



**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO
PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DA
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLUÇÕES
FERTILIZANTES**

HUDSON DE PAULA CARVALHO

2004

HUDSON DE PAULA CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA
MONITORAMENTO E CONTROLE DA
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLUÇÕES
FERTILIZANTES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de "Mestre".

Orientador

Prof. Dr. Luis Artur Alvarenga Vilela

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

2004

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Carvalho, Hudson de Paula

Desenvolvimento de um protótipo para monitoramento e controle da condutividade elétrica de soluções fertilizantes / Hudson de Paula Carvalho. – Lavras : UFLA, 2004.

78 p. : il.

Orientador: Luiz Artur Alvarenga Vilela.

Dissertação (Mestrado) – UFLA.

Bibliografia.

1. Condutividade elétrica. 2. Automação. 3. Fertirrigação. 4. Soluções fertilizantes. 5. Protótipo. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

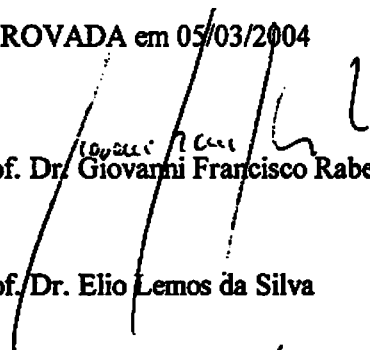
CDD-631.587

HUDSON DE PAULA CARVALHO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO PARA
MONITORAMENTO E CONTROLE DA
CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE SOLUÇÕES
FERTILIZANTES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para a obtenção do título de "Mestre".

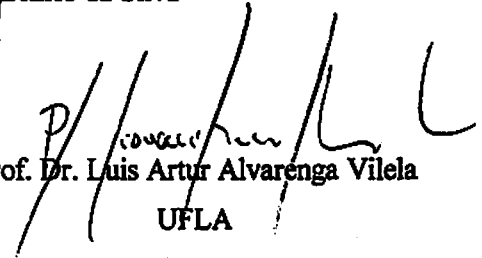
APROVADA em 05/03/2004


Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo

UFLA

Prof. Dr. Elio Lemos da Silva

UFLA


Prof. Dr. Luis Artur Alvarenga Vilela

UFLA

(Orientador)

Lavras

MINAS GERAIS – BRASIL

HOMENAGEM

**Prof. Dr. Luis Artur Alvarenga Vilela
(1966 – 2004)**

O Prof. Luis Artur era Mestre, Doutor, com especialidade em Irrigação e Drenagem e atuação nas áreas de avaliação e desenvolvimento de equipamentos e manejo de irrigação, do Departamento de Engenharia, da Universidade Federal de Lavras.

**Muitos podem ser Orientadores, mas poucos Orientam de verdade.
Eu tive o privilégio de ter um Orientador.**

Um abraço, professor, onde estiver.

A Deus,

inteligência suprema, bondade e justiça infinita, no qual tenho fé.

OFEREÇO

Aos meus pais, Antônio e Rosilda e meus irmãos, Hércules, Hélio e Humberto, pelo amor e apoio irrestrito;

À minha avó Deolinda (*in memorian*), pela ajuda e proteção;

Aos meus avós, João Batista, Sebastião Carvalho (*in memorian*) e Ana Carvalho; minhas tias Dilma, Alzira e Maria Rosalina e aos tios Élcio e Edgard, por tudo que fizeram por mim.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao professor, amigo e orientador Luis Artur Alvarenga Vilela (*in memorian*), pelo apoio, dedicação e paciência, durante todo o curso.

Ao professor, amigo e co-orientador, Giovanni Francisco Rabelo, pelas dicas durante a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores do curso de Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, pelos valiosos ensinamentos.

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Engenharia, pela acolhida e, principalmente, pela confiança em mim depositada.

A Tato Equipamentos Eletrônicos, pela doação do microcontrolador e cooperação em outros projetos.

Aos colegas e amigos Tadeu Queiroz e Luciano Mendes, pela ajuda na elaboração dos circuitos eletrônicos.

A todos os colegas do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial aos da área de Irrigação e Drenagem, pela amizade e companheirismo durante o curso.

BIOGRAFIA

HUDSON DE PAULA CARVALHO, filho de Antônio de Paula Almeida e Rosilda de Carvalho Almeida, nasceu a 20 de maio de 1976, em Alto Garças, MT.

Em 1993, ingressou na Escola Agrotécnica Federal de Cuiabá, em Cuiabá, MT, onde obteve o título de Técnico em Agropecuária, em 1995.

Em julho de 1997, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal de Uberlândia, em Uberlândia, MG, onde graduou-se Engenheiro Agrônomo, em julho de 2002.

Em setembro de 2002, ingressou no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, na área de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Lavras, em Lavras, MG, obtendo o título de Mestre em março de 2004.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 Fertirrigação.....	3
2.2 Eletrônica e automação.....	7
2.3 Condutividade elétrica.....	13
2.4 Aspectos construtivos dos medidores de condutividade elétrica comerciais.....	19
2.5 Efeito da temperatura na medida da condutividade elétrica.....	21
2.6 Aferição das leituras de condutividade elétrica.....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Local de desenvolvimento do protótipo.....	24
3.2 Desenvolvimento da fonte de alimentação	24
3.3 Desenvolvimento do circuito eletrônico e do sensor de condutividade elétrica	25
3.3.1 Circuito eletrônico do sensor de condutividade elétrica	25
3.3.2 Sensor de condutividade elétrica	26
3.4 Montagem do circuito medidor de temperatura	27
3.5 Montagem do circuito eletrônico do microcontrolador	29
3.6 Calibração do protótipo	31
3.6.1 Obtenção da equação da condutividade elétrica.....	31
3.6.2 Obtenção da equação do fator de correção da temperatura.....	32
3.7 Avaliação do fator de correção da temperatura.....	33
3.8 Teste de controle da condutividade elétrica em circuito hidráulico fechado	34
3.8.1 Avaliação da exatidão do protótipo	35

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Características do sensor de condutividade elétrica	39
4.2 Avaliação do sensor de temperatura	40
4.3 Avaliação do microcontrolador	41
4.4 Equação da condutividade elétrica	41
4.5 Equação da condutividade elétrica corrigida.....	43
4.6 Avaliação do fator de correção da temperatura.....	44
4.7 Teste de controle da condutividade elétrica em circuito hidráulico fechado	47
4.8 Custo do protótipo	49
4.9 Considerações finais	49
5 CONCLUSÕES.....	51
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXOS	57

RESUMO

CARVALHO, Hudson de Paula. Desenvolvimento de um protótipo para monitoramento e controle da condutividade elétrica de soluções fertilizantes. 2004. 78 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

A grande maioria dos controladores de fertirrigação existentes no mercado nacional é importada, dificultando assim a reposição de peças e o reparo dos instrumentos. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo para monitoramento e controle da condutividade elétrica de soluções fertilizantes, para uso em fertirrigação, que seja de baixo custo e de fácil aquisição no mercado brasileiro. Para tanto, foram desenvolvidos circuitos eletrônicos, um sensor de condutividade elétrica e um sensor de temperatura. Além disso, foram geradas uma equação para a correção da temperatura e uma para a conversão da tensão em condutividade elétrica. Todo o sistema foi comandado por um microcontrolador. O funcionamento do protótipo foi avaliado em comparação com um condutivímetro comercial, tido como padrão, onde pôde-se obter as seguintes conclusões: i – o desempenho do protótipo no controle da condutividade elétrica foi satisfatório e ii – os sensores de condutividade elétrica e temperatura desenvolvidos mostraram-se adequados para esse tipo de medição, além de apresentarem excelente robustez, o que garante a possibilidade de instalação em qualquer parte da linha de irrigação.

* Comitê Orientador: Luis Artur Alvarenga Vilela – UFLA (Orientador);
Giovanni Francisco Rabelo – UFLA.

ABSTRACT

CARVALHO, Hudson de Paula. Development of a prototype for monitoring and control of electrical conductivity in fertilizing solutions. 2004. 78p. Dissertation (Masters Degree in Agricultural Engineering / Irrigation and Drainage) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.*

Large part of the fertigation controllers available today in the national market is imported. This makes difficult the replacement of parts and repair of instruments. The current study aimed the development of a low cost device for monitoring and controlling electrical conductivity of fertilizing solutions to be used in fertigation with components easy to find in the Brazilian market. Electric circuits and sensors for electrical conductivity and temperature were developed. An equation for temperature correction was established as well as another for converting tension into electrical conductivity. The entire system was controlled by a microcontroller. The performance of the prototype was evaluated in comparison to a commercial electrical conductivity sensor, allowing the following conclusions: *i.* the prototype performance in monitoring and controlling electrical conductivity was satisfactory and *ii-* the developed electrical conductivity and temperature sensors have proven to be appropriate for this type of assessment, besides presenting excellent robustness, that ensures the possibility to be set in any part of the irrigation line.

* Guidance Committee: Luis Artur Alvarenga Vilela (Major Professor);
Giovanni Francisco Rabelo – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, a agricultura brasileira passa por grandes mudanças em sua estrutura administrativa e, principalmente, produtiva. Essa transformação vem ocorrendo ao longo de muitos anos, porém, da última década do século passado para cá, acentuou-se bastante. Um dos processos produtivos que mais se beneficiaram disso foi a irrigação e, juntamente a ela, outras práticas envolvidas, como a fertirrigação.

Sucintamente, a fertirrigação é a aplicação de fertilizantes químicos ou orgânicos via água de irrigação. Países como Estados Unidos, Grécia, Espanha, Holanda, Israel, Austrália e África do Sul, possuem grande parte de suas áreas irrigadas com o sistema de gotejamento, utilizando a fertirrigação. No Brasil, essa prática ainda é insipiente quando comparada com os países acima citados. Regiões como o Nordeste e o Sudeste brasileiro, por conterem os maiores pólos de horticultura e floricultura do país, utilizam mais efetivamente essa tecnologia. Entretanto, uma fertirrigação criteriosa ainda não é praticada em boa parte dessas regiões.

Em nosso país, a automação de sistemas de irrigação vem sendo implantada com maior intensidade nos últimos anos, principalmente em função do surgimento de técnicas apropriadas que vêm acompanhando a modernização crescente da agricultura e abertura do mercado brasileiro às importações, principalmente com relação à irrigação localizada, liderada por empresas americanas, israelenses e européias.

O uso de dispositivos eletrônicos no manejo da fertirrigação vem sendo implantado em países como Estados Unidos, Israel, Espanha, e outros, já há bastante tempo. No Brasil, essa tecnologia é ainda pouco difundida. A grande maioria dos controladores de fertirrigação existentes no mercado nacional é

importada, o que aumenta o custo de aquisição, além de dificultar a reposição de peças e o reparo dos instrumentos. Por outro lado, os produtores brasileiros são, em geral, bastante sensíveis às novas tecnologias; prova disso, são os crescentes aumentos na venda de equipamentos de irrigação mais modernos verificados nos últimos anos. Na verdade, o grande empecilho para a aquisição de novas tecnologias por parte dos produtores é o custo das mesmas.

O controle da fertirrigação pode ser dividido em vários níveis. Pode-se controlá-la usando desde um medidor de pH e de condutividade elétrica (CE) portáteis, até um sistema totalmente automático, no qual todo o processo é monitorado. Ao se avançar de um ponto a outro, aumenta-se o grau de complexidade, custo de implantação e manutenção, bem como a homogeneidade e precisão das aplicações.

Com o avanço da eletrônica, vários componentes foram desenvolvidos nos últimos anos, com custos mais acessíveis, facilidade de obtenção e, com isso, os diversos segmentos da produção puderam ter acesso a eles. Dentre esses componentes, destacam-se os microcontroladores, de grande utilidade na fertirrigação, pois podem receber sinais, ser programados para tomar decisões e atuar comandando desde a mistura dos fertilizantes até a injeção desses na linha de irrigação.

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo para monitoramento e controle da condutividade elétrica de soluções fertilizantes, para uso em fertirrigação, que seja composto por componentes nacionais e apresente um baixo custo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fertirrigação

As estatísticas mostram que, até o ano de 2025, a população mundial terá dobrado de tamanho. Essa informação, aliada à indisponibilidade de novas áreas de cultivo em boa parte do mundo, faz com que as populações invistam em tecnologias que proporcionem aumento de produtividade (Papadopoulos, 1999).

Dentro de um contexto moderno e seguro de agricultura, no qual se encontra o uso criterioso de produtos químicos, está inserida a fertirrigação. Segundo Villas Bôas et al. (2001), estima-se que, atualmente, a fertirrigação seja empregada em 100% da produção irrigada por gotejamento, em países como Estados Unidos, Espanha, Holanda, Austrália, África do Sul e Israel. Neste último, 75% de toda a produção agrícola são conduzidos sob essa tecnologia.

Em nosso país, essa técnica está ganhando cada vez mais espaço no sistema produtivo. De acordo com Villas Bôas et al. (2001), no Brasil, a fertirrigação vem sendo utilizada desde a região Nordeste, principalmente no cultivo do melão, até as produções de figo e pêssego na Campanha Gaúcha, passando pelos plantios de flores e citros na região Sudeste e tomate industrial e outras fruteiras na região Centro-Oeste.

A fertirrigação, como todo sistema de produção, apresenta vantagens e limitações. Como vantagens citam-se: capacidade de aumento da produtividade (Papadopoulos, 1999; San Juan, 1988); promove uma melhor qualidade do produto colhido (Papadopoulos, 1999); melhor eficiência na recuperação do fertilizante (Papadopoulos, 1999; Cabello, 1987; San Juan, 1988; Rolston et al., 1986; Hernandez, 1994); perdas mínimas de fertilizantes ocasionadas pela

lixiviação (Papadopoulos,1999; Cabello, 1987); controle da concentração de nutrientes na solução do solo (Papadopoulos, 1999; Cabello, 1987; Hernandez, 1994) e controle da forma e da taxa de variação das mesmas, principalmente dos fertilizantes nitrogenados. Além disso, promove uma maior flexibilidade na escolha da época de distribuição do fertilizante em relação à exigência da cultura, com base nos estádios de desenvolvimento fisiológico das mesmas (Papadopoulos, 1999; Cabello, 1987; Rolston et al., 1986; Hernandez, 1994; Bar-Yosef, 1999); reduz as flutuações da salinidade do solo causadas pelos fertilizantes, melhorando assim, as condições da solução do solo, especialmente para culturas sensíveis à salinidade (Papadopoulos, 1999; Bar-Yosef, 1999; com a fertirrigação, geralmente é possível proteger o solo e a água do excesso de fertilizantes, proporcionando maior sustentabilidade à agricultura (Papadopoulos (1999); Bar-Yosef (1999); redução da compactação do solo e dos danos mecânicos à cultura (Antunes et al. (2001); Rolston et al. (1986); Hernandez (1994); Bar-Yosef (1999) e possibilidade de utilização do sistema de aplicação de fertilizantes, para aplicação de inseticidas, fungicidas e herbicidas (Cabello (1987); Hernandez (1994).

As possíveis limitações podem ocorrer quando: há distribuição desigual de produtos químicos, ocasionada pelo inadequado dimensionamento ou operação do sistema de irrigação (Papadopoulos, 1999); na superfertilização, quando a irrigação não está baseada nas exigências reais de água (Papadopoulos, 1999); ocorrerem chuvas intensas na época da aplicação do fertilizante (Papadopoulos, 1999); ocorrerem reações químicas dos produtos no sistema de irrigação, provocando corrosão e obstruções (Papadopoulos (1999); Hernandez (1994); ocorrer precipitação de materiais químicos e/ou entupimento das saídas (Papadopoulos (1999); Pizarro (1987); Hernandez (1994). Além disso, o excesso de pureza dos fertilizantes utilizados na fertirrigação tem levado à deficiência de alguns nutrientes que, tidos como impurezas nos adubos tradicionais, eram

fornecidos com frequência às plantas, como exemplo, o enxofre (Cabello, 1987) e em instalações cuja fonte de água são poços subterrâneos, deve-se colocar válvulas de retenção e antivácuo, impedindo a inversão do fluxo na rede de irrigação, que poderia contaminar o lençol freático (Hernandez, 1994). Finalmente, a fertirrigação requer investimento inicial alto para aquisição do injetor de fertilizantes e instrumentos de segurança, como filtros, válvulas de retenção e medidores de condutividade elétrica e pH. Além disso, quando se trabalha com fertilizantes líquidos, deve-se levar em conta o custo de aquisição e manutenção do tanque de armazenamento (Bar-Yosef, 1999). A maioria desses problemas foi extensamente estudada e as soluções são viáveis.

