

LUIZ CARLOS BARON

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE DISPOSITIVOS DE
BAIXO CUSTO PARA AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA HIDROPÔNICO
NFT

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
MARÇO – 2019

LUIZ CARLOS BARON

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE DISPOSITIVOS DE
BAIXO CUSTO PARA AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA
HIDROPÔNICO NFT**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

Coorientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

CASCABEL

PARANÁ – BRASIL

MARÇO – 2019

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Baron, Luiz Carlos.

Avaliação da viabilidade técnica de dispositivos de baixo custo para automação de um sistema hidropônico NFT / Luiz Carlos Baron; orientador(a), Carlos Eduardo Camargo Nogueira; coorientador(a), Jair Antonio Cruz Siqueira, 2019.

133 f.

Dissertação (mestrado), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2019.

1. CE. 2. Solução hidropônica. 3. Arduino. I. Nogueira, Carlos Eduardo Camargo. II. Siqueira, Jair Antonio Cruz. III. Título.

LUIZ CARLOS BARON

Avaliação da viabilidade técnica de dispositivos de baixo custo para automação de um sistema hidropônico NFT

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes Renováveis e Racionalização de Energia Na Agroindústria e Agricultura, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:



Orientador(a) - Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Alcione Miotto
Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

Cascavel, 13 de março de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa, Deisy de Godoy Baron, pelo apoio, incentivo e principalmente por se fazer presente em várias das etapas do experimento. Ao meu irmão Andre Luis Baron Lang pelas contribuições no projeto.

Especialmente, ao professor Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira pelas preciosas e eficazes orientações, pelo apoio e compreensão.

Ao professor Dr. Alcione Miotto pelo auxílio na área de cultivos hidropônicos.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura (PPGEA) pelo conhecimento compartilhado.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel, pela oportunidade de realizar o mestrado e pela disponibilidade de infraestrutura.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus de São Miguel do Oeste, pela disponibilidade de infraestrutura para realização do experimento.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Vantagens do sistema hidropônico em relação ao cultivo no solo | 5 |
| Tabela 2 – Desvantagens do sistema hidropônico em relação ao cultivo no solo..... | 7 |
| Tabela 3 – Concentrações de nutrientes em formulações de soluções nutritivas | 17 |
| Tabela 4 – Composição nutritiva adequada para alface em sistema NFT | 18 |
| Tabela 5 – Características de sensores utilizados para automação do sistema hidropônico..... | 37 |
| Tabela 6 – Características de sensores utilizados para automação do sistema hidropônico..... | 50 |
| Tabela 7 – Diferenças entre repostas iniciais de finais do sensor de condutividade . | 73 |
| Tabela 8 – Teste de tempo de detecção de passagem da solução nutritiva no final dos canais ao longo do teste de cultivo hidropônico | 75 |
| Tabela 9 – Massas das mudas de alface crespa no início e no final do cultivo no sistema automatizado | 83 |
| Tabela 10 – Custo de diferentes níveis do sistema hidropônico automatizado..... | 85 |
| Tabela 11 – Características do controlador Arduino Mega 2560 R3 | 95 |
| Tabela 12 – Dados coletados de resposta do medidor de temperatura do condutímetro..... | 105 |
| Tabela 13 – Medições de condutividade antes do início do cultivo hidropônico | 106 |
| Tabela 14 – Medições de condutividade no final cultivo hidropônico | 107 |
| Tabela 15 – Dados coletados de iluminação, temperatura e umidade do ar para determinação do tempo de acionamento da motobomba | 108 |
| Tabela 16 – Custos de componentes do projeto de automação do sistema hidropônico | 110 |
| Tabela 17 – Custos do sistema hidropônico automatizado básico para 1 bancada | 111 |
| Tabela 18 – Custos do sistema hidropônico automatizado básico para 10 bancadas | 112 |
| Tabela 19 – Custos do sistema hidropônico automatizado intermediário para 1 Bancada | 113 |
| Tabela 20 – Custos do sistema hidropônico automatizado intermediário para 10 bancadas..... | 114 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 21 - Custos do sistema hidropônico automatizado completo para 1 Bancada | 115 |
| Tabela 22 - Custos do sistema hidropônico automatizado completo para 10 bancadas | 116 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Seis tipos diferentes de sistemas hidropônicos tradicionais. (a) sistema de pavio, (b) sistema de gotejamento, (c) sistema de subirrigação, (d) sistema de leito flutuante, (e) sistema NFT, (f) sistema aeropônico..... | 13 |
| Figura 2 – Descrição simplificada de um sistema de controle..... | 23 |
| Figura 3 – Variação da resposta a um comando de entrada..... | 24 |
| Figura 4 – Elementos de um sistema de controle em malha aberta..... | 24 |
| Figura 5 – Elementos de um sistema de controle em malha fechada (com realimentação)..... | 25 |
| Figura 6 – Curva típica de um módulo fotovoltaico de potência elétrica em função da tensão e corrente elétrica em função da tensão..... | 29 |
| Figura 7 – Influência na curva característica de IxV em função: a) da variação da irradiância, b) da variação da temperatura da célula fotovoltaica..... | 30 |
| Figura 8 – Localização do experimento..... | 32 |
| Figura 9 – Compostos de nutrientes para confecção de solução nutritiva balanceada. | 33 |
| Figura 10 – Formato de bancada hidropônica para ensaios. | 34 |
| Figura 11 – Desenho esquemático da vista superior da bancada de teste. | 34 |
| Figura 12 - Desenho esquemático da vista lateral da bancada de teste. | 35 |
| Figura 13 – Detalhe da entrada da solução nutritiva nos perfis do sistema automatizado..... | 35 |
| Figura 14 – Montagem de filtro para bomba 12V CC. | 35 |
| Figura 15 – Sensores utilizados para a automação hidropônica: a) Peagâmetro, b) Condutivímetro, c) Medidor de energia, d) Sensor de iluminância, e) Sensor Ultrassônico, f) Sensor de temperatura e umidade do ar. | 37 |
| Figura 16 – Montagem de terminais para detecção da passagem da solução nutritiva. | 38 |
| Figura 17 – Circuito para acionamento do polo positivo para cada bancada (1 até 10). | 38 |
| Figura 18 – Circuito para detecção da passagem da solução nutritiva nos canais (1 ao 6). | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 19 – Montagem do circuito de acionamento das bancadas e de leitura dos canais..... | 40 |
| Figura 20 – Circuito montado para medição de condutividade e de temperatura do líquido, com detalhe dos eletrodos e do sensor NTC..... | 41 |
| Figura 21 – Atuadores utilizados para a automação hidropônica: a) Bomba 12V CC, b) Bomba peristáltica 12V CC, c) Válvula solenoide 12V CC, d) Buzzer. | 43 |
| Figura 22 – Circuito de acionamento das 5 bombas peristálticas, da bomba da solução nutritiva e da eletroválvula..... | 43 |
| Figura 23 – Montagem de bombas peristálticas..... | 44 |
| Figura 24 – Instalação de bombas peristálticas. | 44 |
| Figura 25 – Ligações do módulo relé, tela nextion, medidores INA219 e carregador da bateria. | 46 |
| Figura 26 – Visão frontal e superior da caixa do sistema de automação. | 47 |
| Figura 27 – Visão inferior da caixa do sistema de automação. | 47 |
| Figura 28 – Visão lateral esquerda da caixa do sistema de automação | 48 |
| Figura 29 – Posicionamento dos sensores e componentes do sistema automatizado. | 48 |
| Figura 30 – Medidores de referência utilizados: a) Condutímetro, b) Multímetro-Wattímetro, c) Peagâmetro portátil, d) Condutímetro portátil, e) Balança portátil... | 49 |
| Figura 31 – Diagrama esquemático do sistema hidropônico automatizado. | 51 |
| Figura 32 – Preparo da solução nutritiva..... | 53 |
| Figura 33 – Solução nutritiva em recipientes de 5L..... | 54 |
| Figura 34 – Preparação das mudas de alface crespa para colocar no sistema hidropônico..... | 55 |
| Figura 35 – Mudas em copos plásticos descartáveis inseridas nos canais..... | 55 |
| Figura 36 – Inserção e identificação de mudas nas bancadas e nos perfis. | 55 |
| Figura 37 – Posição e identificação de mudas nas bancadas e nos perfis. | 56 |
| Figura 38 – Levantamento de resposta de sensor de condutividade do sistema automatizado em comparação com o de bancada..... | 57 |
| Figura 39 – Verificação de resposta do condutímetro do sistema automatizado ao final do cultivo de 12 dias. | 58 |
| Figura 40 – a) Tela principal do sistema no software nextion e b) Tela principal real. | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 41 – a) Tela de status do sistema no software nextion e b) Tela de status real. | 60 |
| Figura 42 – a) Tela de mensagens do sistema no software nextion e b) Tela de mensagens real..... | 60 |
| Figura 43 – a) Tela de configuração do sistema no software nextion e b) Tela de configuração real..... | 61 |
| Figura 44 – Medições de energia com multímetro Unit-T UT71E, a) com a bomba ligada e b) com a bomba desligada..... | 63 |
| Figura 45 – Irradiação solar no plano inclinado na cidade de São Miguel do Oeste, SC-Brasil. | 65 |
| Figura 46 – Resposta de sensor de temperatura NTC-10k do condutivímetro. | 70 |
| Figura 47 – Resposta do condutivímetro do sistema automatizado em relação ao de bancada antes do início dos testes de cultivo hidropônico..... | 71 |
| Figura 48 – Oxidação provocada pela ação salina da solução em volta dos eletrodos do condutivímetro..... | 72 |
| Figura 49 – Resposta do condutivímetro do sistema automatizado em relação ao de bancada no final do cultivo hidropônico. | 73 |
| Figura 50 – Conexão de terminais para detecção da solução nutritiva a) forma inicial b) forma final. | 75 |
| Figura 51 – Desgaste dos terminais durante o período dos testes, a) Canal 1, b) Canal 2, c) Canal 3..... | 77 |
| Figura 52 – Testes de detecção de queda de energia e alimentação de emergência por bateria, a) Sem energia da Rede, b) Com energia da Rede. | 77 |
| Figura 53 – Informação de dados via serial usb, para computador..... | 78 |
| Figura 54 – Variação da iluminância durante o dia 21/02/2019..... | 78 |
| Figura 55 – Variação da temperatura e da umidade relativa do ar durante o dia 21/02/2019. | 79 |
| Figura 56 – Variação do tempo de turno de rega em função da iluminância, temperatura e umidade relativa do ar para o sistema automatizado..... | 80 |
| Figura 57 – Variação do tempo de bomba ligada e desligada para o sistema automatizado comparado com um convencional. | 84 |
| Figura 58 – Circuito montado para leitura da condutividade, a) visão frontal da placa, b) visão inferior, c) estrutura final do condutivímetro..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figura 59 – a) Sistema controlador Arduino Mega 2560 R3, b) Módulo RTC DS3231 e c) Módulo cartão micro sd. | 95 |
| Figura 60 – Shield montado para o Arduino Mega. | 96 |
| Figura 61 – Tela de interface IHM touch. | 97 |
| Figura 62 – Circuito de fonte de alimentação para o sistema. | 98 |
| Figura 63 – Caixa do sistema de automação finalizado. | 99 |
| Figura 64 – Fluxograma de leitura de tensão do sensor NTC 10k do condutivímetro para levantamento da função de resposta do sensor de temperatura do líquido. ... | 100 |
| Figura 65 – Fluxograma de medição de tensão analógica do condutivímetro para comparações com o condutivímetro de bancada e verificação de função de resposta. | 101 |
| Figura 66 – Parte 1 do Fluxograma resumido da programação do Arduino. | 102 |
| Figura 67 – Parte 2 do fluxograma resumido da programação geral do Arduino. ... | 103 |
| Figura 68 - Parte 3 do fluxograma resumido da programação geral do Arduino. | 104 |

