

**Caio Hiroshi Fujiwara**

**Desenvolvimento de um sensor de condutividade para a  
determinação do tempo de resposta de um sistema de  
pulverização agrícola com injeção direta**

**São Carlos, Brasil**

**Novembro de 2015**



**Caio Hiroshi Fujiwara**

**Desenvolvimento de um sensor de condutividade para a determinação do tempo de resposta de um sistema de pulverização agrícola com injeção direta**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Universidade de São Paulo – USP  
Escola de Engenharia de São Carlos  
Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Vilma Alves de Oliveira

São Carlos, Brasil  
Novembro de 2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F949d

Fujiwara, Caio Hiroshi

Desenvolvimento de um sensor de condutividade para  
a determinação do tempo de resposta em um sistema de  
pulverização agrícola com injeção direta / Caio Hiroshi  
Fujiwara; orientadora Vilma Alves de Oliveira. São  
Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com  
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São  
Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Sensor de condutividade. 2. Tempo de resposta.  
3. Injeção direta. 4. Pulverização agrícola. I. Título.

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**Nome: Caio Hiroshi Fujiwara**

**Título: "Desenvolvimento de um sensor de condutividade para a determinação do tempo de resposta em um sistema com injeção direta"**

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado  
em 23/11/2015,**

**com NOTA 10,0 (dez, zero), pela Comissão Julgadora:**

**Profa. Titular Vilma Alves de Oliveira - (Orientadora- SEL/EESC/USP)**

**Prof. Dr. José Marcos Alves - (SEL/EESC/USP)**

**Prof. Assistente Edson Gesualdo - (SEL/EESC/USP)**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:  
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior**



Dedico este trabalho aos meus pais, irmão e família pelos esforços imedidos para que eu pudesse seguir em frente em busca dos meus sonhos e também, por todo amor.



# Agradecimentos

À minha namorada Camila, que esteve comigo durante os momentos de alegria e que sempre foi meu pilar de apoio nos momentos de dificuldade.

Aos meus irmãos de São Carlos, Múmia, Arnaldo, Tixa, Glamour, Cabeça e Melven, que compartilharam momentos comigo dos quais sempre sentirei saudades.

Aos amigos da Eletrônica 010, da república e todos os demais que participaram dessa fase da minha vida, em especial, Brunna, Marcela, Tiago, João, Réjean, Smooth e Piauí.

À Embrapa Instrumentação e todos os seus colaboradores, por possibilitarem o desenvolvimento deste trabalho, em especial, Adriana Thomazi, Jorge Novi, Luis Godoy e Cristiane Gattaz, que por diversas vezes disponibilizaram seu tempo, trabalho e atenção.

Ao meu orientador de estágio, professor Dr. Paulo Estevão Cruvinel, pela oportunidade concedida na Embrapa Instrumentação e por todo o apoio, conselhos e orientações sobre questões técnicas, corporativas e pessoais, que me proporcionaram grande crescimento profissional.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, Jussara Ramos Zoia e Rosenberg Júlio da Silva, por toda ajuda, paciência, atenção e carisma em meio a tantas perguntas.

À minha orientadora, professora Dra. Vilma Alves de Oliveira, que aceitou e acreditou no meu potencial e na minha proposta de desenvolvimento para este trabalho e também por todo apoio durante o seu desenvolvimento e finalização.

Aos companheiros do LAC, Heitor Mercaldi e Elmer Peñazola, pela amizade, pelas discussões construtivas, conversas e ajudas prestadas durante o desenvolvimento deste trabalho, que sem dúvidas, trouxeram grande enriquecimento para o mesmo.

Aos meus professores do curso de graduação, em especial aos que me inspiraram durante o mesmo, Edson Gesualdo, Vilma Alves de Oliveira, Jerson Barbosa de Vargas, José Carlos de Melo Viera Jr. e Paulo Roberto Veronese.

À Universidade de São Paulo e à Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade, experiência e pelo grande aprendizado que me foram proporcionados.



# Resumo

Em aplicações de pesticidas baseadas em sistemas com injeção direta, o tempo de resposta é um fator determinante para a qualidade da pulverização em tempo real. O tempo de resposta é definido como o tempo decorrido a partir do instante de injeção até o momento em que a concentração da calda atinge 95% do seu valor de equilíbrio nos bicos de pulverização. Este documento apresenta o desenvolvimento de um sensor de condutividade para a obtenção do tempo de resposta em um sistema de pulverização com injeção direta construído em uma plataforma flexível de desenvolvimento de pulverizadores. O sensor construído possui cinco módulos e é composto por um circuito de excitação senoidal de alta estabilidade, transdutor de condutividade do tipo placas paralelas, circuito de condicionamento de sinal, sistema de acionamento e tratamento computacional de dados, possibilitado pela interface entre a placa Arduino Uno e o *software* LabVIEW. Os tempos de resposta do sistema de pulverização com injeção direta foram calculados através das respostas dinâmicas obtidas a partir de um degrau de concentração que foi realizado com a injeção de uma mistura de água e NaCl no sistema e a utilização do sensor construído aplicado diretamente no bico de pulverização de herbicida. Os resultados obtidos mostram a utilidade do sensor desenvolvido em aplicações em tempo real e possibilita aplicações em campo visando a sustentabilidade e redução do consumo de agrotóxicos.

**Palavras-chave:** sensor de condutividade, tempo de resposta, injeção direta, pulverização agrícola.



# Abstract

In pesticide application based on direct injection systems, the response time plays an important role for the spraying quality, mainly when operating in real time. The response time is defined as the time elapsed from the time of injection until the concentration of the mixture reaches 95% of its regime value in the sprayer nozzles. This document presents the development of a conductivity sensor to measure the response time of a boom sprayer system with direct injection system built in a flexible sprayer systems development platform. The built sensor has five modules and is composed by a sinusoidal excitation circuit with high stability, a parallel plates topology conductivity transducer, a signal conditioning circuit, a drive system and the computational data processing, assisted by the interface between the Arduino Uno board and LabVIEW software. The response times of the sprayer system with direct injection were calculated by the obtained dynamic system responses from a concentration step, which was performed by a mixture of water and NaCl injection in the system, and the sensor directly applied in herbicide sprayer nozzle. The obtained results show the usefulness of the developed sensor in real-time applications and attend practical field applications aiming sustainability and reduction of pesticide consumption.

**Keywords:** conductivity sensor, response time, direct injection, agricultural spray



# Listas de ilustrações

Figura 1 – Condutor elétrico uniforme, com área de secção transversal a e comprimento $\ell$ .	24
Figura 2 – Princípio de funcionamento de um sensor de condutividade com eletrodos do tipo placas paralelas.	26
Figura 3 – Resposta dinâmica característica para sistemas de injeção direta, onde $T_r$ é o tempo de resposta, $T_a$ é o tempo de atraso de transporte do sistema, definido como o tempo decorrido para que a concentração da mistura atinge 10% do seu valor final e $T_t$ é o tempo de transiente, definido como o tempo entre os limiares de 10% até 95% da concentração final da mistura.	28
Figura 4 – Diagrama esquemático do projeto do sensor de condutividade desenvolvido.	32
Figura 5 – Diagrama de blocos do circuito de excitação.	32
Figura 6 – Circuito oscilador senoidal.	33
Figura 7 – Filtro passa-alta passivo.	34
Figura 8 – Aplicação de um circuito isolador para isolação entre dois estágios.	34
Figura 9 – Circuito isolador utilizado no terceiro e quinto estágio do circuito de excitação.	35
Figura 10 – Circuito amplificador inversor.	35
Figura 11 – Vista explodida do transdutor de condutividade com instalação no bico pulverizador.	36
Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema de medição da condutividade elétrica específica.	37
Figura 13 – Vista em corte do transdutor de condutividade - cotas em milímetros.	38
Figura 14 – Aplicação do sensor de condutividade no SDP	38
Figura 15 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento.	39
Figura 16 – Circuito retificador de precisão.	39
Figura 17 – Filtro passa-baixa da topologia <i>Sallen Key</i> .	41
Figura 18 – Circuito isolador construído com OPA344.	42
Figura 19 – Vista frontal do sistema de desenvolvimento de pulverizadores.	43
Figura 20 – Sistema de pulverização de agroquímicos montado no SDP para aplicação em taxa variada com o módulo de injeção direta e demais componentes desenvolvidos no projeto em detalhe.	44
Figura 21 – Diagrama esquemático do circuito de acionamento da bomba de injeção.	44
Figura 22 – IVMC construído para a medição da condutividade elétrica específica.	46
Figura 23 – Painel de interface com o usuário para a aferição da condutividade elétrica.	46
Figura 24 – IVATR construído para a aferição do tempo de resposta.	48
Figura 25 – Painel de interface correspondente ao IVATR para aquisição do tempo de resposta.	48
Figura 26 – Sinal de saída do circuito oscilador.	51
Figura 27 – Sinal senoidal com remoção do nível de tensão médio.	52
Figura 28 – Resposta em frequência teórica e experimental do filtro passa-alta.	52
Figura 29 – Resposta em frequência do circuito da topologia isolador.	53
Figura 30 – Resistência de entrada do circuito da topologia isolador.	53
Figura 31 – Resistência elétrica de saída do circuito da topologia isolador.	53
Figura 32 – Sinal de excitação do transdutor.	54

Figura 33 – Sinal de tensão de saída $V_8$ .	55
Figura 34 – Sinal de tensão de saída $V_9$ .	55
Figura 35 – Sinal de saída $V_{15}$ do circuito retificador.	55
Figura 36 – Resposta em frequência teórica e experimental do filtro passa-baixa.	56
Figura 37 – Sinal de saída $V_s$ do circuito de condicionamento.	56
Figura 38 – Curva de calibração do sensor com constante de célula $C = 0,255\text{cm}^{-1}$ .	57
Figura 39 – Curva de calibração do sensor com constante de célula $C = 0,5\text{cm}^{-1}$ .	57
Figura 40 – Curva de calibração do sensor com constante de célula $C = 0,764\text{cm}^{-1}$ .	58
Figura 41 – IVMC modificado para medição da condutividade elétrica específica.	58
Figura 42 – Resposta dinâmica obtida para cada uma das três repetições para uma vazão $Q = 16\text{l/min}$ e pressão igual a $200\text{kPa}$ .	59
Figura 43 – Resposta dinâmica obtida para uma vazão $Q = 16\text{l/min}$ e pressão igual a $200\text{kPa}$ .	60
Figura 44 – Resposta dinâmica obtida para cada uma das três repetições para uma vazão $Q = 23\text{l/min}$ e pressão igual a $400\text{kPa}$ .	60
Figura 45 – Resposta dinâmica obtida para uma vazão $Q = 23\text{l/min}$ e pressão igual a $400\text{kPa}$ .	61
Figura 46 – Conexões entre o cRIO-9073 e os módulos de E/S.	69

# **Lista de tabelas**

Tabela 1 – Resistividade e condutividade elétrica para diferentes materiais em temperatura igual a $20^{\circ}C$ .	24
Tabela 2 – Condutividades iônicas de diferentes cátions e ânions em temperatura igual a $25^{\circ}C$ .	27
Tabela 3 – Distância entre os eletrodos e suas respectivas constantes de célula.	37
Tabela 4 – Dados experimentais do filtro passa-alta.	52
Tabela 5 – Valores de tensão experimentais do circuito de excitação.	54
Tabela 6 – Dados experimentais do filtro passa-baixa.	56
Tabela 7 – Valores experimentais obtidos para vazão de 16l/min e pressão igual a 200kPa.	59
Tabela 8 – Valores experimentais obtidos para vazão de 23l/min e pressão igual a 400kPa.	61



# **Lista de abreviaturas e siglas**

<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>AP</b>	Agricultura de Precisão
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>VRT</b>	Variable-Rate Technology — Tecnologia de Aplicação em Taxas Variáveis
<b>GIS</b>	Global Information Systems
<b>SDP</b>	Sistema de Desenvolvimento de Pulverizadores
<b>d.d.p.</b>	Diferença de Potencial
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>NI-VISA</b>	National Instruments Virtual Instrument Software Architecture
<b>VIPM</b>	Virtual Instruments Package Manager
<b>LIFA</b>	LabVIEW Interface for Arduino
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>IVMC</b>	Instrumento Virtual Medidor de Condutividade
<b>IVATR</b>	Instrumento Virtual Aquisição do Tempo de Resposta



# Sumário

1	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	21
2	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS . . . . .</b>	23
2.1	Condutovidade elétrica . . . . .	23
2.2	Sensores de condutividade . . . . .	25
2.3	Tempo de resposta . . . . .	28
3	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	31
3.1	Círculo de excitação de sinal . . . . .	32
3.1.1	Círculo oscilador . . . . .	32
3.1.2	Filtro passa-alta . . . . .	33
3.1.3	Círculo isolador do círculo de excitação de sinal . . . . .	34
3.1.4	Círculo amplificador inversor . . . . .	35
3.2	Transdutor de condutividade . . . . .	36
3.3	Círculo de condicionamento de sinal . . . . .	38
3.3.1	Retificador de tensão de precisão com ganho variável . . . . .	39
3.3.2	Filtro passa-baixa . . . . .	41
3.3.3	Círculo isolador do círculo de condicionamento de sinal . . . . .	42
3.4	Sistema de acionamento . . . . .	43
3.5	Análise e tratamento computacional de sinal . . . . .	45
3.5.1	Instrumento virtual medidor de condutividade . . . . .	46
3.5.2	Instrumento virtual aquisição do tempo de resposta . . . . .	47
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	51
4.1	Medidor de condutividade . . . . .	51
4.1.1	Círculo de excitação . . . . .	51
4.1.2	Círculo de condicionamento de sinal . . . . .	54
4.1.3	Curvas de calibração . . . . .	57
4.2	Determinação do tempo de resposta . . . . .	59
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	63
	<b>Referências . . . . .</b>	65
	<b>APÊNDICE A – CONEXÕES ENTRE O CRIOD-9073 E OS MÓDULOS DE E/S . . . . .</b>	69
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGO DESENVOLVIDO EM MATLAB PARA LEVANTAMENTO DA RESPOSTA DINÂMICA .</b>	71



# 1 Introdução

O aumento da produção de alimentos de maneira sustentável continua sendo o grande desafio do setor agrícola brasileiro. Embora a agricultura seja praticada pela humanidade há mais de dez mil anos, o uso intensivo de agrotóxicos existe há apenas pouco mais de meio século [1].

Atualmente, o Brasil vivencia o cenário onde é o principal país consumidor de agrotóxicos no mundo desde o ano de 2008, quando atingiu a marca de 986,5 mil toneladas de defensivos aplicados, equivalente a 5,2kg de agrotóxico por habitante [1]. Dados recentes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que o consumo nacional de ingredientes ativos de agrotóxicos e afins por área plantada cresceu 112,5% no período compreendido entre os anos de 2000 a 2013, passando de 3,2kg/ha para 6,8 kg/ha [2].

Os agrotóxicos, defensivos agrícolas de origem química ou biológica, são insumos amplamente utilizados para o controle de doenças e pragas nas culturas agrícolas com o objetivo de aumentar a produtividade das lavouras. Dentre os tipos mais consumidos no país, os herbicidas superam a marca de 50% do total da aplicação de agrotóxicos utilizados no controle de ervas daninhas, tendo correspondido a 61,23% da quantidade comercializada de ingredientes ativos de agrotóxicos em 2013 [3],[4].

Mediante ao elevado consumo apresentado nos últimos anos, a presença de resíduos químicos acima dos níveis autorizados, o risco de contaminação do solo e das águas são realidade e têm sido alvos de preocupação da saúde pública, exigindo investimentos de diversas esferas do governo para a implementação de ações de controle do uso de agrotóxicos [5].

Entretanto, apesar dos riscos à saúde, dos impactos ambientais e o alto consumo de agrotóxicos, a agricultura brasileira tem evoluído constantemente. Técnicas agrícolas tradicionais têm sido aprimoradas ou substituídas por outras, provenientes do avanço da Agricultura de Precisão (AP), que reúne o uso de tecnologias para o manejo do solo, insumos e culturas de modo adequado às variações espaciais e temporais com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva no campo [6].

A AP teve início marcado pelo foco em máquinas dotadas de receptores GPS (*Global Positioning System*) e mapas de produtividade [7]. O avanço de tais tecnologias, dos sensores de uso agrícola, da modelagem matemática e computação voltadas à agricultura possibilitaram o mapeamento de infestações de plantas daninhas por regiões, considerando a sua variabilidade espacial e temporal [8].

A tecnologia de aplicação de agrotóxicos em taxas variáveis, também conhecida pela sigla VRT (Variable-Rate Technology) foi implantada pela indústria agropecuária na década de 80. A aplicação em taxas variáveis utiliza-se do relacionamento entre o grau de infestação de uma determinada região e sua variabilidade espacial, obtidos a partir da análise dos mapas de infestação provenientes de softwares GIS (*Geographic Information Systems*). Segundo [9], a utilização das tecnologias de aplicações localizadas e em taxas variáveis de agrotóxicos podem possibilitar uma redução na quantidade total de herbicida de 30% a 80% em comparação aos métodos de aplicação em área total.

Os primeiros sistemas de pulverização agrícola de aplicações em taxas variáveis por meio da injeção direta de herbicidas foram desenvolvidos entre os anos de 1970 e 1980 [10]. Os sistemas de injeção

direta possuem como principal característica o armazenamento dos componentes da calda em recipientes separados. A formação da calda, mistura de água e defensivos de controle agrícolas (agrotóxicos), é realizada somente no momento da aplicação através da injeção dos defensivos diretamente em um ponto específico da tubulação de transporte da calda aos bico de pulverização [11],[12].

Nos processos de pulverização com aplicação direta, um período de tempo é necessário para que a calda formada seja entregue corretamente aos bicos com a concentração desejada. O transiente da concentração, caracterizado pelo tempo de resposta, acarreta em erros de aplicação [13].

O tempo de resposta é dependente da posição do ponto de injeção na tubulação de transporte da calda, onde quanto mais próxima dos bicos de pulverização for realizada a injeção dos defensivos, menor será o tempo [14]. É um dos fatores de desempenho mais importantes para as máquinas de pulverização dotadas de sistemas de injeção direta, podendo ser avaliado a partir de medidas de concentração da calda formada por sensores de condutividade [11].

O estudo teve o objetivo de desenvolver de um sensor de condutividade de líquidos com sensibilidade adequada e aplicado diretamente no bico de pulverização para a obtenção do tempo de resposta de um sistema de pulverização com injeção direta. Apresenta os resultados teóricos e experimentais dos circuitos de excitação e condicionamento de sinal, o desenvolvimento do sistema de tratamento computacional de dados e a construção do transdutor do sensor de condutividade customizado e inteligente inicialmente apresentado em [15],[16] e [17], que foi utilizado para a determinação do tempo de resposta do Sistema de Desenvolvimento de Pulverizadores (SDP) que se encontra no Laboratório de Pulverização Agrícola de Precisão da Embrapa Instrumentação [14],[18],[19]. O projeto é parte da pesquisa em desenvolvimento dentro da cooperação estabelecida entre a empresa e o Laboratório de Controle da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC-USP) visando o aumento da competitividade e sustentabilidade na agricultura.

O estudo foi dividido em cinco capítulos. O primeiro, apresenta a introdução ao trabalho. No segundo, o embasamento teórico sobre os conceitos da condutividade elétrica, sensores de condutividade e sobre tempo de resposta são discorridos. O terceiro capítulo apresenta a metodologia desenvolvida e utilizada. O quarto capítulo descreve os resultados e discussões. Por fim, o quinto capítulo apresenta a conclusão e as oportunidades para a continuidade do trabalho desenvolvido.

## 2 Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos à respeito da condutividade elétrica, sensores de condutividade e o tempo de resposta em um sistema de pulverização com injeção direta.

### 2.1 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é uma propriedade física de todos os materiais [20]. Sendo o recíproco da resistividade, a condutividade é definida como um número que representa a maleabilidade de um material em permitir o fluxo de eletricidade ao longo de suas dimensões, ou seja, a facilidade que os materiais possuem de transportar cargas elétricas. Quanto maior o número de elétrons livres (elétrons ligados aos últimos orbitais atômicos) em um material, maior é a sua capacidade de transportar eletricidade.

A propriedade é percebida quando uma diferença de potencial (d.d.p) é aplicada entre os extremos de dois materiais geometricamente iguais porém de diferentes composições, como o cobre e o vidro. Constatata-se que as correntes resultantes dos dois casos são muito diferentes - indicando que um material pode ser caracterizado por sua condutividade elétrica [21].