A qualidade da água é fator preponderante, quando o assunto é fertirrigação. Segundo Gheyi et al. (1999), a qualidade da água para irrigação está relacionada a muitos fatores. Dentre eles, têm-se características do solo, tolerância das culturas à salinidade, condições climáticas locais e manejo de irrigação e drenagem. Na maioria das vezes, a água tem, na sua composição, os íons de sódio, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e bicarbonato, além de potássio e carbonato (Medeiros & Gheyi, 1994).

Deve o fertirrigante, por meio da análise da água, saber quais nutrientes estão presentes e sua concentração para, porventura, subtrair da quantidade que ele teria que aplicar na fertirrigação. Segundo Testezlaf & Matsura (1999) por estarem na forma de sais, os fertilizantes aplicados na água de irrigação aumentam a concentração salina inicial dessa água, aumentando, assim, a sua condutividade elétrica.

Segundo Cabello (1987), a água de irrigação, depois de ter recebido os fertilizantes, não deverá apresentar uma salinidade e/ou uma CE superior à tolerada pelos cultivos. Cada espécie de planta possui uma faixa tolerável de condutividade elétrica na zona radicular (Tabela 1); valores acima dessa faixa podem provocar diminuição acentuada na produtividade.

TABELA 1 - Tolerância de algumas culturas à salinidade e seus valores de salinidade limiar (A) e de diminuição de rendimento (B) por aumento unitário de condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) do solo.

Cultura	Valor		Toler. ³	Cultura	Valor		Toler. ³
	A ¹	B ²			A ¹	B ²	
EXTENSIVAS				EXTENSIVAS			
Algodoeiro	7,7	5,2	T	Cevada	8,0	5,0	T
Amendoim	3,2	29,4	MS	Feijão fava	1,5	9,5	MS
Arroz	3,3	13,0	MS	Feijoeiro comum	1,0	18,9	S
Beterraba açúcar.	7,0	5,9	T	Milho	1,7	12,0	MS
Cana-de-açúcar	1,7	5,8	MS	Soja	5,0	20,0	MT
Caupi	4,9	12,0	MT	Sorgo	6,8	16,1	MT
HORTALIÇAS				HORTALIÇAS			
Abobrinha italian.	4,7	9,4	MT	Alface	1,3	13,0	MS
Aspargo	4,1	2,0	T	Rabanete	1,2	13,0	MS
Beterraba	4,0	9,1	MT	Cebola	1,2	16,1	S
Abobrinha	3,2	16,1	MS	Berinjela	1,1	6,9	MS
Alho	3,0	17,0	S	Cenoura	1,0	14,1	S
Brócolis	2,8	9,2	MS	Feijão-vagem	1,0	18,9	S
Tomateiro	2,5	9,5	MS	Nabo	0,9	9,0	MS
Pepino	2,5	13,0	MS	Espinafre	2,0	7,6	MS
Aipo	1,8	6,2	MS	Repolho	1,8	9,8	MS
Batata	1,7	12,0	MS	Milho doce	1,7	12,0	MS
Batata-doce	1,5	10,5	MS	Pimentão	1,5	14,1	MS
FRUTÍFERAS				FRUTÍFERAS			
Guayule	15,0	13,0	T	Tamareira	4,0	3,6	T
Pomelo	1,8	16,0	S	Laranja	1,7	15,9	S
Pessegueiro	1,7	21,0	S	Damasqueiro	1,6	24,0	S
Videira	1,5	9,5	MS	Amendoeira	1,5	19,0	S
Ameixeira	1,5	18,0	S	Amoreira preta	1,5	22,2	S
Amoreira	1,5	22,0	S	Morangueiro	1,0	33,0	S
FORRAGEIRAS				FORRAGEIRAS			
Capim Bermuda	6,9	6,4	T	Cevada forrageir.	6,0	7,1	MT
Sesbânia	2,3	7,0	MS	Alfafa	2,0	7,3	MS
Capim mimoso	2,0	8,4	MS	Festuca alta	3,9	6,2	MT
Capim Sudão	2,8	4,3	MT	Caupi forrageiro	2,5	11,0	MS

Fonte: Adaptado de Gheyi et al. (1999).

¹A = Salinidade limiar (dS m⁻¹);

²B = Redução da produção relativa (%) por aumento unitário da salinidade do solo acima da salinidade limiar;

³Tolerância, S = Sensível, MS = Moderadamente sensível, MT = Moderadamente tolerante e T = Tolerante.

De acordo com Richards (1954), valores de condutividade elétrica na água de irrigação de 1,44 e 2,88 dS m⁻¹, implementam uma moderada e uma alta salinidade, respectivamente.

Frey (1981), citado por Feitosa Filho (1990) e San Juan (1988), afirma que a adubação pelos métodos tradicionais tem uma eficiência muito baixa, não ultrapassando os 50%, em função, principalmente, da má distribuição dos adubos no solo e das perdas por lixiviação.

De acordo com Burt (2003), quando a fertirrigação é realizada de maneira criteriosa, reduções nas dosagens de fertilizantes podem ser conseguidas. Essa diminuição pode ser de até 25%, sem afetar o desenvolvimento e, conseqüentemente, a produtividade das culturas.

Feitosa Filho et al. (2001), objetivando avaliar o efeito da redução de 25% e 50% das doses de N e K, aplicadas via fertirrigação em relação às doses recomendadas para adubação convencional na cultura da bananeira, observou que reduções nas doses de nitrogênio e potássio de até 50% não influenciaram os níveis de N, P e K e relação N/K nas folhas, nem no peso e qualidade dos frutos.

A fertirrigação pode promover aumentos de produtividade nas culturas e qualidade nos produtos colhidos, o que pode compensar o investimento inicial na aquisição dos equipamentos usados para aplicação dos fertilizantes. Além disso, com a redução das quantidades de fertilizantes aplicadas, o produtor terá sua renda líquida aumentada e o meio ambiente sofrerá menor impacto.

2.2 Eletrônica e automação

Nos últimos anos, a agricultura brasileira tem se modernizado rapidamente, principalmente no que se refere ao uso de dispositivos e sistemas automatizados de produção. Diestefano et al. (1972) definem o termo sistema como sendo uma disposição de componentes físicos, conectados ou relacionados

de tal maneira a informar e/ou a atuar como um todo. Assim, o autor define um sistema de controle como sendo uma disposição de componentes físicos, conectados ou relacionados de tal maneira a comandar, dirigir ou regular a si mesmos ou a outros sistemas.

Usualmente, os sistemas de controle são divididos em duas categorias: sistemas de controle em malha aberta e sistema de controle em malha fechada. De acordo com Testezlaf & Matsura (2001), o sistema de controle em malha aberta possui basicamente dois elementos: a central de controle, que geralmente é um controlador do tipo “timer” ou programador, e o atuador, que será acionado a distância, como, por exemplo, um relê que comanda a bomba dosadora de fertilizante. Já o sistema de controle em malha fechada requer, além dos equipamentos necessários ao sistema de malha aberta, sensores que fornecerão informações do processo ao controlador, permitindo, então, que este seja capaz de tomar uma decisão automaticamente.

Nos últimos anos, a evolução do controle de processos foi marcada pela introdução da instrumentação digital que proporcionou a utilização de ferramentas, como: computadores, microprocessadores, controladores lógico programáveis (CLP) e outros. Os computadores digitais foram usados para controle de processos na década de 1960. Devido ao alto custo na época, era preciso colocar o maior número possível de malhas sob controle, para justificar o investimento. Naquela época, foram desenvolvidos os primeiros projetos de controle digital direto. Devido à complexidade do hardware e às ferramentas ainda incipientes de software, questionava-se a ampla aplicação da tecnologia no controle de processos (Silva Neto, citado por Machado, 2000).

Os problemas envolvendo a utilização de controle por computador começaram a ser solucionados com o advento dos microprocessadores na década de 1970, cujo impacto mais imediato foi a brutal redução do custo dos equipamentos. O aproveitamento desses dispositivos foi tão intenso que se

seguiu uma extraordinária revolução técnica, hoje permitindo sua utilização no controle de processos, segundo diferentes topologias (Machado, 2000).

De maneira geral, os sistemas de controle estão baseados em circuitos eletrônicos analógicos ou digitais, sendo neste último necessário utilizar processadores. De acordo com Bento (1989), os sistemas baseados em processadores, além de exigir um periférico (hardware), necessita também de um aplicativo computacional (software) para dar funcionalidade às tarefas. Ainda segundo o autor, este sistema pode ser comandado por microprocessadores dedicados ou usar microcomputadores pessoais.

Os microcontroladores ou microprocessadores ou “ μ C” são conhecidos como computadores embutidos em circuito integrado. Em um microcontrolador podem ser encontradas memória, CPU, entradas e saídas. Alguns ainda possuem periféricos, como conversores A/D e D/A, comparadores, etc. (Angnes, 2003).

Há, à venda, diversos tipos de microcontroladores ou microprocessadores dedicados, diferenciando basicamente na linguagem de programação e na capacidade de trabalho. Angnes (2003) relata alguns com seus respectivos fabricantes: microcontroladores da família 8051 – fabricante Intel; PIC – fabricante Microchip; AVR – fabricante Atmel; BASIC Stamp – fabricante Parallax e Basic Step – fabricante Tato Equipamentos Eletrônicos Ltda.

O microcontrolador Basic Step 1, pertencente à linha Basic Step, é programado pelas linguagens Tbasic (português) ou Pbasic (inglês), ambas de alto nível. Elas são uma variação da conhecida BASIC, portanto, mais simples que as linguagens de baixo nível Assembly e C.

Segundo Angnes (2003), o Basic Step 1 trabalha com um microcontrolador PIC16F628 e, numa única placa, engloba esse dispositivo, uma memória com o interpretador PBASIC e um regulador de tensão. Possui oito portas configuráveis para entrada ou saída e pode ser alimentado com tensão

de 7,5 a 15V, além de fornecer uma saída com tensão regulada de 5V. É programável diretamente pela porta serial do computador, por um cabo simples, por isso, não precisa de programadores caros ou difíceis de construir.

Já se encontram na literatura voltada para a área agrícola, particularmente ligada à irrigação, alguns trabalhos relatando o uso desses dispositivos funcionando como gerenciadores de processos.

Vilela (2002) desenvolveu um protótipo de um sistema de pulverização acoplável a pivô central, a partir do microcontrolador Basic Step 1, no qual a aplicação de defensivos agrícolas ocorre de maneira intermitente. O autor relata, dentre outras vantagens deste modelo de microcontrolador, o baixo custo e a facilidade de programação.

Utilizando o mesmo microcontrolador, Vilela et al. (2002) e Vilela et al. (2003) desenvolveram um dispositivo para monitoramento da operação de conjuntos motobomba elétricos e um manômetro digital microprocessado, respectivamente, ambos de baixo custo. O primeiro tem a função de monitorar a presença de água acima do nível mínimo do reservatório de captação, no interior da linha de sucção, além da presença das fases elétricas para alimentação do motor. Na ocorrência de qualquer tipo de falha, o motor é desligado e uma mensagem referente ao problema é exibida em um visor de cristal líquido.

Zerezuela & Oki (2003) desenvolveram um sistema de transmissão e um software para aquisição de dados de uma estação meteorológica experimental em tempo real. Os autores utilizaram um microcontrolador da família 8051 para coleta e armazenamento das informações climáticas.

Os sistemas automáticos necessitam de uma central de controle que tem a missão de comandar todo o processo, por meio de um software gerenciador. De acordo com Souza (2001), uma central de controle de fácil acesso e de baixo custo é o próprio computador pessoal. Computadores que são considerados obsoletos para as várias atividades de escritório e/ou residências podem ser

usados com alta eficiência no controle da fertirrigação, bem como em outras aplicações.

Objetivando estudar o estado e o crescimento de plantas em vaso, por meio do monitoramento dos fatores ambientais, Kacira & Ling (2001) desenvolveram um sistema que, por meio de um computador pessoal, monitorava e coletava dados pelo sensor de infravermelho, câmera fotográfica monocromática, TDR, micro-lisímetros, umidade relativa do ar, velocidade do vento e, ainda, controlava a irrigação e a fertirrigação das plantas.

Quando se desenvolve um hardware e o mesmo será controlado por um microcontrolador ou computador, há a necessidade, para que esse controle seja possível, da utilização dos conversores analógicos digitais. De acordo com Braga (1996), citado por Vilela et al. (2001), os computadores e muitos circuitos (como os microprocessadores) que operam dados obtidos de sensores operam exclusivamente com sinais digitais. Assim, se a saída de um sensor apresentar sinais analógicos e precisar transferir este sinal para um circuito digital, como de um computador ou microcontrolador, será necessário “convertê-lo” por meio de um dispositivo denominado conversor analógico digital, ou simplesmente conversor A/D.

Atualmente, são encontrados no mercado nacional diversos tipos de hardware, diferenciando-se basicamente na finalidade de uso e, com isso, no grau de complexidade e no preço. Segundo Crestana et al. (1998), a manutenção desses equipamentos é uma tarefa complicada, sendo alguns equipamentos considerados verdadeiras “caixas pretas”, necessitando de mão-de-obra altamente especializada quando algum reparo for exigido.

Com o objetivo de desenvolver equipamentos de menor custo, cuja manutenção se torna facilitada em razão de se conhecer totalmente o projeto do dispositivo e os componentes eletrônicos empregados, alguns pesquisadores têm optado por construir seus próprios aparelhos (Vilela et al., 2001).

Machado (2000), trabalhando com automação de hidroponia, projetou dispositivos eletrônicos para controle de fatores ambientais e qualidade da solução nutritiva. O autor desenvolveu um sensor para controle da condutividade elétrica e um sensor para monitoramento da temperatura. Os valores de condutividade elétrica (CE) eram corrigidos, em função da temperatura, pelo programa gerenciador, por meio de um fator de correção gerado pelo autor no processo de calibração do sensor de condutividade elétrica.

Testezlaf & Matsura (2001) apresentaram o projeto de um sistema de controle de malha fechada, no qual o sensor de CE fornece ao controlador os valores desta variável ao longo do período de irrigação e este, por sua vez, atua sobre um inversor de frequência que controla a rotação da bomba centrífuga, aumentando ou reduzindo a vazão de aplicação do fertilizante, ou seja, modificando a concentração do mesmo em função da variação da vazão total do sistema.

Segundo Figueredo Júnior et al. (2003), com a tecnologia disponível atualmente, é possível automatizar praticamente todo o sistema de irrigação, desde o acionamento de bombas, válvulas de campo, injeção de fertilizantes (fertirrigação), retrolavagem de filtros, até a impressão de relatórios de operação do sistema, dentre muitas outras possibilidades.

Com isso, observa-se que a automação de sistemas agrícolas, em particular da irrigação e fertirrigação, é uma tendência que apresenta tecnologias dos mais diversos tipos e a adoção de alguma por parte do produtor vai depender do nível tecnológico ao qual se encontra, bem como da capacidade de investimento do mesmo.

2.3 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma propriedade característica de diversos materiais. Alguns são considerados excelentes condutores, como o ouro, o cobre e a platina. Outros, como o plástico e o vidro, literalmente não conduzem corrente elétrica e, por isso, são chamados isolantes.