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas;

NFT – Técnica de Filme de Nutrientes (*Nutrient Film Technique*);

SC – Santa Catarina;

DWC – Cultura de Águas Profundas (*Deep Water Culture*);

DFT – Técnica de Fluxo Profundo (*Deep Flow Technique*);

CE – Condutividade Elétrica;

CLPs – Controladores Lógicos Programáveis;

CA – Corrente Alternada;

CC – Corrente Contínua;

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina;

NOCT – Temperatura Nominal de Operação da Célula (*Nominal Operating Cell Temperature*);

STC – Potência nas condições padrão de ensaio (*Standart Test Conditions*);

RTC – Relógio de Tempo Real (*Real Time Clock*);

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil;

BARON, Luiz Carlos; Me. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, março de 2019. **Avaliação da viabilidade técnica de dispositivos de baixo custo para automação de um sistema hidropônico NFT**. Professor Orientador Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira, Prof. Coorientador Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

RESUMO

Os sistemas hidropônicos necessitam de ajustes frequentes na solução nutritiva e variações nos turnos de rega devido à iluminância, temperatura e umidade do ar. Estas atividades resultam em emprego de mão de obra ou custos elevados de sistema hidropônicos automatizados. Este trabalho teve por objetivo a elaboração e análise da viabilidade técnica e operacional da automação modular de baixo custo relativo para um sistema hidropônico NFT de pequena escala. O sistema realiza o controle em malha fechada de condutividade elétrica, controle em malha aberta do fluxo da solução nutritiva de forma que o tempo da motobomba acionada dependente da intensidade de iluminância, da temperatura e umidade do ar. O sistema ainda realiza a verificação de falhas da bomba, encharcamento de perfis e da queda de energia, apresentando confiabilidade na alimentação de emergência por bateria quando ocorre a falta de energia da rede. O controle da condutividade elétrica mostrou-se viável, porém o sensor apresenta uma descalibração que pode ser corrigida por programação. Já o controle do pH se mostrou impraticável devido à grande variação apresentada pelo medidor quando submerso continuamente na solução nutritiva. O sistema possui um consumo de 7,548 W, que representa durante um dia 181,15 W.h.dia⁻¹, com um custo de energia de R\$ 4,18 ao mês considerando a tarifa atual de 0,769 R\$.kW⁻¹.h⁻¹. A automação do sistema apresentou um baixo custo relativo para a configuração básica, com R\$ 657,90 para uma bancada e de R\$ 1.076,90 para dez bancadas e para a configuração intermediária de R\$ 859,63 e R\$ 2.292,23 respectivamente. Apenas para um sistema isolado com alimentação por módulo fotovoltaico e com reserva por bateria o sistema apresentou um custo relativamente alto de R\$ 2.183,03 e R\$ 7.458,73 para uma e para dez bancadas, respectivamente.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

PALAVRAS-CHAVE: CE, solução hidropônica, arduino.

BARON, Luiz Carlos; Me. State University of West Paraná, march of 2019. **Evaluation of the technical feasibility of low-cost devices for automation of an NFT hydroponic system.** Teacher mentor Ph.D Carlos Eduardo Camargo Nogueira, Teacher second mentor Ph.D Jair Antonio Cruz Siqueira.

ABSTRACT

Hydroponic systems require frequent adjustments in nutrient solution and variations in watering shifts due to illuminance, temperature, and air humidity. These activities result in the employment of labor or high costs of automated hydroponic systems. This work aimed at the elaboration and analysis of the technical and operational feasibility of the low-cost modular automation for a small scale NFT hydroponic system. The system performs closed-loop control of electrical conductivity, open-loop control of the nutrient solution flow so that the time of the driven pump depends on the intensity of illuminance, temperature and humidity of the air. The system also performs the verification of pump failures, profile dampening and power failure, presenting reliability in emergency battery power when there is a lack of mains power. The control of the electrical conductivity has proved feasible, however the sensor presents a decalibration that can be corrected by programming. On the other hand, the pH control was impracticable due to the great variation presented by the meter when continuously submerged in the nutritive solution. The system has a consumption of 7.548 W, which represents for one day 181.15 W.h.day⁻¹, with an energy cost of R\$ 4.18 per month considering the current tariff of 0.769 R\$.kW⁻¹.h⁻¹. The system automation presented a relatively low cost for the basic configuration, with R\$ 657.90 for one bench and R\$ 1,076.90 for ten benches and for the intermediate configuration of R\$ 859.63 and R\$ 2,292.23 respectively. Only for an isolated system powered by photovoltaic module and with battery backup the system presented a relatively high cost of R\$ 2,183.03 and R\$ 7,458.73 for one and ten benches, respectively.

"This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001"

KEYWORDS: EC, hydroponic solution, arduino.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivo principal | 2 |
| 1.2 Objetivos específicos: | 2 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 O Cultivo Hidropônico..... | 4 |
| 2.1.1 Histórico do Cultivo Hidropônico..... | 4 |
| 2.1.2 Vantagens do sistema hidropônico..... | 5 |
| 2.1.3 Desvantagens do sistema hidropônico | 6 |
| 2.2 Tipos de Sistemas Hidropônicos. | 7 |
| 2.2.1 Sistema de pavio (<i>The wick system</i>) | 8 |
| 2.2.2 Sistema por gotejamento (<i>The drip system</i>) | 8 |
| 2.2.3 Sistema de subirrigação ou fluxo e refluxo (<i>The Ebb and Flow - Flood and Drain</i>) | 9 |
| 2.2.4 Sistema de leito flutuante (<i>The deep water culture system - DWC or floating e</i> <i>Deep Flow Technique - DFT</i>) | 9 |
| 2.2.5 Sistema da técnica de filme de nutriente - NFT (<i>The nutrient film technique</i> <i>system</i>)..... | 10 |
| 2.2.6 Sistema de aeroponia (<i>Aeroponic system</i>) | 12 |
| 2.3 Sistemas Hidropônicos Automatizados Existentes | 13 |
| 2.3.1 Hidrobase: Internet das coisas aplicada à Jardinagem | 14 |
| 2.3.2 Sistema de Comunicação e Controle para Hidroponia | 14 |
| 2.3.3 Sistema hidropônico totalmente automatizado para crescimento de plantas internas | 15 |
| 2.4 Fatores de Desenvolvimento de Plantas | 15 |
| 2.4.1 Nutrientes | 16 |
| 2.4.2 Soluções nutritivas – Preparo e manejo | 17 |
| 2.4.3 Fluxo de água | 18 |
| 2.4.4 Substratos..... | 19 |
| 2.4.5 Espaçamento entre plantas | 19 |
| 2.4.6 Temperatura do ar e da solução nutritiva | 20 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.4.7 | Oxigenação..... | 20 |
| 2.4.8 | Radiação-Luz..... | 20 |
| 2.4.9 | pH..... | 21 |
| 2.4.10 | Condutividade elétrica (CE)..... | 21 |
| 2.5 | Sistemas de Controle e Automação | 23 |
| 2.5.1 | Controle e automação..... | 23 |
| 2.5.2 | Controladores | 26 |
| 2.6 | Sistemas Fotovoltaicos | 27 |
| 2.6.1 | Radiação Solar e Orientação dos Módulos Fotovoltaicos..... | 27 |
| 2.6.2 | Efeito Fotovoltaico | 28 |
| 2.6.3 | Funcionamento e características dos módulos fotovoltaicos | 28 |
| 2.6.4 | Controlador de Carga | 30 |
| 2.6.5 | Tecnologias e tipos de sistemas fotovoltaicos | 30 |
| 3. | MATERIAL E MÉTODOS..... | 32 |
| 3.1 | Localização do experimento | 32 |
| 3.2 | Material..... | 32 |
| 3.2.1 | Bancada hidropônica NFT | 33 |
| 3.2.2 | Protótipo de sistema hidropônico NFT automatizado | 36 |
| 3.2.3 | Medidores de referência | 49 |
| 3.3 | Métodos..... | 50 |
| 3.3.1 | Dimensionamento da bomba de fluxo de nutrientes..... | 52 |
| 3.3.2 | Preparo da solução nutritiva, bancadas e plantas | 53 |
| 3.3.3 | Verificação de resposta e calibração de sensores..... | 56 |
| 3.3.4 | Programação geral do sistema | 59 |
| 3.3.5 | Consumo de energia..... | 62 |
| 3.3.6 | Dimensionamento do sistema fotovoltaico..... | 63 |
| 3.3.7 | Dimensionamento de Baterias..... | 66 |
| 3.3.8 | Análise do sistema hidropônico convencional e automatizado | 67 |
| 3.3.9 | Levantamento de custos do projeto..... | 68 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 69 |
| 4.1.1 | Dimensionamento da bomba de fluxo de nutrientes..... | 69 |
| 4.1.2 | Verificação de resposta e calibração de sensores..... | 69 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.1.3 | Programação geral do sistema | 78 |
| 4.1.4 | Consumo de energia..... | 81 |
| 4.1.5 | Dimensionamento do sistema fotovoltaico..... | 81 |
| 4.1.6 | Dimensionamento de Baterias..... | 82 |
| 4.1.7 | Análise do sistema hidropônico convencional e automatizado | 83 |
| 4.1.8 | Levantamento de custos do projeto | 85 |
| 5. | CONCLUSÕES | 87 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 89 |
| | ANEXO A – CIRCUITO CONSTRUÍDO PARA O MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE E TEMPERATURA | 94 |
| | ANEXO B – MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA E MÓDULOS RTC E DATALOGGER UTILIZADOS NO SISTEMA | 95 |
| | ANEXO C – SHIELD MONTADO PARA O ARDUINO MEGA..... | 96 |
| | ANEXO D – TELA DE INTERFACE IHM TOUCH..... | 97 |
| | ANEXO E – CIRCUITO DE FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA O SISTEMA | 98 |
| | ANEXO F – CAIXA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO FINALIZADO..... | 99 |
| | ANEXO G – FLUXOGRAMA DE LEITURA DE TENSÃO DO SENSOR NTC 10K DO CONDUTIVÍMETRO PARA LEVANTAMENTO DA FUNÇÃO DE RESPOSTA DO SENSOR DE TEMPERATURA DO LÍQUIDO | 100 |
| | ANEXO H – FLUXOGRAMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO ANALÓGICA DO CONDUTIVÍMETRO PARA COMPARAÇÕES COM O CONDUTIVÍMETRO DE BANCADA E VERIFICAÇÃO DE FUNÇÃO DE RESPOSTA | 101 |
| | ANEXO I – FLUXOGRAMA RESUMIDO DA PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO | 102 |
| | ANEXO J – TABELA DE DADOS COLETADOS DA RESPOSTA DO MEDIDOR DE TEMPERATURA DO CONDUTIVÍMETRO | 105 |
| | ANEXO K – TABELA DE DADOS COLETADOS DE MEDIÇÕES DE CONDUTIVIDADE ANTES DO INÍCIO DO CULTIVO HIDROPÔNICO | 106 |
| | ANEXO L – TABELA DE DADOS COLETADOS DE MEDIÇÕES DE CONDUTIVIDADE NO FINAL CULTIVO HIDROPÔNICO | 107 |
| | ANEXO M – DADOS COLETADOS PARA O DIA 21/02/2019..... | 108 |
| | ANEXO N – TABELA DE CUSTOS DE CADA COMPONENTE DO SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO | 110 |