A resistência  $R$ , em ohms [ $\Omega$ ], e a condutância elétrica  $G$ , em Siemens [ $S$ ] de um material podem ser definidas pela Lei de Ohm de forma que:

$$R = \frac{V}{I} \quad (2.1)$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{V} \quad (2.2)$$

onde  $I$  é a corrente em ampères [ $A$ ] que percorre o material e  $V$  é a tensão em volts [V] aplicada em suas extremidades. A resistividade elétrica  $\rho$  [ $\Omega m$ ] e a condutividade elétrica  $\sigma$  [ $S m^{-1}$ ], dependentes das características geométricas do material e sua resistência/condutância elétrica, são definidas tal que:

$$\rho = \frac{Ra}{\ell} \quad (2.3)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{\ell}{Ra} \quad (2.4)$$

onde  $a$  [ $m^2$ ] é a área de secção transversal do material e  $\ell$  [m] corresponde ao seu comprimento, conforme ilustrado na Figura 1. A Tabela 1 exibe a resistividade e a condutividade elétrica para diferentes tipos de materiais.

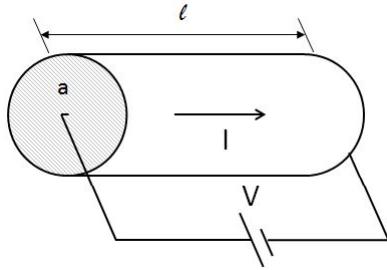


Figura 1 – Condutor elétrico uniforme, com área de seção transversal  $a$  e comprimento  $\ell$ .

Tabela 1 – Resistividade e condutividade elétrica para diferentes materiais em temperatura igual a  $20^\circ C$ .

Material	Resistividade [ $\Omega \cdot m$ ]	Condutividade [ $S \cdot m^{-1}$ ]
Prata	$1,59 \cdot 10^{-8}$	$6,29 \cdot 10^7$
Cobre	$1,70 \cdot 10^{-8}$	$5,88 \cdot 10^7$
Ouro	$2,44 \cdot 10^{-8}$	$4,10 \cdot 10^7$
Alumínio	$2,82 \cdot 10^{-8}$	$3,55 \cdot 10^7$
Silício	640	$1,56 \cdot 10^{-3}$
Vidro	$10^{10} \sim 10^{14}$	$10^{-10} \sim 10^{-14}$
Enxofre	$10^{15}$	$10^{-15}$

Fonte: [22]

O mecanismo de condução de corrente elétrica não ocorre somente em materiais sólidos como os metais. Em soluções aquosas eletrolíticas, os elétrons são transportados por íons capazes de se moverem independentemente com a aplicação de um campo eletrostático, o que proporciona a condução da corrente elétrica no meio [23].

Sob a influência de uma d.d.p. aplicada entre dois eletrodos entre um meio eletrolítico, os íons da solução são acelerados de um eletrodo em direção ao eletrodo de carga oposta, porém, com velocidade de migração limitada pela resistência do solvente ao movimento das partículas [24]. A velocidade de migração dos íons se relaciona linearmente com a d.d.p. e as soluções de eletrólitos obedecem a lei de Ohm: a corrente elétrica é diretamente proporcional à d.d.p. e inversamente proporcional à resistência do meio. A condutividade elétrica específica  $\kappa$  para uma solução eletrolítica homogênea e com área de seção transversal  $a$  uniforme pode então ser definida como:

$$R = \kappa \frac{d}{a} \quad (2.5)$$

o que fornece:

$$\kappa = R \frac{a}{d} \quad (2.6)$$

onde  $\kappa$  é dada em  $S \cdot m^{-1}$ ,  $a$  é dado em  $m^2$  e  $d$ , dado em metros [m], é a distância entre os eletrodos [24].

## 2.2 Sensores de condutividade

Os sensores atuam como conversores que transformam as energias de radiação, mecânica, gravitacional, elétrica, térmica ou magnética em grandezas elétricas como tensão, corrente ou carga elétrica [21]. Através de circuitos eletrônicos de condicionamento e processamento de sinal, os sinais convertidos por um sensor podem ser analisados através de outros parâmetros como a amplitude, polaridade, frequência e fase, ou ainda, serem convertidos em sinais digitais, que possibilitam uma vasta aplicabilidade de sensoriamento com sistemas que utilizam microcontroladores.

Sensores são dispositivos que respondem a diferentes estímulos com sinais elétricos [20]. São convencionalmente classificados de acordo com os seus princípios de conversão, capacidade de medição, as tecnologias utilizadas ou suas aplicações.

No âmbito da agricultura de precisão e geologia, os sensores de condutividade são fundamentais em aplicações como a análise dos solos e a determinação da concentração da calda de aplicação em pulverizadores.

Os medidores de condutividade do solo são utilizados para se determinar a habilidade de uma área amostral em conduzir ou acumular a carga elétrica [25]. Dentre os métodos existentes, destaca-se a medição da condutividade do solo com base na utilização de dois eletrodos como pontas de prova, onde a condutividade elétrica é analisada através dos parâmetros tensão e corrente elétrica que flui entre os eletrodos inseridos no solo [21].

Compostos por água, minerais e materiais orgânicos, os solos apresentam condutividade elétrica entre 0,01 a 8 S/m, dependendo da composição da área analisada [21]. Suas análises podem ser realizadas com equipamentos relativamente simples, com grande eficiência operacional e a um custo relativamente baixo, quando comparado com outras técnicas [26].

Um exemplo deste tipos de sensores é o protótipo incorporado diretamente em uma plantadeira, onde o sensor de condutividade construído foi composto de um sistema de seis eletrodos, utilizados para a mensuração da condutividade elétrica em duas diferentes profundidades do solo [26]. Os eletrodos do sensor foram dispostos de forma que os dois eletrodos externos foram utilizados para a injeção de corrente elétrica na área analisada, os dois eletrodos centrais internos foram utilizados para a medição da diferença de potencial em uma profundidade de 0,40m e os dois eletrodos centrais externos foram utilizados para a medição da diferença de potencial em uma profundidade de 0,80m da superfície do solo. Os resultados da aplicação do sensor mostraram um grande potencial do protótipo portátil como ferramenta auxiliar na caracterização dos solos [27].

Em sistemas de pulverização, sensores de condutividade foram desenvolvidos por [28] e [29] para a medição da concentração de um aditivo injetado em bicos. Os sensores eram compostos de dois eletrodos dispostos no interior de um anel plástico que permaneceu em contato com o fluido. Dentre os resultados obtidos, destaca-se a obtenção da resposta transitória e os valores referentes ao tempo de atraso e tempo de resposta do sistema, fatores de desempenho cruciais em sistemas de pulverização de injeção direta.

De maneira semelhante, [30] utilizou um sensor de condutividade acoplado na saída do bico de pulverização de um sistema experimental de injeção direta, obtendo resultados para o tempo de resposta

que variaram entre 10 e 24 segundos. Os estudos inicialmente apresentados em [15],[16] e [17], onde um sensor de condutividade com um transdutor do tipo placas paralelas foi utilizado para a determinação da resposta dinâmica do SDP, possuem como resultados valores médios experimentais para o tempo de resposta iguais a 33,20 e 41,81 segundos.

Nos transdutores com eletrodos paralelamente dispostos, os eletrodos mantém contato direto com as soluções analisadas e a condutância elétrica é medida diretamente através da tensão de saída do transdutor, com vistas à avaliação da concentração do eletrólito. Seu princípio de funcionamento é representado abaixo pela Figura 2.

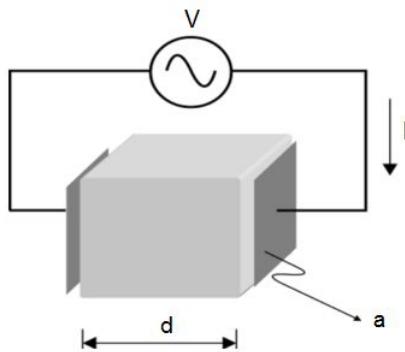


Figura 2 – Princípio de funcionamento de um sensor de condutividade com eletrodos do tipo placas paralelas.

Para um transdutor do tipo placas paralelas baseado nos conceitos da condutometria direta com constante de célula  $C$  (razão entre a distância  $d$  entre os eletrodos e suas áreas de seção transversal  $a$ ) e conforme (2.5), têm-se a seguinte relação para a condutância ( $G_{sol}$ ) e resistência elétrica ( $R_{sol}$ ) de uma solução eletrolítica:

$$G_{sol} = \kappa \frac{a}{d} = \frac{\kappa}{C} \quad (2.7)$$

$$R_{sol} = \frac{1}{\kappa} \frac{d}{a} = \frac{C}{\kappa} \quad (2.8)$$

onde  $C$  é expresso em  $m^{-1}$ .

A condutividade específica de uma solução eletrolítica varia em função de sua concentração, sendo necessário a sua normalização não apenas pela geometria, mas também pelos tipos de eletrólitos e concentração de íons [24].

A condutividade equivalente ou condutividade molar  $\Lambda_m$ , dada em  $S \text{ cm}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ , é resultado da normalização de soluções com diferentes eletrólitos. É definida como a condutividade medida entre dois eletrodos espaçados de 1 cm devido a um mol de substância e área superficial exatamente suficiente para conter todo o volume da solução [22], e pode ser descrita por:

$$\Lambda_m = \frac{1000 \kappa}{c} \quad (2.9)$$

onde  $c$  é a concentração da solução em  $mol\ l^{-1}$ .

A relação entre a condutividade molar e a concentração indica a existência de eletrólitos fortes e fracos. Os eletrólitos fortes possuem a característica de a condutividade molar diminuir pouco com o aumento da concentração, o que não ocorre para eletrólitos fracos em concentrações próximas à zero. Entretanto, nestes últimos a condutividade molar decresce rapidamente para valores muito baixos em concentrações elevadas [31].

Para uma solução contendo eletrólitos fortes, a condutividade molar  $\Lambda_m$  pode ser determinada através da lei de Kohlrausch da migração independente, de forma que, em uma solução de baixa concentração, as condutividades molares dos eletrólitos fortes variam linearmente com a raiz quadrada da concentração [22]:

$$\Lambda_m = \Lambda_m^0 - \kappa\sqrt{c} \quad (2.10)$$

onde  $\Lambda_m^0$  é a condutividade molar para uma diluição infinita, onde as atrações interiônicas são nulas e os íons são independentes um do outro,  $\kappa$  é constante e depende em grande parte da estequiometria do elétrolito.

Kohlrausch mostrou que  $\Lambda_m^0$  pode ser expressa como a soma das contribuições dos íons separados em condutividades iônicas limite, que são constantes para cada espécie iônica em um dado solvente e para uma temperatura específica. A condutividade molar em uma diluição infinita é portanto:

$$\Lambda_m^0 = \lambda_+^0 + \lambda_-^0 \quad (2.11)$$

em que  $\lambda_+^0$  e  $\lambda_-^0$  são as condutividades iônicas molares dos cátions e ânions, respectivamente.

A Tabela 2 exibe os valores das condutividades iônicas a uma temperatura de  $25^\circ C$ . Para uma solução de cloreto de sódio ( $NaCl$ ), o valor resultante da condutividade molar  $\Lambda_m$  é igual a  $126,50\ S\ cm^2\ mol^{-1}$  [22].

Tabela 2 – Condutividades iônicas de diferentes cátions e ânions em temperatura igual a  $25^\circ C$ .

Cátion	$\lambda_+^0\ [\Omega^{-1}cm^2mol^{-1}]$	Ânion	$\lambda_-^0\ [\Omega^{-1}cm^2mol^{-1}]$
$H^+$	349,85	$OH^-$	197,60
$Li^+$	38,64	$F^-$	55,40
$Na^+$	50,15	$Cl^-$	76,35
$K_+$	73,50	$Br^-$	78,17
$Ag^+$	61,92	$I^-$	76,85
$Nh_4^+$	73,40	$NO_3^-$	71,44

Fonte: [22]

A condutância elétrica obtida através de um transdutor de placas paralelas pode então ser descrita

como:

$$G(a, d, \Lambda_m, c) = \kappa \frac{a}{d} = \frac{\Lambda_m c}{1000} \frac{a}{d} = \frac{\Lambda_m c}{1000} \frac{1}{C} = \frac{\Lambda_m c}{1000 C} \quad (2.12)$$

sendo dependente da área de secção transversal  $a$  e da distância  $d$  entre os eletrodos, da concentração  $c$  e da condutividade molar  $\Lambda_m$  da solução eletrolítica analisada.

## 2.3 Tempo de resposta

Conforme exposto anteriormente, o tempo de resposta é um fator crucial de um sistema de injeção direta e pode durar dezenas de segundos, sendo este dependente da localização do ponto de injeção na tubulação de transporte da mistura do pesticida e água. Estudos anteriormente realizados apresentaram resultados em que o tempo de resposta variou entre 4s e 60s [10] [15] [16] [13] [32] [33].

Segundo definido por [34], o tempo de resposta como sendo o tempo em que a injeção de herbicida é realizada até o momento em que a concentração química da mistura atinge 95% do seu valor de equilíbrio, cuja taxa de concentração corresponde ao limiar de eficácia para o controle adequado de ervas daninhas [35]. A Figura 3 exibe a característica dinâmica de um sistema de pulverização, conforme proposto pelos autores.

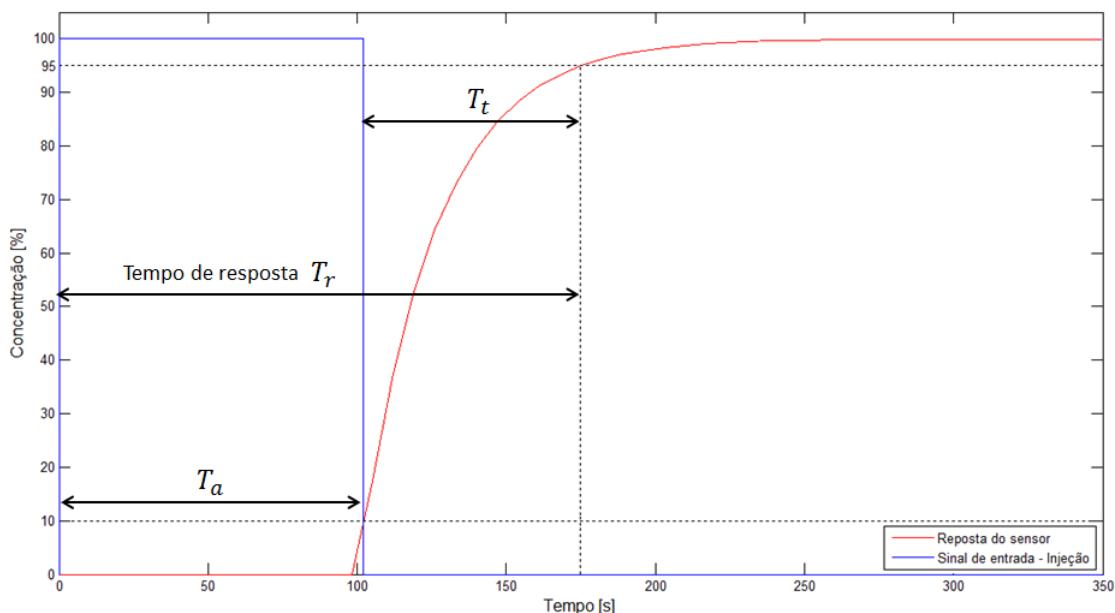


Figura 3 – Resposta dinâmica característica para sistemas de injeção direta, onde  $T_r$  é o tempo de resposta,  $T_a$  é o tempo de atraso de transporte do sistema, definido como o tempo decorrido para que a concentração da mistura atinge 10% do seu valor final e  $T_t$  é o tempo de transiente, definido como o tempo entre os limiares de 10% até 95% da concentração final da mistura.

A concentração pode ser analisada por meio dos valores da condutância elétrica da solução ou pelos valores de condutividade elétrica específica. No primeiro caso, a concentração é relacionada com a

condutância da solução tal que:

$$G = \frac{\Lambda_m c}{1000 C} \quad (2.13)$$

o que fornece:

$$c = G \frac{1000 C}{\Lambda_m}. \quad (2.14)$$

Para a condutividade elétrica específica, a relação com a concentração da solução é dada por decorre de (2.9), resultando em:

$$c = \frac{1000 \kappa}{\Lambda_m}. \quad (2.15)$$

A resposta dinâmica de um sistema de pulverização resultante da aplicação de um degrau de concentração (injeção de agroquímico nas barras de pulverização), ilustrada na Figura 3, pode ser caracterizada por uma função de transferência de primeira ordem com tempo de atraso:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{e^{-sT_a}}{\tau s + 1} \quad (2.16)$$

em que  $s$  é o operador de Laplace,  $\tau$  é uma constante,  $U(s)$  é a transformada de Laplace de referência da dose e  $Y(s)$  é a transformada de Laplace da saída do pulverizador [36]. O tempo de resposta é então representado por (2.17) [37].

$$T_r = T_a + T_t. \quad (2.17)$$



### 3 Metodologia

Neste capítulo são apresentadas de forma detalhada, a metodologias utilizada em cada um dos módulos constituintes do projeto. Um esquemático descritivo geral deste pode ser visualizado na Figura 4, onde são exibidos cada um dos módulos do sensor com suas respectivas funções, características e principais componentes.

O primeiro módulo do sensor de condutividade para determinação do tempo de resposta em um sistema de injeção direta que foi desenvolvido é constituído por um circuito de excitação de alta estabilidade, cuja finalidade foi fornecer um sinal senoidal para que existisse a condução de corrente elétrica entre os terminais do transdutor de condutividade do tipo placas paralelas conforme a Lei de Ohm.

O segundo módulo é representado pelo transdutor de condutividade do tipo placas paralelas, constituído por dois componentes: um corpo de poliacetal (polímero de alta resistência mecânica e que não absorve umidade após a injeção) e eletrodos cilíndricos de aço inox. O transdutor foi aplicado diretamente no bico pulverizador de herbicida em um sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido no Sistema de Desenvolvimento de Pulverizadores (SDP) do Laboratório de Pulverização de Agrícola de Precisão da Embrapa Instrumentação.

O circuito de condicionamento de sinal desenvolvido foi utilizado com a finalidade de converter analogicamente as leituras de condutividade elétrica realizadas com o transdutor e de adequar o sinal para posterior análise e tratamento computacional dos dados. O circuito de condicionamento representa o terceiro módulo do projeto do sensor de condutividade.

O quarto módulo é representado pelo circuito de acionamento. O circuito possui interação com a placa *Arduino Uno* e o SDP, sendo responsável por acionar a bomba de injeção no momento desejado e com os parâmetros elétricos adequados.

Por fim, o quinto módulo é representado pelo tratamento computacional de sinal, e é dividido em duas diferentes aplicações: o tratamento computacional para o medidor de condutividade, que foi utilizado para o levantamento da curva de calibração do sensor; o tratamento computacional para a aquisição da resposta dinâmica e tempo de resposta do SDP.

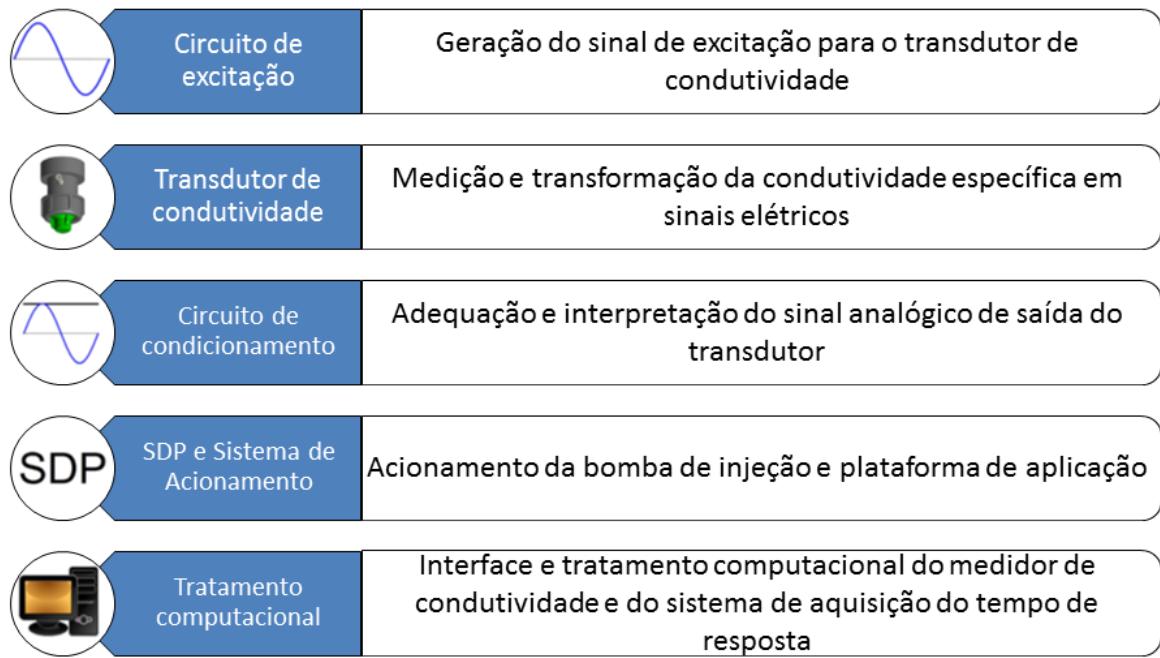


Figura 4 – Diagrama esquemático do projeto do sensor de condutividade desenvolvido.