Cienfuegos & Vaitsman (2000) classificam os condutores elétricos em duas classes: os de primeira e os de segunda classe, dependendo da natureza de seus materiais constituintes. Os de primeira classe abrangem diferentes metais, ligas e óxidos metálicos. Nesses materiais, que são bons condutores, a condução elétrica é feita através dos elétrons de valência, sem provocar alterações de suas propriedades físicas. A resistência elétrica dos condutores desta classe aumenta com o aumento da temperatura, porque os elétrons encontram maior dificuldade em atravessar o condutor em agitação térmica. Já os de segunda classe são representados pelas soluções eletrolíticas, nas quais o movimento iônico para os pólos respectivos de uma pilha assegura a condução da corrente, ocorrendo transferência de massa. Os íons movem-se mais lentamente, com menor condutividade do que nos condutores de primeira classe. Ao contrário dos condutores metálicos, a resistência elétrica das soluções eletrolíticas diminui com o aumento da temperatura. Segundo Cienfuegos & Vaitsman (2000), isso ocorre porque esse efeito torna a solução menos viscosa e diminui a solvatação, permitindo que os íons se movimentem com maior velocidade.

A água pura é composta por átomos de hidrogênio e oxigênio unidos por ligações covalentes muito estáveis. Segundo Gheyi et al. (1999), a água é má condutora de eletricidade, já que a 25°C, apenas uma molécula em dez milhões se dissocia em íons OH^- e H^+ .

Já as soluções eletrolíticas, como as soluções fertilizantes, são capazes de conduzir corrente elétrica pela migração de íons sob a influência de um campo elétrico, produzindo, porém, um aumento de temperatura.

Os primeiros estudos da condutividade de soluções foram realizados com correntes contínuas elevadas. A ação eletroquímica resultante causava resultados erráticos, devido à polarização dos eletrodos da célula de condutividade. Esses problemas foram vencidos mediante o uso de frequências alternadas na região de áudio (1000 a 4000 Hz) (Ewing, 1972).

Considerando-se um condutor elétrico metálico de comprimento L e seção S (Figura 1), fazendo parte de um circuito elétrico e aplicando-se a lei de Ohm, tem-se a expressão:

$$V = R \times i \quad (1)$$

Em que:

V = tensão aplicada ao condutor (v);

R = resistência do condutor (ohm) e;

i = intensidade da corrente elétrica que percorre o circuito (A).

A resistência pode ser expressa em função de suas dimensões L e S e de uma propriedade do material do condutor, a resistência específica ou resistividade, representada por " ρ " (Figura 2) (Rodella, 1990; Pizarro, 1985):

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (2)$$

Em que:

ρ = resistência específica ou resistividade do material (ohm m);

20

L = comprimento do condutor (m) e;
 S = seção transversal do condutor (m^2).

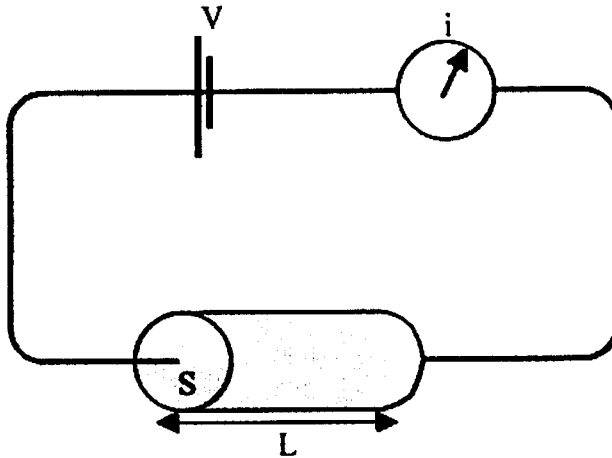


FIGURA 1 – Circuito equivalente de um condutor metálico de seção S e comprimento L .

Quanto maior o comprimento do condutor, maior é a dificuldade para o caminhamento dos elétrons. Do mesmo modo, quanto maior a seção do condutor, mais fácil é o caminhamento dos elétrons.

Segundo Cienfuegos & Vaitsman (2000) e Rodella (1990), de modo análogo, pode-se definir condutância, como o inverso da resistência para exprimir a capacidade de um condutor em conduzir corrente elétrica e também a condutância específica ou a condutividade do condutor, por meio das expressões:

$$C = \frac{1}{R} \tag{3}$$

$$c = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

Em que:

C = condutância (S) e;

c = condutividade do condutor ou condutância específica ($S m^{-1}$).

De modo que:

$$c = C \cdot \frac{L}{S} \quad (5)$$

Quando se trabalha com soluções, não existe um condutor sólido. Por isso, mede-se a resistência à movimentação de elétrons promovida por um volume de solução, compreendido entre as placas paralelas de um eletrodo (Figura 2) (Rodella, 1990).

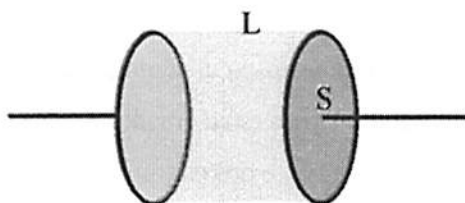


FIGURA 2 – Ilustração de duas placas de platina dispostas paralelamente.

O aparelho denominado condutivímetro mede a resistência do segmento de solução, cujo volume é definido pelo sensor, que é a célula de medida desse aparelho. Esse equipamento consiste essencialmente de uma ponte de Wheatstone, do tipo corrente alternada, apropriada para medidas de condutividade (Rodella, 1990).

Na verdade, não se está interessado nas características desse segmento de solução, mas sim na condutividade ou condutância específica, que é característica da solução que está sendo avaliada. A resistência da solução fornece o valor da condutância, que será utilizado para calcular a condutividade elétrica por meio da Equação 5.

Segundo Rodella (1990), o quociente L/S é um valor constante, característico do eletrodo ou célula de leitura empregada e denominada constante de célula, portanto:

$$c = C.\theta \tag{6}$$

Em que:

θ = constante de célula (m^{-1}).

A unidade de resistência é o ohm e a de condutância é o Siemens (S). Empregam-se comumente submúltiplos, como miliohm, miliSiemens (mS) e deciSiemens (dS). Não são mais utilizados símbolos como Ω , equivalente a ohm para resistência, ou mho, equivalente a Siemens, para condutividade elétrica. A unidade mais comum para constante de célula é o cm^{-1} , mas m^{-1} é preferível para atender ao SI. A condutividade elétrica pode ser expressa em unidades como: $\mu S cm^{-1}$ ou $dS m^{-1}$ (o mesmo que $mS cm^{-1}$) (Rodella, 1990).

Modelos mais antigos de condutivímetro fornecem a leitura de resistência ou condutância da solução que preenche uma determinada célula, de constante θ conhecida, cabendo ao operador calcular a condutividade elétrica da amostra. Segundo Rodella (1990), em aparelhos modernos, a solução padrão de KCl é lida numa etapa inicial de calibração e, em seguida, durante a leitura das amostras, se lê diretamente na escala do aparelho a condutividade elétrica das mesmas.

A condutividade elétrica é proporcional, embora em relação não linear, à concentração iônica de uma solução, pois, quanto maior a quantidade de íons na solução, maior o número de unidades condutoras de eletricidade.

Soluções de NaCl e de KCl de mesma concentração molar têm o mesmo número de íons por unidade de volume, mas as condutividades elétricas são diferentes. Isso ocorre porque o íon potássio tem maior habilidade em conduzir a corrente elétrica do que o sódio, por ter maior mobilidade. Por outro lado, soluções de CaCl₂ têm, obrigatoriamente, maior condutividade elétrica do que soluções de NaCl e de KCl de igual concentração molar, pois apresentam maior número de íon por unidade de volume (Rodella, 1990).

Segundo Rodella (1990), normalmente, a constante de uma célula não é determinada ou aferida diretamente, a partir da área e da distância entre seus eletrodos. Para tanto, utiliza-se uma solução padrão de KCl, da qual se conhece a condutividade elétrica.

A escolha do valor da constante de célula é feita em função da concentração iônica da solução a ser analisada. Soluções com baixa concentração de eletrólitos apresentarão baixos valores de condutância e para se obter valores mais confiáveis desse parâmetro, serão mais adequadas células com baixos valores de constante de célula, ou seja, placas de área relativamente grande, separadas por uma pequena distância. Por outro lado, soluções concentradas exigirão células com elevado valor de constante de célula (Rodella, 1990).

É muito importante observar que a condutividade elétrica não é uma medida específica, pois reflete a contribuição de todos os íons presentes, em função da concentração e das características de cada um deles. Apenas quando um dos íons em uma solução aquosa está presente em concentração bem maior que os demais, a condutividade elétrica pode servir como forma de estimativa da

concentração desse elemento na solução, (Cienfuegos & Vaitsman, 2000; Rodella (1990) e Resh (1987) citado por Machado, 2000).

2.4 Aspectos construtivos dos medidores de condutividade elétrica comerciais

O material usado para a construção da célula não pode ser afetado pelos eletrólitos em solução e não pode absorver nada de líquido em processo. Muitos materiais estão disponíveis para várias faixas de pressão, temperatura e tipos de fluido. O corpo pode ser feito de vidro, resina de epoxy, plásticos, como PTFE (politetrafluoretileno), PVC (polipropileno de vinila) ou outros materiais para esta aplicação, desde que não sofra deformação com a temperatura ou pressão, pois a constante da célula poderá ser alterada. Os eletrodos podem ser placas paralelas, anéis ou barras de metal ou grafite (Jones, 1985, citado por Machado, 2000).

A precisão e a confiabilidade do funcionamento do sensor de condutividade elétrica estão diretamente relacionadas ao tipo e ao tempo de contato que ocorre entre a célula sensora e a solução. Existem diferentes formas de instalação do sensor no sistema. Geralmente, ele é instalado em uma tubulação conectada em paralelo à linha de recalque e a sua disposição na linha depende do tipo de célula medidora. Alguns são instalados na posição vertical sobre a linha paralela "by-pass". Diferentes tipos de sensores de condutividade elétrica são utilizados no controle da fertirrigação, sendo, na maioria, produtos importados (Testezlaf & Matsura, 1999).

As Tabelas 2 e 3 relacionam algumas características construtivas de sensores de condutividade elétrica construídos por uma empresa brasileira e uma israelense.

TABELA 2 – Características do sensor comercializado pela empresa Fascitec – Instrumentação e Eletrônica Ltda (Brasil).

Detalhes construtivos	Características
Material do corpo	PVC com eletrodos de aço inox
Constante da célula	Não informado
Intervalo de temperatura	13 a 40°C
Precisão	+/- 0,25%
Compensação de temperatura	Termistor interno NTC

Fonte: Adaptado de Testezlaf & Matsura (1999).

TABELA 3 – Características do sensor comercializado pela empresa Eldar Shany Technologies (Israel).

Detalhes construtivos	Características
Material do corpo	Epoxy 12 mm
Constante da célula	$\theta = 1,0 \pm 10\%$
Intervalo de temperatura	0 a 50°C
Precisão	+/- 0,2%
Compensação de temperatura	Termistor interno 10 kOhm NTC

Fonte: Adaptado de Testezlaf & Matsura (1999).

Quanto ao tipo de instrumentação usada, ela pode ser do tipo que mede a condutância diretamente da célula, ou do tipo que usa uma ponte de Wheatstone. No primeiro, a corrente, ou a tensão, é proporcional à condutância e, dessa forma, o sinal de saída do amplificador pode ser aplicado a um indicador de medida. No método que usa uma ponte de Wheatstone, a condutância da célula é medida pelo autobalanceamento da ponte (Machado, 2000).

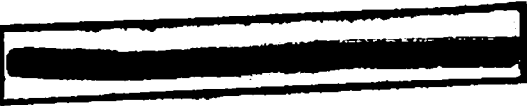
2.5 Efeito da temperatura na medida da condutividade elétrica

A medida da condutividade elétrica de soluções de eletrólitos sofre forte efeito da temperatura, aumentando, em média, 1,9% para cada grau Celsius de aumento de temperatura, (Rodella, 1990). Cienfuegos & Vaitsman (2000) afirmam que o aumento varia de 1% a 2%. Jones (1985), citado por Machado (2000), afirma que a condutividade elétrica aumenta aproximadamente em 2% para cada grau Kelvin de aumento da temperatura.

Como cada íon tem seu coeficiente de temperatura característico, o melhor é padronizar uma temperatura para se efetuar as medidas, usualmente 25°C (Rodella, 1990; Cienfuegos & Vaitsman, 2000; Pizarro, 1985 e Machado, 2000).

Os condutivímetros podem operar com um sensor de temperatura que promove correção automática para 25°C por meio de um fator de correção sobre a leitura obtida em temperatura ambiente. Segundo Machado (2000), alguns condutivímetros comerciais usam um resistor para fazer a compensação da temperatura. Nesse caso, o termistor, ou termo-resistor, nada mais é do que um sensor que apresenta uma brusca variação na resistência elétrica com o aumento da temperatura. Esta variação pode ser positiva ou negativa, dependendo do material semicondutor envolvido. Quando a variação é negativa, o termistor é conhecido como NTC (Negative Thermal Coefficient) e quando é positiva PTC (Positive Thermal Coefficient). O termo-resistor baseia-se no princípio de que um metal tem de variar sua resistência com a temperatura. O metal mais utilizado é a platina.

Como as leituras podem ser feitas em outras temperaturas, alguns autores indicam a multiplicação do valor lido por um fator de correção, que é proporcional a cada temperatura.


Campbell & Richards (1949), citados por Machado (2000) e Pizarro (1985), indicam que, para a correção da condutividade elétrica a 25°C, deve ser aplicada a Equação 7.

$$CE_{25} = CE.F_t \quad (7)$$

Em que:

CE_{25} = condutividade elétrica a 25°C ($\mu\text{S m}^{-1}$);

CE = condutividade elétrica atual ($\mu\text{S m}^{-1}$) e;

F_t = fator de correção da temperatura (adimensional).

Pizarro (1985) disponibiliza uma tabela genérica com valores de fatores de correção em função da temperatura. Simões et al. (2003) determinaram o fator de correção da temperatura para três sais e compararam o resultado com os dados da tabela proposta por Pizarro (1985). Os resultados de F_t foram semelhantes para os valores medidos e os estimados pela tabela de Pizarro. Os autores concluíram que, apesar da pequena discrepância, a tabela pode ser utilizada, de acordo, é claro, com o grau de exatidão que se deseja obter.

Machado (2000) confrontou valores de fator de correção da temperatura medidos em sua pesquisa com valores de F_t tabelados propostos por Campbell (1949). Houve grande discrepância entre os dois métodos. O autor atribuiu essa diferença ao método de determinação usado por Campbell, que pode ter utilizado um tipo específico de aparelho ou um tipo específico de célula de condutividade elétrica, já que a pesquisa data de 1949.

Dessa forma, quando se necessita obter uma boa precisão nas leituras de CE, como na calibração de um protótipo, o melhor caminho é obter um fator de correção específico para as condições de célula de condutividade e aparelho usados, bem como para a faixa de temperatura na qual será empregado.

2.6 Aferição das leituras de condutividade elétrica

As únicas soluções cujas condutividades são conhecidas com precisão suficiente para serem usadas como referência são aquelas à base de cloreto de potássio (KCl). Este sal deve ser de alta pureza (formulações PA ou puro para análise) e seco a 120°C. As soluções devem ser preparadas com água deionizada com condutividade inferior a 2 $\mu\text{S cm}^{-1}$, a 25°C. As soluções de referência mais precisas são preparadas com pesagens (Machado, 2000).

Rodella (1990) afirma, como exemplo, que uma solução 0,01 mol L⁻¹ de KCl (7,456 g L⁻¹) deve apresentar uma condutividade de 1423 $\mu\text{S cm}^{-1}$ a 25°C.

Cienfuegos & Vaitsman (2000) apresentam alguns valores que destoam do apresentado por Rodella (1990), como apresentado na Tabela 4.

TABELA 4 – Condutividade elétrica de soluções de cloreto de potássio.