| | |
|---|-----|
| ANEXO O – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO BÁSICO COM 1 BANCADA..... | 111 |
| ANEXO P – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO BÁSICO COM 10 BANCADAS | 112 |
| ANEXO Q – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO INTERMEDIÁRIO COM 1 BANCADA..... | 113 |
| ANEXO R – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO INTERMEDIÁRIO COM 10 BANCADAS..... | 114 |
| ANEXO S – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO COMPLETO COM 1 BANCADA | 115 |
| ANEXO T – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO COMPLETO COM 10 BANCADAS..... | 116 |

1. INTRODUÇÃO

Estudos da ONU mostram que a população mundial era de 7,8 bilhões em 2017, bem como pode chegar a 8,6 bilhões em 2030, com esse crescimento populacional e a escassez de terras torna necessário cultivos mais intensivos e eficientes (UNITED NATIONS, 2017). Porém para a produção de plantas em solo se faz necessidade de uma maior área com solo próprio para realizar o cultivo, e a utilização de agrotóxicos. A hidroponia é uma ótima alternativa de cultivo para atender essas necessidades, pois: possui uma maior produção em menor área, pouca ou nenhuma precisão de agrotóxicos para cultivos hidropônicos em abrigos, produção em áreas próximas de centros de consumo (em cidades), produção em regiões áridas como no norte do Brasil e regiões de relevo acidentado. É o caso do estado de Santa Catarina (SC), que possui um relevo muito acidentado, pois o planalto ocidental domina boa parte do estado, principalmente a região Oeste de SC.

Um dos ramos da horticultura que mais cresce no Estado de SC é, justamente, a hidroponia. O estado apresenta um perfil de produtores hidropônicos que são principalmente agricultores familiares, que possuem pequenas áreas de produção. Além disso, muitos dos iniciantes na hidroponia são pessoas do meio urbano, que buscam na agricultura uma forma de ter seu negócio próprio. Outra grande parte dos novos hidroponistas são agricultores na procura por uma nova alternativa de renda na propriedade (MORALES, 2017).

Dentre os sistemas hidropônicos mais utilizados está a Técnica de Filme de Nutriente (NFT), o qual possui perfis para colocar as plantas e por onde passa a solução nutritiva, descendo por ação da gravidade até um tanque, quando a solução nutritiva é bombeada para o início dos perfis. As principais vantagens do sistema NFT são: melhor qualidade do produto, diminuição do tempo para cultivo, diminuição de consumo e desperdícios de água e fertilizantes, dispensa rotação de cultura, maior produtividade, melhor controle das variáveis climáticas e nutricionais, bem como facilidade de esterilização. Além disso, suas principais desvantagens são: o custo inicial alto, necessidade de mão de obra especializada, a dependência de eletricidade nos sistemas automáticos. Nos sistemas hidropônicos NFT existe uma carência de automação de baixo custo, que evitem perdas por queda de energia, por entupimento dos perfis, bem como façam a verificação de falhas no sistema.

Para o sistema hidropônico NFT realizado de forma convencional, a solução nutritiva é preparada manualmente e durante o ciclo de crescimento é medido sua Condutividade Elétrica (CE), assim como sua necessidade de reposição que também é realizada manualmente. Já a circulação da solução nutritiva é realizada geralmente por bombas de Corrente Alternada (CA) controladas por temporizadores analógicos, os quais possuem tempos pré-definidos de 15 em 15 minutos apenas, não possibilitando temporizações inferiores a 15 minutos. Tempos inadequados são prejudiciais para o crescimento das plantas quando submetidas à uma temperatura elevada, com longo tempo sem a circulação da solução nutritiva.

A automação do sistema hidropônico NFT pode suprir a necessidade do controle/acompanhamento constante do cultivo com sistemas de ajustes de CE datados de soluções nos tanques e nos recipientes de reposição. Além disso, um sistema fotovoltaico pode trazer uma maior autonomia em caso de quedas de energia prolongadas e também uma redução do consumo de energia pela concessionária de energia.

Dessa forma, este projeto propõe a automação de um sistema hidropônico NFT para pequenos e médios produtores, de forma modular, com possibilidade para atender até dez bancadas hidropônicas por módulo. Pretende-se diminuir ou eliminar os principais problemas ainda encontrados em um sistema hidropônico NFT, fazendo com que o mesmo apresente baixo custo relativo, tenha alimentação de emergência (por bateria recarregada por rede ou por placa fotovoltaica), e disponibilize alertas de falhas no sistema, como possíveis entupimentos nos perfis, dentre outras.

1.1 Objetivo principal

Este trabalho tem por objetivo principal desenvolver um sistema de automação modular para hidroponia de pequena escala, bem como realizar uma avaliação técnica e operacional do mesmo.

1.2 Objetivos específicos:

- Construir e testar um sistema de automação modular de baixo custo para cultivo hidropônico NFT, com controle do pH, CE e do tempo de acionamento da motobomba, além de realizar a medição de: iluminância,

temperatura e umidade do ar, temperatura, pH e condutividade da solução nutritiva líquida;

- Construir circuito elétrico e realizar a programação para um medidor de CE e temperatura da solução nutritiva, com a realização de calibração e testes de confiabilidade comparando com medidores de laboratório;
- Construir e testar a eficiência de sensores de queda de energia e sensores nos perfis hidropônicos de NFT para monitoramento de funcionamento da motobomba e do fluxo da solução nutritiva;
- Avaliar a viabilidade técnica e operacional de um sistema de automação modular para hidroponia NFT de pequena escala, comparando-o com o sistema manual;
- Dimensionar e levantar os custos para diferentes níveis de configuração do sistema de automação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é abordado o cultivo em sistema hidropônico, fatores de desenvolvimento de plantas e a automação aplicada em hidroponia.

2.1 O Cultivo Hidropônico

Segundo Douglas (1987) e Jesus Filho (2009), o termo hidroponia deriva das palavras gregas: *hydro* = água e *ponos* = trabalho. Sua combinação relaciona ao trabalho na água ou cultivo na água, em que as plantas se desenvolvem sem a utilização do solo, com sua alimentação por meio de uma solução nutritiva dissolvida em água, contendo os nutrientes que são essenciais para as plantas.

2.1.1 Histórico do Cultivo Hidropônico

Para Alberoni (1997), os primeiros cultivos em água de que se tem notícia relatam sua utilização já há milhares de anos, nos jardins flutuantes dos astecas e da china. No entanto, a primeira referência em literatura é a observação de Woodward em 1699, que cultivou menta em alguns tipos de água (TEIXEIRA, 1996).

Antes de 1930 a técnica de cultivo hidropônico já era estudada, mas, conforme Douglas (1987) a técnica se espalhou rapidamente para o cultivo doméstico e para fins comerciais nos Estados Unidos, somente após a publicação dos estudos e ensaios bem-sucedidos de Willian Gericke, em 1938. Gericke realizou, inicialmente, testes com tomates e, posteriormente com outras plantas como flores, cereais, tubérculos, frutas. Tal técnica ele chamou de hidroponia.

Com a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), o cultivo hidropônico recebeu um impulso, com a adoção da técnica pelo governo norte-americano em bases militares cultivando vegetais para alimentação de suas tropas, de acordo com Douglas (1987) e Teixeira (1996).

Alberoni (1997) afirma que a hidroponia é uma tendência mundial, sendo comprovadamente produtiva e lucrativa.

Segundo Son, Kim e Ahn (2016), atualmente é preciso uma nova forma de cultivo para reduzir a área horizontal necessária, com a utilização da agricultura

vertical interna, usando um sistema de fábrica com iluminação artificial para produção eficiente de culturas alimentares. E para essa forma de cultivo, os sistemas hidropônicos são ferramentas essenciais para essa produção.

2.1.2 Vantagens do sistema hidropônico

Como um sistema de produção agrícola, a hidroponia tem muitas vantagens sobre os métodos baseados no solo, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. As principais vantagens apresentadas nas referências consultadas, tal como pode ser observado na Tabela 1, são: melhor qualidade do produto, diminuição do tempo para cultivo, diminuição de consumo e desperdícios de água e fertilizantes, dispensa rotação de cultura, maior produtividade, maior uniformidade do produto com o melhor controle das variáveis climáticas, nutricionais, e facilidade de esterilização.

