLUSÕES

As leituras ajustadas são confiáveis e apresentaram exatidão satisfatória para uso em soluções salinas utilizadas na fertirrigação de cultivos.

Em soluções muito salinas, nota-se uma perda de precisão, porém isso não seria problema haja vista que no solo estes valores não seriam atingidos e se o fossem, nem mesmo plantas tolerantes a salinidade suportariam.

Dentro dos limites de salinidade tolerados pela maioria das culturas agrícolas, o sensor desenvolvido apresentou máximo de 5% de variação em relação aos sensores disponíveis no mercado, viabilizando seu uso.

A sonda desenvolvida poderá ser replicada e utilizada em um sistema completo de fertirrigação, viabilizando assim o acesso de pequenos produtores a esta tecnologia.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BASSOI, L. H.; **Irrigação no Brasil: necessidade e opção estratégica.** EMBRAPA, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/62692713/artigo-irrigacao-no-brasil-necessidade-e-opcao-estrategica>. Acesso em: 06/07/2022.
- CARRIJO, O. A.; **FERTIRRIGAÇÃO DE HORTALIÇAS.** Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004. 13 p.
- COELHO, E. F.; OR, D.; SOUSA, V. F.; **ASPECTOS BÁSICOS EM FERTIRRIGAÇÃO, Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças.** Capítulo 6, p. 235 – 251, 2008.
- COSGROVE, C.; COSGROVE, W. **The dynamics of global water futures: driving forces 2011-2050.** Paris: UNESCO, 2012
- DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; QUEIROZ, I. S. R.; **MANEJO DA SALINIDADE NA AGRICULTURA: ESTUDOS BÁSICOS E APLICADOS, Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade.** p 151 – 162, 2016.
- GHEYI, H. R. 2000. **Problemas de salinidade na agricultura irrigada.** In: OLIVEIRA, T.; ASSIS, J. R.; R. N.; ROMERO, R. E.; SILVA, J. R. C. (Eds.). Agricultura, sustentabilidade e o semiárido. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.329-345.
- GUIMARÃES, V. G.; **Automação e monitoramento remoto de sistema de irrigação na agricultura.** 2011. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- MAAS, E. V.; POSS, J. A.; HOFFMAN, G. J.; **IRRIGATION SCIENCE, Salinity Sensitivity of Sorghum at Three Growth Stages.** Springer-Verlag 1986.
- MEDEIROS, P. R.; DUARTE, S. N.; UYEDA, C. A.; SILVA, E. F. F.; MEDEIROS, J. F. **Tolerância da cultura do tomate à salinidade do solo em ambiente protegido.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 16, n.1, p. 51-55, 2012.

- PAULINO, J.; FOLEGATTI, M. V.; ZOLIN, C. A.; ROMÁN, R. M. S.; JOSÉ, J. V. SITUAÇÃO DA AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL DE ACORDO COM O CENSO AGROPECUÁRIO 2006. **IRRIGA**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 163–176, 2011. DOI: 10.15809/irriga.2011v16n2p163. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/201>. Acesso em: 26 jul. 2022.
- QUEIROZ, S. O. P.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Metodologia para avaliação da salinidade do solo em ambiente protegido**. Irriga, Botucatu, v.14, n.3, p.383-397, 2009
- RHOADES, J. D. **Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity**. Advances in Agronomy, San Diego, v.49, p.232-242, 1993.
- RHOADES, J. D.; CORWIN, D.L. **Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction**. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, p.288-291, 1984.
- RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A. 2003. **Solos halomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável**. In: CURTI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S; ALVAREZ, V. H. (eds.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.3, p.165-208.
- TALAVERA, J. W.; **COMPUTERS AND ELECTRONICS IN AGRICULTURE: Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields**. [S.l.], 18 set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/computers-and-electronics-in-agriculture>. Acesso em: 29 jun. 2022.