KCl (N) ¹	Condutividade elétrica em função da temperatura ($\mu\text{S cm}^{-1}$)				
	0°C	10°C	18°C	20°C	25°C
1	65410	93190	98220	102070	111800
0,1	7150	9330	11190	11670	12880
0,01 ²	776	1020	1225	1278	1413

Fonte: Adaptado de Cienfuegos & Vaitsman (2000).

¹ = Soluções de cloreto de potássio em Normal;

² = Equivalente ao apresentado por Rodella (1990).

Essa discrepância pode ser atribuída ao método de determinação, bem como ao aparelho utilizado na leitura. De qualquer forma, os dois valores são bastante próximos, não importando qual deles seja adotado nas aferições.

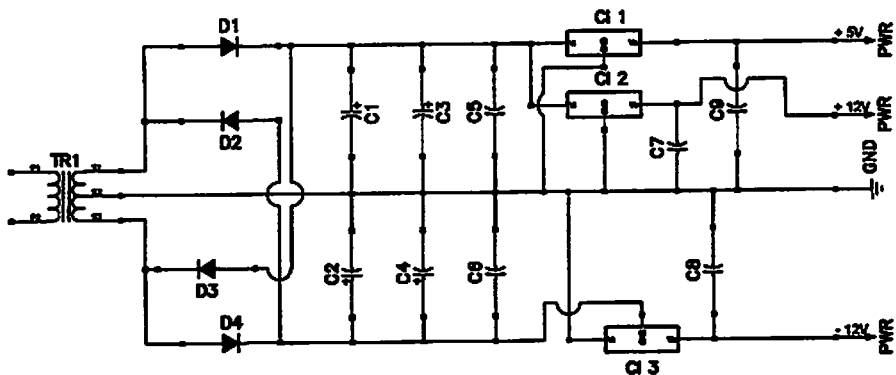
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local de desenvolvimento do protótipo

O protótipo foi desenvolvido e avaliado no Laboratório de Hidráulica, pertencente ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras.

3.2 Desenvolvimento da fonte de alimentação

O circuito da fonte de alimentação é apresentado na Figura 3.



TR1: transformador 127/12+12Vca x 500mA

C1 e C2: capacitor eletrolítico 1000 μ F/25V

C3 e C4: capacitor eletrolítico 100 μ F/16V

C5 e C6: capacitor eletrolítico 0,1 μ F/16V

C7 a C9: capacitor eletrolítico 22 μ F/16V

D1 a D4: diodo 1N4007

CI 1: regulador de tensão LM7805

CI 2: regulador de tensão LM7812

CI 3: regulador de tensão LM7912

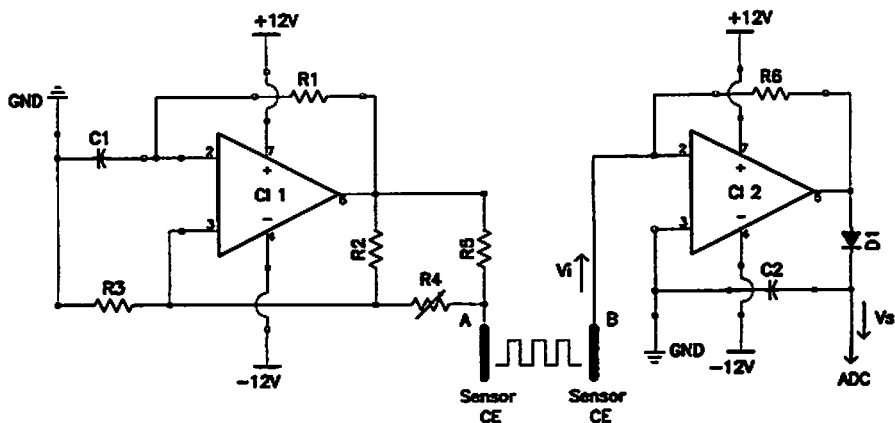
FIGURA 3 – Diagrama eletrônico da fonte de alimentação simétrica de dois níveis de tensão.

O presente circuito foi desenvolvido com base no modelo proposto por Braga (1999). Com o objetivo de se obter tensões reguladas de +5 Vcc, +12 Vcc e -12 Vcc, foram acrescentados ao modelo os reguladores de tensão CI 1, CI 2 e CI 3. Os capacitores C5, C6, C7, C8 e C9 foram introduzidos por recomendação de National... (2000a), visando dar maior estabilidade à tensão de saída do regulador.

3.3 Desenvolvimento do circuito eletrônico e do sensor de condutividade elétrica

3.3.1 Circuito eletrônico do sensor de condutividade elétrica

O referido circuito (Figura 4) foi desenvolvido de acordo com o modelo proposto por Machado (2000).



R1 e R2: resistor 100k Ω 1/8W \pm 5%

R3 e R6: resistor 10k Ω 1/8W \pm 5%

R4: resistor variável 25 voltas 10k Ω 1/8W \pm 5%

R5: resistor 100 Ω 1/8W \pm 5%

C1: capacitor cerâmico 10nF/16V

C2: capacitor cerâmico 47nF/16V

D1: diodo 1N4007

CI 1 e CI 2: amplificador operacional LM741

FIGURA 4 – Diagrama eletrônico do medidor de condutividade elétrica.

A primeira parte do circuito, representada por CI 1, funciona como um gerador de onda quadrada, a uma frequência de 2,57 kHz.

A segunda parte do circuito, indicada por CI 2, tem a função de captar e amplificar o sinal produzido pela primeira, proporcionando um ganho de 100 vezes. Além disso, a corrente gerada é retificada por D1, passando novamente para contínua. O resistor variável R4 é usado para ajustar a faixa de trabalho do protótipo e o valor de calibração. A tensão V_s é proporcional à condutividade elétrica do meio, representado pelo intervalo dos pontos A e B, pois, V_i depende da condutividade e $V_s \approx 100V_i$.

3.3.2 Sensor de condutividade elétrica

O sensor de condutividade elétrica foi desenvolvido mediante modelo descrito por Machado (2000), apresentando, porém, alterações nos eletrodos, conforme apresentado na Figura 5.

Foram usados eletrodos em aço inox, com medidas de 2,45 mm de diâmetro e 30,0 mm de comprimento, sendo que a parte em contato com a solução apresenta um comprimento de 10,0 mm. A distância entre eles é de 8,85 mm (medida de centro a centro do eletrodo) e cada um apresenta uma área de $4,71435 \text{ mm}^2$.

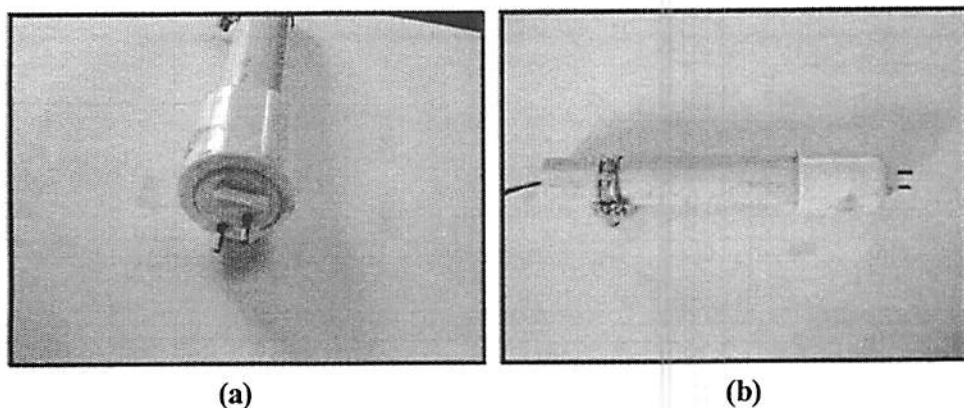
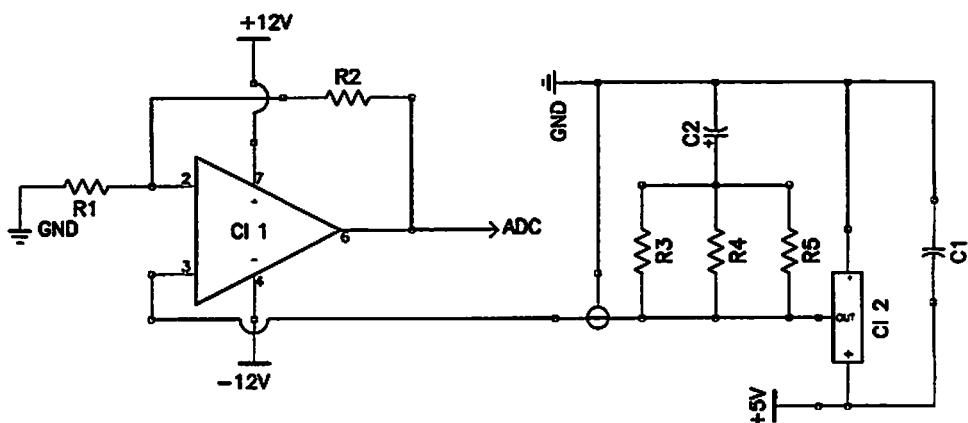


FIGURA 5 – Fotos do sensor de condutividade elétrica: (a) = Detalhe dos eletrodos de aço inox; (b) = Ilustração de todo o sensor.

A constante da célula foi determinada, segundo metodologia proposta por Rodella (1990), mergulhando-se o sensor em solução contendo $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ($7,456 \text{ g L}^{-1}$) de KCl, cuja condutividade elétrica era conhecida e de $1423 \text{ } \mu\text{S cm}^{-1}$. Em seguida, com auxílio de um multímetro digital, foi determinada a resistência elétrica da solução. Com este valor pôde-se determinar a condutância da solução de KCl, por meio da Equação 3. Com o valor da condutância e da condutividade elétrica, determinou-se, mediante a Equação 6, a constante da célula.

3.4 Montagem do circuito medidor de temperatura

O sensor de temperatura empregado foi o LM35 (National ..., 2000b), com corpo de plástico e apresentando uma faixa de medida de -40 a $+110^\circ\text{C}$. O fabricante também recomenda a montagem de um circuito eletrônico auxiliar, para se obter o sinal de leitura do sensor de temperatura (Figura 6).



CI 1: amplificador operacional CA3140

CI 2: sensor de temperatura LM35

C1: capacitor eletrolítico 0,1μF/16V

C2: capacitor eletrolítico 1μF/16V

R1: resistor 10kΩ 1/8W ±5%

R2: resistor 100kΩ 1/8W ±5%

R3 e R4: resistor 200Ω 1/8W ±5%

R5: resistor 301Ω 1/8W ±5%

FIGURA 6 – Diagrama eletrônico auxiliar do sensor de temperatura.

O fabricante sugere um resistor de 75 ohms no sinal de saída de CI 2, porém, não foi encontrado um resistor com essa característica. Assim sendo, foi utilizado um esquema de resistores em paralelo, representados por R3, R4 e R5, que atendeu perfeitamente à recomendação do fabricante.

O ganho de amplificadores operacionais montados no esquema de laço fechado (closed loop), como no mostrado na Figura 6, é determinado pela Equação 8.

$$ganho = \frac{R1 + R2}{R1} \quad (8)$$

Em que:

ganho = aumento da tensão de saída, obtido pelo amplificador operacional (V);

R1 e R2 = resistores (ohm).

Visando protegê-lo do contato com a água, e com isso garantir seu perfeito funcionamento, o LM35 foi introduzido dentro de um tubo de vidro (parte de uma pipeta), com dimensões de 9,0 cm de comprimento, 0,66 cm de diâmetro interno e 1,04 cm de diâmetro externo. Dentro desse tubo foi colocada pasta térmica (a mesma usada entre o cooler e o processador em PCs), com intuito de melhorar as trocas de calor e, imerso nela, foi inserido o sensor. Para transmissão do sinal do sensor até o circuito eletrônico, foi utilizado cabo RGC059 tripolar de 75 ohms. A Figura 7 ilustra o conjunto sensor já montado e o cabo coaxial utilizado.

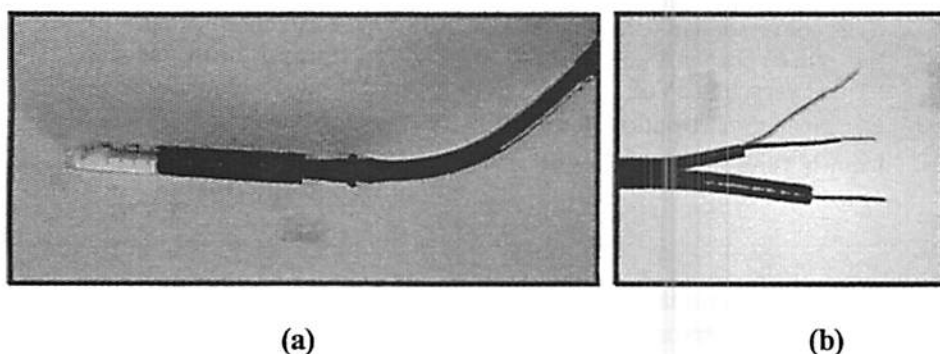
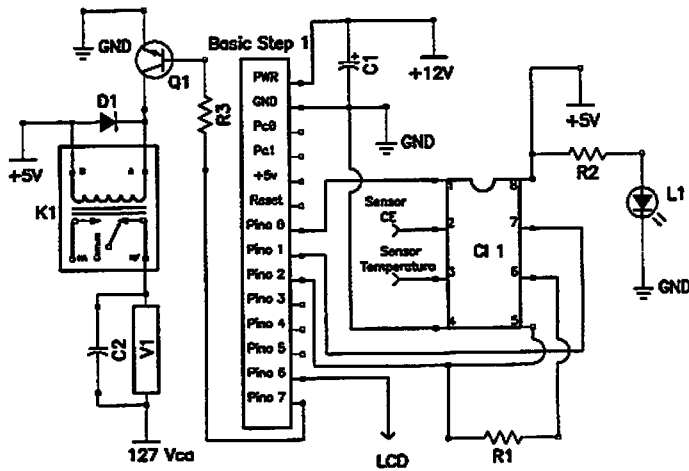


FIGURA 7 – (a) = Detalhe do conjunto sensor de temperatura; (b) = Detalhe do cabo coaxial.

3.5 Montagem do circuito eletrônico do microcontrolador

O presente circuito foi construído com base no modelo descrito por Vilela et al. (2003) (Figura 8).



- | | |
|--|---|
| CI 1: conversor analógico digital ADC0832 | V1: válvula solenóide |
| K1: relê 6Vcc/50mA | Q1: transistor BC548 |
| L1: led vermelho 5Vcc | D1: diodo 1N4007 |
| C1: capacitor eletrolítico 10 μ F/16V | R1: resistor 1k Ω 1/8W \pm 5% |
| C2: capacitor de poliéster 220 μ F/16V | R2: resistor 330 Ω 1/8W \pm 5% |
| | R3: resistor 10k Ω 1/8W \pm 5% |

FIGURA 8 – Diagrama do circuito eletrônico do microcontrolador, associado ao conversor A/D e ao relê que ativa a válvula solenóide.

O aplicativo computacional do microcontrolador foi elaborado por meio de um software emulador fornecido pela empresa fabricante e transferido ao microcontrolador, através da porta serial, por um cabo específico também fornecido pela empresa. Todas essas vantagens, aliadas à facilidade de programação da linguagem PBASIC, quando comparada com linguagens de baixo nível, contribuíram para a escolha deste microcontrolador.

Para fazer a interface com o operador foi utilizado um display de cristal líquido (LCD), que é um dos itens acessórios fornecidos pelo fabricante que

podem ser associados ao Basic Step 1. A Figura 9 mostra todos os componentes do protótipo e o detalhe do microcontrolador usado.