Tabela 1 – Vantagens do sistema hidropônico em relação ao cultivo no solo

| Vantagens | Referências |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Menor consumo e menor desperdícios de água, fertilizantes e nutrientes, sendo recicláveis. | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; JESUS FILHO, 2009; BELTRANO et al., 2015; CARRUTHERS, 2015; PEREZ E., 2008. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Produção em menor período, crescimento mais rápido, precocidade na colheita, pois as plantas não estão sob estresse nutricional ou de água. | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; CARRUTHERS, 2015; RESH, 2015. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Maior produtividade por área. | TEIXEIRA, 1996; BELTRANO et al., 2015; CARRUTHERS, 2015; PEREZ E., 2008; RESH, 2015. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Produção de melhor qualidade, é mais firme com maior prazo de validade. | TEIXEIRA, 1996; BELTRANO et al., 2015; CARRUTHERS, 2015; PEREZ E., 2008. |
| <ul style="list-style-type: none"> • Mínimo uso de fungicidas e inseticidas, pois não possui ervas daninhas, insetos e microorganismos do solo. | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; RESH, 2015. |

Tabela 1 – Continuação.

| | |
|---|--|
| • Plantas uniformes e todas com alta qualidade. Plantas têm um equilíbrio ideal de ar, água, pH, condutividade e nutrientes, com correções de deficiências ou excessos. | ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; PEREZ E., 2008; RESH, 2015. |
| • Dispensa rotação de cultura. | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; PEREZ E., 2008. |
| • Facilidade de operação e de esterilização do sistema, após cada cultivo. | JESUS FILHO, 2009; BELTRANO et al., 2015; PEREZ E., 2008; RESH, 2015. |
| • Maior limpeza, redução de parasitas, bactérias, fungos e de contaminação. | BELTRANO, 2015; CARRUTHERS, 2015; PEREZ E., 2008; RESH, 2015. |
| • Produção em pequenas áreas, e próximas aos grandes centros consumidores. | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015. |
| • Baixos riscos climáticos/meteorológicos. | ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; PEREZ E., 2008. |
| • Absoluto controle da água utilizada. | ALBERONI, 1998; PEREZ E., 2008; RESH, 2015. |
| • Trabalhos mais leves e de fácil manejo, pois ficam a uma boa altura de trabalho. | ALBERONI, 1998; JESUS FILHO, 2009; RESH, 2015. |
| • Menor uso de maquinários agrícolas, como: tratores, arados ou implementos similares. | BELTRANO et al., 2015; PEREZ E., 2008. |
| • Rápido retorno econômico. | ALBERONI, 1998; PEREZ E., 2008. |
| • Menor emprego de mão de obra. | TEIXEIRA, 1996; PEREZ E., 2008. |
| • Adequado para áreas não aráveis. | CARRUTHERS, 2015; RESH, 2015. |
| • Possibilidade de enriquecer produtos alimentares com vitaminas ou minerais. | PEREZ E., 2008. |

2.1.3 Desvantagens do sistema hidropônico

O sistema hidropônico também apresenta algumas desvantagens, entre as mais citadas, com base nas referências consultadas, conforme Tabela 2 são: o custo inicial alto, necessidade de mão de obra especializada, a dependência de eletricidade nos sistemas automáticos e sua facilidade de disseminação de patógenos quando do seu aparecimento, possuindo outras desvantagens menos citadas.

Tabela 2 – Desvantagens do sistema hidropônico em relação ao cultivo no solo

| Desvantagens | Referências |
|--|--|
| • O custo inicial pode ser elevado | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; CARRUTHERS, 2015; PEREZ E., 2008; RESH, 2013. |
| • Necessidade de mão de obra especializada | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998; BELTRANO et al., 2015; CARRUTHERS, 2015; PEREZ E., 2008. |
| • Dependência de eletricidade nos sistemas automáticos | TEIXEIRA, 1996; CARRUTHERS, 2015, RESH, 2015. |
| • Fácil disseminação de patógenos, no entanto, há muito menos chance de doenças de plantas em comparação com o cultivo em solo | JESUS FILHO, 2009; CARRUTHERS, 2015; RESH, 2013. |
| • Atividades rotineiras | TEIXEIRA, 1996; ALBERONI, 1998. |
| • Resistência dos produtores tradicionalistas. | ALBERONI, 1998. |
| • Deficiência de oxigênio e menor disponibilidade de nutrientes nos perfis muito longos | JESUS FILHO, 2009. |
| • A esterilização entre as colheitas não garante a isenção de patógenos | JESUS FILHO, 2009. |
| • Complexos problemas nutricionais encontrados | RESH, 2013. |

2.2 Tipos de Sistemas Hidropônicos.

Existem vários tipos de sistemas de cultivo hidropônico, se diferenciando quanto: à forma de sustentação da planta, por meio líquido ou substrato; à circulação da solução nutritiva, com ou sem circulação; ao fornecimento da solução nutritiva, contínua ou intermitente; ao reaproveitamento da solução nutritiva, com ou sem reaproveitamento. Na circulação sem reaproveitamento, a solução nutritiva é aplicada uma única vez às plantas e posteriormente descartada, podendo causar poluição ambiental, bem como gerando um custo maior, porém não necessita de um controle de

condutividade e pH após o preparo da solução nutritiva, pois não sofre variações. Já na circulação com reaproveitamento, a solução nutritiva é reutilizada, sendo necessário a correção periódica da composição da solução nutritiva, para controlar a condutividade e o pH, seja por meio da adição de água, ou de nutrientes minerais.

2.2.1 Sistema de pavio (*The wick system*)

De acordo com Seungjun Lee e Jiyoung Lee (2015), o sistema de pavio é característico por possuir um ou mais pavios, geralmente de nylon, pelos quais, por capilaridade, a solução nutritiva é fornecida do reservatório às raízes da planta, conforme Figura 1 (a). É considerado um sistema autoalimentado, por não necessitar de bomba para a circulação ou fornecimento dos nutrientes, apenas precisando da aeração da solução nutritiva. As plantas crescem em bandejas colocadas acima do reservatório de solução nutritiva, pelas quais as raízes não passam (DOUGLAS, 1987).

Ainda que o sistema seja eficaz na inibição de doenças comuns em sistemas hidropônicos, é pouco utilizado comercialmente, apenas em pequena escala, pois o sistema não é adequado para plantas de grande porte, que necessitam de uma quantidade maior de água (SEUNGJUN LEE; JIYOUNG LEE, 2015).

2.2.2 Sistema por gotejamento (*The drip system*)

É considerado um método de operação simples, portanto, um temporizador controla os ciclos de irrigação, bombeando a solução do reservatório de nutrientes para a base das plantas por meio de uma linha de gotejamento, conforme Figura 1 (b) (RESH, 2015).

Segundo Douglas (1987), essa técnica não necessita de uma oxigenação forçada na solução nutritiva, pois o gotejamento da solução no substrato e durante o retorno ao reservatório, já realiza uma oxigenação da gota. Já Resh (2015) diz ser vantajoso incluir um aerador colocado dentro do tanque de solução para melhorar a oxigenação.

Segundo Seungjun Lee e Jiyoung Lee (2015), o sistema pode ser de dois modelos, sem recuperação (sistema aberto) e com recuperação da solução nutritiva (sistema fechado). O sistema com recuperação exige monitoramentos e ajustes

diários de pH e de condutividades, uma vez que a recirculação causa mudanças desses parâmetros, sendo mais complicado de execução, porém mais econômico com a reutilização da solução. O sistema é vulnerável à falta de energia, que pode causar estresse ou morte das plantas (RESH, 2015).

2.2.3 Sistema de subirrigação ou fluxo e refluxo (*The Ebb and Flow - Flood and Drain*)

Consiste em um sistema com uma bancada superior contendo a cultura com substrato e regulador de altura da solução, e um tanque inferior com a solução nutritiva. A solução é bombeada para o meio da cultura, até atingir sua superfície, permanecendo certo período de tempo (que depende do estágio de crescimento da planta e do tipo do substrato), controlado por um temporizador, quando então a solução retorna ao tanque pela mesma tubulação da bomba, conforme demonstrado na Figura 1 (c) (JESUS FILHO, 2009).

Resh (2015) afirma que o substrato deve ser poroso, como cascalho, argila expandida ou areia grossa. Não se deve usar um meio fino como coco ou serragem, pois estes irão conter muita umidade e haverá falta de oxigênio para as plantas.

Segundo Seungjun Lee e Jiyoung Lee (2015), o sistema de fluxo e refluxo foi um dos primeiros sistemas comerciais de hidroponia, porém, mesmo permitindo cultivar vários tipos de plantas e fornecer uma grande quantidade de água, ocorre facilmente nesse sistema doenças de raiz e crescimento de algas ou fungos, necessitando uma etapa de esterilização da água.

2.2.4 Sistema de leito flutuante (*The deep water culture system - DWC or floating e Deep Flow Technique - DFT*)

Esse sistema pode ser de duas formas quanto a circulação da solução nutritiva: estático ou circulante. Na configuração estática, conforme se observa na Figura 1 (d), é chamado de *Deep water culture (DWC)*, e na configuração circulante é denominado de *Deep Flow Technique (DFT)*.

De acordo com Resh (2015), o sistema de leito flutuante é um sistema de cultura de água, assim como a técnica de filme de nutrientes (NFT). Esse tipo não é

adequado para culturas de longo prazo devido a falta de oxigenação das raízes das plantas. Para Seungjun Lee e Jiyoung Lee (2015, p.208), “as algas e fungos podem crescer rapidamente no reservatório”.

O sistema de leito flutuante estático consiste em um reservatório, uma plataforma flutuante de sustentação às plantas, e um sistema de aeração. Devido a solução nutritiva ser coberta pelos perfis, a troca de oxigênio entre a atmosfera e a solução nutritiva é limitada. O melhoramento dos métodos de aeração, mantendo o oxigênio dissolvido, possibilitou o cultivo com raízes das plantas constantemente suspensas na água. No sistema *Floating* é necessário monitorar as concentrações de oxigênio e nutrientes, salinidade e pH, para a otimização das condições de crescimento (SEUNGJUN LEE; JIYOUNG LEE, 2015).

Já o sistema de leito flutuante circulante, se diferencia do sistema estático por possuir plataformas flutuantes com as plantas em perfis separados do reservatório. E se diferenciando do NFT por possuir uma camada maior de solução nutritiva circulante nos perfis, de 10 a 20 cm de profundidade, em todo trecho do perfil. O sistema DFT permite adotar diferentes frequências de recirculação, pois as raízes das plantas são mantidas em contato contínuo com a profundidade da solução nutritiva, diminuindo as perdas com a queda de energia ou parada temporária da circulação da solução nutritiva. A concentração da solução nutritiva, expressa a partir da CE e do pH neste sistema deve ser monitorada e ajustada manualmente ou com um sistema automatizado (GILL, 2016).

Na DFT circulante, a solução nutritiva pode passar por filtros antes de retornar aos tanques, no entanto, para o sistema DFT estático, a solução nutritiva é limpa antes e depois de cada ciclo de cultivo (GILL, 2016).

2.2.5 Sistema da técnica de filme de nutriente - NFT (*The nutrient film technique system*)

De acordo com Jesus Filho (2009), essa técnica foi desenvolvida por Allen Cooper na década de 1982 que, segundo Seungjun Lee e Jiyoung Lee (2015), veio para compensar os pontos fracos dos sistemas de fluxo e refluxo, o que proporcionou a difusão do cultivo hidropônico em nível comercial. O NFT é a técnica de hidroponia mais utilizada para culturas de baixo perfil, como alface, manjericão, rúcula e espinafre (RESH, 2015).