APÊNDICE

Anexo A – Código de Programação

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

int R1 = 1000; //Resistência Resistor utilizado (1000 Ohms)
int Ra = 25; //Resistencia dos pinos de Alimentação

//Definidos pinos analógicos Sonda
int ECPin = A0;
int ECGround = A1;
int ECPower = A4;

float TemperaturaCoef = 0.019; //Coeficiente Linear de temperatura comumente usado para
    Fertilrigação (1,9% EC para cada cada 1°C)

//Constantes para potência usada na curva de calibração
double ECC = 0;
float mV = 0;
double pot = 0;
float mV2 = 0;

//Portas para sensor de Temperatura
#define ONE_WIRE_BUS 40 // Pino de informações
const int TempProbePositive = 39; //5v
const int TempProbeNegative = 38; //GND

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS); // Reconhecimento do sensor de temperatura para o One
    Wire
DallasTemperature sensors(&oneWire); // Passa os dados para o DallasTemperature

//Demais variaveis
float Temperatura = 10;
float EC = 0;
float EC25 = 0;
float raw = 0;

```

```

float Vin = 5;
float Vdrop = 0;
float Rc = 0;
float buffer = 0;

//Variaveis para obtenção ECM
float count = 0;
float ECx[10];
float ECM = 0;
int i = 0;
int j = 0;
int k = 0;
float aux = 0;
//-----//
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(TempProbeNegative , OUTPUT );
  digitalWrite(TempProbeNegative , LOW );
  pinMode(TempProbePossitive , OUTPUT );
  digitalWrite(TempProbePossitive , HIGH );
  pinMode(ECPin, INPUT);
  pinMode(ECPower, OUTPUT);
  pinMode(ECGround, OUTPUT);
  digitalWrite(ECGround, LOW);
  delay(100);
  sensors.begin();
  delay(100);
  R1 = (R1 + Ra);

  Serial.println("Insira a Sonda e o Sensor de Temperatura no FLUIDO");
  Serial.println("");
  Serial.println("Leituras serão feitas a cada 5s, AGUARDE VALORES ESTABILIZAREM");
};
//-----//
void loop()
{
  ObterEC();      //Chamado void ObterEC

```

```

count = count + 1;
i = count - 1;
if (count < 10)
{
  ECx[i] = ECC;
};
if (count == 10)
{
  ECx[i] = ECC;
  count = 0;
}
j = 0;
k = j + 1;
while (j <= 9) {
  while (k <= 9) {
    if (ECx[j] > ECx[k]) {
      aux = ECx[j];
      ECx[j] = ECx[k];
      ECx[k] = aux;
    }
    k++;
  }
  j++;
  k = j + 1;
}
ECM = (ECx[2] + ECx[3] + ECx[4] + ECx[5] + ECx[6] + ECx[7]) / 6;
Print(); // Chamado void Print
delay(5000); //Leituras a cada 5000ms
}
//-----//
void ObterEC() {

  sensors.requestTemperatures();//Obter Temperatura
  Temperatura = sensors.getTempCByIndex(0); //Armazena em uma variavel
  digitalWrite(ECPower, HIGH);
  raw = analogRead(ECPin);
  raw = analogRead(ECPin); //Duplicidade para carregar o Capacitor e dar uma leitura mais
  correta
  digitalWrite(ECPower, LOW);

```

```

//Convertendo para EC
Vdrop = (Vin * raw) / 1024.0;
Rc = (Vdrop * R1) / (Vin - Vdrop);
Rc = Rc - Ra;
EC = 1000 / (Rc);

//Compensando Temperatura
EC25 = EC / (1 + TemperaturaCoef * (Temperatura - 25.0));
ECC = ((-0.0347 * (pow(EC25, 3))) + (0.4041 * (pow(EC25, 2))) - (0.3241 * EC25) + 0.0261);
}
//-----//
void Print() {
  Serial.print("EC Sem Correção: ");
  Serial.print(EC);
  Serial.print("mS/cm");
  Serial.print("    EC Temperatura: ");
  Serial.print(EC25);
  Serial.print("mS/cm");
  Serial.print("    EC Temperatura + Curva: ");
  Serial.print(ECC);
  Serial.print("mS/cm");
  Serial.print("    Temperatura = ");
  Serial.print(Temperatura);
  Serial.print("°C");
  Serial.print("    EC = ");
  Serial.print(ECM);
  Serial.println("mS/cm");
};

```