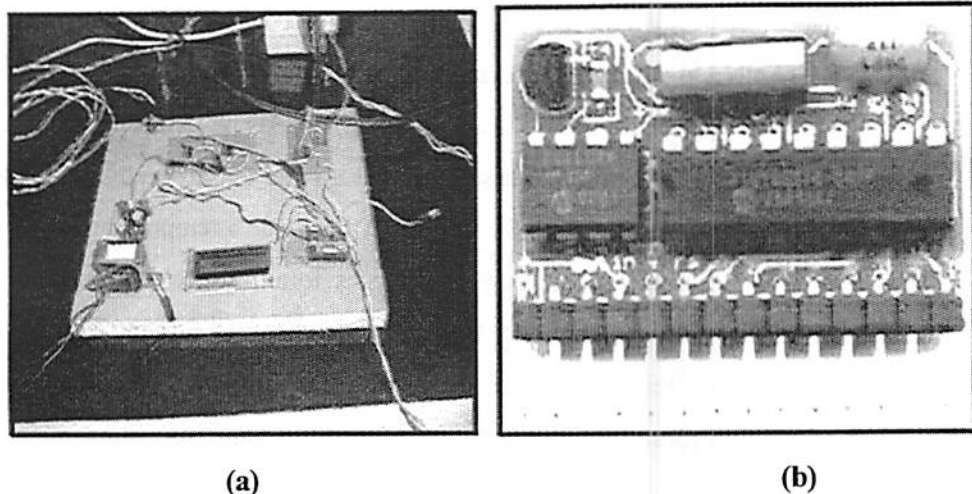


FIGURA 9 – (a) = Detalhe dos componentes do protótipo; (b) = Detalhe do microcontrolador Basic Step 1.

3.6 Calibração do protótipo

3.6.1 Obtenção da equação da condutividade elétrica

Foram preparadas soluções de KCl (PA) nas concentrações de 0 a 2000 mg L^{-1} , variando em 100 mg L^{-1} cada concentração. A água usada no preparo das soluções apresentou uma condutividade elétrica de 2,0 $\mu\text{S cm}^{-1}$. O sal foi previamente seco em estufa a 105°C, visando eliminar qualquer umidade que pudesse interferir no peso do mesmo e, conseqüentemente, nos processos de calibração e aferição.

Foi desenvolvida uma rotina para o microcontrolador, que fornecesse a leitura da temperatura, já em graus Celsius, e da tensão em milivolt. Juntamente com as leituras de temperatura e tensão, foram obtidos os dados de condutividade elétrica (dS m^{-1}), com auxílio de um condutivímetro comercial (HI 8733 – HANNA Instruments) previamente calibrado.

Depois de preparadas, as soluções foram colocadas na geladeira para que a temperatura abaixasse e possibilitasse fazer leituras de tensão e condutividade elétrica a 10°C , 15°C , 20°C , 25°C , 30°C e 35°C . Para que a temperatura subisse de maneira lenta, os frascos contendo as soluções foram aquecidos em banho-maria, com a ajuda de um ebulidor. Quando a temperatura atingia os valores acima descritos, era feita a anotação dos dados. Para cada solução foram realizadas três repetições.

3.6.2 Obtenção da equação do fator de correção da temperatura

Para a obtenção do fator de correção da temperatura (F_t) foram reunidos os dados médios de tensão para cada concentração (100 a 1900 mg L^{-1}), nas temperaturas avaliadas (10°C a 35°C). Em seguida, aplicando-se a Equação 9, obteve-se o fator de correção inicial para cada temperatura e em cada concentração (Tabela 3A).

$$\delta_t = \frac{V_{25^\circ\text{C}}}{V_T} \quad (9)$$

Em que:

δ_t = fator de correção inicial da temperatura (adimensional);

$V_{25^\circ\text{C}}$ = tensão observada na temperatura de 25°C (V);

V_T = tensão observada na temperatura que se deseja corrigir (V).

3.7 Avaliação do fator de correção da temperatura

Para esta avaliação, foram preparadas soluções de cloreto de potássio nas concentrações de 100, 500, 1000, 1500 e 1900 mg L⁻¹. Essas soluções foram avaliadas nas temperaturas de 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C, com três repetições.

Utilizou-se a metodologia sugerida por Rodella (1990), por meio da qual pode-se avaliar a exatidão das leituras do protótipo em relação às do condutivímetro comercial, pelo teste t de Student, sendo os graus de liberdade igual a (n_A + n_B - 2). Para isso, calcula-se o desvio padrão conjunto (Equação 10) e o valor de t calculado (Equação 11).

$$s = \sqrt{\frac{(s_a)^2 \cdot GL_a + (s_b)^2 \cdot GL_b}{n_A + n_B - 2}} \quad (10)$$

Em que:

s = desvio padrão conjunto;

s_a = desvio padrão das leituras do protótipo;

s_b = desvio padrão das leituras do condutivímetro;

GL_a = graus de liberdade das leituras do protótipo;

GL_b = graus de liberdade das leituras do condutivímetro;

n_A = número de leituras efetuadas no protótipo e;

n_B = número de leituras efetuadas no condutivímetro.

$$t = \frac{m_A - m_B}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}}} \quad (11)$$

Em que:

t = valor t calculado;

m_A = média das leituras do protótipo e;

m_B = média das leituras do condutivímetro.

3.8 Teste de controle da condutividade elétrica em circuito hidráulico fechado

Na presente avaliação, foi utilizada uma bombona e um balde, ambos de 40L, simulando um tanque com fertilizante líquido concentrado e um tanque de mistura do fertilizante, respectivamente. Utilizou-se uma válvula solenóide de 127 volts para controle da entrada de fertilizante no tanque de mistura. Foi utilizada uma bomba (SIEBE, 32 W e 60 Hz) para agitar a solução do tanque de mistura.

Um condutivímetro digital portátil (HI 8733 - HANNA Instruments) foi utilizado para aferir a condutividade elétrica, sendo a leitura deste tomada como padrão para avaliar a exatidão do aparelho desenvolvido.

Antes de iniciar o teste, tanto o condutivímetro comercial como o protótipo foram calibrados com uma solução de condutividade elétrica conhecida (0,01N de KCl com uma CE de $1423 \mu\text{S cm}^{-1}$), de acordo com a recomendação de Rodella (1990), sendo as leituras ajustadas para $1,42 \text{ mS cm}^{-1}$ para o primeiro e $1423 \mu\text{S cm}^{-1}$ para o segundo. A diferença entre as unidades deve-se às características de fabricação de cada um.

Para dar início ao teste, preparou-se uma solução concentrada de KCl branco, de uso agrícola e adicionou-se à bombona. O balde foi preenchido com água tratada da rede pública e nele introduzidos os sensores de condutividade elétrica do condutivímetro e do protótipo, bem como o sensor de temperatura do segundo.

No aplicativo do microcontrolador foi introduzida uma rotina, para que fosse preparada uma solução com condutividade elétrica de $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$. O tempo de abertura da válvula, bem como a homogeneização e leitura da condutividade elétrica, foram estipulados em 5 segundos cada. Dessa forma, o microcontrolador injetava solução por 5 segundos e noutros 5 segundos subsequentes fazia leituras da condutividade elétrica. Isso se repetiu até que a condição imposta, de $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$, fosse atendida.

As leituras foram iniciadas a partir de $200 \mu\text{S cm}^{-1}$, determinados pelo condutivímetro comercial, sendo o intervalo de leituras de aproximadamente $100 \mu\text{S cm}^{-1}$. Dessa forma, eram feitas e anotadas as leituras do condutivímetro e do protótipo. Foram realizadas três repetições e em cada uma delas dezenove leituras.

3.8.1 Avaliação da exatidão do protótipo

Para a avaliação da exatidão do protótipo foi utilizada a metodologia sugerida por Rodella (1990), em que as leituras médias fornecidas pelo protótipo foram confrontadas com as leituras obtidas pelo condutivímetro comercial. Por essa metodologia, obtendo-se a equação de regressão $y = a x + b$, caso o coeficiente angular "a" fosse 1 e coeficiente linear "b" fosse zero, os resultados fornecidos pelos dois métodos seriam inteiramente concordantes, portanto $y = x$. Sendo o coeficiente angular diferente de um e o coeficiente linear diferente de zero, isso corresponde à manifestação de erro nas leituras. Com esse objetivo,

obteve-se, plotando os valores médios das leituras do protótipo e do condutivímetro comercial, o gráfico que está apresentado na Figura 10, de onde a equação de regressão pôde ser extraída.

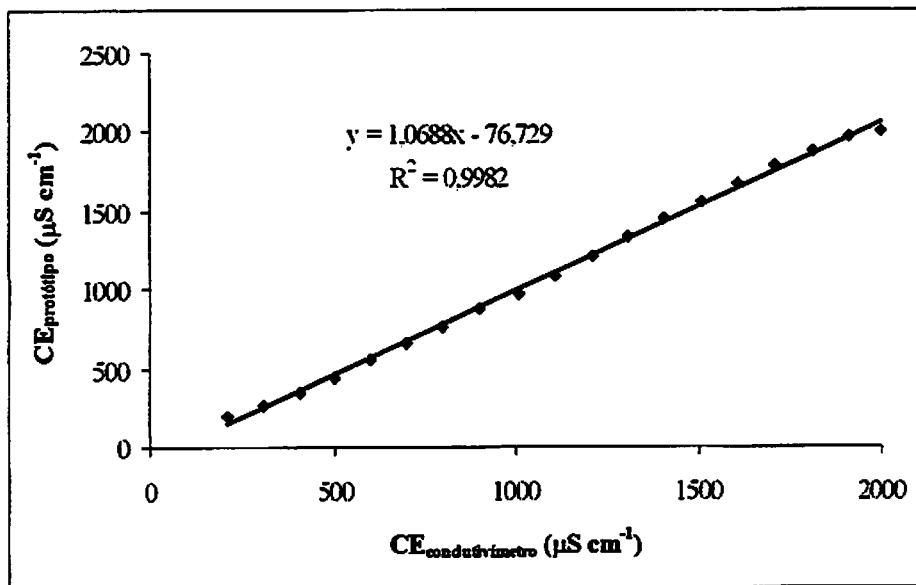


FIGURA 10 – Valores das leituras médias obtidas no condutivímetro comercial ($CE_{\text{condutivímetro}}$), versus as leituras médias observadas no protótipo ($CE_{\text{protótipo}}$).

Objetivando-se avaliar se os coeficientes angular (1,0728) e linear (0,0784) são, respectivamente, diferentes estatisticamente de 1 e 0, aplicou-se o teste t com (n-2) graus de liberdade. Para tanto, calcularam-se os desvios padrões da regressão e dos coeficientes, linear e angular (Equações 11, 12 e 13).

$$s_1 = \sqrt{\frac{\sum (y_i - y_{est})^2}{n-2}} \quad (11)$$

Em que:

s_1 = desvio padrão da regressão;

y_i = valor da condutividade elétrica observada em cada leitura do condutímetro;

y_{est} = valor da condutividade elétrica estimada pela equação representada na Figura 10 para cada valor de x_i e;

n = número de leituras.

$$s_{1b} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}} \quad (12)$$

Em que:

s_{1b} = desvio padrão do coeficiente linear;

x_i = valor da condutividade elétrica observada em cada leitura do protótipo.

$$s_{1a} = \frac{s_1}{\sqrt{\sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}} \quad (13)$$

Em que:

s_{1a} = desvio padrão do coeficiente angular.

Com os valores de s , s_{1b} e s_{1a} procedeu-se o cálculo do valor de t para o coeficiente linear e angular (Equações 14 e 15).

$$t_{1b} = \frac{b-0}{s_{1b}} \quad (14)$$

Em que:

t_{1b} = valor de t calculado para o coeficiente linear e;

b = valor do coeficiente linear.

$$t_{1a} = \frac{a-1}{s_{1a}} \quad (15)$$

Em que:

t_{1a} = valor de t calculado para o coeficiente angular e;

a = valor do coeficiente angular.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características do sensor de condutividade elétrica

O sensor desenvolvido apresentou boa robustez e confiabilidade durante todos os testes a que o protótipo foi submetido. Ele é caracterizado como um sensor de imersão, pois necessita que os eletrodos permaneçam completamente imersos dentro da solução a ser medida. Na avaliação da resistência da solução 0,01N de KCl, de condutividade elétrica conhecida ($1423 \mu\text{S cm}^{-1}$), foi encontrado o valor de 12 ohms. A condutância específica foi determinada em $83,3 \mu\text{S}$ e a constante da célula em $0,1708 \text{ m}^{-1}$.

Esse valor é substancialmente menor que o encontrado por Machado (2000), que utilizou eletrodos de carbono, apresentando uma constante média de 403,5 e 444 cm^{-1} , em cada um dos dois circuitos desenvolvidos.

Por outro lado, o valor de constante de célula do sensor desenvolvido no presente trabalho é consideravelmente maior que o relatado por Testezlaf & Matura (1999) para o sensor da empresa Eldar Shany Technologies, que é de $1,0 \text{ cm}^{-1}$.

Os eletrodos do sensor desenvolvido são de aço inox o que garante boa resistência à corrosão provocada pelos fertilizantes. Além disso, esse tipo de material também apresenta alta resistência mecânica, o que não acontece com os eletrodos de carbono ou de epoxy. Essa alta resistência do sensor desenvolvido permite que o mesmo possa ser instalado em qualquer local onde se deseje monitorar a condutividade elétrica, desde que esteja em contato direto com a solução a ser acompanhada.

4.2 Avaliação do sensor de temperatura

O conjunto sensor de temperatura mostrou-se bastante confiável durante todas as etapas do processo de calibração. Além disso, a pasta térmica na qual o LM35 foi imerso promoveu uma boa condução da temperatura, fato observado na resposta rápida dos valores de temperatura mostradas no display.

Não foi preciso qualquer processo de calibração, pois, segundo National... (2000b), o LM35 é um sensor de temperatura previamente calibrado, com precisão de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ para temperaturas próximas a $+25^{\circ}\text{C}$, garantido por um fator de escala linear de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Aplicando-se a Equação 8, com os valores dos resistores empregados no circuito auxiliar do sensor de temperatura, verificou-se que o ganho operacional seria de onze vezes. No entanto, quando da verificação, no circuito, do ganho proporcionado pelo amplificador, observou-se que o mesmo não era de 11 vezes como previsto, mas sim, de 11,25 vezes. Essa pequena diferença é atribuída aos resistores R1 e R2 que, por serem de pouca precisão, não garantiram o ganho esperado. Para manter o fator de escala indicado pelo fabricante, houve a necessidade de calcular um fator de ajuste e introduzi-lo na rotina do microcontrolador. Esse fator foi obtido dividindo-se o ganho previsto pelo ganho real (10 vezes/11,25 vezes), obtendo-se 0,8889 que, ao ser multiplicado pela leitura do sensor em milivolts, ajustou novamente o fator de escala do LM35 para $10\text{ mV }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

O conjunto desenvolvido mede temperaturas de até 44°C , em função do limite do ADC, que é de 5V. A determinação desse teto foi conseguida com base no fator de escala do LM35 e no ganho real do circuito amplificador (Ex: $44^{\circ}\text{C} \times 10\text{ mV }^{\circ}\text{C}^{-1} \times 11,25 \approx 4950\text{mV}$ ou 4,95V).

4.3 Avaliação do microcontrolador

O microcontrolador Basic Step 1 apresenta uma grande vantagem em relação aos outros microcontroladores existentes no mercado, que é a possibilidade de programação em alto nível. No entanto, ele possui um limite de memória para programação e armazenamento de dados de apenas 256 bytes. Para a edição da rotina, foram utilizados 225 bytes, deixando um limite de apenas 36, o que praticamente inviabiliza qualquer possibilidade de expansão das operações do protótipo. Além disso, o microcontrolador utilizado elimina todas as casas decimais após a vírgula, o que dificultou a programação, sendo necessária a adoção de alguns procedimentos para que isso não acontecesse, evitando assim a perda de precisão das equações introduzidas no mesmo. Como exemplo, cita-se a unidade na qual a condutividade elétrica foi expressa ($\mu\text{S cm}^{-1}$), na qual, trabalhando com quatro dígitos, pôde-se dar maior precisão ao protótipo. Entretanto, existem outros modelos de microcontroladores no mercado que eliminariam os problemas acima citados, alguns, inclusive, produzidos pela mesma empresa fabricante do Basic Step 1.