### 3.1 Circuito de excitação de sinal

O circuito de excitação que foi construído teve como finalidade o fornecimento de um sinal senoidal de excitação para que uma d.d.p. fosse aplicada ao transdutor de condutividade. Sua constituição foi composta por um oscilador senoidal, um filtro passa-alta, dois circuitos isoladores e um amplificador inversor, conforme representado pelo diagrama de blocos da Figura 5. A definição e construção de cada um dos estágios foi realizada para a que fosse obtido um sinal de excitação com nível médio de tensão nulo, estabilidade, frequência de 1kHz e amplitude igual a  $5V_p$ , características adequadas para o uso do transdutor desenvolvido.

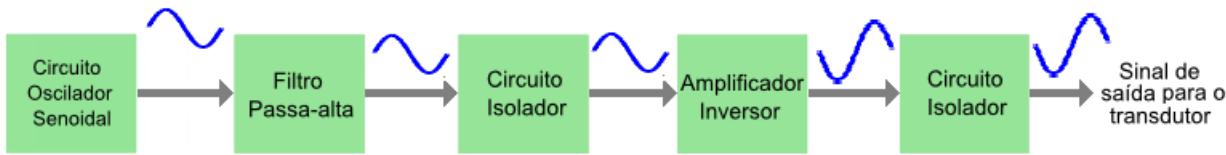


Figura 5 – Diagrama de blocos do circuito de excitação.

#### 3.1.1 Circuito oscilador

O circuito oscilador foi desenvolvido com elementos elétricos passivos e um circuito integrado gerador de funções monolítico *XR2206*, cujo sinais de saída podem ser modulados em amplitude ou frequência por meio da aplicação de uma tensão externa. O circuito integrado é capaz de produzir sinais senoidais, triangulares e quadrados de alta qualidade, alta estabilidade e precisão em uma faixa de frequência de operação de 0,01Hz à 1MHz [38].

O oscilador do tipo senoidal foi escolhido a fim de se reduzir o efeito da eletrólise nos eletrodos e a polarização da mistura, dado que a condução de uma corrente direta através de uma célula envolve a

ocorrência da dissociação iônica da solução eletrolítica, reação de oxidação no ânodo e redução no cátodo.

A Figura 6 apresenta o circuito oscilador senoidal desenvolvido, composto pelo circuito integrado XR2206, resistores, capacitores e potenciômetros. Sua construção é uma versão adaptada dos circuitos sugeridos no manual do fabricante e a frequência do sinal de saída é determinada pelo capacitor  $C_1$  e o resistor  $R_4$ . A simetria e a forma de onda foram ajustadas pelos potenciômetros  $R_5$  e  $R_6$ , respectivamente.

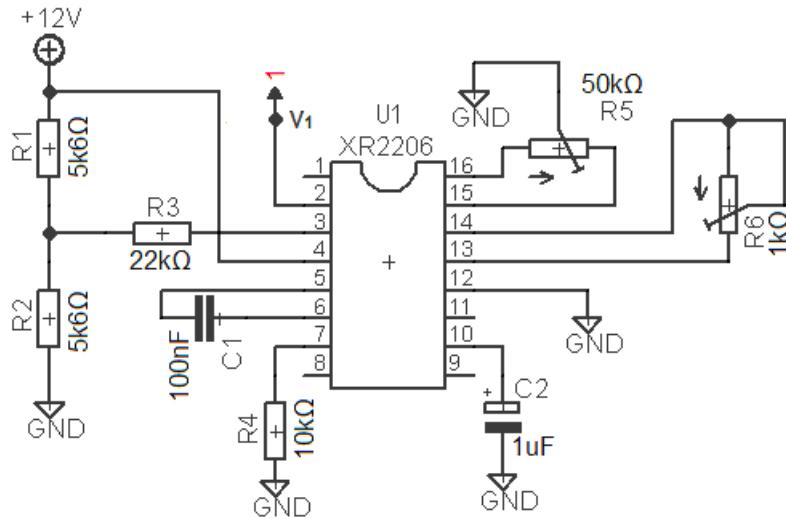


Figura 6 – Circuito oscilador senoidal.

De acordo com o manual do fabricante, a taxa de distorção harmônica típica do oscilador senoidal é menor que 2,5% e o nível de tensão médio no sinal de saída é aproximadamente a metade do valor de tensão de polarização no terminal 3 do XR2206. A amplitude máxima de saída também é determinada pela tensão de polarização no terminal 3, não ultrapassando valores iguais a metade desse valor [38].

A presença do nível de tensão médio diferente de zero no sinal de saída do circuito oscilador demonstrou a inviabilidade do uso isolado do circuito construído. O nível de tensão médio teve de ser então eliminado do sinal de saída através de um filtro passa-alta, no estágio seguinte ao circuito oscilador.

### 3.1.2 Filtro passa-alta

Filtros são circuitos lineares baseados em elementos elétricos reativos (capacitores e indutores) e possuem como característica a propriedade de atenuar a amplitude de sinais com frequências fora dos seus limites de especificação. Tais circuitos podem ser construídos com elementos elétricos passivos ou ativos e, em relação a sua resposta em frequência, classificam-se em quatro diferentes tipos: filtro passa-baixas, filtro passa-alta, filtro passa-faixa e filtro rejeita-faixa.

Um filtro passa-alta possui a propriedade de atenuar a amplitude de sinais de frequências abaixo de uma frequência específica e de permitir a passagem de sinais de frequências acima dessa frequência, denominada frequência de corte. Tais tipos de filtro são comumente utilizados para a remoção de níveis de tensão médio de sinais alternados.

O filtro passa-alta passivo de primeira ordem da Figura 7 compõe o segundo estágio do circuito de excitação e foi projetado para que o nível de tensão contínua presente no sinal gerado pelo circuito oscilador fosse removido, dado que este pode ser considerado como a composição de um sinal senoidal

alternado com um sinal contínuo. O filtro com frequência de corte de 482mHz foi construído com um circuito RC série, cuja função de transferência é dada por:

$$G_{fpa}(s) = \frac{s}{s + \frac{1}{R_7 C_3}} = \frac{s}{s + 3,0303} \quad (3.1)$$

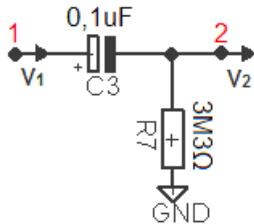


Figura 7 – Filtro passa-alta passivo.

Sendo um filtro passa-alta de primeira ordem, o circuito construído possui um decaimento de amplitude do sinal de 20dB por década para frequências abaixo da frequência de corte. A frequência de corte  $f_{c_{fpa}}$  de 482mHz, calculada teoricamente através de (3.2), foi escolhida para que o nível médio de tensão do sinal fosse eliminado.

$$f_{c_{fpa}} = \frac{1}{2\pi R_7 C_3} \quad (3.2)$$

onde  $R_7 = 3,3M\Omega$  e  $C_3 = 0,1\mu F$ .

### 3.1.3 Circuito isolador do circuito de excitação de sinal

Os circuitos isoladores, comumente chamados de *buffers*, são circuitos não-inversores com ganho unitário largamente utilizados para a realização do isolamento entre dois estágios independentes de um circuito, fazendo com que as características elétricas de um estágio não influencie nas características do outro.

A Figura 8 exibe a aplicação de um circuito isolador para a isolação entre dois estágios. Uma impedância de entrada teoricamente infinita é vista pelo estágio 1, enquanto uma resistência de saída teoricamente nula é vista pelo estágio 2.

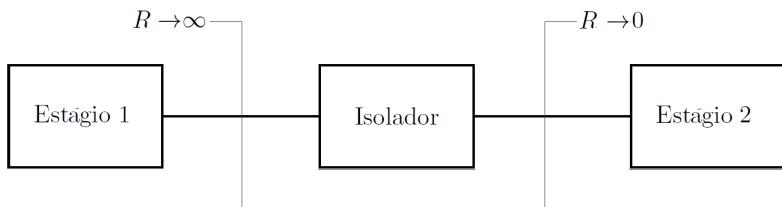


Figura 8 – Aplicação de um circuito isolador para isolação entre dois estágios.

Os circuitos isoladores são comumente constituídos por circuitos transistorizados ou amplificadores operacionais. Em construções compostas por amplificadores operacionais ideais, a condução de

corrente elétrica entre os terminais positivo e negativo é nula. Em composições com circuitos não-ideais a mesma condição pode ser assumida, dado que o ganho de malha aberta dos amplificadores é grande o suficiente para que os efeitos da não-idealidade sejam minimizados.

Dois circuitos isoladores foram construídos, com o objetivo de se realizar o isolamento entre o filtro passa-alta com o estágio de amplificação e, o isolamento entre o circuito de excitação e o transdutor de condutividade, conforme indicado no diagrama de blocos da Figura 5. A Figura 9 representa o circuito isolador não-inversor utilizado no terceiro e quinto estágio do circuito de excitação, onde foi utilizado um circuito integrado *LF347*, amplificador operacional quádruplo que apresenta extensa largura de banda de operação ( $4MHz$  em malha aberta), alto *Slew -Rate* ( $13V/s$ ), alta impedância de entrada ( $10^{12}\Omega$ ) e pequeno tempo de acomodação ( $2\mu s$ ) [39].

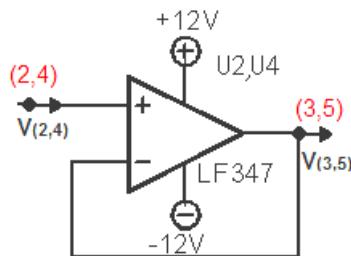


Figura 9 – Circuito isolador utilizado no terceiro e quinto estágio do circuito de excitação.

### 3.1.4 Circuito amplificador inversor

Para que se fosse fornecido um sinal com nível de tensão adequado para a aplicação do sensoriamento da condutividade elétrica, foi necessário a amplificação do sinal proveniente da saída do terceiro estágio do circuito de excitação através de um amplificador inversor.

O amplificador inversor exibido na Figura 10 foi construído com resistores e um amplificador operacional do circuito integrado *LF347*. O amplificador possui ganho de tensão igual a -2,2, conforme dado pela equação 3.3:

$$A_v = -\frac{R_9}{R_8} \quad (3.3)$$

onde  $R_9 = 2,2k\Omega$  e  $R_8 = 1k\Omega$ .

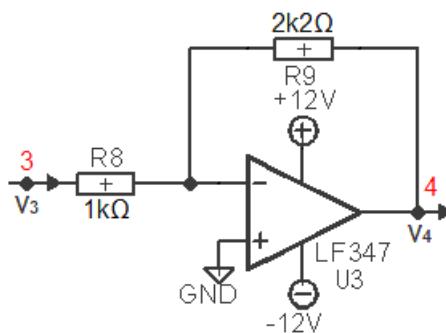


Figura 10 – Circuito amplificador inversor.

O amplificador que foi projetado compõe o quarto estágio do circuito de excitação e realiza a adequação da amplitude do sinal senoidal do terceiro estágio. O circuito foi dimensionado para que seu sinal de saída possuísse valor de pico igual a cinco volts.

Ao final do último estágio do circuito de excitação, foi obtido um sinal senoidal com nível de tensão médio próximo de zero (10mV), frequência e nível de tensão adequados para a alimentação do transdutor de condutividade (1,0684kHz), módulo posterior do projeto.

### 3.2 Transdutor de condutividade

O transdutor de condutividade representa o segundo módulo do projeto desenvolvido. Conforme exposto na Seção 2.1, o tempo de resposta é um fator crucial para o desempenho de pulverizadores e quanto mais próximo do bico for feita a injeção de herbicida, menor será o tempo de resposta.

Visando a melhoria da precisão e confiabilidade da aquisição do tempo de resposta, o transdutor do tipo placas paralelas foi projetado para que ficasse posicionado o mais próximo possível dos bicos de pulverização, reduzindo a influência de efeitos como a constante de elasticidade do fluido-mangueira e a perda de carga decorrente da dissipação de energia.

O transdutor de condutividade foi então construído com uma base de poliacetal, projetada para ser acoplada diretamente no bico pulverizador de herbicida, especificamente, no sistema corta gotas. Os eletrodos foram confeccionados com aço inox e possuem diâmetro de 5 mm. A Figura 11 exibe o modelo em três dimensões com vista explodida da montagem do transdutor com instalação no bico pulverizador de herbicida.

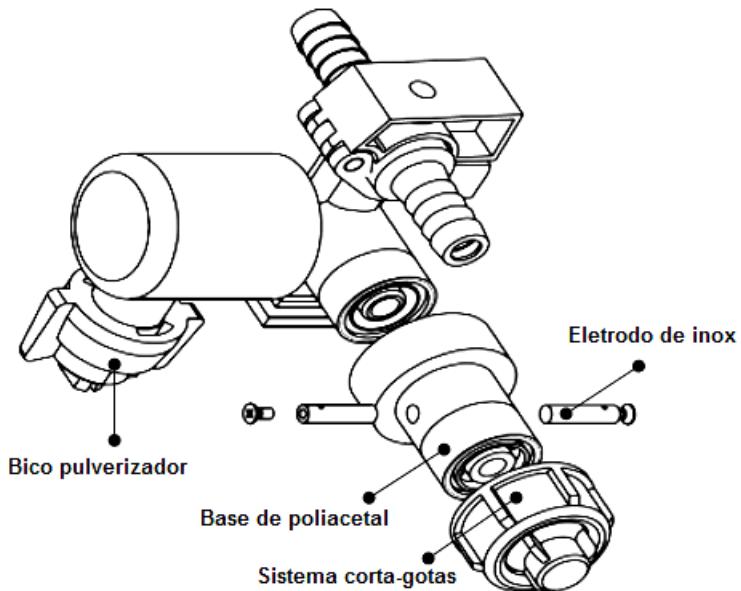


Figura 11 – Vista explodida do transdutor de condutividade com instalação no bico pulverizador.

Fonte:[17]

A definição da constante de célula utilizada para a construção do sensor com sensibilidade adequada para a aferição do tempo de resposta do SDP foi realizada a partir de variações nos parâmetros de construção do transdutor de condutividade em relação às suas características físicas, especificamente

na variação da distância entre os dois eletrodos de aço inox. Os eletrodos foram posicionados na base de poliacetal e separados entre si por três diferentes distâncias  $d$ . A Tabela 3 abaixo exibe as diferentes distâncias de espaçamento dos eletrodos e a constante de célula para cada um dos casos estudados.

Tabela 3 – Distância entre os eletrodos e suas respectivas constantes de célula.

Distância d	Constante de célula
0,5 mm	$0,255 \text{ cm}^{-1}$
1 mm	$0,509 \text{ cm}^{-1}$
1,5 mm	$0,764 \text{ cm}^{-1}$

Para a análise dos valores de condutividade elétrica específica através de grandezas elétrica, o transdutor de condutividade foi utilizado em conjunto com um resistor de  $2,17\text{k}\Omega$ . A resistência elétrica do fluido em análise e o resistor formaram um circuito divisor de tensão, cujo sinal de saída em relação ao sinal de entrada e a condutividade elétrica específica do fluido é relacionado por (3.4). O sistema de medição de condutividade elétrica específica é representado pela Figura 12 e a Figura 13 exibe uma vista em corte com as dimensões do transdutor.

$$V_6 = V_5 \frac{R_{10}}{R_{10} + R_S} \quad (3.4)$$

com  $R_{10} = 10\text{k}\Omega$  e  $R_S = \frac{1}{G}$ .

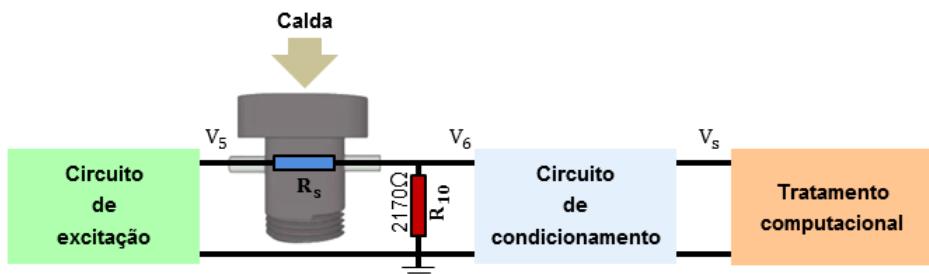


Figura 12 – Diagrama de blocos do sistema de medição da condutividade elétrica específica.

Fonte: Figura modificada de [16]

A constante de célula do transdutor de condutividade foi definida após o levantamento da curva de calibração para cada um dos três casos apresentados na Tabela 3, onde foram analisadas soluções eletrolíticas compostas de água destilada e NaCl em ensaios estáticos. Os resultados obtidos pelas leituras do sensor foram analisados em conjunto com os resultados lidos por um medidor de condutividade comercial (modelo mCA150 , fabricante Tecnopen), que possui faixa de funcionamento de 0 a  $200\mu\text{S}/\text{cm}$ , resolução de  $0,1\mu\text{S}/\text{cm}^2$  e 1% de precisão de fundo de escala [40]. A constante de célula igual a  $0,509 \text{ cm}^{-1}$  foi definida como constante de célula do transdutor de condutividade após a análise das três curvas de calibração e considerando-se a influência da distância entre os eletrodos sobre o fluxo de passagem da calda. O transdutor foi então acoplado diretamente nos bicos de pulverização e ao SDP, para medição de valores de condutividade específica, concentração da calda e para a aferição do tempo de reposta do sistema. A Figura 14 exibe detalhes do sensor aplicado ao SDP, localizado no Laboratório de Pulverização de Precisão da Embrapa Instrumentação (São Carlos, SP).

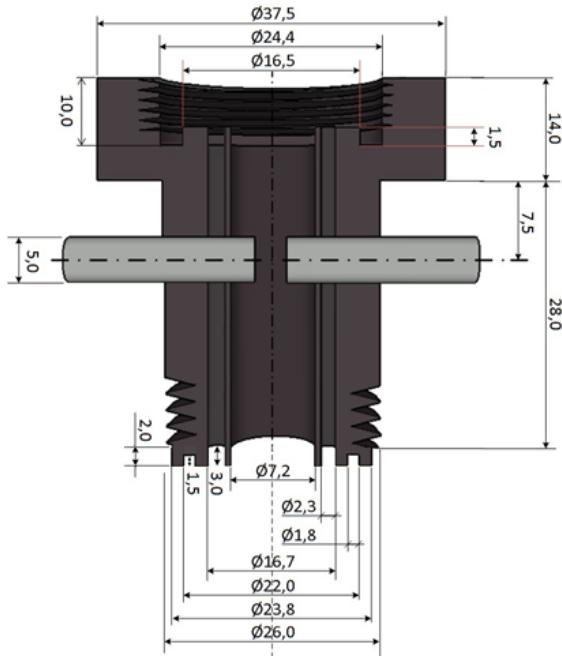


Figura 13 – Vista em corte do transdutor de condutividade - cotas em milímetros.

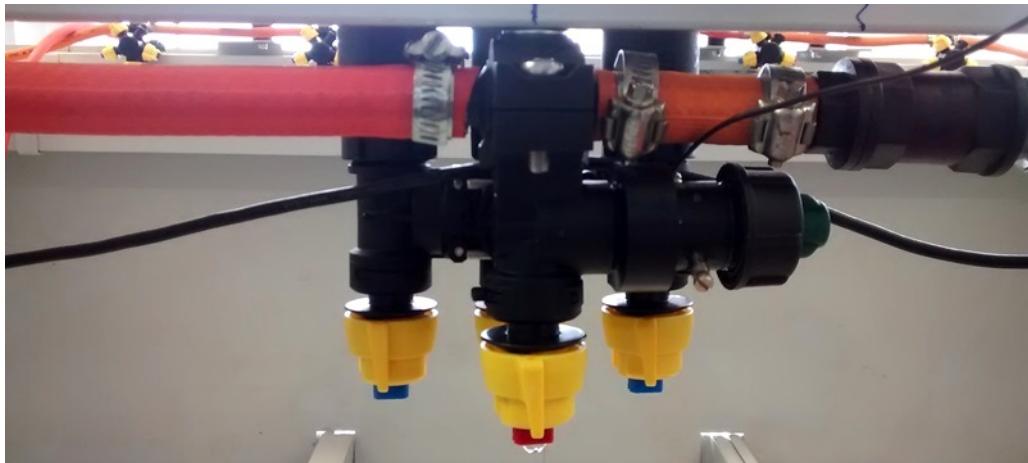


Figura 14 – Aplicação do sensor de condutividade no SDP

Fonte: [16]

### 3.3 Circuito de condicionamento de sinal

O circuito de condicionamento de sinal representa o terceiro módulo do sensor de condutividade que foi desenvolvido. O circuito, constituído por três elementos principais, possui sua estrutura representada pelo diagrama de blocos da Figura 15, onde um circuito retificador de tensão de precisão com ganho variável representa o primeiro estágio, um filtro passa-baixa ativo de segunda ordem representa o segundo estágio e um circuito isolador representa o terceiro e último estágio.