O sistema NFT, Figura 1 (e), possui perfis que sustentam as plantas, com inclinação de 2 a 4%, por onde circula a solução nutritiva, com um reservatório para a solução nutritiva, sendo colocado em nível mais baixo que o final dos perfis, pois a solução passa pelos perfis e retorna ao reservatório pela ação da gravidade. Os perfis recebem a solução nutritiva a partir de uma bomba com períodos intermitentes controlados por um temporizador ou, em alguns casos, constantemente acionada (JESUS FILHO, 2009).

Raviv e Lieth (2008) afirmam que o comprimento dos perfis varia de 1 a 20 m, e que a largura dos perfis varia de acordo com a cultura: de 4-8 cm são suficientes para culturas como alfaces e crisântemos, enquanto que para tomate e pimentão é necessária uma largura de 15 cm. Já Resh (2015) cita que estes perfis não devem exceder 3,7m de comprimento para evitar um aumento de temperatura e perda de oxigênio na solução nutritiva enquanto ela percorre o perfil.

Segundo Martinez (2016), a taxa de fluxo deve ser aproximadamente 2L/min por perfil. Um volume considerável de água sai do sistema por evapotranspiração, necessitando sua adição periódica ao reservatório. Para Raviv e Lieth (2008), uma taxa de fluxo mais lenta que a recomendada para manter as raízes revestidas com água pode não ser adequada em um sistema NFT, pois se a vazão for muito baixa, pode ocorrer a falta de nutrientes, especialmente para as plantas no final do perfil. Isto porque as plantas estão expostas à água da qual muitas outras plantas já extraíram alguns nutrientes, especialmente potássio. Às vezes, é feita uma distinção nas taxas de fluxo necessárias conforme o estágio do cultivo.

O sistema NFT possui a vantagem de impedir o crescimento de algas nos perfis, pois a luz não entra nos perfis, além de permitir várias adaptações, com perfis de tubos rígidos ou flexíveis com diferentes seções, diâmetros e comprimentos (FURLANI et al., 1999; RESH, 2015). Carruthers (2015) cita outras vantagens como: a exposição adequada das raízes das plantas à água, oxigênio e nutrientes. Este autor cita ainda como principais desvantagens o risco de inundações nos perfis e a dependência do fornecimento de água e energia, não existindo sistema de backups adequados, que pode causar perdas de colheitas.

2.2.6 Sistema de aeroponia (*Aeroponic system*)

Este sistema é similar ao sistema NFT, com seus perfis para disposição das plantas (dispostos de forma vertical ou horizontal) e sua solução nutritiva circulante fornecida por uma bomba e retornando por gravidade, Figura 1 (f). A diferença do sistema aeropônico é que a solução nutritiva é aplicada às raízes sobre pressão, formando uma nebulização, a partir da utilização de bicos de pulverizadores, fornecendo uma solução nutritiva altamente oxigenada para as plantas (ALBERONI, 1998).

O sistema apresenta um custo elevado de implantação e manutenção, pois necessita de limpeza frequente para evitar doenças e o entupimento dos bicos pulverizadores. O ciclo de pulverização deve ser ajustado, visto que as raízes estando expostas ao ar podem secar rapidamente e a pulverização é afetada pela temperatura, dificultando sua operação. O sistema exige um domínio técnico maior em relação aos sistemas convencionais, e é por este motivo que é pouco utilizado comercialmente. A falha parcial nesse sistema pode causar danos às plantas. A interrupção de energia, falhas nas bombas ou entupimento dos bicos pulverizadores resultam na morte das raízes pela desidratação (SEUNGJUN LEE; JIYOUNG LEE, 2015).

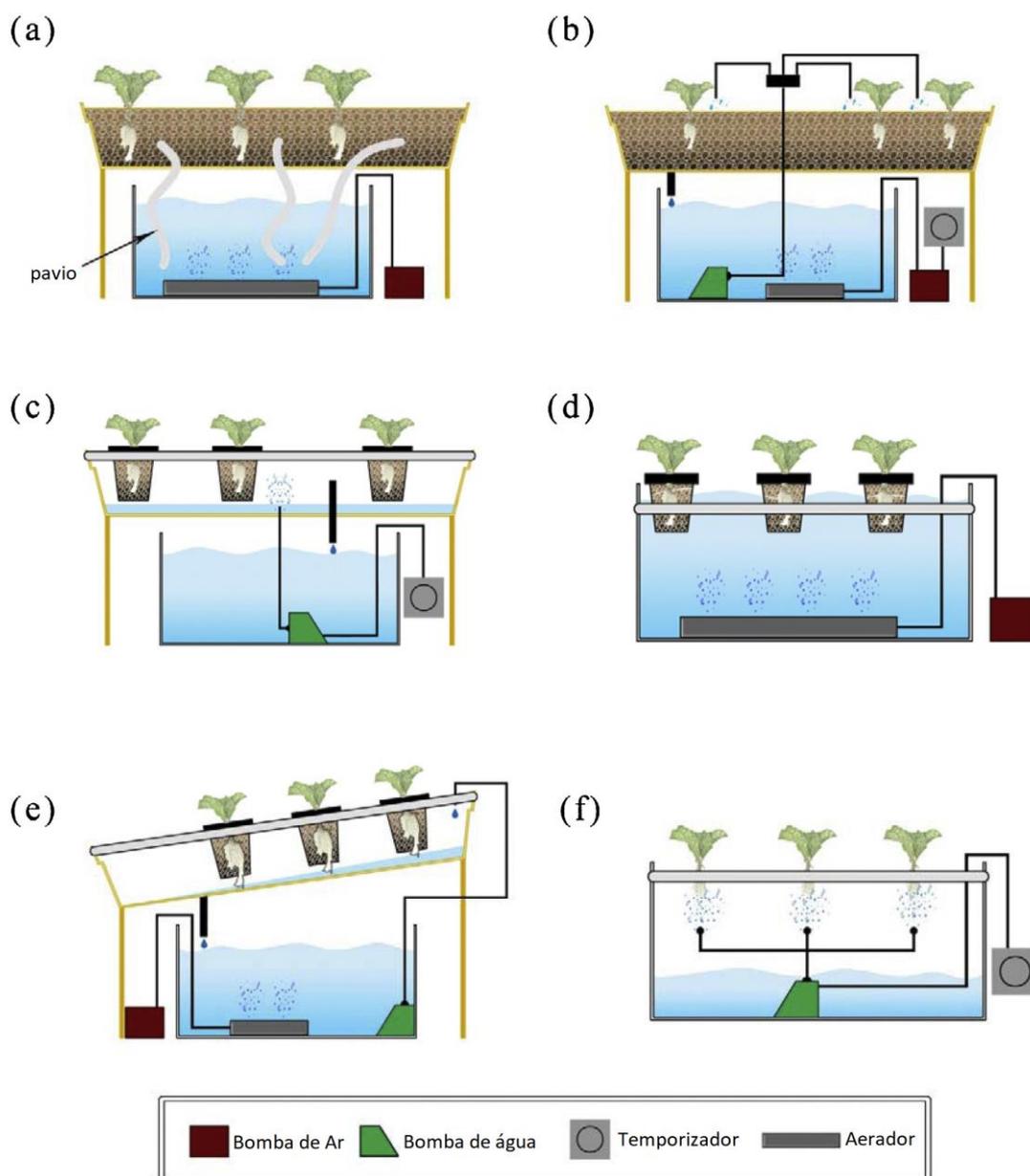


Figura 1 – Seis tipos diferentes de sistemas hidropônicos tradicionais. (a) sistema de pávio, (b) sistema de gotejamento, (c) sistema de subirrigação, (d) sistema de leito flutuante, (e) sistema NFT, (f) sistema aeropônico.

Fonte: Extraído e traduzido de Seungjun Lee e Jiyoung Lee (2015, p.209).

2.3 Sistemas Hidropônicos Automatizados Existentes

Sistemas automatizados aplicados à hidroponia já existem, principalmente quando aplicados em sistemas de grande produção. No entanto, para sistemas hidropônicos de pequeno porte (menor que 20 bancadas) os sistemas existentes são considerados caros, assim como não possuem verificações que alertem ao operador

sobre perfis com entupimento, e sistemas de alimentação de emergência, em caso de queda de energia.

Alguns sistemas sobre automação hidropônica de pequeno porte já realizadas são descritas na sequência.

2.3.1 Hidrobase: Internet das coisas aplicada à Jardinagem

Segundo o autor Goyal (2016), o projeto é destinado especificamente a clientes de pequena a média escala de Agricultura Urbana, aplicado ao sistema hidropônico em vasos com substrato, que estejam interessados em automatizar a experiência de jardinagem/agricultura. O projeto fornece informações importantes, como temperatura do ar, CE, pH, lux, utilizando um controlador Arduino Mega, bem como atuadores importantes, como bombas de água e bombas peristálticas, com o intuito de fazer um sistema de baixo custo. O sistema possui interface WEB que fornece as informações citadas, além da altura e a densidade da planta, por meio de câmeras e o processamento realizado por meio de raspberry pi. No entanto, o projeto apresenta um custo elevado, se tornando inviável segundo Goyal (2016).

2.3.2 Sistema de Comunicação e Controle para Hidroponia

Para Lima (2014), o projeto realiza o monitoramento da solução nutritiva, como: temperatura ambiente e da solução, CE, pH, umidade e luminosidade por meio de uma rede de sensores sem fios, ZigBee. O sistema é destinado ao interior de uma estufa e disponibiliza informação em tempo real, sobre as variáveis recolhidas dos sensores por microcontroladores, enviando via rede sem fios baseada no protocolo IEEE 802.15.4 e ZigBee, ao agricultor a partir de um computador.

O custo do sistema de monitoramento do reservatório é de R\$ 655,67 e cada módulo de monitoramento de bancada é de R\$ 338,75. O sistema cumpre o requisito inicial, conforme o autor de uma rede de sensores sem fio de baixo custo e com aquisição de dados sobre as variáveis físicas, pH, CE e temperatura. Entretanto, ele descreve que seria pertinente aplicar algoritmos de rotina e criar funções inteligentes tais como autoconfiguração, detecção e correção de falhas ou erros para os quais o sistema possa não ter sido projetado.

De acordo com Lima (2014), uma das dificuldades apresentadas no projeto está relacionada com a calibração dos sensores de forma a obter-se valores corretos para as medidas efetuadas, pois é necessário utilizar soluções padrão para calibrar os sensores e também disponibilizá-las ao longo do tempo, devido aos sensores de pH e de CE necessitarem de calibrações periódicas.