4.4 Equação da condutividade elétrica

A partir das três leituras realizadas em cada temperatura e concentração, fez-se uma média para cada temperatura, como apresentado na Tabela 1A, (Anexo) e, em seguida, uma média dos dados da Tabela 1A, originando a Tabela 2A. Com as informações de condutividade elétrica e tensão contidas na Tabela 2A, obteve-se através de regressão (Figura 11), uma equação linear chamada de condutividade elétrica, que foi adicionada à rotina do microcontrolador.

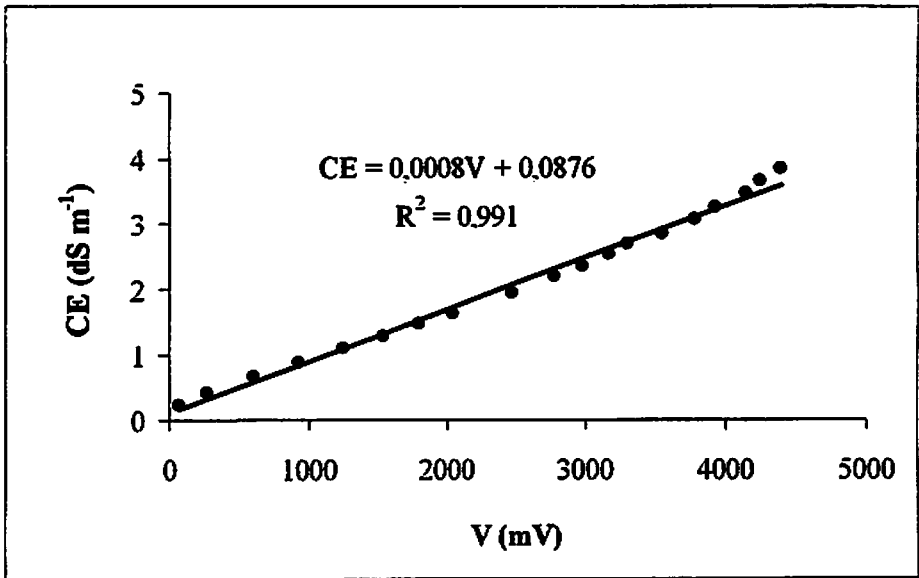


FIGURA 11 – Valores de condutividade elétrica (CE) obtidos com condutivímetro comercial (HI 8733 - HANNA Instruments), em função dos valores de tensão (V) obtidos com o protótipo.

Dessa forma, o circuito faria a leitura de uma solução qualquer em milivolt e o microcontrolador, por meio desta equação, transforma e explicita o resultado em $\mu\text{S cm}^{-1}$. Adotou-se essa unidade para a condutividade elétrica em função das limitações do Basic Step 1, que trabalha somente com números inteiros. Para se obter o resultado em dS m^{-1} (unidade no Sistema Internacional), basta dividir o valor que aparece no display por 1000.

As leituras nas concentrações de 0 e 2000 mg L^{-1} foram descartadas ao final do processo de obtenção dos dados, uma vez que o protótipo não apresentou confiabilidade para estes extremos. Dessa forma, procedeu-se à calibração para um intervalo de trabalho que vai de 100 a 1900 mg L^{-1} de KCl, o que garante uma boa leitura por parte do protótipo, para condutividades elétricas

variando de 200 a 4000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (0,2 a 4 dS m^{-1}). Essa faixa atende perfeitamente aos níveis máximos de condutividade elétrica na água de irrigação recomendados por Richards (1954), que é de 2,88 dS m^{-1} (2880 $\mu\text{S cm}^{-1}$).

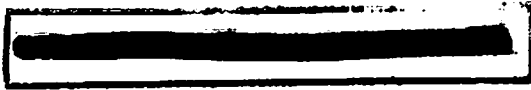
4.5 Equação da condutividade elétrica corrigida

Com a equação da condutividade elétrica e da temperatura pôde-se determinar, por meio da Equação 7, a condutividade elétrica corrigida ou a 25°C.

No display do aparelho (Figura 12) são mostrados os valores instantâneos da condutividade elétrica corrigida e da temperatura, além de suas respectivas unidades.



FIGURA 12 – Detalhe do display, indicando valores de condutividade elétrica e temperatura, com suas respectivas unidades.



4.6 Avaliação do fator de correção da temperatura

Analisando-se a Tabela 3A, observou-se que o fator de correção inicial da temperatura (δ_i) variava muito pouco, independentemente da concentração. Em função disso, procedeu-se à obtenção de uma média dos fatores de correção para cada temperatura (Tabela 4A). Com os dados da Tabela 4A, foi plotado um gráfico (Figura 13) e, por meio do mesmo, obteve-se a equação do fator de correção da temperatura.

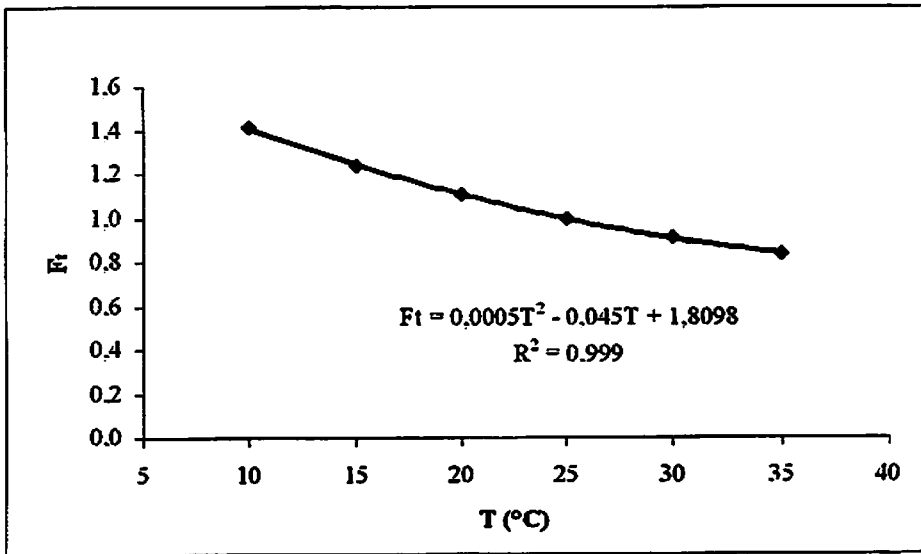


FIGURA 13 – Valores de fator de correção da temperatura (F_t), em função da temperatura (T).

Na Tabela 5A está o resultado da avaliação do fator de correção da temperatura. O presente teste objetivou avaliar se o protótipo apresentava exatidão quando uma mesma solução fosse submetida a temperaturas diferentes. Se as leituras fossem de mesmo valor, significaria que o fator de correção atuou

de maneira eficaz. No entanto, as leituras para uma mesma temperatura tiveram variações, impondo a necessidade de utilização de uma análise estatística, para verificar se as diferenças nas leituras eram estatisticamente significativas.

Analisando-se os dados da Tabela 5A, observa-se que o valor da condutividade elétrica tomada com o protótipo apresentou variação, mesmo depois de corrigida, conforme a temperatura da solução era alterada. Ao se observar as leituras do condutivímetro comercial, percebe-se que as variações nos valores decorrentes das diferentes temperaturas são pouco significativas e que os valores são próximos da média.

Com o objetivo de verificar se a diferença nas leituras do protótipo e do condutivímetro foi estatisticamente significativa e, com isso, avaliar a exatidão do primeiro, foi aplicado o teste t de Student, a 99% de probabilidade (Figura 14) (Rodella, 1990).

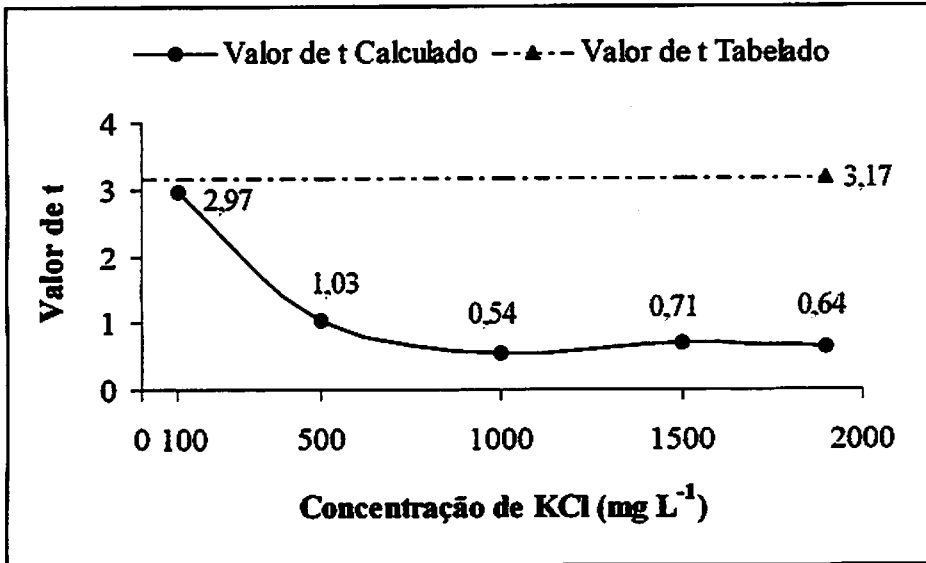


FIGURA 14 – Resultado do teste t de Student para o fator de correção da temperatura (F_t), em função da concentração de KCl.

Pela Figura 14 pode-se observar que o valor de t tabelado foi de 3,17; já os valores de t calculado foram, para todas as concentrações, menores que este. Para a concentração de 100 mg L^{-1} , o valor calculado foi superior àqueles obtidos para as demais concentrações estudadas, chegando próximo do limite de 3,17. Isso deve-se ao fato da leitura do condutivímetro comercial não haver sofrido qualquer alteração com a variação da temperatura para essa concentração, permanecendo em $0,21 \text{ dS m}^{-1}$. Dessa forma, quando, pelo teste t , calcularam-se os desvios padrões para cada instrumento, os valores foram muito discrepantes, uma vez que o aparelho desenvolvido teve variações acentuadas nas leituras iniciais, proporcionando um valor de t calculado elevado.

Quando se analisam as outras concentrações, verifica-se que as leituras, tanto do condutivímetro comercial quanto do aparelho desenvolvido, sofreram alterações significativas, indicadas nos respectivos desvios padrões. O teste t , neste caso, avalia a exatidão de um em relação ao outro, comparando os respectivos desvios padrões. Como a variação foi recíproca, os valores de t calculado mostraram-se mais baixos.

No entanto, ao se calcular o erro médio embutido no fator de correção do protótipo, adotado como padrão para o cálculo à temperatura de 25°C , verificou-se que o mesmo era alto e estava influenciando nas medições. O valor médio encontrado para as cinco concentrações foi da ordem de 9%, para uma variação da temperatura de 10°C .

Este valor está bem acima do erro médio obtido por Machado (2000), que foi de 2% e muito elevado em relação ao citado por Testezlaf & Matsura (1999), para os controladores de condutividade elétrica, indicados para a fertirrigação, comercializados.

4.7 Teste de controle da condutividade elétrica em circuito hidráulico fechado

Os resultados desta avaliação encontram-se compilados na Tabela 6A e apresentados na Figura 15.

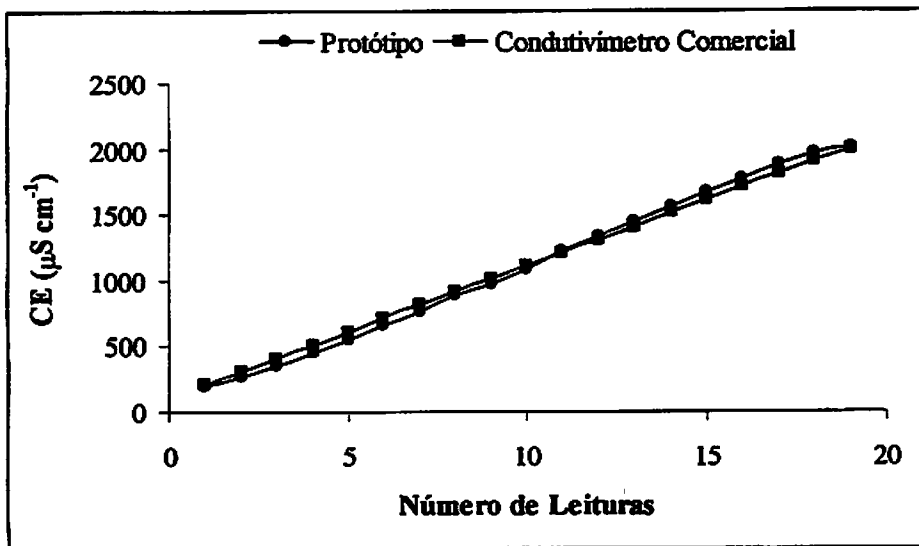


FIGURA 15 – Valores lidos pelo condutivímetro comercial tido como padrão e obtidos pelo protótipo.

Analisando-se a Tabela 6A, observa-se que a correlação entre as leituras do protótipo e do condutivímetro foi elevada, mostrando que as observações dos dois aparelhos se relacionam, ou seja, apresentam-se semelhantes.

No entanto, o erro médio percentual e o absoluto foram ainda altos, 5,19 e 0,04, respectivamente, em comparação com os aparelhos comercializados. Neste caso, essa variação não pode ser atribuída ao fator de correção da temperatura, uma vez que a temperatura da solução preparada, nas três

repetições, ficaram em torno de 21°C, ou seja, não sofreu acentuada alteração. Uma parte deste erro pode ser atribuído à calibração, pois, na condutividade de 1410 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (medida pelo padrão), que é um valor bastante próximo da condutividade da solução de calibração (1420 $\mu\text{S cm}^{-1}$), a leitura média do aparelho foi de 1450 $\mu\text{S cm}^{-1}$, introduzindo um erro de 3,39%. Vale ressaltar que tanto o protótipo quanto o condutivímetro comercial apresentam uma certa dificuldade no ajuste do valor de calibração, em função da sensibilidade dos respectivos resistores variáveis, contribuindo para o erro.

Apesar do erro médio ter sido um tanto elevado, o aparelho desenvolvido apresentou excelente exatidão para o valor estipulado via programação, que era de 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Essa característica apresentada pelos dados do protótipo, no que diz respeito aos altos erros para os valores de condutividade elétrica abaixo de 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ e ao se aproximar desse valor, o protótipo ter conseguido ajustar o valor de aplicação, ocasionando um baixo erro, deve-se à sensibilidade do mesmo. Quando a solução era injetada no tanque de mistura, observava-se que a medida no protótipo sofria uma alteração imediata e oscilava o valor de leitura. Quando o valor começava a se estabilizar, uma nova injeção de solução era feita e o valor novamente se alterava. Essa rotina era esperada, uma vez que foi adicionada no aplicativo do microcontrolador. Por outro lado, quando o valor da condutividade elétrica aproximava-se de 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, o tempo de injeção ia diminuindo progressivamente e de forma mais lenta, cada vez que a rotina de leitura da CE era implementada. Com isso, a condutividade elétrica também ia se alterando mais lentamente, dando mais tempo para a estabilização das leituras, o que provocou uma diminuição do erro ao final.

Objetivando avaliar a exatidão das leituras do protótipo em relação ao condutivímetro comercial, foi implementada uma análise de regressão, em que a estatística t de Student foi usada para avaliar se a diferença nos coeficientes era

significativa ou não. Os resultados dessa análise encontram-se compilados na Tabela 7A. Analisando-se os dados desta tabela, observa-se que os valores de t calculados para os coeficientes angular e linear foram, respectivamente, 2,03 e 0,16, os quais são menores que o valor de t tabelado, 2,88.