Neste módulo, os sinais de saída senoidais advindos das leituras de condutividade elétrica realizadas pelo transdutor de condutividade foram convertidos em sinais adequados para a interpretação, análise, interfaceamento e tratamento computacional de dados. As descrições e especificidades de cada

bloco do circuito de condicionamento de sinal são expostas a seguir.

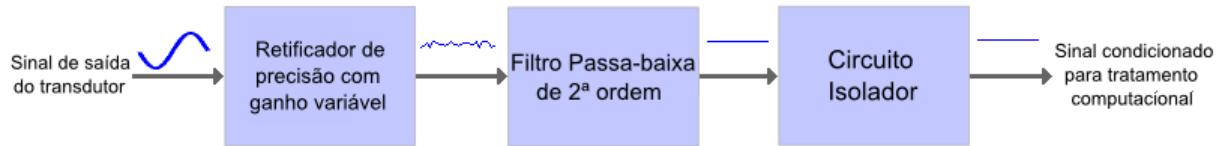


Figura 15 – Diagrama de blocos do circuito de condicionamento.

### 3.3.1 Retificador de tensão de precisão com ganho variável

Circuitos retificadores de tensão possuem a propriedade de fazer com que a corrente em uma carga circule em um único sentido. Quando utilizados conjuntamente filtros capacitivos, sinais de tensão alternados são transformados em sinais de tensão contínuos.

Os retificadores de meia onda utilizam apenas o semi-ciclo positivo ou o semi-ciclo negativo de um sinal alternado no processo de retificação de sinal, enquanto o retificador de onda completa utiliza ambos os semi-ciclos do sinal alternado de entrada, invertendo a polaridade de um dos semi-ciclos para que o sinal de saída seja unipolar.

Com a finalidade de obter um sinal de tensão contínuo adequado para o tratamento computacional de dados, o circuito retificador de precisão de onda completa com ganho variável foi selecionado e desenvolvido devido à sua capacidade de retificar sinais de amplitudes contornando as quedas de tensão que são inerentes da junção PN de um diodo real através de malhas de realimentação, sendo portanto, uma alternativa às deficiências dos retificadores convencionais à diodo.

A Figura 16 ilustra o circuito retificador de precisão que foi desenvolvido. O circuito possui como saída um sinal de tensão contínuo com valor igual ao valor de pico do sinal de tensão senoidal de saída  $V_6$  do transdutor de condutividade.

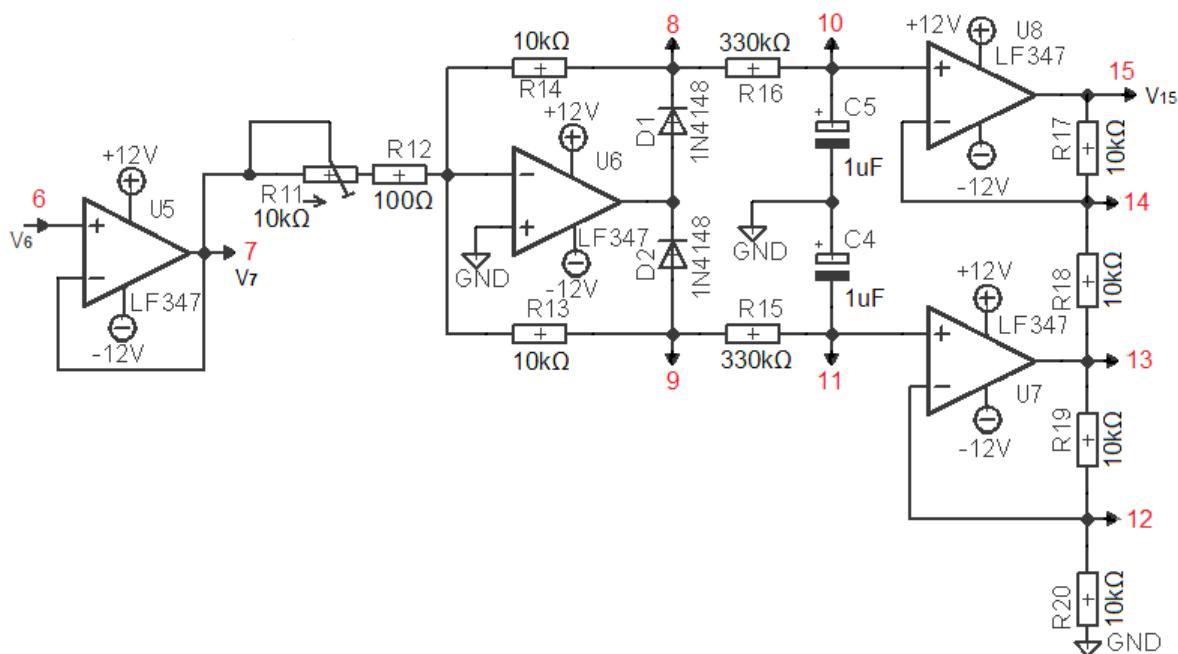


Figura 16 – Circuito retificador de precisão.

O amplificador operacional  $U_5$  foi responsável pelo isolamento elétrico entre o segundo e terceiro módulos do sensor de condutividade. O potenciômetro  $R_{11}$ , os resistores  $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ , o amplificador operacional  $U_6$  e os diodos  $D_1$  e  $D_2$  são parte integrantes do circuito que foi responsável pela retificação de meia-onda em cada semiciclo do sinal de entrada, onde o ganho desse estágio e do circuito completo pode ser regulado pelo potenciômetro  $R_{11}$ . Os resistores  $R_{15}$  e  $R_{16}$  e os capacitores  $C_4$  e  $C_5$  foram responsáveis pela obtenção do valor médio dos sinais retificados em cada semiciclo. Os demais componentes fazem parte da construção de dois amplificadores que realizaram a soma e amplificação dos valores eficazes obtidos em cada semiciclo.

Dado que o ganho do circuito isolador é unitário, a tensão  $V_7$  é igual a tensão de entrada  $V_6$ . No estágio de retificação, os sinais de saída obtidos nos semiciclos negativo ( $V_8$ ) e positivo ( $V_9$ ) foram relacionados com o sinal de tensão  $V_7$  por (3.5) e (3.6), respectivamente.

$$V_8 = -V_{6_{pico-}} \frac{R_{14}}{R_{11} + R_{12}} \quad (3.5)$$

$$V_9 = -V_{6_{pico+}} \frac{R_{13}}{R_{11} + R_{12}} \quad (3.6)$$

No estágio seguinte, foram obtidos os valores médios dos sinais retificados do semiciclo negativo e do semiciclo positivo, com saída  $V_{10}$  e  $V_{11}$ , respectivamente dadas por:

$$V_{10} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{8_{pico}} \operatorname{sen}(\omega t) d\omega t = \frac{V_{8_{pico}}}{\pi} \quad (3.7)$$

$$V_{11} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{9_{pico}} \operatorname{sen}(\omega t) d\omega t = \frac{V_{9_{pico}}}{\pi}. \quad (3.8)$$

No último estágio, os amplificadores com sinais de saída  $V_{15}$  e  $V_{13}$  são descritos respectivamente como:

$$V_{15} = V_{10} + R_{17} \frac{(V_{10} - V_{13})}{R_{18}} \quad (3.9)$$

$$V_{13} = V_{11} + R_{19} \frac{(V_{11} - 0)}{R_{20}} = V_{11} \left(1 + \frac{R_{19}}{R_{20}}\right) \quad (3.10)$$

com  $V_{8_{pico}} = -V_{9_{pico}}$ , assumindo  $R_{17} = R_{18} = R_{19} = R_{20} = 10k\Omega$  e a partir das equações 3.9 e 3.10 tem-se que:

$$V_{15} = 2V_{10} - 2V_{11} = 4V_{10}. \quad (3.11)$$

A tensão de saída  $V_{15}$  foi então relacionada com a tensão de entrada  $V_6$  a partir de (3.5), (3.7) e (3.11), onde as variáveis referentes aos valores dos componentes elétricos utilizados são exibidos na Figura 16, conforme demonstrado por (3.12).

$$V_{15} = V_{6_{pico}} \frac{R_{14}}{R_{11} + R_{12}} \frac{4}{\pi} \quad (3.12)$$

com  $R_{11} = 12,63k\Omega$ ,  $R_{14} = 10k\Omega$  e  $R_{12} = 100\Omega$  obtém-se:

$$V_{15} = V_{6_{pico}} \frac{12730}{12630 + 100} \quad (3.13)$$

logo:

$$V_{15} = V_{6_{pico\_contnuo}}. \quad (3.14)$$

### 3.3.2 Filtro passa-baixa

Conforme exposto anteriormente, os filtros elétricos possuem como característica a propriedade de atenuar a amplitude de sinais com frequências fora dos seus limites de especificação. Ao contrário do filtro passa-alta, um filtro passa-baixa é capaz de atenuar a amplitude de sinais com frequências acima da frequência de corte e de permitir a passagem de sinais de frequências abaixas da sua frequência de corte.

O filtro passa-baixa de segunda ordem exibido pela Figura 17 é um filtro ativo *Butterworth* da topologia *Sallen-Key* e compõe o segundo estágio do circuito de condicionamento de sinal. O filtro foi construído com circuitos RC e um amplificador realimentado, e possui função de transferência dada pela Equação 3.15.

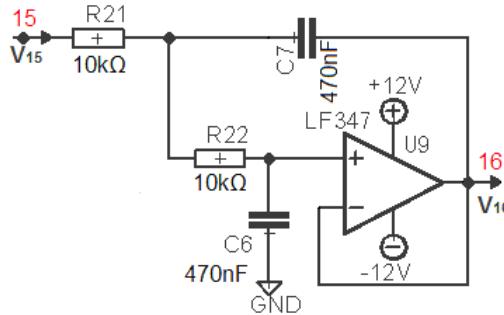


Figura 17 – Filtro passa-baixa da topologia *Sallen Key*.

$$G_{fpb}(s) = \frac{1}{1 + C_7(R_{21} + R_{22})s + C_6 C_7 R_{21} R_{22} s^2} \quad (3.15)$$

onde, com  $C_6 = C_7 = 470nF$  e  $R_{21} = R_{22} = 10k\Omega$ , obtém-se a função de transferência tal que:

$$G_{fpb}(s) = \frac{1}{1 + 9,40 \cdot 10^{-3} s + 22,09 \cdot 10^{-6} s^2}. \quad (3.16)$$

Sendo um filtro passa-baixa de segunda ordem, o circuito que foi construído possui um decaimento de amplitude do sinal de 40dB por década para frequências acima da frequência de corte. A frequência de corte  $f_{c_{fpb}}$  de 33,86Hz calculada teoricamente através de (3.17) foi determinada para que o filtro fosse capaz de reduzir interferência da rede elétrica e dos inversores de frequência presentes no SDP de acordo com:

$$f_{c_{fpb}} = \frac{1}{2\pi C_{6,7} R_{21,22}} \quad (3.17)$$

com  $C_6 = C_7 = 470nF$  e  $R_{21} = R_{22} = 10k\Omega$ .

### 3.3.3 Circuito isolador do circuito de condicionamento de sinal

O último estágio do circuito de condicionamento de sinal é composto por um circuito de isolação, conforme teoricamente descrito anteriormente na Seção 3.1.3. Porém, neste caso, o circuito foi construído com o circuito integrado *OPA344*, um amplificador operacional com capacidade de operar com alimentação simples e com baixos níveis de tensão (mínimo de 2,5V), segundo o fabricante [41].

A Figura 18 exibe o circuito isolador construído com o amplificador *OPA344*, que foi escolhido por ser do tipo *Rail-to-Rail*, ou seja, um circuito onde o sinal de saída atinge níveis máximos muito próximos aos valores das tensões de alimentação, o que não ocorre nos outros tipos de amplificadores. O circuito regulador de tensão foi utilizado para que a tensão de alimentação do isolador fosse igual a 5 volts, o que proporcionou proteção da placa de prototipagem *Arduino Uno* do módulo de tratamento computacional de dados, dado que a excursão de sinal ficou limitada pela faixa de 0 a 5 volts.

Dado que o filtro passa-baixa da topologia *Sallen-Key* e o circuito isolador possuem ganho unitário para sinais de baixa frequência, o sinal de tensão de saída  $V_s$  é dado por:

$$V_s = V_{16} = V_{15} = V_{6_{pico}} \quad (3.18)$$

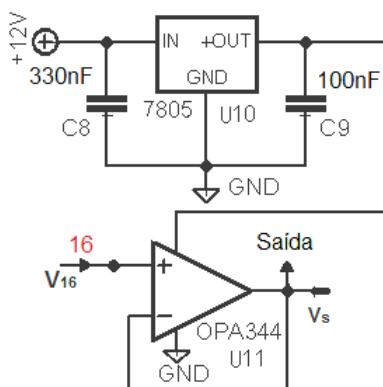


Figura 18 – Circuito isolador construído com OPA344.

O circuito isolador do módulo de condicionamento de sinal representa o último circuito componente do sistema de medição de condutividade elétrica. Com a finalização desse estágio, obteve-se um sistema capaz de transformar medidas de condutividade elétrica em sinais de tensão adequados para o tratamento computacional e interpretação de dados. Para o sistema, uma placa de circuito impresso foi desenvolvida no *software Eagle*.

Os circuitos desenvolvidos nos estágios de excitação e condicionamento foram analisados experimentalmente com um osciloscópio digital. O circuito de condicionamento de sinal foi analisado com o sinal de tensão de entrada fornecido pelo circuito de excitação, sem a presença do transdutor. Para as análises teóricas, foram utilizados os softwares *Matlab* e *LT Spice*.

### 3.4 Sistema de acionamento

O quarto módulo do projeto do sensor de condutividade para determinação do tempo de reposa em um sistema de injeção direta é composto pelo circuito de acionamento e o SDP, plataforma flexível para o desenvolvimento de pulverizadores, aplicadores de fertilizantes líquidos e maturadores [18].

A plataforma de desenvolvimento de pulverizadores, instalada em uma infraestrutura compartilhada entre a Embrapa Instrumentação e o Laboratório de Controle da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, é ilustrada na Figura 19 e o sistema de pulverização de injeção direta proposto para a aplicação de agrotóxicos em taxa variada que foi utilizado no projeto é ilustrado na Figura 20. A automação do sistema de desenvolvimento de pulverizadores foi realizada com um controlador programável para automação (PAC) (modelo cRIO-9073, empresa National Instruments) [42][14][19]. A conexão dos cinco módulos de E/S do cRIO-9073 (NI9262, NI9421, NI9411, NI9021 e NI9474) com os sinais dos sensores e atuadores utilizados na automação do SDP são mostrados na Figura 46 do Apêndice A.

O circuito de acionamento foi construído com um circuito integrado optoacoplador 4N25 para isolamento elétrica entre os estágios de potência, composto pela bomba de injeção, transistor de potência IRFZ48, e uma fonte de 12V 30A para alimentação da bomba de injeção, e o estágio responsável pelo sinal de acionamento, composto pelo *Arduino Uno*. O diagrama esquemático do circuito é exibido abaixo na Figura 21.



Figura 19 – Vista frontal do sistema de desenvolvimento de pulverizadores.

Fonte: [14]

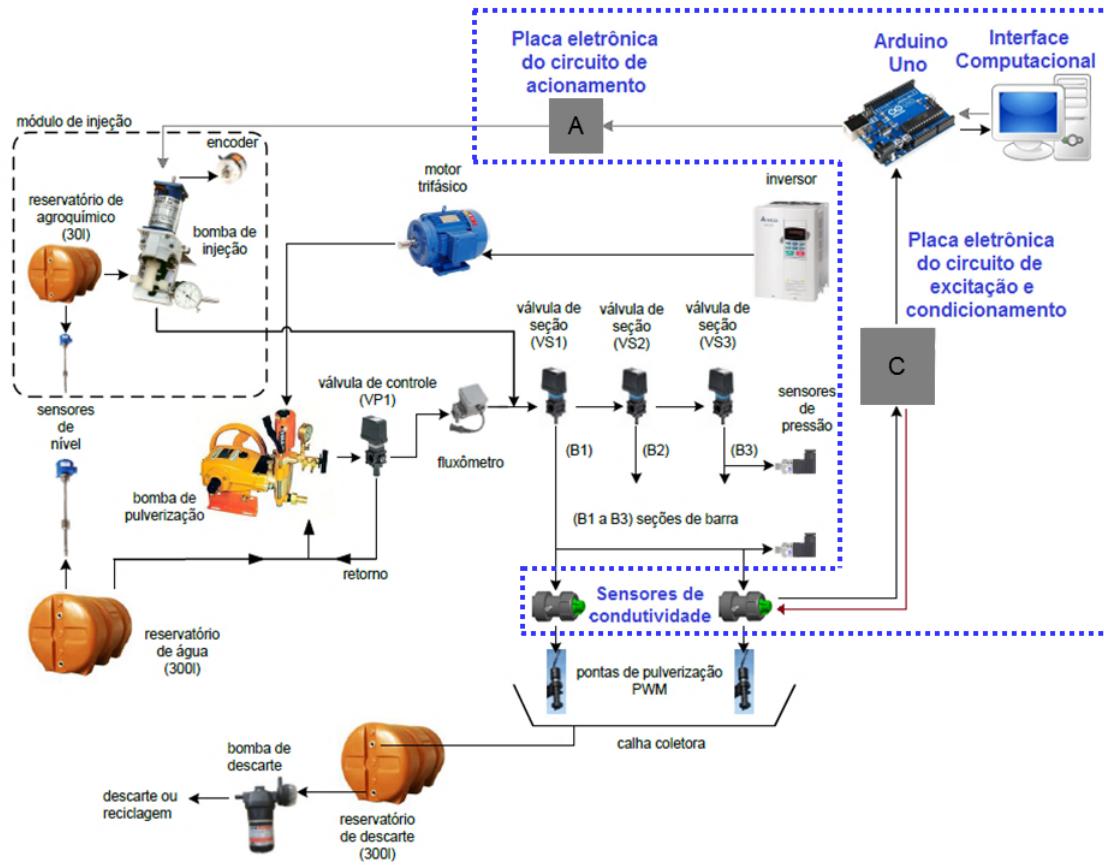


Figura 20 – Sistema de pulverização de agroquímicos montado no SDP para aplicação em taxa variada com o módulo de injeção direta e demais componentes desenvolvidos no projeto em detalhe.

Fonte: Figura modificada de [19]

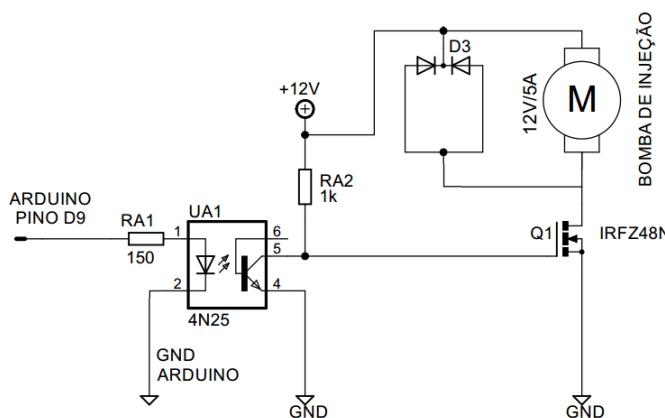


Figura 21 – Diagrama esquemático do circuito de acionamento da bomba de injeção.

A bomba de injeção foi acionada com a aplicação de um sinal com nível de tensão lógico baixo (0V) no terminal 1 do optoacoplador 4N25. O sinal de acionamento foi fornecido pela placa *Arduino Uno* conforme o tratamento computacional para aquisição do tempo de resposta que foi desenvolvido para o projeto e que será descrito na seção seguinte.