2.3.3 Sistema hidropônico totalmente automatizado para crescimento de plantas internas

Palande, Zaheer e George (2017) criaram um sistema hidropônico automático em uma rede de Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*), criada para melhorar a confiabilidade e permitir o monitoramento e controle remoto, se necessário. O usuário só precisa plantar uma muda e definir os parâmetros iniciais. Uma vez feito, o sistema é capaz de manter os parâmetros e promover a saúde para o crescimento das plantas.

O objetivo do projeto, chamado de Titan Smartponics, é criar um sistema ambientalmente independente para o crescimento de plantas de interior. Com isso, assim como na maioria dos sistemas hidropônicos convencionais, parâmetros como CE e pH da solução de água são ajustados para o valor desejado durante a configuração do sistema. Existem vários outros parâmetros, como temperatura e umidade do ar, luzes, temperatura da água, etc., que não são controlados ou mantidos, apenas é feita sua leitura.

O sistema utiliza duas placas Arduino para a análise dos dados recebidos e controle. Um Raspberry Pi é usado para executar um software de automação de código aberto chamado Domoticz. Uma vez que o Raspberry Pi recebe os dados de entrada, ele atualiza o servidor. O sistema também usa um aplicativo móvel para permitir o monitoramento e controle de dispositivos iOS ou Android, que possibilita ligar uma luz, verificar temperatura na solução e do ar, qualidade da água (pH) e umidade do ar.

2.4 Fatores de Desenvolvimento de Plantas

Dois dos fatores cruciais no desenvolvimento das plantas são as condições ambientais, que devem ser mantidas em níveis adequados para cada cultivo, e o

correto fornecimento de nutrientes. Para manter, monitorar e regular os níveis desejados, os equipamentos eletrônicos específicos para esta finalidade auxiliam nessa tarefa. Os seguintes fatores podem ser monitorados e controlados: temperatura, circulação de ar, umidade relativa do ar, dióxido de carbono (CO₂), luz do ambiente da instalação, qualidade, temperatura e circulação da água, pH, CE e oxigenação da solução nutritiva (RESH, 2015).

2.4.1 Nutrientes

Por meio do sistema radicular, as plantas e vegetais obtêm seus nutrientes essenciais como a água e os nutrientes minerais. Alguns são exigidos em maior quantidade, necessitando de quantidades na ordem de g/L, que são chamados de macronutrientes. Já os micronutrientes são necessários em menores quantidades, na ordem de mg/L. Os macronutrientes não são mais importantes que os micronutrientes, a divisão se refere ao fato de que os macronutrientes são exigidos em maiores quantidades pelas plantas para seu ciclo do que os micronutrientes, pois cada nutriente tem sua função (BELTRANO, 2015; MALAVOLTA, 2006).

Os nutrientes podem ser divididos em (ALBERONI, 1998):

- Orgânicos: C, H, O. Constituindo cerca de 90 a 95% do peso das plantas, porém esses elementos são abundantes na natureza, pois provêm do ar e da água;
- Minerais: são os elementos que compõem a solução nutritiva, que se subdividem em:
 - Macronutrientes: exigidos em maior quantidade na solução nutritiva, como: N, P, K, Ca, Mg, S;
 - Micronutrientes: exigidos em menor quantidade na solução nutritiva, como: Mn, Fe, B, Zn, Cu, Mo, Cl.

Um detalhe sobre os nutrientes é que, entre as hortaliças, a alface é usada como bioindicador de contaminação de plantas, pois é considerada a principal acumuladora de metais pesados, principalmente Zn, Cu e Pb (HUE et al., 1988).

Quanto à redistribuição dos nutrientes no interior das plantas, os nutrientes podem ser classificados em três grupos (FURLANI et al, 2009):

- Móveis (NO₃⁻, NH₄⁺, P, K e Mg);

- Intermediários (S, Mn, Fe, Zn, Cu e Mo);
- Imóveis (Ca e B).

É útil essa classificação na identificação de sintomas de deficiência de um determinado nutriente, de acordo com Furlani et al (2009), como os sintomas de falta de N e de B, que ocorrem em partes mais velhas (folhas velhas) e mais jovens da planta (pontos de crescimento), respectivamente.

2.4.2 Soluções nutritivas – Preparo e manejo

Existem várias formulações de soluções nutritivas, com concentrações de nutrientes diferentes, inclusive para uma mesma espécie e entre espécies diferentes. Para a alface, as faixas aceitáveis são mostradas na Tabela 3 (ALBERONI, 1998).

Tabela 3 – Concentrações de nutrientes em formulações de soluções nutritivas

| Nutriente | Forma química | Concentrações | |
|-----------|-------------------|---------------|--------------------|
| | | μM | mg.L^{-1} |
| N | N-NO ₃ | 6 – 15 | 100 – 300 |
| N | N-NH ₄ | 0,5 – 1 | 100 – 300 |
| P | P | 0,5 – 3 | 30 – 70 |
| K | K | 2,5 – 8,5 | 200 – 400 |
| Ca | Ca | 1 – 8 | 200 – 400 |
| Mg | Mg | 0,75 – 4 | 24 – 80 |
| S | S | 0,5 – 4 | 30 – 80 |
| B | B | 0,5 – 400 | 0,5 – 1,0 |
| Cu | Cu | 0,05 – 1 | 0,02 – 0,1 |
| Fe | Fe | 3 – 100 | 2,0 – 10 |
| Mn | Mn | 0,5 – 40 | 0,5 – 1,0 |
| Mo | Mo | 0,01 – 3 | 0,01 – 0,05 |
| Zn | Zn | 0,5 – 2,3 | 0,05 – 0,1 |

Fonte: (ALBERONI, 1998, p.55)

Para a escolha da concentração de nutrientes, devem ser analisados os seguintes itens: tipo de sistema hidropônico, época do ano, fatores ambientais, espécie

vegetal, variedade cultivada, idade das plantas. Uma composição adequada para ser utilizada no sistema NFT para a alface é dada pela Tabela 4 (ALBERONI, 1998).

Tabela 4 – Composição nutritiva adequada para alface em sistema NFT

| Macronutriente | mg L ⁻¹ | Micronutriente | mg L ⁻¹ |
|----------------|--------------------|----------------|--------------------|
| N | 200 | Fe | 12 |
| P | 60 | Mn | 2 |
| K | 300 | B | 0,3 |
| Ca | 170 | Cu | 0,1 |
| Mg | 50 | Mo | 0,2 |
| S | 60 | Zn | 0,1 |

Fonte: (ALBERONI, 1998, p.55)

Gondim et al. (2010) obteve, em análises com sistema hidropônico NFT com alface cultivar Brasil 303, obteve que a maior exigência nutricional das plantas para os macronutrientes foi K, N, Ca, P, Mg e S e dos micronutrientes foram Fe, Mn, Zn, B e Cu, respectivamente, em ordem decrescente. Adotando a solução proposta por Alberoni (1998).

Segundo Resh (2015), os fatores principais para manter a qualidade da solução nutritiva, são: Temperatura da solução, Nível de oxigênio, Condutividade elétrica e o PH.

2.4.3 Fluxo de água

O fluxo da solução nutritiva deve estar entre 1 e 2 L.min⁻¹ em cada perfil, pois essa taxa de fluxo proporcionará boa oxigenação (RESH, 2015).

Genuncio et al. (2012) obtiveram, analisando cultivares de alface Lucy Brown, Izabela e Veneza, que foram crescidas em vazões de 1,50; 1,00 e 0,75 L.min⁻¹, obtiveram ganhos de massa fresca para Lucy Brown quando cultivada a uma vazão de solução nutritiva acima de 1,0 L.min⁻¹. Já para Izabela e Veneza maiores massas frescas foram observadas em vazão de 1,5 L.min⁻¹.

Os turnos de rega podem ser contínuos ou intermitentes, geralmente realizados por um temporizador com tempo de 15/15, 15/30 ou 15/ 60 com bombeamento e intervalo de ausência de bombeamento, respectivamente. Dalastra (2017) ao realizar, em sua Tese, estudos com as variações de bombeamento apresentadas para a alface

americana, o resultado que teve maior produção e lucratividade foi com fluxo contínuo de solução nutritiva. No entanto, sistemas contínuos exigem aeradores e, portanto, são mais caros.

2.4.4 Substratos

O meio em que as raízes das plantas se desenvolvem pode ser sólido (com substrato) ou líquido (sem substrato). O cultivo com substratos utiliza a solução nutritiva e materiais inertes como meio de cultivo das plantas como, por exemplo: areia, cascalho, vermiculita, lã de rocha, fibra de coco, entre outros. O cultivo com substrato precisa de diferentes formas de aplicação da solução nutritiva devido a sua maior ou menor retenção de umidade (PEREZ E., 2008).

Os substratos possuem a função de sustentação para as raízes das plantas, retenção de umidade e prover uma oxigenação. Dificilmente apenas um substrato fornece todas as características necessárias, sendo recomendado misturar alguns diferentes substratos para melhor desempenho no cultivo (BELTRANO et al., 2015).

2.4.5 Espaçamento entre plantas

As plantas podem ser espaçadas, não limitadas pela disponibilidade de água ou nutrientes, apenas pela luz disponível. Isso resulta em maiores rendimentos por unidade de área que a planta ocupa (RESH, 2015).

Calori et al. (2014) estudaram o efeito do espaçamento entre plantas de alface (espaçamentos de 2,5; 5,0 e 10,0 cm) na modalidade *baby leaf*, em que as plantas são colhidas precocemente em relação ao tempo em que tradicionalmente são consumidas no sistema hidropônico NFT para avaliar o efeito sobre a produção, obtiveram que o espaçamento entre plantas de 2,5 cm favoreceu a maior produtividade em kg.m^{-2} , com médias de $4,9 \text{ kg.m}^{-2}$ para alface. Este estudo demonstrou que é possível atingir uma maior produção mudando o espaçamento para a cultura de alface.

2.4.6 Temperatura do ar e da solução nutritiva

A temperatura ideal para plantas em hidroponia está entre 15 e 35 °C. Variando para diferentes espécies de plantas conforme sua adaptação à mudança de temperaturas (PEREZ, 2008).

As variações de temperatura em uma solução hidropônica podem afetar o pH e a solubilidade dos nutrientes, que ocorre melhor a temperatura ideal da água entre 20°C e 22°C. Fora desta faixa de temperatura ideal, os elementos começam a ter dificuldade para se dissolver e o crescimento e a produtividade das plantas podem ser afetados. Temperaturas mais altas ou mais baixas que o ideal para determinada espécie, afetam as plantas da mesma maneira que os extremos de pH, mas geralmente, a maioria das plantas crescem razoavelmente bem entre 18 e 28°C (CARRUTHERS, 2015).