4.8 Custo do protótipo

O custo de fabricação do protótipo foi de R\$169,49 (US\$58.04) (Tabela 8A). Neste custo não foi contabilizado o sistema de bombeamento, uma vez que os sensores podem ser instalados na linha de irrigação, dispensando, portanto, qualquer equipamento equivalente.

Ainda que o protótipo tenha apresentado um erro médio superior ao dos equipamentos comerciais, o baixo custo de fabricação e a fácil aquisição dos componentes utilizados poderiam ser atrativos a favor do primeiro. Além disso, as melhorias sugeridas no protótipo poderiam diminuir bastante o erro observado, sem elevar muito o custo de fabricação. Mesmo com um acréscimo de 100% no custo de produção, a utilização do equipamento ainda seria compensatória ao produtor. Além do mais, com uma produção em escala, os custos tendem a diminuir substancialmente.

4.9 Considerações finais

O presente trabalho apresentou avanços importantes para o futuro desenvolvimento de um controlador de condutividade elétrica em fertirrigação. Até o final do desenvolvimento deste equipamento, várias etapas deverão ser cumpridas. A deste trabalho se apresenta como uma delas.

Além de promover avanços, trabalhos como este deverão também apresentar diretrizes para os passos seguintes, avaliando metodologias e propondo mudanças.

Nesse sentido, considera-se que a metodologia para a obtenção do fator de correção inicial (δ_i) deverá ser alterada. Talvez, a equação descrita por Machado (2000) seja mais adequada.

A constante de célula (θ) dos eletrodos deverá ser reduzida para um valor em torno de 0,1, pois é mais adequada para leituras de condutividade elétrica que usualmente são trabalhadas em fertirrigação. Para se conseguir diminuir a constante de célula, basta aumentar o diâmetro dos eletrodos e/ou diminuir a distância entre eles.

O microcontrolador usado atendeu de forma satisfatória às exigências impostas na programação. Porém, sua capacidade de memória está quase completa, necessitando, caso seja acrescentada mais alguma rotina, a substituição do mesmo por algum com maior capacidade de memória.

Todas essas alterações são fáceis de serem implementadas e poderão garantir melhor desempenho do aparelho, diminuindo os erros e possibilitando ampliações futuras.

5 CONCLUSÕES

Tendo como objetivo desenvolver um equipamento para controlar e monitorar a aplicação de fertilizantes em fertirrigação, que utilizasse componentes nacionais e que apresentasse um baixo custo, pôde-se concluir que:

1. o desempenho do protótipo no controle da condutividade elétrica foi satisfatório;
2. os sensores de condutividade elétrica e temperatura desenvolvidos mostraram-se adequados para esse tipo de medição, além de apresentarem excelente robustez, o que garante a possibilidade de instalação em qualquer parte da linha de irrigação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGNES, D. L. **Introdução ao microcontrolador: BASIC Step**. Santa Cruz do Sul, RS: Tato, 2003. 45 p. Disponível em: <<http://www.tato.ind.br/files/microcontroladores%20Basic%20Step.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2003.

ANTUNES, R. C. B., RENA, A. B, MANTOVANI, E. C. **Fertirrigação na cultura do cafeeiro arábica**. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais/UFV/DEA, 2001. 39 p.

BAR-YOSEF, B. **Advances in fertigation**. In: SPARKS, D. L. **Advances in Agronomy**. Newark, USA: Academic Press, 1999. v. 65, p. 2-77.

BENTO, C. R. **Sistemas de controle : teoria e projetos**. São Paulo: Érica, 1989. 194 p.

BRAGA, N. C. **Curso básico de eletrônica**. 3. ed. São Paulo: Saber, 1999. v. 2, 140 p.

BURT, C. M. **Fertigation : the next frontier**. **Irrigation Business and Technology**, San Luis Obispo, CA, v. 3, n. 4, p. 16-19, 1995. Disponível em: <<http://www.itrc.org/papers/fertigationnextfrontier.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2003.

CABELLO, F. P. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF)**. 2. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1987. 461 p.

CIENFUEGOS, F.; VAITSMAN, D. **Análise Instrumental**. Rio de Janeiro: Interciência, 2000. 606 p.

CRESTANA, S.; TORRE NETO, A.; INAMASU, R. Y.; MARTIN NETO, L.; VAZ, C. M. P.; CRUNIVEL, P.E. **Automação e instrumentação na agropecuária**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: SBEA, 1998.

DIESTEFANO, J. J.; STUBBERUD, A. R.; WILLIAMS, I. J. Sistemas de retroação e controle. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1972. 480 p.

EWING, G. W. Métodos instrumentais de análise química. Tradução de A. G. Albanese; J. T. S. Campos. São Paulo: Edgard Blucher, 1972. 672 p.

FEITOSA FILHO, J. C. Uniformidade de distribuição de fertilizantes via água de irrigação por microaspersão, com injetores tipo venturi e tanque de derivação. 1990. 77 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FEITOSA FILHO, J. C.; CAVALCANTE, L. F.; LOPES, W. F.; SANTOS, C. S.; LEITE JÚNIOR, G. P.; LOPES, W. F.; PINTO, J. M. Estudos de doses de nitrogênio e de potássio aplicadas em banana por fertirrigação em comparação à adubação convencional. In: **WORKSHOP DE FERTIRRIGAÇÃO 2., 2001, Piracicaba. Artigos científicos...** Piracicaba: ESALQ/USP, 2001. p. 48-66.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M.; SILVA, G. O.; COELHO, R. D.; ALVES JÚNIOR, J. Sistemas de automação na irrigação localizada. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. Anais...** Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F.; SOUZA, J. R. A qualidade da água de irrigação. In: **FOLEGATTI, M. V. (Coord.). Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças.** [S. l.]: Guaíba, 1999. p. 237-265.

HERNANDEZ, F. B. T. Potencialidades da fertirrigação. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLÚIDOS, Piracicaba, 1994.. Fertilizantes fluídos...** Piracicaba: POTAFOS, 1994. p. 215-225.

KACIRA, M.; LING, P. P. Design and development of an automated and non-contact sensing system for continuous monitoring of plant health and growth. **Transaction of the ASAE, St. Joseph, v. 44, n. 4, p. 989-996, July/Aug. 2001.**

MACHADO, P. P. C. Sistema computadorizado para o monitoramento de fatores ambientais e controle da qualidade da solução nutritiva no cultivo hidropônico em casas de vegetação. 2000. 357 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MEDEIROS, J. F.; GHEYI, H. R. A qualidade da água de irrigação. Mossoró: Escola Superior de Agricultura de Mossoró/Departamento de Engenharia Agrícola, 1994. 60 p. (Boletim Técnico Científico, 22).

NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. LM340/LM78MXX Series 3: Terminal Positive Regulators. 2000a. Disponível em: <<http://www.national.com/tensionregulators>>. Acesso em: 15 jul. 2003.

NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. LM35 - Precision Centigrade Temperature Sensors. 2000b. 13 p. Disponível em: <<http://www.national.com/temperaturesensors>>. Acesso em: 15 jul. 2003.

PAPADOPOULOS, I. Fertirrigação: situação atual e perspectivas para o futuro. In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.). Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 11-154.

PHENE, C. J. Operational principles: automation. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed.). Trickle irrigation for crop production. [S. l.]: Elsevier Science, 1986. Chap. 3.3, p. 188-215. (Development in Agricultural Engineering, 9).

PIZARRO, F. Drenagem agrícola y recuperacion de suelos salinos. 2. ed. Madri. Agricola Española, 1985. 542 p.

RICHARDS, L. A. (Ed.). Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Riverside, CA: United State Salinity Laboratory/USDA, 1954. (Agriculture Handbook, n. 60). Disponível em: <<http://www.ussl.ars.usda.gov/hb60/hb60.htm>>. Acesso em: 13 fev. 2004.

RODELLA, A. A. **Métodos instrumentais de análise: texto auxiliar para aulas teóricas.** Piracicaba: ESALQ/USP, 1990. Disponível em: <http://members.tripod.com/quimica_esalq/textunic.doc>. Acesso em : 20 out. 2003.

ROLSTON, D. E.; MILLER, R. J.; SCHULBACH, H. **Management principles.** In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. (Ed.). **Trickle irrigation for crop production.** Amsterdam: Elsevier Science, 1986. p. 317-339. (Development in Agricultural Engineering, 9).

SAN JUAN, J. A. M. **Riego por goteo: teoría y práctica.** 3. ed. Madrid: Mundi Prensa, 1988. 256 p.

SIMÕES, W. L.; QUEIROZ, T. M.; CARVALHO, H. P.; ARANTES, K. R.; MIRANDA, J. H. **Determinação do fator de correção da condutividade elétrica, em função da temperatura para três sais.** In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 13., 2003, Juazeiro. **Anais...** Juazeiro: ABID, 2003. 1 CD-ROM.

SOUZA, R. O. R. M. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação automatizado para áreas experimentais.** 2001. 70 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”; Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SOUZA, V. F.; COELHO, E. F. **Manejo de fertirrigação em fruteiras.** In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.). **Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças.** Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 289-317.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Automação aplicada à fertirrigação.** In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.). **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças.** Ed. Guaíba: Agropecuária, 1999. 460 p. p. 207-235.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E. E. **Fertirrigação: técnicas e equipamentos para aplicação de fertilizantes.** In: SANTOS, C. M., et al. (Eds.). **Irrigação da cafeicultura no Cerrado.** Uberlândia: ICIAG /UFU, 2001. p. 153-171.

VILELA, L. A. A. Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central. 2002. 127 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de agricultura “Luiz de Queiroz”/ Universidade de São Paulo, Piracicaba.

VILELA, L. A. A.; BOTREL, T. A.; SOCCOL, O. J.; GERVÁSIO, E. S.; NETO, O. R. Dispositivo para monitoramento da operação de conjuntos motobomba elétricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. Anais... Salvador: SBEA, 2002. 1 CD-ROM.

VILELA, L. A. A.; CARVALHO, H. P.; PRADO, G.; BOTREL, T. A. Construção e calibração de um manômetro digital microprocessado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia Anais... Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

VILELA, L. A. A.; GERVÁSIO, E. S.; SOCCOL, O. J.; BOTREL, T. A. Sistema para aquisição de dados de pressão e vazão usando o microcomputador. Revista Brasileira de Agrocomputação, Ponta Grossa, v. 1, n. 2, p. 25-30, dez. 2001.

VILLAS BÔAS, R. L.; ANTUNES, C. L.; BOARETTO, A. E.; SOUZA, V. F.; DUENHAS, L. H. Perfil da pesquisa e emprego da fertirrigação no Brasil. In: FOLEGATTI, M. V. (Coord.). Fertirrigação: flores, frutas e hortaliças. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 71-103.

ZEREZUELA, R.; OKI, N. Desenvolvimento de um sistema de transmissão de dados e de software para aquisição de dados de estações meteorológicas em tempo real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. Anais... Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD-ROM.

ANEXOS

- TABELA 1A – Valores médios de tensão e condutividade elétrica, observados nas leituras efetuadas durante o processo de calibração, com o protótipo e com o condutivímetro comercial, para as temperaturas de 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C..... 58
- TABELA 2A – Valores de tensão e condutividade elétrica, calculados a partir dos dados da Tabela 1, pela média das leituras observadas nas diferentes temperaturas, em função da concentração de cloreto de potássio..... 64
- TABELA 3A – Valores de fator de correção para cada temperatura estudada, obtidos por meio dos dados médios de tensão fornecidos pelo protótipo, em cada concentração avaliada. 65
- TABELA 4A – Valores médios do fator de correção (F_c) para cada temperatura estudada. 71
- TABELA 5A – Relação dos dados obtidos na avaliação da exatidão do protótipo..... 72
- TABELA 6A – Relação dos dados obtidos do protótipo, quando solicitada à aplicação de fertilizante, para que se atingisse uma condutividade elétrica de $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$, em comparação com um condutivímetro comercial. 75
- TABELA 7A – Relação dos dados obtidos na avaliação da exatidão do protótipo. 76
- TABELA 8A – Custo dos materiais utilizados na fabricação do protótipo..... 77

TABELA 1A – Valores médios de tensão e condutividade elétrica, observados nas leituras efetuadas durante o processo de calibração, com o protótipo e com o condutivímetro comercial, para as temperaturas de 10°C, 15°C, 20°C, 25°C, 30°C e 35°C.

Temperatura de 10°C		
Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
*0	35,00	0,00
100	40,00	0,22
200	163,33	0,43
300	393,33	0,66
400	640,00	0,88
500	889,33	1,10
600	1100,00	1,29
700	1336,67	1,48
800	1566,67	1,65
900	1873,33	1,96
1000	2166,67	2,22
1100	2326,67	2,35
1200	2533,33	2,54
1300	2706,67	2,70
1400	2870,00	2,87
1500	3056,67	2,98
1600	3246,67	3,26
1700	3380,00	3,52
1800	3563,33	3,69
1900	3700,00	3,90
*2000	3666,67	3,93

Cont....

TABELA 1A (Cont....):

Temperatura de 15°C		
Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
*0	35,00	0,00
100	60,00	0,22
200	200,00	0,42
300	466,67	0,66
400	746,67	0,89
500	1013,33	1,10
600	1273,33	1,29
700	1520,00	1,47
800	1753,33	1,65
900	2113,33	1,95
1000	2390,00	2,20
1100	2593,33	2,35
1200	2790,00	2,57
1300	2900,00	2,73
1400	3133,33	2,88
1500	3380,00	3,00
1600	3540,00	3,28
1700	3720,00	3,50
1800	3853,33	3,72
1900	3993,33	3,90
*2000	3933,33	4,05

Cont....

TABELA 1A (Cont....):

Temperatura de 20°C		
Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
*0	38,00	0,00
100	63,33	0,22
200	246,67	0,42
300	560,00	0,67
400	893,33	0,90
500	1170,00	1,10
600	1446,67	1,29
700	1706,67	1,47
800	1960,00	1,65
900	2363,33	1,95
1000	2666,67	2,22
1100	2840,00	2,35
1200	3066,67	2,54
1300	3193,33	2,70
1400	3400,00	2,86
1500	3676,67	3,12
1600	3816,67	3,27
1700	4050,00	3,50
1800	4113,33	3,69
1900	4306,67	3,85
*2000	4260,00	4,01

Cont....

TABELA 1A (Cont....):

Temperatura de 25°C		
Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
*0	34,00	0,00
100	80,00	0,22
200	290,00	0,42
300	640,00	0,65
400	986,67	0,87
500	1306,67	1,10
600	1620,00	1,28
700	1913,33	1,48
800	2120,00	1,64
900	2596,67	1,93
1000	2916,67	2,19
1100	3110,00	2,34
1200	3323,33	2,53
1300	3426,67	2,70
1400	3706,67	2,85
1500	3933,33	3,10
1600	4093,33	3,24
1700	4343,33	3,46
1800	4380,00	3,64
1900	4560,00	3,82
*2000	4560,00	4,00

Cont....

TABELA 1A (Cont....):

Temperatura de 30°C		
Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
*0	31,00	0,00
100	100,00	0,22
200	346,67	0,41
300	733,33	0,65
400	1073,33	0,86
500	1480,00	1,08
600	1780,00	1,26
700	2070,00	1,44
800	2333,33	1,62
900	2840,00	1,92
1000	3163,33	2,15
1100	3380,00	2,32
1200	3553,33	2,52
1300	3693,33	2,70
1400	3970,00	2,82
1500	4206,67	3,07
1600	4303,33	3,20
1700	4576,67	3,43
1800	4700,00	3,62
1900	4806,67	3,76
*2000	4760,00	3,96

Cont....

TABELA 1A (Cont....):

Temperatura de 35°C		
Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
*0	35,00	0,00
100	120,00	0,22
200	396,67	0,41
300	833,33	0,64
400	1200,00	0,86
500	1620,00	1,07
600	1960,00	1,26
700	2266,67	1,43
800	2540,00	1,62
900	3040,00	1,90
1000	3393,33	2,15
1100	3620,00	2,31
1200	3820,00	2,50
1300	3906,67	2,63
1400	4226,67	2,80
1500	4463,33	3,05
1600	4556,67	3,19
1700	4836,67	3,42
1800	4856,67	3,58
1900	4973,33	3,74
*2000	4936,67	3,92

* = Leituras descartadas durante o processo de calibração do protótipo.