### 3.5 Análise e tratamento computacional de sinal

O tratamento computacional para a medição da condutividade elétrica específica e o tratamento computacional para a aquisição da resposta dinâmica do SDP formam o quinto e último módulo do projeto do sensor de condutividade. O módulo foi desenvolvido com a utilização de uma placa *Arduino Uno* para o interfaceamento entre os módulos do projeto e o *software LabVIEW*, onde foram desenvolvidas as interfaces gráficas para o medidor de condutividade e a aquisição do tempo de resposta.

*Arduino* é uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre e de placa única, projetada com um microcontrolador *Atmel AVR* com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão com origem em *Wiring*, baseado essencialmente nas linguagens C e C++. Entre suas principais características, pode-se citar a tensão de alimentação de 5V, frequência de *clock* de 16MHz, 14 pinos de digitais de entrada ou saída, conversor analógico/digital do tipo aproximação sucessivas com 6 canais de entrada com 10 bits de resolução e precisão de 2LSB ( $\approx 15\text{mV}$ ), memória *flash* de 32kB, EEPROM de 1kB e conector USB, utilizado para a programação do microprocessador, comunicação serial e alimentação [43].

A placa *Arduino Uno* foi utilizada para a aquisição dos valores de tensão analógicas provenientes da saída do circuito de condicionamento de sinal, que foram convertidas em valores digitais por seu conversor analógico/digital. Sua interface com o *software LabVIEW* foi realizada por uma *toolkit* gratuita denominada *LabVIEW Interface for Arduino* (LIFA), que possibilita o uso do *Arduino* e suas funções no ambiente de programação gráfica.

Para o correto funcionamento da *toolkit* que realiza a interface, foram necessárias as instalações dos *softwares* computacionais:

- *National Instruments Virtual Instrument Software Architecture* (NI-VISA), responsável pela instalação dos *drivers* da comunicação serial RS-232 para o *LabVIEW*;
- *Virtual Instruments Package Manager* (VIPM), um gerenciador de instalação e atualização de pacotes para o *LabVIEW*;
- *Toolbox LabVIEW Interface for Arduino* (LIFA), *toolbox* de aquisição de dados e interface, cuja instalação foi realizada através do VIPM;
- *Arduino Integrated Development Environment* (IDE), ambiente utilizado para o desenvolvimento de programas e gravação pelo conector USB.

Os códigos computacionais disponíveis pela *toolbox* LIFA foram responsáveis pela configuração e inclusão das bibliotecas necessárias para o funcionamento do *Arduino Uno* com o *LabVIEW*. Os procedimentos de instalação e os códigos necessários para o correto funcionamento da interface são descritos em [44].

Com a interface desenvolvida, o tratamento computacional de dados para a medição da condutividade elétrica específica e o tratamento computacional para a aferição da resposta dinâmica e tempo de resposta foram realizados, respectivamente, pelas interfaces gráficas instrumento virtual medidor de condutividade (IVMC) e instrumento virtual aquisição tempo de resposta (IVATR), desenvolvidas no *LabVIEW* e descritas a seguir.

### 3.5.1 Instrumento virtual medidor de condutividade

O IVMC da Figura 22 foi desenvolvido para a conversão dos dados de tensão analógica resultantes da saída do circuito de condicionamento de sinal em valores de condutividade elétrica específica da solução, utilizado principalmente para o levantamento da curva característica dos sensores de condutividade com as diferentes constantes de células estudadas. O IVMC é composto pela configuração da interface entre a placa *Arduino Uno* e o *LabVIEW*, a leitura da tensão analógica de saída pelo conversor analógico/digital dos pinos de entrada da placa, um filtro de média móvel e um código desenvolvido em linguagem C/C++, que executa a conversão da grandeza elétrica para valores de condutividade. Seu correspondente painel de interface com o usuário é exibido na Figura 23.

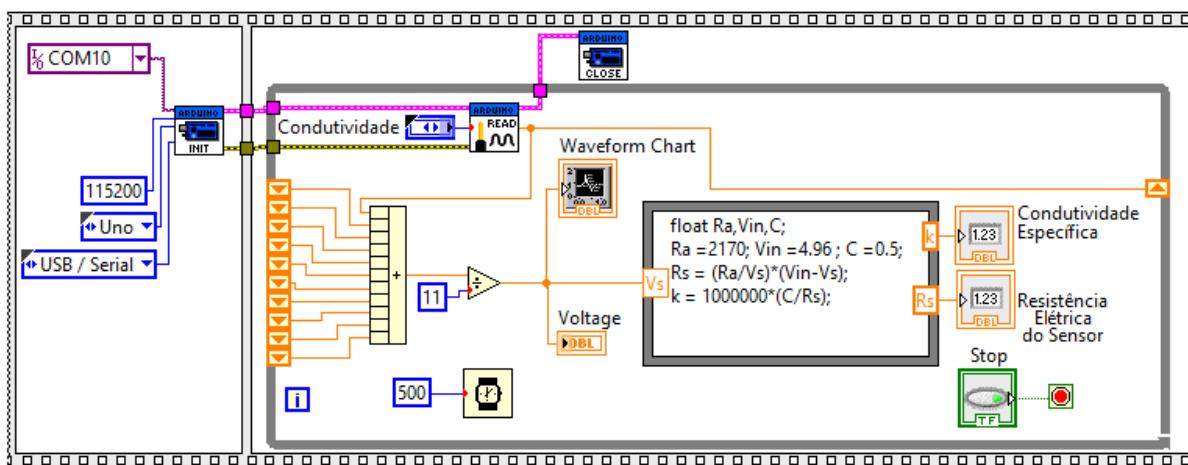


Figura 22 – IVMC construído para a medição da condutividade elétrica específica.

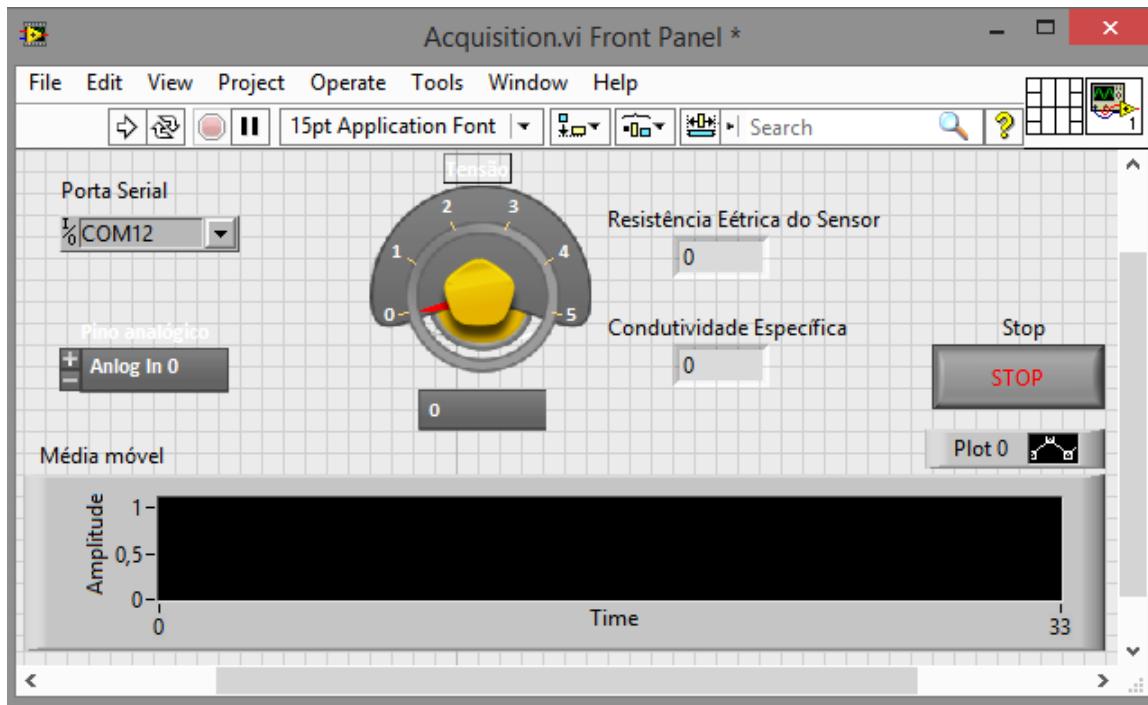


Figura 23 – Painel de interface com o usuário para a aferição da condutividade elétrica.

A conversão da grandeza elétrica para os valores de condutividade elétrica específica decorre de (2.8) e (3.4), de forma que  $\kappa$  é dado por:

$$\kappa = \frac{C}{R_s} \quad (3.19)$$

de (3.4) e (3.14) tem-se que:

$$\kappa = \frac{C V_s}{R_{10} (V_{5_{\text{pico}}} - V_s)} \quad (3.20)$$

com  $R_{10} = 2,17 k\Omega$ :

$$\kappa = \frac{C V_s}{2170 (V_{5_{\text{pico}}} - V_s)} \quad (3.21)$$

onde  $\kappa$  é a condutividade específica dada em  $S\ cm^{-1}$ ,  $V_s$  é a tensão de saída do circuito de condicionamento e  $R_s$  é a resistência elétrica da solução eletrolítica em análise. A condutividade elétrica específica medida pelo sensor, dada em  $\mu S\ cm^{-1}$ , é então representada por:

$$\kappa = 10^6 \frac{C V_s}{2170 (V_{5_{\text{pico}}} - V_s)}. \quad (3.22)$$

As curvas de calibração do sensor de condutividade desenvolvido com as constantes de células iguais a  $0,255\ cm^{-1}$ ,  $0,509\ cm^{-1}$  e  $0,764\ cm^{-1}$  foram levantadas por meio da aplicação do sensor (círculo de excitação, transdutor de condutividade e circuito de condicionamento), o IVMC da Figura 22 e um medidor comercial de condutividade (modelo mCA150 , Tecnopen) em ensaios estáticos com diferentes soluções compostas por água destilada e NaCl. O medidor foi anteriormente calibrado com uma solução padrão de KCl (0,02 mol/l). Por meio do método de regressão não-linear, uma função cuja combinação não-linear de parâmetros de um modelo depende de uma ou mais variáveis independentes foi obtida pela função *fit* no software *Matlab*.

### 3.5.2 Instrumento virtual aquisição do tempo de resposta

O IVATR ilustrado na Figura 24, cujo painel de interface com o usuário é representado na Figura 25, foi desenvolvido para a aferição da resposta dinâmica do sistema de pulverização para um degrau de concentração. O IVATR é composto inicialmente da configuração da interface entre o *Arduino* e o *LabVIEW*. No bloco seguinte, o acionamento da bomba de injeção é realizado através do comando do usuário. Os dados referentes ao tempo decorrido a partir do instante de injeção e os valores de tensão provenientes das leituras do sensor de condutividade são lidos pelo *Arduino Uno* e exibidos no painel de interface com o usuário e também armazenados em um arquivo de dados. O desligamento da bomba de injeção é realizado após 30 segundos de injeção.

As respostas dinâmicas do sistema de pulverização foram obtidas através da utilização do sensor de condutividade com constante de célula  $C = 0,509\ cm^{-1}$ , escolhido após levantamento das curvas das três diferentes curvas de calibração, pelo sistema de acionamento e pelo IVATR. O degrau de concentração

foi realizado a partir de uma solução composta de água potável (16l) e NaCl (50g), que foi injetada no sistema à uma taxa de 2,3l/min durante 30 segundos.

Dois experimentos foram realizados. No primeiro, a resposta dinâmica foi obtida para uma vazão total da mistura igual a 16l/min e pressão igual a 200kPa. No segundo, a resposta dinâmica foi obtida para uma vazão total da mistura de 23l/min e pressão igual a 400kPa. Para cada um deles, foram realizadas três repetições para verificação da repetibilidade dos resultados. O tempo de resposta, tempo de atraso e tempo de transiente foram calculados para cada uma das repetições, com o embasamento teórico conforme descrito na Seção 2.3.

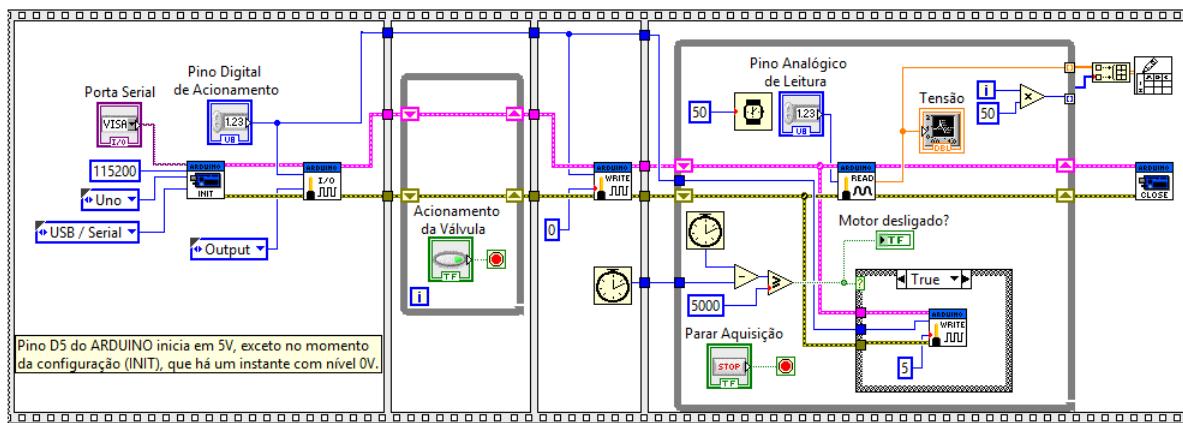


Figura 24 – IVATR construído para a aferição do tempo de resposta.

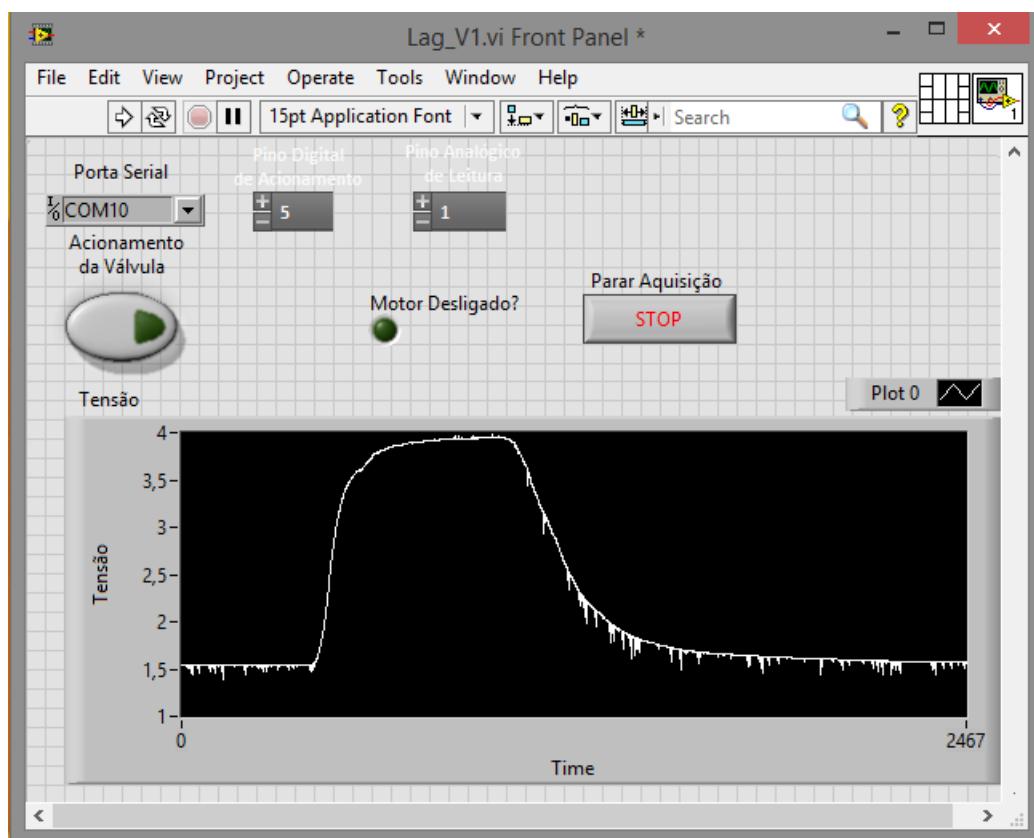


Figura 25 – Painel de interface correspondente ao IVATR para aquisição do tempo de resposta.

As curvas referentes às respostas dinâmicas foram construídas no *software Matlab* a partir dos arquivos de dados extraídos em cada repetição, onde também foi realizada a conversão dos valores de tensão em percentual de concentração conforme o código que foi desenvolvido e é exibido no Apêndice B. Os valores médios e o desvio padrão para cada um dos tempos obtidos nos experimentos também foram calculados.



# 4 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos referentes ao medidor de condutividade, cuja análise refere-se aos circuitos de excitação e condicionamento de sinal, ao sensor de condutividade e as suas correspondentes curvas de calibração para cada uma das três constantes de células analisadas. Também são apresentados os resultados referentes à resposta dinâmica e ao tempo de resposta do SDP. Serão discorridas análises e discussões sobre cada um dos módulos estudados.

## 4.1 Medidor de condutividade

### 4.1.1 Circuito de excitação

A Figura 26 exibe o sinal senoidal de saída do circuito oscilador proveniente do primeiro estágio do circuito de excitação que foi obtido experimentalmente e apresenta  $V_{1_{max}} = 7,84V$ ,  $V_{1_{min}} = 3,36V$  e  $V_{1_{med}} = 5,60V$ .

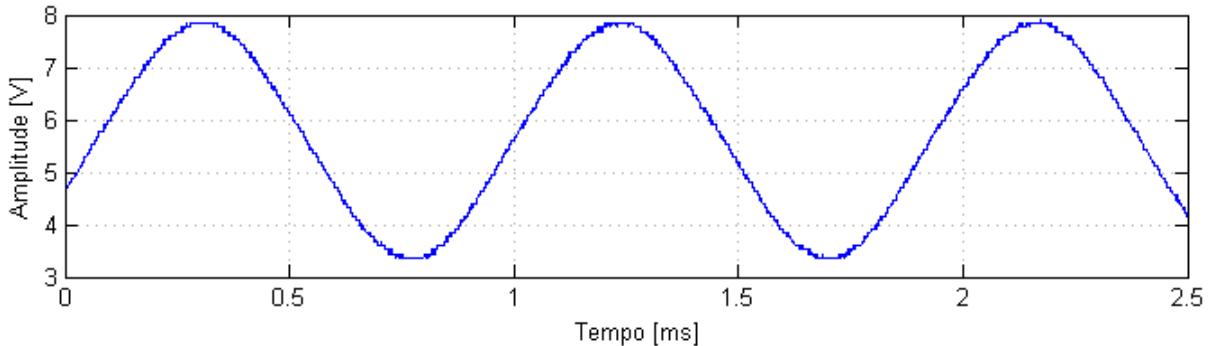


Figura 26 – Sinal de saída do circuito oscilador.

O sinal de saída do circuito oscilador apresenta frequência igual a 1,0684kHz, adequada para a aplicação, visando a redução da eletrólise e polarização da solução decorrente da aplicação de uma corrente direta. Entretanto, os níveis de amplitude do sinal e o nível médio de tensão  $V_{1_{med}} = 5,60V$  são inadequados para a aplicação desejada, evidenciado a necessidade da utilização do filtro passa-alta e o estágio de amplificação de sinal.

A Figura 27 exibe o sinal de saída experimental após o filtro passa-alta, e a Figura 28 exibe a resposta em frequência teórica e experimental do filtro passa-alta passivo de primeira ordem construído, conforme os dados experimentais obtidos representados na Tabela 4.

A frequência de corte experimental  $f_{c_{fpa}}$  do filtro passa-alta que foi construído é igual a 475mHz, 1,5% menor do que a frequência de corte teórica de 482mHz calculada. O sinal de saída experimental  $V_2$ , que corresponde ao sinal de saída obtido após o filtro, apresenta  $V_{2_{max}} = 2,32V$ ,  $V_{2_{min}} = -2,30V$  e  $V_{2_{med}} = 10mV$ .

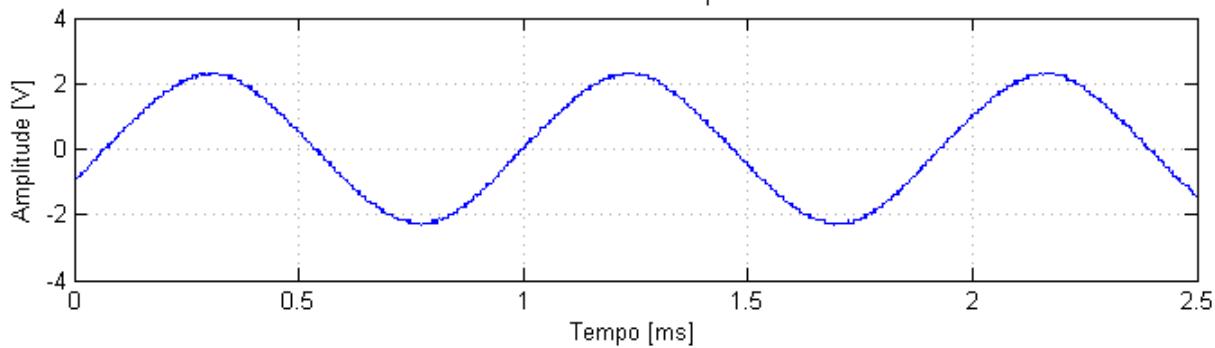


Figura 27 – Sinal senoidal com remoção do nível de tensão médio.