2.4.7 Oxigenação

No ambiente do sistema hidropônico é preciso que haja a renovação do ar para manter as taxas de CO₂ e de oxigênio em valores adequados para o sistema radicular das plantas (JESUS FILHO, 2009).

Para Alberoni (1998) a oxigenação promove a absorção dos nutrientes pelo sistema radicular das plantas, assim como pode ser feita durante a circulação da solução no retorno ao reservatório, ou aplicando ar comprimido ou oxigênio.

2.4.8 Radiação-Luz

A luz é um fator vital para o crescimento das plantas. Em geral, é aconselhável que a cultura receba tanta luz quanto possível, especialmente em climas mais frios. Recomenda-se também que as plantas recebam pelo menos seis horas de luz, embora não devam ser expostas para o sol o dia todo (PEREZ E, 2008).

2.4.9 pH

O pH (potencial de Hidrogênio) é o índice que mede a atividade dos íons positivo de hidrogênio (H^+), e pode ser medido pelo pHmetro (peagâmetro). O valor de pH mais adequado para o desenvolvimento das plantas está entre 5,5 e 6,5, que garante uma boa disponibilidade de macro e micronutrientes e o crescimento contínuo das plantas. No entanto, existem plantas mais ou menos tolerantes à acidez ($pH < 7$) ou à alcalinidade ($pH > 7$). O ajuste periódico do pH é indispensável, pois as plantas ao absorverem os nutrientes, alteram o pH da solução (JESUS FILHO, 2009; MARSCHNER, 1995).

O pH pode ser ajustado utilizando um ácido tal como ácido nítrico, ácido fosfórico ou ácido sulfúrico ou uma base tal como hidróxido de potássio, hidróxido de sódio ou bicarbonato de potássio (GILL, 2016). O ácido fosfórico 85% é o mais utilizado para a redução do pH e de bases como Hidróxido de potássio para o aumento do pH. Todavia, para Furlani et al. (2009), as variações de pH na solução nutritiva são reflexos da absorção diferenciada de cátions e ânions, recomendando-se manter a solução nutritiva equilibrada em cátions e ânions para atender a demanda da planta, em vez de manter o pH numa faixa estreita de valores a partir do uso de ácido (sulfúrico, fosfórico, nítrico ou clorídrico) ou de bases (hidróxido de sódio, de potássio ou de amônio) fortes para diminuir ou aumentar o pH do meio de crescimento, respectivamente.

2.4.10 Condutividade elétrica (CE)

A CE é medida por um condutivímetro. Jesus Filho (2009) afirma que a CE representa a característica que uma solução possui de conduzir a corrente elétrica em função dos íons dissolvidos. A CE será maior quanto maior a concentração de íons na solução.

A CE da solução nutritiva pode ser aumentada pela adição de um volume desejado de uma formulação padrão de nutrientes, ou diminuída pela adição de um volume de água (GILL, 2016). Fornecendo informações sobre a concentração de sais na solução, para tomada de decisão da necessidade de se adicionar fertilizantes ou água à solução nutritiva. Entretanto, a CE permite somente determinar a quantidade

total de sais na solução, não permitindo a identificação de quais nutrientes estão em falta ou excesso na solução nutritiva (JESUS FILHO, 2009).

O tipo de cultura e as condições climáticas definem em qual faixa a CE deve se situar, pois em temperaturas elevadas as plantas consomem mais água que nutrientes, recomendando-se trabalhar com CE entre 0,6 a 1miliSiemens por centímetro ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$) e, em baixas temperaturas, na faixa de 1,5 a 2,5 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ para alface conforme Jesus Filho (2009). Para as diferentes espécies, Furlani et al. (2009) recomendam usar as seguintes faixas de CE: alface (1,5 a 2,5), manjeriço (1,5 a 2,0), melão (3,0 a 3,5), pepino (3,0 a 3,5) e tomate (2,5 a 3,0 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Caruso et al. (2011) obtiveram em experimentos que uma solução nutritiva com CE de 1,3 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ deve ser preferida durante a primavera, enquanto uma CE de 2,2 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ provou ser a melhor no inverno em termos de qualidade dos frutos quando o morango alpino (*Fragaria vesca* L.) foi cultivada em hidroponia NFT.

Gondim et al. (2010) realizaram estudos sobre a influência de diferentes CE na produtividade da variedade BR 303 de alface, com 4 tratamentos em delineamento inteiramente casualizado com seis repetições. Nos tratamentos, foram alocados os tipos de soluções nutritivas, obtidos por diferentes concentrações (0,5; 1,0; 2,0 e 4,0 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$). Avaliando as características de crescimento, matéria seca e o teor de nutrientes. Os autores concluíram que a CE de 2,6 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ apresentou produção máxima de 1.277,35 g por planta, mesmo inibindo o crescimento radicular. A salinidade de 4 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ afetou a relação raiz parte aérea, reduzindo-a em 47%, além de apresentar redução significativa nos diferentes órgãos da planta de acúmulo de macronutrientes e de micronutrientes, com exceção do ferro.

Soares et al. (2007) em experimentos similares com diferentes níveis de salinidade da água (0,43; 1,40; 2,23; 3,08 e 3,93 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), constataram a diminuição de 4,08% na produção de matéria seca da parte aérea para cada acréscimo unitário na CE da água. Eles demonstraram também que o aumento da salinidade da água não interferiu significativamente na produção de massa seca das raízes e na relação raiz/parte aérea, mas reduziu a produção de matéria seca da parte aérea e o consumo de água pelas plantas.

Calori et al. (2014) obtiveram, realizando estudo também com sistema hidropônico NFT, obteve com tratamentos de diferentes CEs (0,4; 0,8; 1,2 e 1,6 ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$), que para a alface as maiores produtividades 3,1 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ foram obtidas com a CE de 1,4 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. Estes resultados são muito similares aos estudos de Rodrigues et al.

(2015), que testaram com três cultivares de alface, porém realizados em vasos com substrato. Os resultados revelaram que a salinidade da água de irrigação, acima de $1,5 \text{ mS.cm}^{-1}$, reduziu o crescimento e o consumo de água pelas plantas de forma linear decrescente.

2.5 Sistemas de Controle e Automação

Os sistemas de controle e automação são compostos basicamente por sensores (que fornecem informações do ambiente), controlador (que realiza as operações de leitura dos sensores, processamento, e envia sinal aos atuadores), e atuadores (recebem o comando do controlador e interferem no processo).

2.5.1 Controle e automação

Segundo Nise (2009), um sistema de controle consiste em subsistemas e processos com o objetivo de se obter uma saída desejada com desempenho desejado, para uma determinada entrada fornecida. A Figura 2 mostra um sistema de controle de forma simples, em que a entrada corresponde a uma saída desejada.

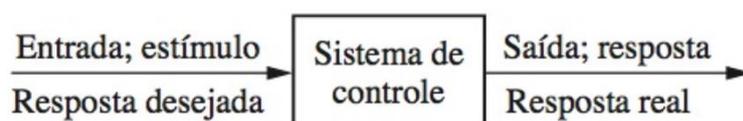


Figura 2 – Descrição simplificada de um sistema de controle.
Fonte: Extraído de (NISE, 2009).

Os sistemas de controle geralmente apresentam as seguintes etapas (FRANCHI, 2011):

1. Medição de um estado ou condição de ambiente de um processo;
2. Cálculo realizado por um controlador calcula uma ação com base em um valor medido, e sua referência (valor desejado);
3. Emissão de um sinal de saída do controlador (resultante dos cálculos) utilizado para manipular uma ação do processo na forma de um atuador;
4. O processo reage ao sinal aplicado, mudando o seu estado ou condição, realizando novamente as etapas.

Por intermédio dos sistemas de controle, pode-se movimentar grandes equipamentos com grande precisão, com a habilidade de compensar perturbações.

Normalmente se deseja controlar algumas variáveis, como a temperatura, posição, velocidade, nível de líquidos, as concentrações químicas em líquidos, e tensão, corrente ou frequência em sistemas elétricos. O sistema deve ser capaz de fornecer a saída correta, mesmo na presença de perturbações. Existem inúmeros sistemas de controle, desde os mais comuns, até os mais complexos (NISE, 2009).

As principais medidas de desempenho de um sistema de controle são: a resposta transiente e o erro no estado estacionário. Caso a resposta seja muito rápida, terá uma oscilação maior, e se for muito lenta, será mais estável, porém exige um tempo maior, para se chegar ao valor desejado, com o erro no estado estacionário nulo (Figura 3) (NISE, 2009).

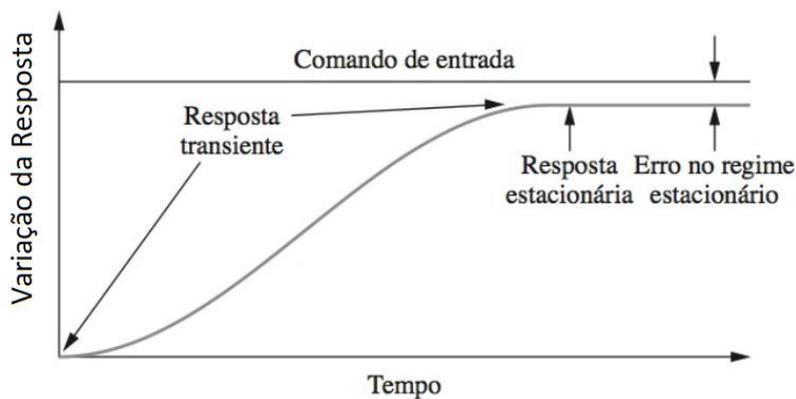


Figura 3 – Variação da resposta a um comando de entrada.
Fonte: Extraído de (NISE, 2009, p.2).

O sistema de controle pode ser de malha aberta ou fechada. O sistema de malha aberta é menos sofisticado, em geral, são divididos em duas partes: o controlador e o processo a ser controlado, conforme mostrado pelo diagrama da Figura 4. Um sinal de entrada, ou comando de referência, é aplicado ao controlador, cuja saída opera como sinal de atuação, controlando o processo a ser controlado, de modo que a variável a ser controlada, se comporte de acordo com algum padrão prescrito. A ação de controle é independente da saída, não existindo nenhum elemento de realimentação (GOLNARAGHI e KUO, 2012).

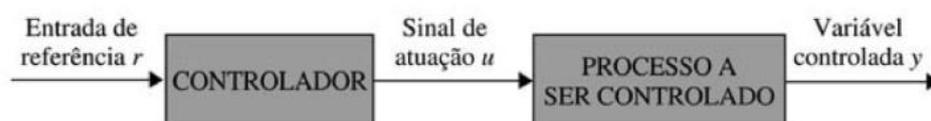


Figura 4 – Elementos de um sistema de controle em malha aberta.
Fonte: Extraído de (GOLNARAGHI e KUO, 2012, p.6).