¹ = Condutivímetro portátil digital HI 8733 – HANNA Instruments.

TABELA 2A – Valores de tensão e condutividade elétrica, calculados a partir dos dados da Tabela 1, pela média das leituras observadas nas diferentes temperaturas, em função da concentração de cloreto de potássio.

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Leitura do condutivímetro (dS m ⁻¹)
100	77,22	0,22
200	273,89	0,42
300	604,44	0,66
400	923,33	0,88
500	1246,56	1,09
600	1530,00	1,28
700	1802,22	1,46
800	2045,56	1,64
900	2471,11	1,94
1000	2782,78	2,19
1100	2978,33	2,34
1200	3181,11	2,54
1300	3304,44	2,69
1400	3551,11	2,85
1500	3786,11	3,05
1600	3926,11	3,24
1700	4151,11	3,47
1800	4244,44	3,66
1900	4390,00	3,83

¹ = Condutivímetro portátil digital HI 8733 – HANNA Instruments.

TABELA 3A – Valores de fator de correção para cada temperatura estudada, obtidos por meio dos dados médios de tensão fornecidos pelo protótipo, em cada concentração avaliada.

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ_t)
100	10	40,00	2,00
	15	60,00	1,33
	20	63,33	1,26
	25	80,00	1,00
	30	100,00	0,80
	35	120,00	0,67
200	10	163,33	1,78
	15	200,00	1,45
	20	246,67	1,18
	25	290,00	1,00
	30	346,67	0,84
	35	396,67	0,73
300	10	393,33	1,63
	15	466,67	1,37
	20	560,00	1,14
	25	640,00	1,00
	30	733,33	0,87
	35	833,33	0,77

Cont....

TABELA 3A (Cont...):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ _t)
400	10	640,00	1,54
	15	746,67	1,32
	20	893,33	1,10
	25	986,67	1,00
	30	1073,33	0,92
	35	1200,00	0,82
500	10	889,33	1,47
	15	1013,33	1,29
	20	1170,00	1,12
	25	1306,67	1,00
	30	1480,00	0,88
	35	1620,00	0,81
600	10	1100,00	1,47
	15	1273,33	1,27
	20	1446,67	1,12
	25	1620,00	1,00
	30	1780,00	0,91
	35	1960,00	0,83

Cont....

TABELA 3A (Cont...):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ_t)
700	10	1336,67	1,43
	15	1520,00	1,26
	20	1706,67	1,12
	25	1913,33	1,00
	30	2070,00	0,92
	35	2266,67	0,84
800	10	1566,67	1,35
	15	1753,33	1,21
	20	1960,00	1,08
	25	2120,00	1,00
	30	2333,33	0,91
	35	2540,00	0,83
900	10	1873,33	1,39
	15	2113,33	1,23
	20	2363,33	1,10
	25	2596,67	1,00
	30	2840,00	0,91
	35	3040,00	0,85

Cont....

TABELA 3A (Cont...):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ_t)
1000	10	2166,67	1,35
	15	2390,00	1,22
	20	2666,67	1,09
	25	2916,67	1,00
	30	3163,33	0,92
	35	3393,33	0,86
1100	10	2326,67	1,34
	15	2593,33	1,20
	20	2840,00	1,10
	25	3110,00	1,00
	30	3380,00	0,92
	35	3620,00	0,86
1200	10	2533,33	1,31
	15	2790,00	1,19
	20	3066,67	1,08
	25	3323,33	1,00
	30	3553,33	0,94
	35	3820,00	0,87

Cont....

TABELA 3A (Cont...):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ_t)
1300	10	2706,67	1,27
	15	2900,00	1,18
	20	3193,33	1,07
	25	3426,67	1,00
	30	3693,33	0,93
	35	3906,67	0,88
1400	10	2870,00	1,29
	15	3133,33	1,18
	20	3400,00	1,09
	25	3706,67	1,00
	30	3970,00	0,93
	35	4226,67	0,88
1500	10	3056,67	1,29
	15	3380,00	1,16
	20	3676,67	1,07
	25	3933,33	1,00
	30	4206,67	0,94
	35	4463,33	0,88

Cont....

TABELA 3A (Cont...):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ_t)
1600	10	3246,67	1,26
	15	3540,00	1,16
	20	3816,67	1,07
	25	4093,33	1,00
	30	4303,33	0,95
	35	4556,67	0,90
1700	10	3380,00	1,29
	15	3720,00	1,17
	20	4050,00	1,07
	25	4343,33	1,00
	30	4576,67	0,95
	35	4836,67	0,90
1800	10	3563,33	1,23
	15	3853,33	1,14
	20	4113,33	1,06
	25	4380,00	1,00
	30	4700,00	0,93
	35	4856,67	0,90

Cont....

TABELA 3A (Cont...):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	Leitura do protótipo (mV)	¹ Fator de correção para cada temperatura (δ _t)
1900	10	3700,00	1,23
	15	3993,33	1,14
	20	4306,67	1,06
	25	4560,00	1,00
	30	4806,67	0,95
	35	4973,33	0,92
			Média = 1,0498

¹= Obtido mediante Equação 9.

TABELA 4A – Valores médios do fator de correção (F_t) para cada temperatura estudada.

Temperatura da solução (°C)	¹ Fator de correção médio da temperatura (F _t)
10	1,4160
15	1,2356
20	1,1078
25	1,0000
30	0,9097
35	0,8376

¹ = Obtido por meio da média dos fatores de correção para cada temperatura (δ_t).

TABELA 5A – Relação dos dados obtidos na avaliação da exatidão do protótipo.

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	¹ Protótipo (dS m ⁻¹)	² Condutivímetro comercial (dS m ⁻¹)	
100	10	0,32	0,21	
	15	0,29	0,21	
	20	0,26	0,21	
	25	0,26	0,21	
	30	0,25	0,21	
	35	0,24	0,21	
	<i>m_a e m_b</i>		0,27	0,21
	GL		5	5
	<i>s_a e s_b</i>		0,029449	0,001721
	<i>s</i>			0,065851
	<i>t</i>			2,97
	<i>t_t</i>			3,17
	500	10	1,07	1,09
15		1,05	1,10	
20		1,01	1,08	
25		0,99	1,07	
30		0,93	1,06	
35		0,94	1,05	
<i>m_a e m_b</i>			1,00	1,08
GL			5	5
<i>s_a e s_b</i>			0,056688	0,016964
<i>s</i>				0,127466
<i>t</i>				1,03
<i>t_t</i>				3,17

Cont....

TABELA 5A (Cont....):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	¹ Protótipo (dS m ⁻¹)	² Condutivímetro comercial (dS m ⁻¹)
1000	10	2,19	2,11
	15	2,11	2,13
	20	2,03	2,11
	25	1,99	2,10
	30	1,94	2,08
	35	1,93	2,06
	<i>m_a e m_b</i>	2,03	2,10
	GL	5	5
	<i>s_a e s_b</i>	0,099290	0,023983
	<i>s</i>		0,222380
	<i>t</i>		0,54
	<i>t_i</i>		3,17
	1500	10	3,28
15		3,17	3,23
20		3,05	3,22
25		2,93	3,18
30		2,85	3,15
35		2,81	3,15
<i>m_a e m_b</i>		3,02	3,19
GL		5	5
<i>s_a e s_b</i>		0,185344	0,035366
<i>s</i>			0,415223
<i>t</i>			0,71
<i>t_i</i>			3,17

Cont....

TABELA 5A (Cont....):

Concentração de KCl (mg L ⁻¹)	Temperatura da solução (°C)	¹ Protótipo (dS m ⁻¹)	² Condutivímetro comercial (dS m ⁻¹)
1900	10	3,92	3,81
	15	3,81	3,83
	20	3,61	3,80
	25	3,47	3,77
	30	3,35	3,75
	35	3,34	3,72
	<i>m_a e m_b</i>	3,58	3,78
	GL	5	5
	<i>s_a e s_b</i>	0,240432	0,038263
	<i>s</i>		0,538537
<i>t</i>		0,64	
<i>t_t</i>		3,17	

¹ = Leituras médias do protótipo, obtidas em três repetições, lidas em $\mu\text{S cm}^{-1}$ e convertidas em dS m^{-1} ;

² = Leituras médias do condutivímetro comercial HI 8733 – HANNA Instruments, obtidas em três repetições;

m_a = Média das leituras médias do protótipo;

m_b = Média das leituras médias do condutivímetro comercial;

GL = Graus de liberdade;

s_a = Desvio padrão das leituras médias do protótipo;

s_b = Desvio padrão das leituras médias do condutivímetro comercial;

s = Desvio padrão conjunto calculado mediante Equação 6;

t = Valor t calculado, obtido com auxílio da Equação 7;

t_t = Valor t tabelado, para 10 graus de liberdade ($n_A + n_B - 2$) e 99% de probabilidade.

TABELA 6A – Relação dos dados obtidos do protótipo, quando solicitada à aplicação de fertilizante, para que se atingisse uma condutividade elétrica de 2000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, em comparação com um condutivímetro comercial.

Observações	¹ Leitura no condutivímetro ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Leitura no protótipo ($\mu\text{S cm}^{-1}$)				² Erro percentual	³ Erro absoluto
		Repetições		Média			
1	210	183	185	218	195	6,88	0,01
2	310	256	251	294	267	12,46	0,04
3	410	337	334	385	352	13,09	0,05
4	510	428	427	477	444	12,04	0,06
5	610	523	530	591	548	9,44	0,06
6	710	640	633	714	662	6,12	0,04
7	810	735	747	813	765	5,00	0,04
8	910	854	878	921	884	2,26	0,02
9	1010	956	947	1015	973	3,22	0,03
10	1110	1057	1054	1133	1081	2,16	0,02
11	1210	1187	1196	1253	1217	0,59	0,01
12	1310	1298	1306	1406	1336	2,40	0,03
13	1410	1427	1418	1512	1452	3,39	0,05
14	1510	1534	1513	1611	1552	3,15	0,05
15	1610	1637	1657	1715	1670	4,02	0,06
16	1710	1748	1764	1817	1776	4,19	0,07
17	1810	1841	1879	1920	1880	4,15	0,07
18	1910	1941	1974	1990	1968	3,33	0,06
19	2000	2008	2024	2026	2011	0,70	0,01
Erro Médio						5,19	0,04
⁴Correlação						0,999	

¹ = Leitura do condutivímetro comercial HI 8733 – HANNA Instruments, adotado como padrão;

^{2, 3 e 4} = Calculado com base na média das leituras do protótipo e na leitura do condutivímetro comercial.

TABELA 7A – Relação dos dados obtidos (dS m^{-1}) na avaliação da exatidão do protótipo.

Observações	y_i	x_i	y_{est}		
1	0,21	0,20	0,131381		
2	0,31	0,27	0,208038		
3	0,41	0,35	0,299190		
4	0,50	0,44	0,398138		
5	0,60	0,55	0,509351		
6	0,70	0,66	0,631651		
7	0,80	0,76	0,742042		
8	0,90	0,88	0,870527		
9	1,01	0,97	0,965005		
10	1,11	1,08	1,081404		
11	1,21	1,21	1,222012		
12	1,31	1,34	1,355254		
13	1,41	1,45	1,479914		
14	1,51	1,55	1,587086		
15	1,61	1,67	1,712604		
16	1,71	1,78	1,827429		
17	1,81	1,88	1,938428		
18	1,91	1,97	2,033300		
19	2,00	2,01	2,079835		
s_f	s_{fb}	s_{fa}	t_{fb}	t_{fa}	t_f
0,091640	0,489695	0,035818	0,16	2,03	2,88

y_i = Valor da condutividade elétrica observada em cada leitura do condutivímetro comercial HI 8733 – HANNA Instruments;

x_i = Valor da condutividade elétrica observada em cada leitura do protótipo;

y_{est} = Valor da condutividade elétrica estimada pela Equação 8 para cada valor de x_i ;

s_f = Desvio padrão da regressão, obtida com a Equação 9;

s_{fb} = Desvio padrão do coeficiente linear, obtido com a Equação 10;

s_{fa} = Desvio padrão do coeficiente angular, obtido com a Equação 11;

t_{fb} = Valor de t calculado para o coeficiente linear, obtido com a Equação 12;

t_{fa} = Valor de t calculado para o coeficiente angular, obtido com a Equação 13;

t_f = Valor de tabelado para $(n - 2)$ graus de liberdade e 99% de probabilidade.

TABELA 8A – Custo dos materiais utilizados na fabricação do protótipo.

Descrição	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Microcontrolador BASIC Step 1	01 ud	65,00	65,00
Display LCD Serial 16x2 s/ backlight	01 ud	40,00	40,00
Transformador 110/12+12 500mA	01 ud	7,50	7,50
Diodo 1N4007	06 ud	0,04	0,24
LED vermelho 5V	01 ud	0,12	0,12
Capacitor eletrolítico 1000 μ F 25V	02 ud	0,50	1,00
Capacitor eletrolítico 100 μ F 16V	02 ud	0,15	0,30
Capacitor eletrolítico 0,1 μ F 16V	03 ud	0,10	0,30
Capacitor eletrolítico 22 μ F 16V	02 ud	0,12	0,24
Capacitor eletrolítico 220 μ F 16V	01 ud	0,12	0,12
Capacitor cerâmico 10nF 16V	01 ud	0,06	0,06
Capacitor cerâmico 47nF 16V	01 ud	0,06	0,06
Capacitor eletrolítico 1 μ F 16V	01 ud	0,14	0,14
Capacitor eletrolítico 10 μ F 16V	01 ud	0,12	0,12
Regulador de tensão LM7805	01 ud	0,80	0,80
Regulador de tensão LM7812	01 ud	0,80	0,80
Regulador de tensão LM7912	01 ud	0,80	0,80
Amplificador operacional LM741	02 ud	0,65	1,30
Amplificador operacional CA3140	01 ud	1,80	1,80
Sensor de temperatura LM35	01 ud	4,50	4,50
Conversor A/D ADC0832	01 ud	6,00	6,00
Resistor 100k Ω 1/8W \pm 5%	03 ud	0,02	0,06
Resistor 10k Ω 1/8W \pm 5%	03 ud	0,02	0,06
Resistor 100 Ω 1/8W \pm 5%	01 ud	0,02	0,02

Cont....

TABELA 8A (Cont....):

Descrição	Quantidade	Custo unitário (RS)	Custo total (RS)
Resistor 200k Ω 1/8W \pm 5%	02 ud	0,02	0,04
Resistor 1k Ω 1/8W \pm 5%	01 ud	0,02	0,02
Resistor 330 Ω 1/8W \pm 5%	01 ud	0,02	0,02
Resist. var. 25 voltas 10k Ω 1/8W \pm 5%	01 ud	0,30	0,30
Resistor 301 Ω 1/8W \pm 5%	01 ud	0,02	0,02
Relê 6V	01 ud	2,40	2,40
Transistor BC548	01 ud	0,12	0,12
Válvula solenóide 127V	01 ud	9,00	9,00
Cabo RGC059 tripolar 75 Ω	03 m	4,20	4,20
Condutor elétrico simples 1mm ²	06 m	0,20	1,20
Placa de fenolite 10x15 cm	01 ud	3,90	3,90
Percloroeto de ferro	250 mL	6,65	6,65
Estanho para solda	04 m	1,00	4,00
Bastão de aço inox 2,54 mm ¹	0,06 m	-	-
Tubo PVC ½"	0,20 m	12,00	2,40
Cola epoxy	01 ud	4,00	4,00
TOTAL			169,61²

¹ = Encontrado em ferro-velho, sem condição de informar o preço.

² = Cotação média do dólar na época de aquisição dos materiais: US\$1,00 = R\$2,92.