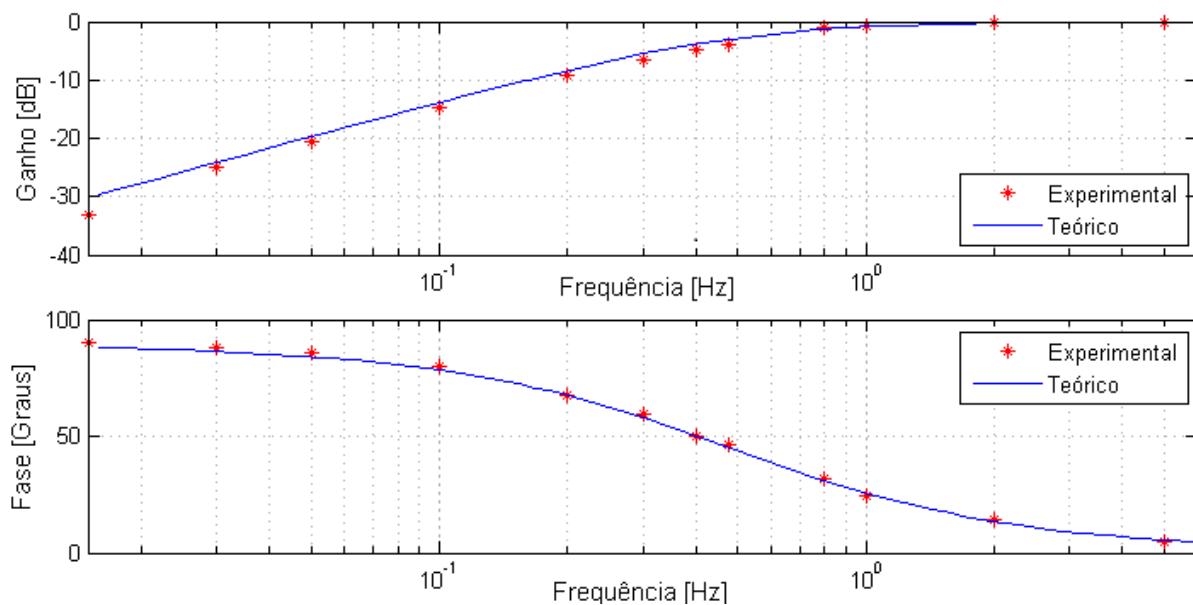


Figura 28 – Resposta em frequência teórica e experimental do filtro passa-alta.

Tabela 4 – Dados experimentais do filtro passa-alta.

Frequência [Hz]	Ganho [dB]	Fase [graus]
0,0150	-33,05	90,19
0,050	-20,61	85,90
0,200	-9,10	67,35
0,300	-6,55	59,17
0,400	-4,81	49,84
0,475	-3,03	45,41
0,800	-1,03	31,99
1,000	-0,80	24,75
5,000	-0,04	5,08

As Figuras 29, 30 e 31 exibem respectivamente, a resposta em frequência e a resistência de entrada e resistência de saída obtidas através do estudo computacional dos circuitos da topologia isolador

que foram desenvolvidos.

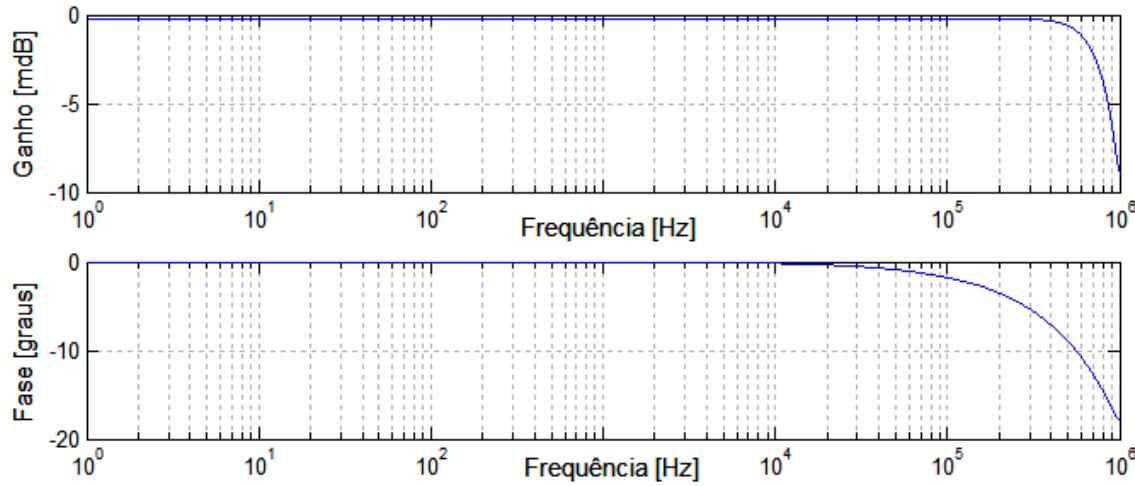


Figura 29 – Resposta em frequência do circuito da topologia isolador.

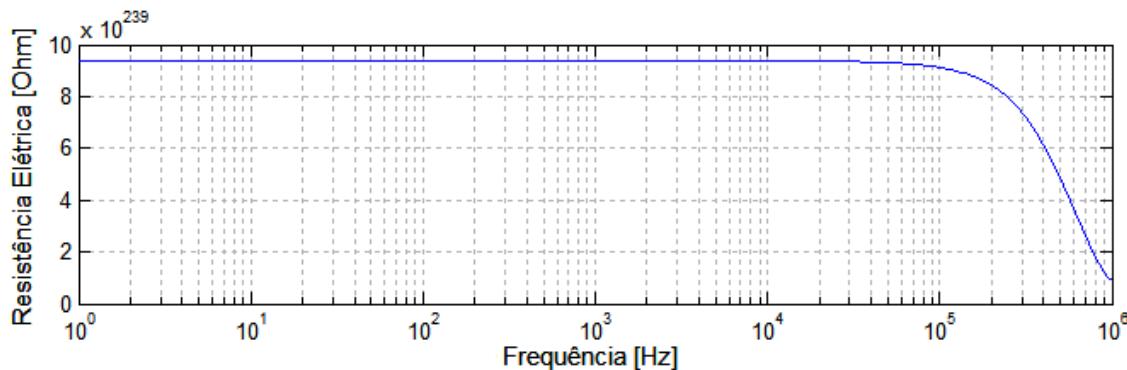


Figura 30 – Resistência de entrada do circuito da topologia isolador.

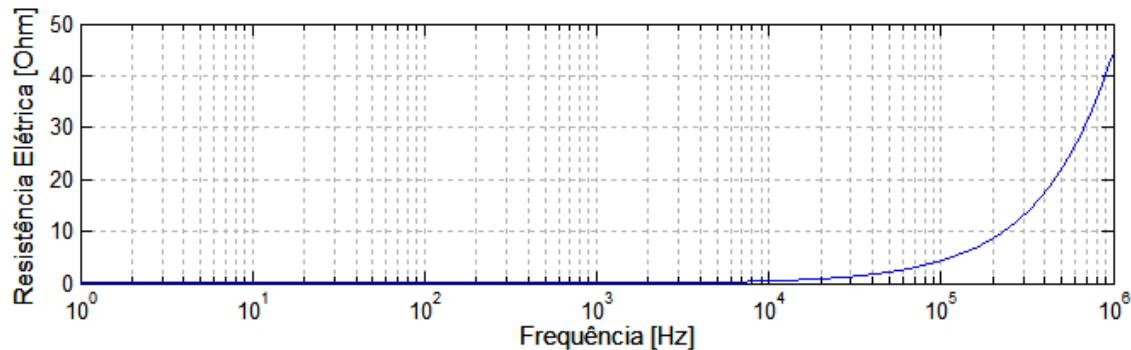


Figura 31 – Resistência elétrica de saída do circuito da topologia isolador.

Os resultados obtidos confirmam a aplicabilidade dos circuitos isoladores analisados. Os circuitos da topologia isolador possuem altíssima resistência de entrada e baixa resistência de saída, o que evidencia a aplicabilidade desses circuitos em situações onde deseja-se reduzir a influência elétrica entre dois diferentes circuitos.

Em adição, os resultados apresentados evidenciam a adequação dos circuitos isoladores para operação em uma extensa faixa de frequências, conforme pode ser observado pela resposta em frequência apresentada na Figura 29. Tais circuitos são, portanto, adequados ao projeto do sensor de condutividade cuja frequência do sinal fornecido pelo circuito de excitação é igual a 1,0684kHz.

O sinal de saída do Módulo 1 foi obtido após o estágio de amplificação e o segundo estágio de isolação do circuito de excitação. Seu resultado experimental é representado pela Figura 32, onde o sinal de saída obtido apresenta valores de tensão  $V_{5_{max}} = 4,96V$  e  $V_{5_{min}} = -4,92V$ . Sendo o ganho dos estágios de isolação e do filtro passa-alta unitários para a frequência do sinal senoidal utilizado, o ganho experimental do estágio de amplificação é igual a  $A_v = 2,1379$ .

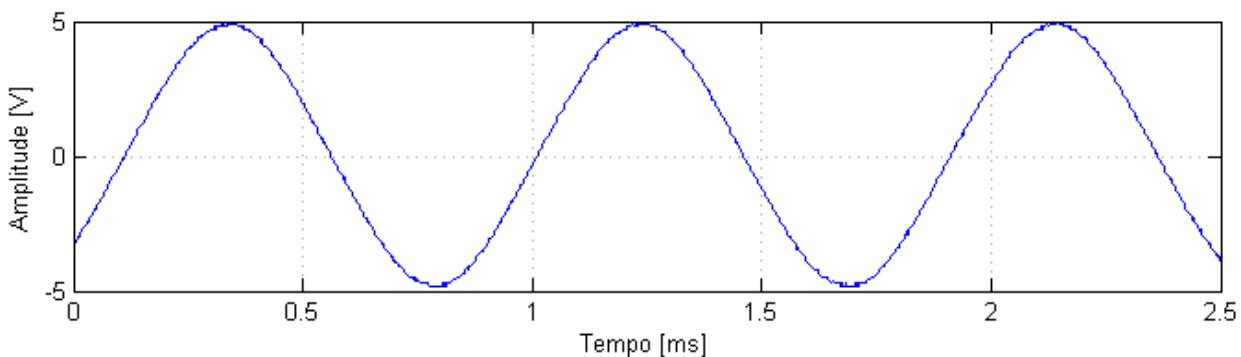


Figura 32 – Sinal de excitação do transdutor.

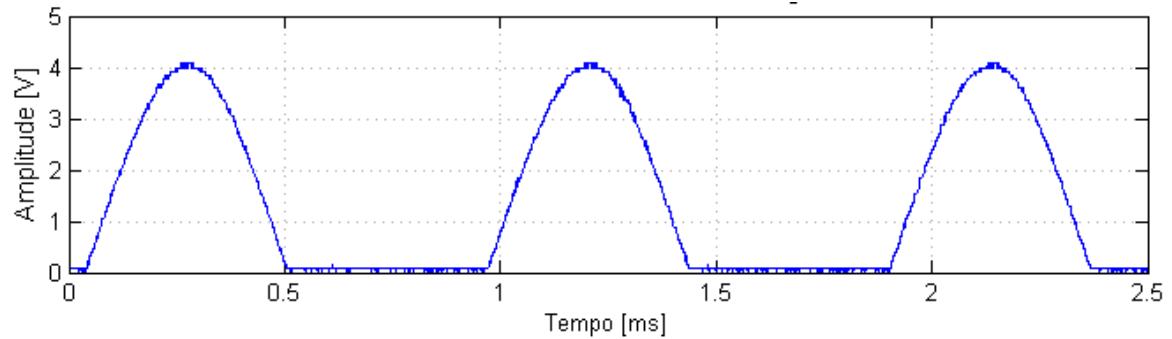
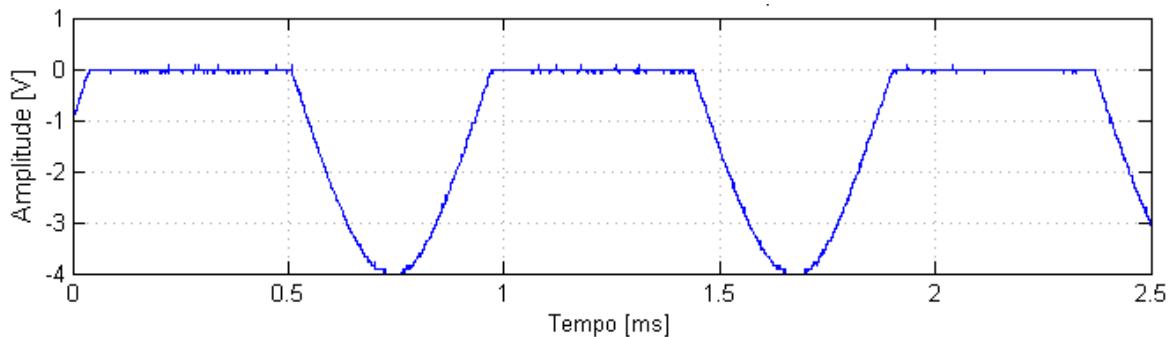
Com o circuito de excitação desenvolvido, foi obtido um sinal de saída  $V_5$  que apresenta características de amplitude e frequência do sinal adequadas para a excitação do transdutor de condutividade e seu posterior tratamento computacional e aplicação para a obtenção do tempo de resposta do sistema de pulverização (tensão máxima de saída limitada em 5V, nível máximo de operação da placa *Arduino Uno* e frequência não-relevante para a ocorrência do processo de dissociação dos íons e polarização da solução). Os valores de tensão máxima, mínimo e médio dos analisados durante os estágios do circuito são exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores de tensão experimentais do circuito de excitação.

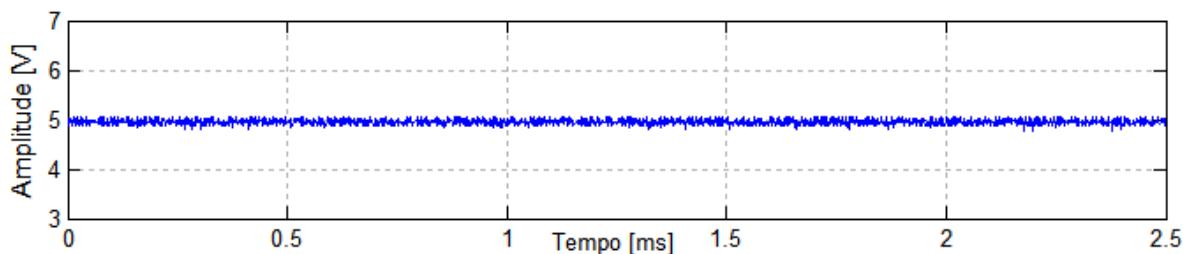
Sinal	$V_{max}$	$V_{min}$	$V_{med}$
$V_1$	7,84V	3,36V	5,60V
$V_2$	2,32V	-2,30V	10,00mV
$V_5$	4,96V	-4,92V	20,00mV

#### 4.1.2 Circuito de condicionamento de sinal

O Módulo 3 do projeto, composto pelo circuito de condicionamento de sinal, foi analisado com o sinal de entrada fornecido pela saída do circuito isolador e sem a presença do transdutor. As Figuras 33 e 34 exibem respectivamente, os sinais de saída experimental dos nós de tensão  $V_8$  e  $V_9$  do circuito retificador de precisão da Figura 16, onde cada semiciclo foi retificado individualmente.

Figura 33 – Sinal de tensão de saída  $V_8$ .Figura 34 – Sinal de tensão de saída  $V_9$ .

Os sinais de tensão  $V_8$  e  $V_9$  apresentam níveis de tensões máximas e mínimas experimentais iguais a  $V_{8_{max}} = 4,08V$ ,  $V_{8_{min}} = 0V$ ,  $V_{9_{max}} = 0V$  e  $V_{9_{min}} = -4V$ , onde a pequena diferença de 0,08V entre eles pode ser atribuída à diferença dos níveis de pico do sinal de tensão  $V_5$  e a diferença entre os valores dos resistores  $R_{13}$  e  $R_{14}$ . O sinal retificado  $V_{15}$ , estágio seguinte do circuito, é exibido na Figura 35 e apresenta valor médio de tensão igual a 4,96V, com perceptível variação decorrente de sinais de ruído.

Figura 35 – Sinal de saída  $V_{15}$  do circuito retificador.

Posterior ao estágio de retificação, a Figura 36 exibe a resposta em frequência teórica e experimental do filtro passa-baixa *Sallen-Key* de segunda ordem construído, conforme os dados experimentais representados na Tabela 6 e a Figura 37 exibe o sinal de saída experimental  $V_s$  do circuito de condicionamento após o filtro passa-baixa e o circuito isolador.

Tabela 6 – Dados experimentais do filtro passa-baixa.

Frequência [Hz]	Ganho [dB]	Fase [graus]
2	0,00	-2,88
10	-0,43	-30,60
15	-1,03	-43,20
20	-1,93	-57,60
25	-3,05	-67,50
30	-4,10	-78,84
35	-5,29	-88,20
40	-6,38	-93,60
45	-7,79	-97,20
70	-12,39	-126,00
300	-37,08	-167,40

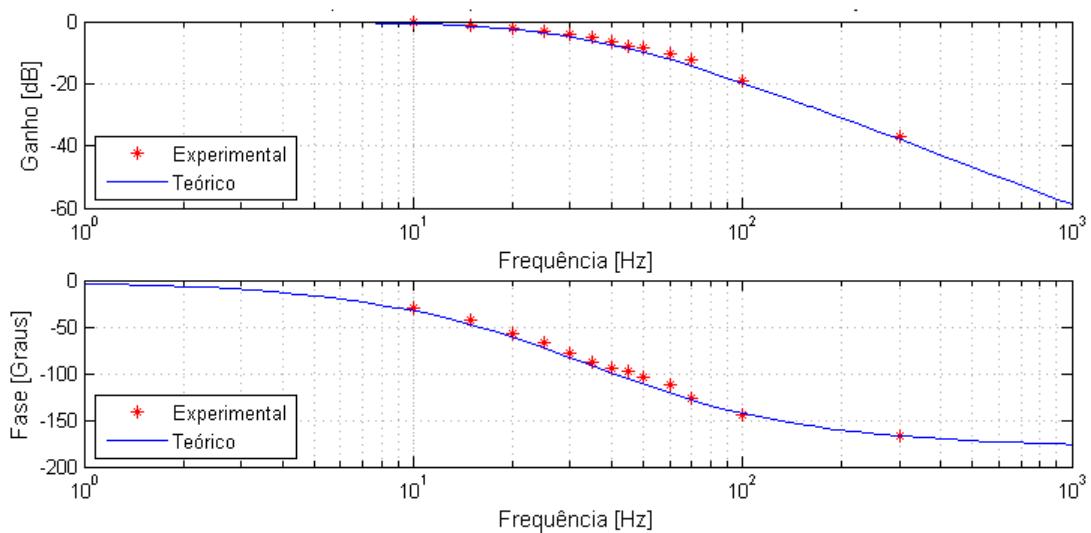
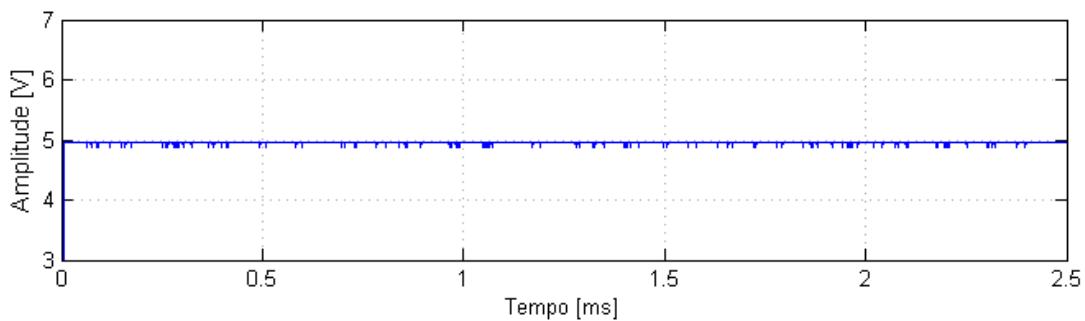


Figura 36 – Resposta em frequência teórica e experimental do filtro passa-baixa.

Figura 37 – Sinal de saída  $V_s$  do circuito de condicionamento.

A frequência de corte experimental do filtro passa-baixa construído é igual a  $f_c = 38,12\text{Hz}$  e o sinal de saída experimental do circuito de condicionamento, apresenta  $V_s = 4,96\text{V}$ . Sendo o ganho do

filtro passa-baixa e do estágio de isolação unitários para a frequência do sinal senoidal utilizado, o ganho experimental do circuito de condicionamento de sinal é igual a  $A_v = 1$ , logo, a amplitude do sinal  $V_6$  proveniente das leituras de condutividade elétrica específica serão iguais ao sinal de tensão contínua de saída  $V_s$ .

#### 4.1.3 Curvas de calibração

A constante de célula do transdutor de condutividade foi definida a partir das curvas de calibração para cada uma das três constantes de célula, conforme descrito anteriormente na Seção 3.2, que trata do transdutor de condutividade, as constantes de célula e o circuito elétrico correspondente e na Seção 3.5.1, que se refere ao tratamento computacional de dados para o medidor de condutividade.

As Figuras 38, 39 e 40 exibem, respectivamente, os resultados experimentais da condutividade elétrica de diferentes soluções compostas de água destilada e NaCl analisadas pelo condutivímetro comercial e pelo sensor de condutividade desenvolvido (círculo de excitação, transdutor de condutividade, circuito de condicionamento de sinal e IVMC), com constantes de células iguais a  $0,255\text{cm}^{-1}$ ,  $0,5\text{cm}^{-1}$  e  $0,764\text{cm}^{-1}$ .

As curvas de calibração foram obtidas por meio dos valores de condutividade lidas pelo condutivímetro comercial e pelos valores de tensão de saída do sensor desenvolvido, que se relacionam com os valores de condutividade elétrica específica conforme (3.22). As três curvas obtidas pelo método de regressão não-linear são exibidas em (4.1).

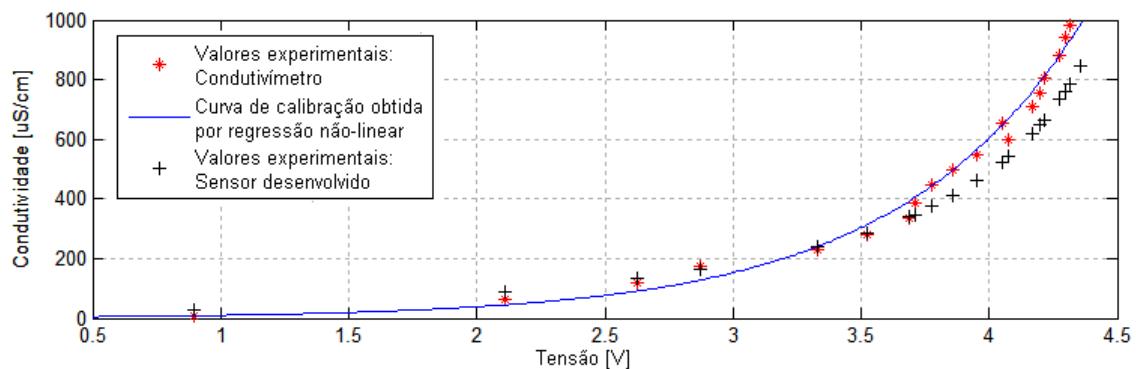


Figura 38 – Curva de calibração do sensor com constante de célula  $C = 0,255\text{cm}^{-1}$ .

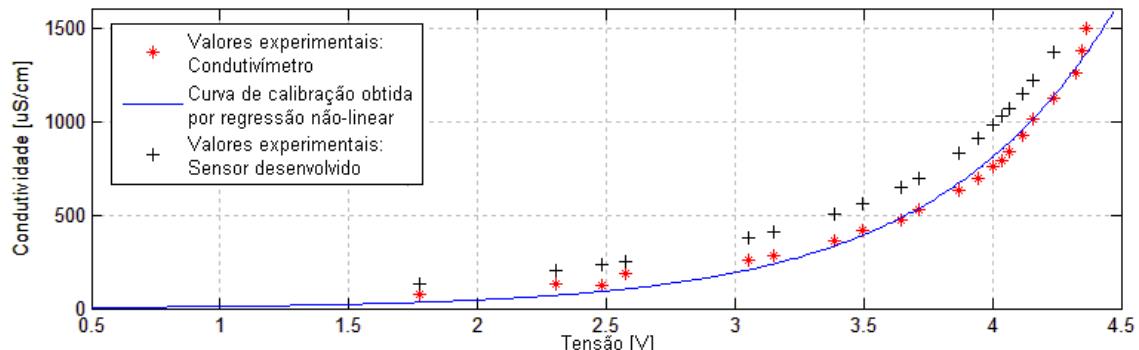


Figura 39 – Curva de calibração do sensor com constante de célula  $C = 0,5\text{cm}^{-1}$ .

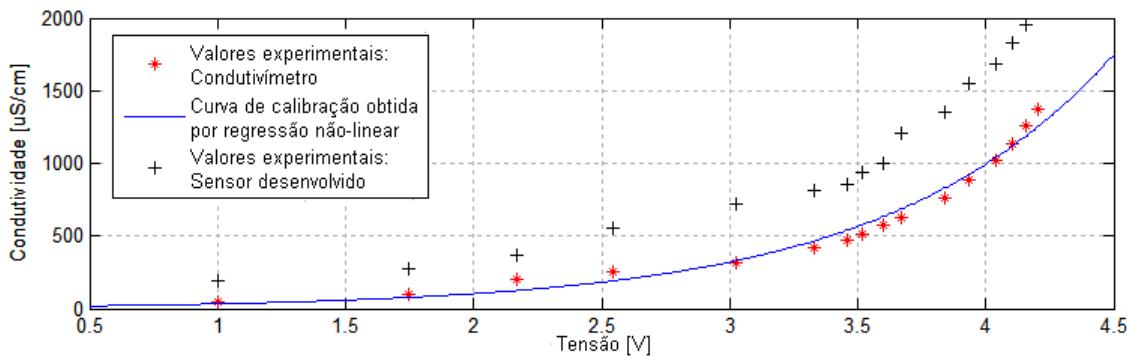


Figura 40 – Curva de calibração do sensor com constante de célula  $C = 0,764\text{cm}^{-1}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 0,255\text{cm}^{-1} : y(u) = 2,456 \cdot 10^{-6} e^{1,376 u} \\ C = 0,5\text{cm}^{-1} : y(u) = 2,547 \cdot 10^{-6} e^{1,44 u} \\ C = 0,764\text{cm}^{-1} : y(u) = 1.078 \cdot 10^{-5} e^{1,131 u}. \end{array} \right. \quad (4.1)$$

A partir dos resultados obtidos, é possível identificar que quanto menor a constante de célula do transdutor de condutividade (quanto menor a distância entre as faces dos eletrodos), maior é a exatidão das medidas realizadas pelo sensor de condutividade.

Diante das curvas de calibração obtidas, o transdutor com constante de célula igual a  $0,255\text{cm}^{-1}$  mostra-se mais adequado para a medição da condutividade elétrica específica. Porém, nesse caso, devido à distância  $d = 0,5\text{mm}$  ser muito pequena, optou-se pelo transdutor com constante de célula igual a  $0,509\text{cm}^{-1}$  dado que, neste último, a distância  $d = 1\text{mm}$  proporciona melhor fluxo da calda pelo sistema e ainda apresenta uma curva de calibração adequada para a aplicação de determinação do tempo de resposta.

Com a definição da constante de célula, o IVMC foi modificado de forma que a condutividade elétrica específica é calculada por meio da curva de calibração para  $C = 0,509\text{cm}^{-1}$ , conforme ilustrado na Figura 41.

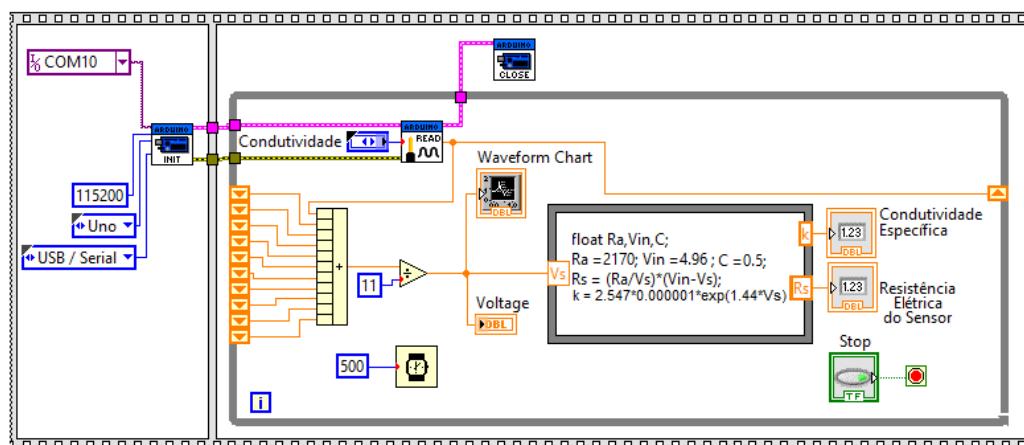


Figura 41 – IVMC modificado para medição da condutividade elétrica específica.

## 4.2 Determinação do tempo de resposta

O tempo de resposta do sistema de pulverização com injeção direta foi determinado a partir dos valores de concentração decorrentes das leituras de condutividade elétrica específica conforme (2.15), obtidas por meio dos circuitos de excitação, circuito de condicionamento de sinal, do transdutor de condutividade aplicado ao SDP, do sistema de acionamento o IVATR e o código desenvolvido em *Matlab* presente no Apêndice B. As Figuras 42 e 43 representam, respectivamente, as respostas dinâmicas individuais e as repostas dinâmicas sobrepostas de cada uma das repetições realizadas para a análise do sistema de pulverização obtidas com a aplicação do sensor de condutividade desenvolvido com vazão total da mistura de 16l/min e pressão igual a 200kPa. A Tabela 7 exibe os valores experimentais obtidos para o tempo de atraso, resposta e transiente, seus respectivos valores médios e desvios padrões.

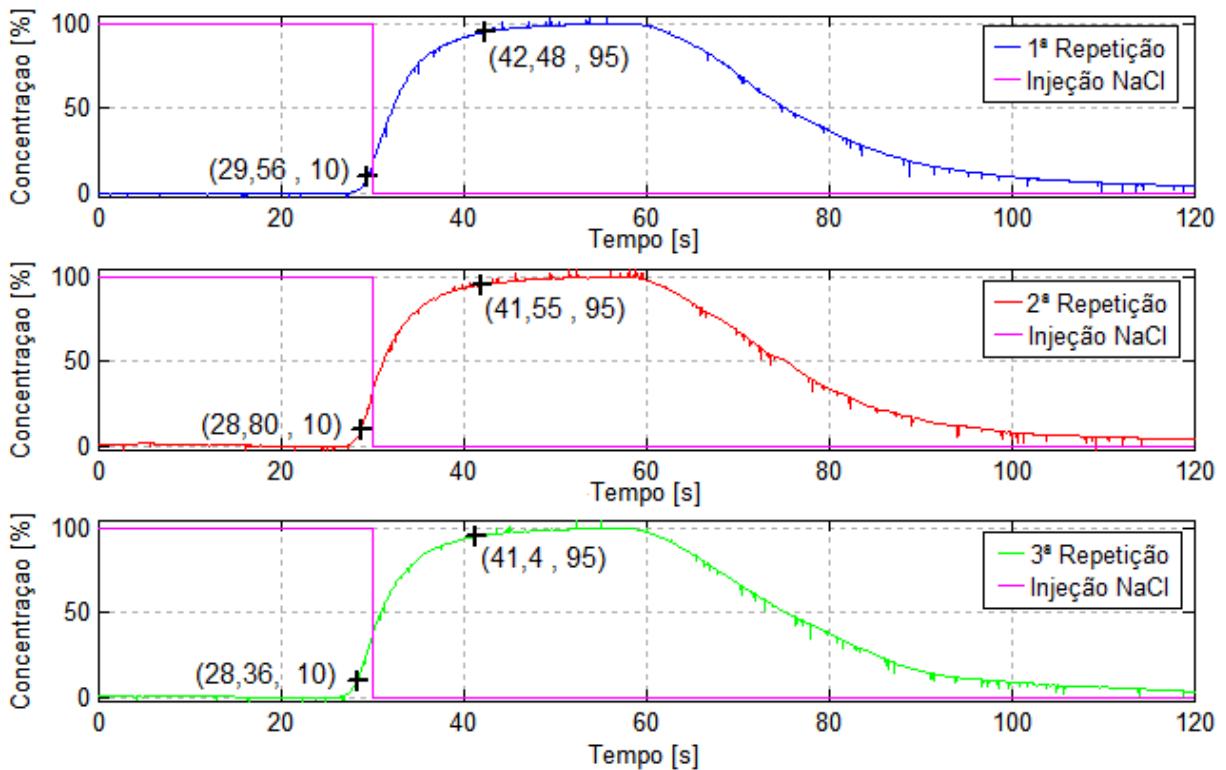


Figura 42 – Resposta dinâmica obtida para cada uma das três repetições para uma vazão  $Q = 16\text{l}/\text{min}$  e pressão igual a 200kPa.

Tabela 7 – Valores experimentais obtidos para vazão de 16l/min e pressão igual a 200kPa.

	Tempo de atraso $T_a$	Tempo de transiente $T_t$	Tempo de resposta $T_r$
1 <sup>a</sup> Repetição	29,56	12,92	42,48
2 <sup>a</sup> Repetição	28,80	12,75	41,55
3 <sup>a</sup> Repetição	28,36	13,04	41,40
Média	28,91	12,90	41,81
Desvio padrão	0,61	0,08	0,59

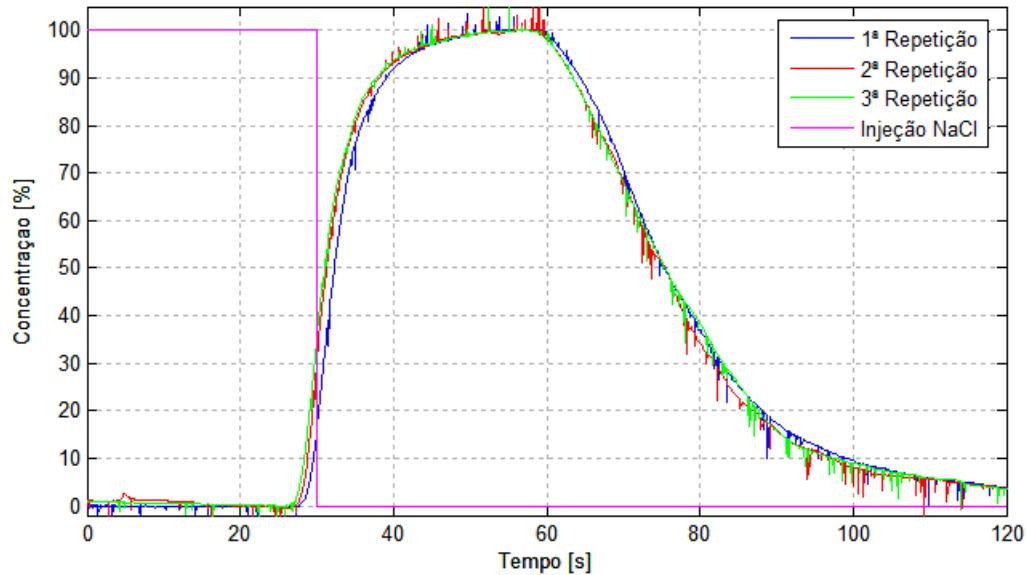


Figura 43 – Resposta dinâmica obtida para uma vazão  $Q = 16\text{l}/\text{min}$  e pressão igual a  $200\text{kPa}$ .

As Figuras 43 e 44 representam, respectivamente, as respostas dinâmicas sobrepostas e as respostas dinâmicas individuais de cada uma das repetições realizadas para a análise do sistema de pulverização obtidas com a aplicação do sensor de condutividade desenvolvido com vazão total da mistura de  $23\text{l}/\text{min}$  e pressão igual a  $400\text{kPa}$ . A Tabela 8 exibe os valores experimentais obtidos para o tempo de atraso, resposta e transiente, seus respectivos valores médios e desvios padrões.

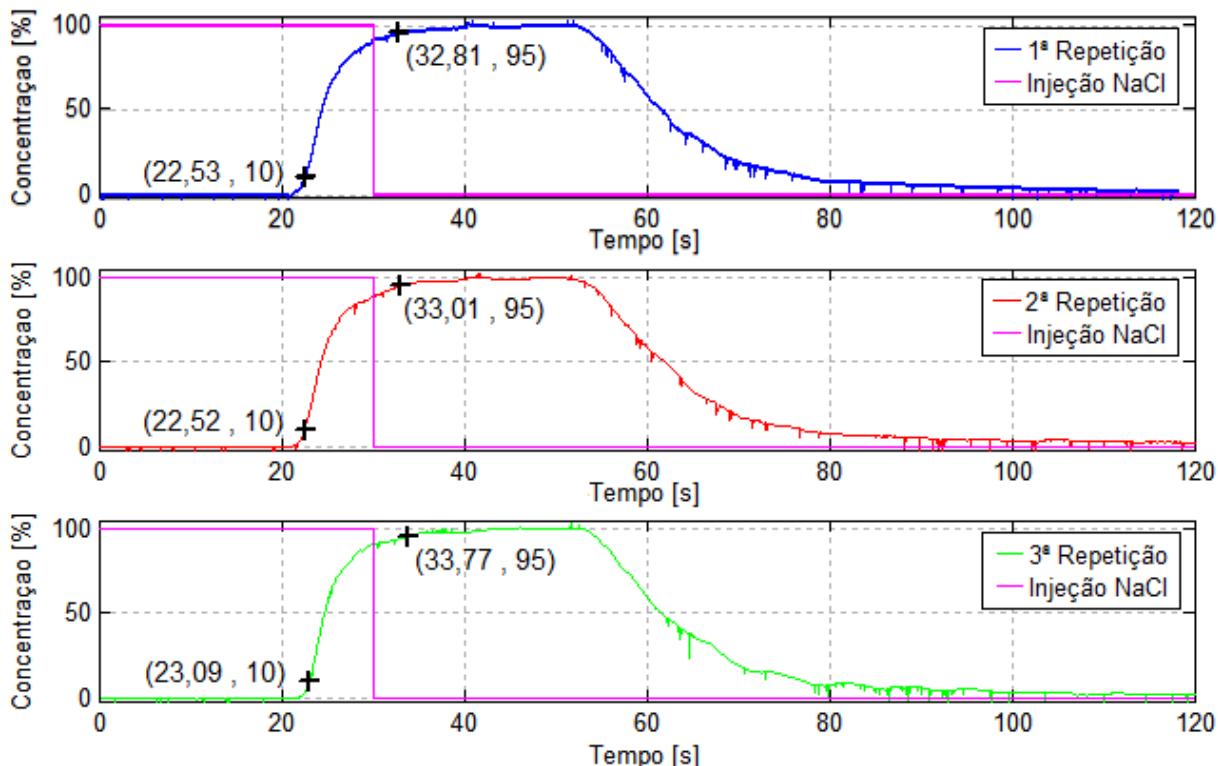
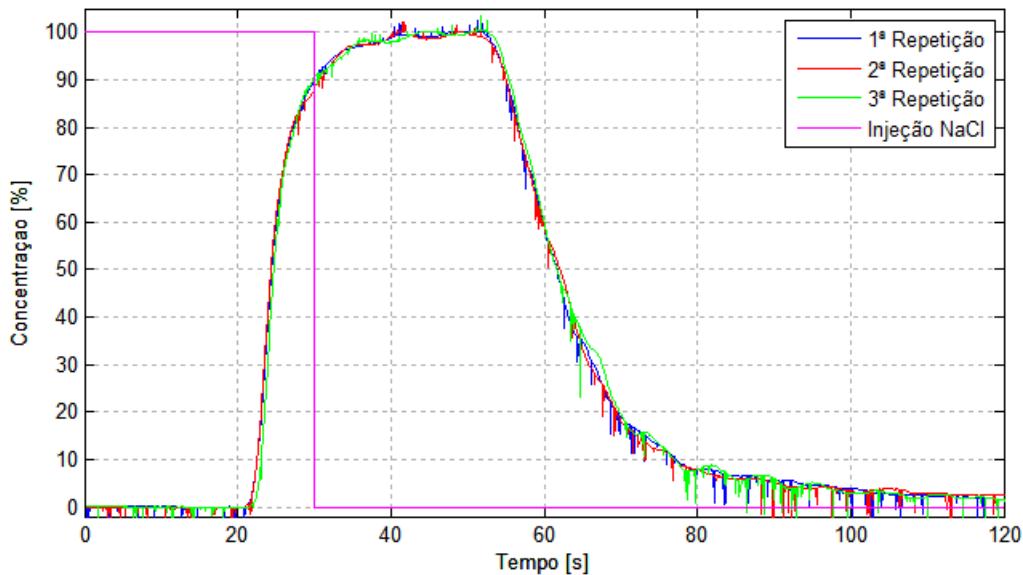


Figura 44 – Resposta dinâmica obtida para cada uma das três repetições para uma vazão  $Q = 23\text{l}/\text{min}$  e pressão igual a  $400\text{kPa}$ .

Tabela 8 – Valores experimentais obtidos para vazão de 23l/min e pressão igual a 400kPa.

	Tempo de atraso $T_a$	Tempo de transiente $T_t$	Tempo de resposta $T_R$
1 <sup>a</sup> Repetição	22,53	10,28	32,81
2 <sup>a</sup> Repetição	22,52	10,49	33,01
3 <sup>a</sup> Repetição	23,09	10,68	33,77
Média	22,71	10,48	33,20
Desvio padrão	0,33	0,12	0,51

Figura 45 – Resposta dinâmica obtida para uma vazão  $Q = 23\text{l}/\text{min}$  e pressão igual a 400kPa.

É possível observar através dos resultados que as respostas dinâmicas obtidas durante as três repetições realizadas pouco diferem-se entre si para o sistema de pulverização com vazão igual a 16l/min e pressão igual a 200kPa, demonstrando precisão e confiabilidade dos resultados obtidos pelo sensor de condutividade desenvolvido. O valor médio do tempo de atraso obtido é igual a 28,91s, valor médio do tempo de transiente igual a 12,90s e valor médio do tempo de resposta igual a 41,81s.

Para o sistema de pulverização operando com vazão igual a 23l/min e pressão igual a 400kPa é possível analisar que, como no caso anterior, as respostas dinâmicas obtidas durante as três repetições realizadas também pouco diferem-se entre si, porém, apresentam maiores níveis de ruído devido a maior velocidade da calda no sistema. O valor médio do tempo de atraso obtido é igual a 22,71s, valor médio do tempo de transiente igual a 10,48s e valor médio do tempo de resposta igual a 33,20s, menores do que no primeiro caso analisado, onde a vazão da mistura é menor.



## 5 Conclusão

Um sensor de condutividade para determinação do tempo de resposta de um sistema de pulverização com injeção direta foi apresentado. Os resultados obtidos em cada módulo demonstram a eficácia dos circuitos de excitação, condicionamento de sinal e acionamento, do transdutor de condutividade e do tratamento computacional de dados que foram desenvolvidos na aplicação de determinação do tempo de resposta do sistema de pulverização de injeção direta desenvolvido no SDP.

A utilização da placa *Arduino Uno* permitiu a integração de maneira simples e eficiente de um sistema analógico com um computador. Devido a característica *open-source* da plataforma, o interfaceamento da placa com *softwares* computacionais pode ser realizada de maneira simples através de extensões de programas, aplicativos e *toolboxes*, como a interface que foi realizada com o *software LabVIEW*.

Em relação às características de construção do transdutor, o corpo de poliacetal permite a aplicação do sensor em um ponto muito próximo dos bicos de pulverização, o que proporciona resultados mais fiéis do tempo de resposta real. As curvas de calibração levantadas para o transdutor com as três diferentes constantes de célula mostram que a precisão das medições dos valores da condutividade elétrica específica de uma solução eletrolítica para um transdutor do tipo placas paralelas é diretamente relacionada com a constante de célula do mesmo, sendo que, quanto menor a distância entre os eletrodos, menor é a constante de célula e maior é a sensibilidade do sensor e a exatidão das medidas realizadas.

No entanto, a constante de célula não deve ser o único fator decisivo para a definição e construção de um sensor de condutividade. Deve também ser analisada as condições de aplicação. No trabalho desenvolvido, foi utilizado um transdutor com maior distância entre os eletrodos e maior constante de célula, porém, que ainda apresentava sensibilidade adequada para o sensoriamento ao degrau de concentração. Assim, a obstrução do caminho percorrido pela calda dentro do sensor pode ser reduzida e até mesmo eliminada, dependendo das características da composição da mistura composta por água e pesticida em aplicações de agrotóxicos.

As repostas dinâmicas, os tempos de atraso, tempos de resposta e tempos de transiente obtidos indicam boa repetibilidade e robustez da instrumentação e os métodos de tratamentos computacionais desenvolvidos junto ao transdutor de condutividade. Foi possível fazer a distinção entre as duas situações avaliadas e foi possível comprovar que, com o aumento do fluxo da mistura no sistema, ocorre a diminuição do tempo de resposta do sistema de pulverização com injeção direta, sendo esta, consequência do aumento da velocidade em que a mistura é transportada pelas barras de pulverização.

Os resultados obtidos demonstram a utilidade do sensor desenvolvido em aplicações em tempo real. Sua aplicação diretamente nos bicos pulverizadores de herbicida é fator diferencial na determinação do tempo de resposta em comparação aos métodos preexistentes. O sensor atende aplicações práticas no campo, trazendo benefícios potenciais para a sustentabilidade, redução do consumo de agrotóxicos bem como sua incorporação em processos pertencentes ao âmbito da agricultura de precisão.

As seguintes sugestões são apresentadas para a continuidade do trabalho:

- a) inclusão de um sistema de medição e compensação de temperatura para correção dos valores

- de condutividade medidos, propiciando resultados mais fiéis aos valores de condutividade mensurados;
- b) injeção do agrotóxico em diferentes pontos de injeção para melhor análise das características do sistema de pulverização utilizado;
  - c) determinação da condutividade elétrica específica através da análise capacitiva da solução a ser mensurada, utilizando o sensor desenvolvido;
  - d) uso do sensor de condutividade para a estimativa da vazão nas pontas de pulverização;
  - e) consideração do efeito da elasticidade do sistema fluido - tubulações nas medições.

# Referências

- [1] LONDRES, F. *Agrotóxicos no Brasil: Um Guia para Ação em Defesa da Vida*. 1a. ed. Rio de Janeiro: AS-PTA - Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa, 2011.
- [2] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Consumo Nacional de Ingredientes Ativos de Agrotóxicos e Afins por Área Plantada*. 2013. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<http://migre.me/rLPzE>>.
- [3] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Indicadores de Desenvolvimento Sustentável: Brasil 2012*. Rio de Janeiro: Estudos e Pesquisas. Informação Geográfica, 2012. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default\\_2012.shtml](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/ids/default_2012.shtml)>.
- [4] IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Comercialização de Ingredientes Ativos de Agrotóxicos e Afins, por Classe de Uso*. 2013. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<http://migre.me/rLQ03>>.
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. *Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA). Relatório Complementar Relativo à Segunda Etapa das Análises de Amostras Coletadas em 2012*. Brasília: Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 2014.
- [6] TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: Conceitos e vantagens. *Ciência Rural*, v. 32, n. 1, p. 159–163, 2002.
- [7] INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. de C. Agricultura de precisão. In: *Agricultura de Precisão: Resultados de um Novo Olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2014. p. 21–33.
- [8] MATTHEWS, G. A.; BATEMAN, R.; MILLER, P. *Pesticide Application Methods*. 4a. ed. London: Wiley-Blackwell, 2014.
- [9] NUSPL, S. J.; RUDOLPH, W. W.; GUTHLAND, R. Use of injection for site-specific chemical application. *Precision Agriculture*, v. 32, n. 1, p. 739–744, 1996.
- [10] KOO, Y. M.; SUMNER, H. R. Total flow control for a direct injection sprayer. *Applied Engineering in Agriculture*, v. 14, n. 4, p. 363–367, 1998.
- [11] BAIO, F. H. R.; ANTUNIASSI, U. R. Sistemas de controle eletrônico e navegação para pulverizadores. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Ed.). *Tecnologia de Aplicação para Culturas Anuais*. Passo Fundo: Aldeia Norte Editora, 2011.
- [12] PAICE, M.; MILLER, P.; BODLE, J. D. An experimental sprayer for the spatially selective application of herbicides. *Agriculture Engineering Research*, v. 60, p. 107–116, 1995.
- [13] TOMPKINS, F. D. et al. Boom flow characteristics with direct chemical injection. *Transactions of the ASAE*, v. 33, n. 3, p. 737–743, 1990.
- [14] FELIZARDO, K. R. *Modelagem e Controle Preditivo de um Sistema de Pulverização com Injeção Direta*. Tese (Doutorado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

- [15] FUJIWARA, C. H. et al. Determinando o tempo de resposta em sistema de injeção direta com um sensor de condutividade inteligente acoplado diretamente no bico pulverizador de herbicida. In: XLIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA - CONBEA 2015. São Pedro - SP, Brazil, 2015. p. 171.
- [16] MERCALDI, H. V. et al. An intelligent and customized electrical conductivity sensor to evaluate the response time of a direct injection system. In: SENSORDEVICES 2015 THE SIXTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SENSOR DEVICE TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS - IARIA 2015. Venice, Italy, 2015. p. 19 – 24.
- [17] MERCALDI, H. V. et al. Smart and customized electrical conductivity sensor for measurements of the response time from sprayers based on direct injection. *Sensors & Transducers*, v. 187, 2015.
- [18] CRUVINEL, P. E. et al. Bancada automatizada para ensaios e desenvolvimento de pulverizadores de agroóxicos, aplicadores de fertilizantes líquidos e maturadores em culturas agrícolas sob manejo baseado em agricultura de precisão. In: *Agricultura de Precisão: um Novo Olhar*. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 96–100.
- [19] MERCALDI, H. V. *Automação de um Sistema de Pulverização para Aplicação de Agroquímicos a Taxa Variada Usando Injeção Direta*. Dissertação (Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- [20] SOLOMON, S. *Sensors Handbook*. 2a. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [21] FRADEN, J. *Handbook of Modern Sensors*. 4a. ed. New York: Springer, 2010.
- [22] ATKINS, P. W.; PAULA, J. D. *Physical Chemistry*. 8a. ed. New York: Oxford University Press, 2006.
- [23] BARROW, G. M. *Físico-Química*. 1a. ed. Rio de Janeiro: Reverté, 1982.
- [24] OHLWEILER, O. A. *Fundamentos de Análise Instrumental*. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1981.
- [25] CELINSKI, V. G.; ZIMBACK, C. R. L.; CELINSKI, T. M. Avaliação de um sensor de resistência elétrica e sua correlação com atributos do solo. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 1, p. 9, 2009.
- [26] RABELLO, L. M. et al. Mapeamento da condutividade elétrica do solo - sistema protótipo. *Embrapa Instrumentação Agropecária - Circular Técnica*, São Carlos, v. 46, p. 4, 2008.
- [27] ROCHA, M. G. et al. Mapeamento da condutividade elétrica aparente do solo com sensor portátil em um argissolo no semiárido. In: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. Uberlândia, MG, 2011. p. 33–37.
- [28] CROWE, T. G. et al. An electronic sensor to characterize transient response of nozzle injection for pesticide spraying. *Transaction of the ASAE*, v. 48, n. 1, p. 73–82, 2005.
- [29] HLOBEN, P. *Study on the Response Time of Direct Injection Systems for Variable Rate Application of Herbicides*. Tese (Doutorado) — Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, 2007.
- [30] FIGUEIREDO, Z. N. *Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Injeção para Aplicação Localizada de Defensivos*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2003.
- [31] VELHO, R. G. *Medidas de Condutividade na Caracterização de Complexos Inorgânicos: um Levantamento Bibliográfico*. Dissertação (Mestrado: Programa de Pós-Graduação em Química e Área de Concentração em Química Inorgânica) — Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia , Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

- [32] STEWARD, B. L.; HUMBURG, D. S. Modeling the raven scs-700 chemical injection system with carrier control with sprayer simulation. *Transactions of the ASAE*, v. 43, n. 2, p. 231–245, 2000.
- [33] BUDWIG, R. S.; MCDONALD, J. M.; KARSKY, T. J. Evaluation of chemical injection system for mobile agricultural spray equipment. *Transaction of the ASAE*, v. 88, 1988.
- [34] PECK, D.; ROTH, L. Field sprayer induction system development and evaluation. *ASAE Papers*, v. 75, 1975.
- [35] BENNET, K. A.; BROWN, R. B. Direct nozzle injection and precise metering for variable rate herbicide application. v. 97, 1997.
- [36] SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: SIMPÓSIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. Viçosa, 2000. p. 110–145.
- [37] OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. 5a. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.
- [38] Exar Corporation, Datasheet XR2206. 2008. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <[https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206\\_104\\_020808.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf)>.
- [39] Texas Instruments, Datasheet LF147, LF347-N. 2013. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf147.pdf>>.
- [40] Tecnopen, Manual de instruções mCA150. 2014. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<http://www.tecnopen.com.br>>.
- [41] Texas Instruments, Datasheet OPA344, OPA345. 2000. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa345.pdf>>.
- [42] FELIZARDO, K. R.; CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A. Bancada didática para avaliação de sistema de injeção direta de herbicidas agrícolas de interesse em agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - CONBAP 2010. Ribeirão Preto, SP, 2010. p. ID: 048.001.
- [43] ARDUINO, ARDUINO UNO. 2014. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>.
- [44] LabVIEW interface for arduino setup procedure. 2011. Acesso em: 10 out 2015. Disponível em: <<https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-15971>>.



# APÊNDICE A – Conexões entre o cRIO-9073 e os módulos de E/S.

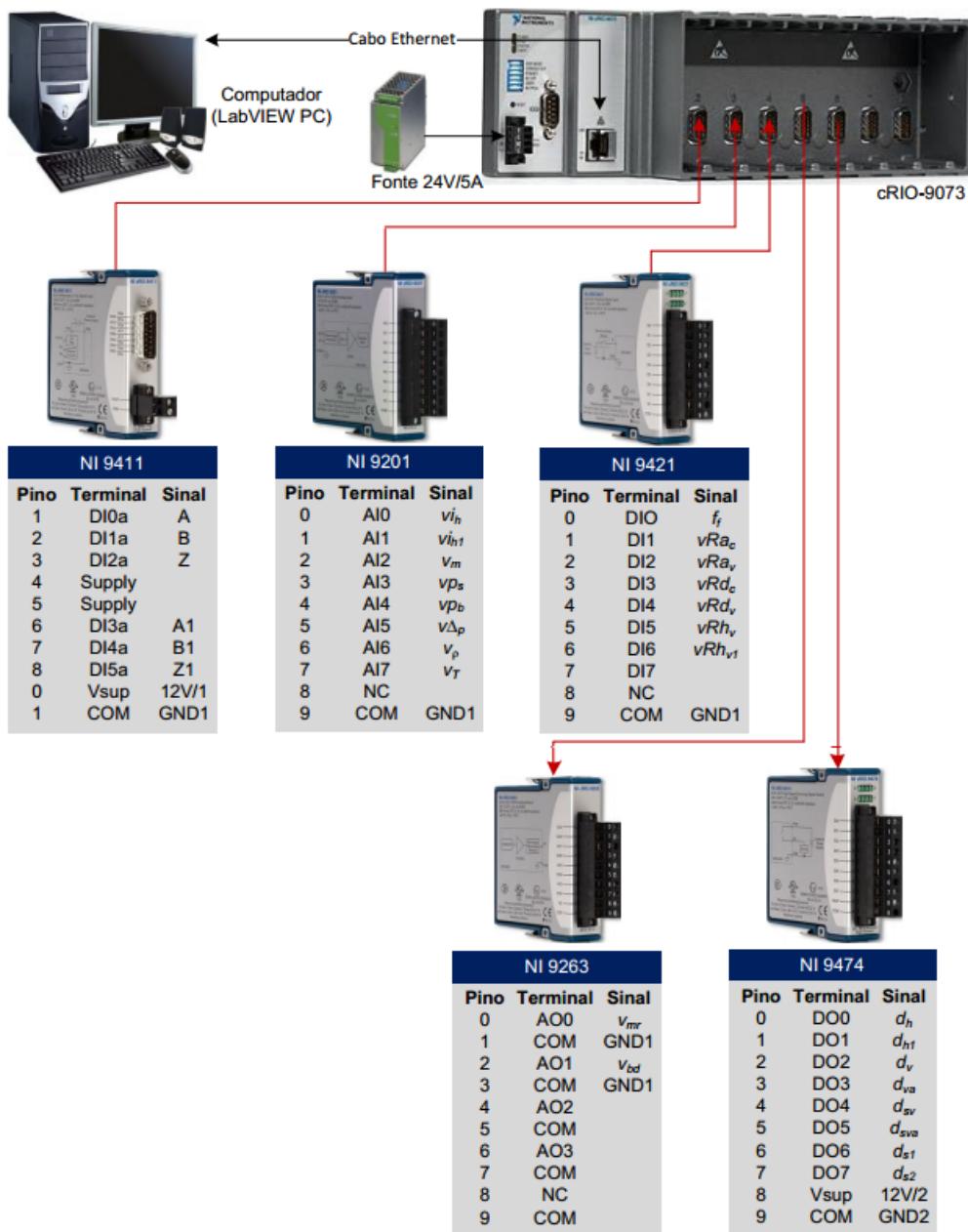


Figura 46 – Conexões entre o cRIO-9073 e os módulos de E/S.

Fonte:[14]



# APÊNDICE B – Código desenvolvido em Matlab para levantamento da resposta dinâmica

```

1 %% Determinacao da condutividade e concentracao
2 % Executar codigo por trechos
3 clear all
4 close all
5
6 tensao1 = load('repeticao1_tensao.txt') %Carregamento de dados
7 tempo1 = load('repeticao1_tempo.txt') %Carregamento de dados
8
9 tensao2 = load('repeticao2_tensao.txt') %Carregamento de dados
10 tempo2 = load('repeticao2_tempo.txt') %Carregamento de dados
11
12 tensao3 = load('repeticao3_tensao.txt') %Carregamento de dados
13 tempo3 = load('repeticao3_tempo.txt') %Carregamento de dados
14
15 k1 = 2.547e-6*exp(1.44*tensao1); %Valores de condutividade eletrica
16 c1 = (1000*k1)./126.59; %Concentracao
17 figure
18 plot(tempo1,k1); %Grafico utilizado para determinar cmin e cmax
19
20 k2 = 2.547e-6*exp(1.44*tensao2); %Valores de condutividade eletrica
21 c2 = (1000*k2)./126.59; %Concentracao
22 figure
23 plot(tempo2,k2); %Grafico utilizado para determinar cmin e cmax
24
25 k3 = 2.547e-6*exp(1.44*tensao3); %Valores de condutividade eletrica
26 c3 = (1000*k3)./126.59; %Concentracao
27 figure
28 plot(tempo3,k3); %Grafico utilizado para determinar cmin e cmax
29
30 % Identificar a concentracao minima e maxima
31 % para determinacao do tempo de resposta (variam para cada repeticao)
32
33 %% Graficos da resposta dinamica
34
35 % Entrada manual
36
37 cmin1 = X %Concentracao minima repeticao 1
38 cmax1 = X %Concentracao maxima repeticao 1
39
40 cmin2 = X %Concentracao minima repeticao 2

```

```
41 cmax2 = X %Concentracao maxima repeticao 2
42
43 cmin3 = X %Concentracao minima repeticao 3
44 cmax3 = X %Concentracao maxima repeticao 3
45
46 %% Graficos
47 subplot(3,1,1)
48 plot(tempo1,100*(c1-c1min)/(c1max-c1min));
49 xlabel('Tempo [s]')
50 ylabel('Concentracao [%]')
51
52 subplot(3,1,2)
53 plot(tempo2,100*(c2-c2min)/(c2max-c2min));
54 xlabel('Tempo [s]')
55 ylabel('Concentracao [%]')
56
57 subplot(3,1,3)
58 plot(tempo3,100*(c3-c3min)/(c3max-c3min));
59 xlabel('Tempo [s]')
60 ylabel('Concentracao [%]')
61
62 figure
63 plot(tempo1,100*(c1-c1min)/(c1max-c1min), 'b')
64 hold on
65 plot(tempo2,100*(c2-c2min)/(c2max-c2min), 'r')
66 hold on
67 plot(tempo3,100*(c3-c3min)/(c3max-c3min), 'g')
68 xlabel('Tempo [s]')
69 ylabel('Concentracao [%]')
```