Já o sistema em malha fechada ou com realimentação (Figura 5), em que o sinal de saída retorna para ser comparado à entrada de referência, gerando um sinal de atuação proporcional à diferença para corrigir o erro (GOLNARAGHI e KUO, 2012). Segundo Franchi (2011), esse sistema é o mais empregado, também chamado de controle com realimentação. Para Castrucci, Bittar e Sales (2011), um bom sistema de controle deve absorver o conhecimento não apenas do objetivo de reduzir o erro, mas também das características dinâmicas do processo controlado e das amplitudes e frequências das perturbações atuantes no processo, que são partes importantes da especificação do sistema de controle.

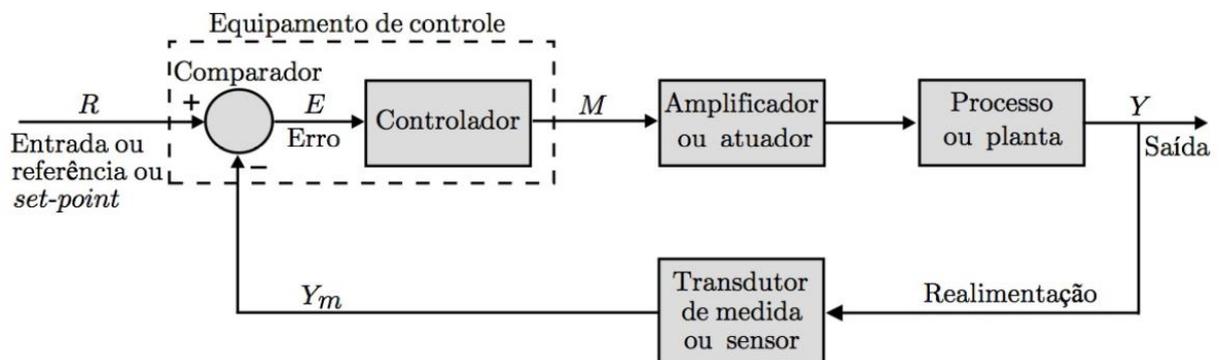


Figura 5 – Elementos de um sistema de controle em malha fechada (com realimentação).
Fonte: Extraído de (CASTRUCCI, BITTAR e SALES, 2011, p.4).

Em malha fechada, há duas grandes classes de controle automático, em função da natureza da dinâmica do processo a controlar (GOLNARAGHI e KUO, 2012, p.6):

- Sistemas de Controle de Dados Contínuos: é aquele no qual os sinais que passam pelas várias partes do sistema são todos funções da variável contínua tempo, t . Os sinais nos sistemas de dados contínuos podem ainda ser classificados como modulado e não modulados;
- Sistema de Controle de Dados Discretos: os sinais em um ou mais pontos do sistema estão na forma de trens de pulso ou de código digital. Usualmente, os sistemas de controle de dados discretos são subdivididos em sistemas de dados amostrais e sistemas de controle digital. Amostrais referem-se a uma classe mais geral de sistemas de dados discretos, nos quais os sinais estão na forma de pulsos de dados. Digital refere-se ao uso de um computador digital ou controlador no sistema, de modo que os sinais sejam digitalmente codificados, como em um código binário.

2.5.2 Controladores

O controlador é o dispositivo que recebe dados de um instrumento de medida, compara-os com um determinado *setpoint* e, se necessário, envia sinais a um elemento de controle para tomar ações corretivas. Pode executar funções matemáticas complexas ou realizar simples funções de soma ou subtração, além de receber sinais de entrada e realizar funções matemáticas para produzir um sinal de saída. Como exemplo de controladores pode-se citar (FRANCHI, 2011):

- Controladores Lógicos Programáveis (CLPs): é um dispositivo microprocessador concebido para uso em um ambiente industrial, altamente versátil no modo de programação. Tem como finalidade desempenhar funções lógicas, sequenciais, temporização, contagem e aritmética, para controlar, por meio de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O CLP e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle. A programação do CLP elementar é a baseada na analogia com contatos elétricos, denominada linguagem Ladder de programação (FRANCHI, 2011; e CAPELLI, 2013).
- Microcontroladores: são uma alternativa para o desenvolvimento de controladores mais simples, de baixo custo como, por exemplo, controles de acesso, controles de senhas e atendimento ao público, sistemas de alarmes, controles de processos simples em pequenas indústrias, entre outros. Arduino, por exemplo, é uma plataforma de hardware código aberto (*open source*), projetada sobre o microcontrolador Atmel AVR, que pode ser programado por meio de uma linguagem de programação similar a C/C++. Foi criado com o objetivo de fornecer uma plataforma de fácil prototipação de projetos interativos, baseada em flexibilidade, na qual o hardware e software são fáceis de serem usados e adaptados aos mais diferentes cenários e aplicações (STEVAN JUNIOR e ADAMSHUK SILVA, 2015; OLIVEIRA e ZANETTI, 2015).

Stevan Junior e Adamshuk Silva (2015) destacam que a principal diferença entre os dois controladores é que o CLP é um dispositivo fechado, com as interfaces de entrada (sensores) e saída (atuadores) oferecidas por conexões simples (bornes com parafusos para fixação). Independentemente da aplicação, basta que sejam identificadas as entradas e saídas, conectadas e programadas para que o CLP esteja

pronto para operar. Já um sistema microcontrolado baseia-se em um sistema eletrônico que precisa de eletrônica a sua volta, para condicionamento de sinais e adaptações específicas do projeto para cada aplicação, a qual depende também de um projeto eletrônico específico para que as entradas e saídas sejam conectadas e o microcontrolador, programado, possa operar.

2.6 Sistemas Fotovoltaicos

A energia solar é considerada, no entanto, uma das alternativas energéticas mais promissoras, com a energia emitida pelo Sol que se mantém praticamente constante há bilhões de anos. E com o desenvolvimento significativo da geração fotovoltaica de eletricidade, faz com que a energia solar tenha um crescimento significativo na matriz energética mundial (PEREIRA, 2017).

2.6.1 Radiação Solar e Orientação dos Módulos Fotovoltaicos

O conjunto de todas as frequências de ondas eletromagnéticas emitidas pelo sol chama-se de espectro da radiação solar, que transporta energia que pode ser captada na forma de calor ou luz (VILLALVA, 2015).

A grandeza utilizada para quantificar a radiação solar é a irradiância, que é a medida de potência por metro quadrado ($W.m^{-2}$), e a irradiação que é a medida de energia por metro quadrado ($Wh.m^{-2}$). A irradiância solar que atinge uma superfície horizontal é chamada de radiação global, que é composta por suas componentes direta e difusa. A irradiância solar direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital do Sol (ângulo entre a incidência da luz solar no solo e a uma linha imaginária perpendicular ao solo). Existe também a componente difusa que engloba a radiação proveniente indiretamente ao plano, que chegam de todas as direções, devido ao espalhamento da radiação solar pelos gases e partículas presentes na atmosfera (PEREIRA, 2017).

O aproveitamento da radiação solar pode ser otimizado a partir da orientação dos módulos fotovoltaicos, sendo que a inclinação dos coletores é mais relevante quanto maior a latitude do local de instalação. O ângulo igual à latitude é considerado

como ótimo, voltado ao norte, no hemisfério sul, de forma que a superfície receptora esteja perpendicular aos raios solares na média anual. Assim, a variação da irradiação ao longo do ano é atenuada, maximizando a quantidade de energia incidente sobre a superfície nesse período (EPE, 2012; TOLMASQUIM, 2016).

2.6.2 Efeito Fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é a base da geração de energia solar fotovoltaica para a produção de eletricidade, bem como consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica com a criação de uma diferença de potencial, sobre uma célula formada por materiais semicondutores. Conectando eletrodos às extremidades da célula, haverá tensão elétrica sobre eles e, ao ligar em um circuito fechado, surgirá uma corrente elétrica (VILLALVA, 2015).

2.6.3 Funcionamento e características dos módulos fotovoltaicos

Para Villalva (2015), diferente de uma bateria, o módulo fotovoltaico não apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais, pois sua tensão elétrica depende de sua corrente e vice-versa. Se conectar um aparelho que solicita muita corrente, tendendo à corrente de curto-circuito (I_{sc}), a tensão de saída do módulo tenderá a cair. No entanto, se conectar uma carga que demanda pouca corrente, a tensão do módulo aumentará, tendendo à tensão de circuito aberto (a tensão máxima do módulo). Assim, o módulo possui um ponto de operação que fornece sua máxima potência (P_{MP}), conforme pode ser observado na Figura 6.

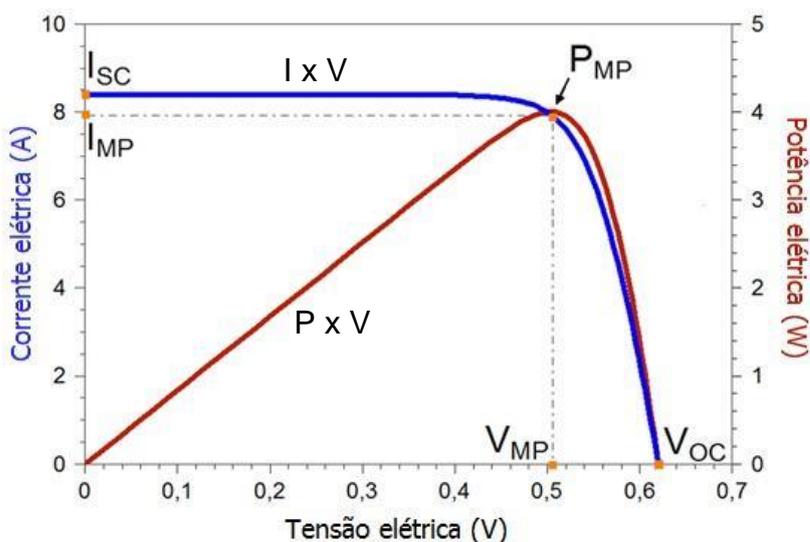


Figura 6 – Curva típica de um módulo fotovoltaico de potência elétrica em função da tensão e corrente elétrica em função da tensão.

Fonte: Extraído de (CRESESB, 2014, p.120).

Os pontos de operação do módulo fotovoltaico podem ser:

I_{SC} : corrente elétrica de curto-circuito;

V_{OC} : tensão de circuito aberto;

P_{MP} : potência máxima ou de pico, medidas sob ensaio NOCT;

I_{MP} : corrente no ponto de potência máxima, medidas sob ensaio NOCT;

V_{MP} : tensão no ponto de potência máxima, medidas sob ensaio NOCT.

Para levantamento de dados dos módulos são realizados os seguintes ensaios (CRESESB, 2014):

- *Standart Test Conditions* (STC) ou Potência nas condições padrão de ensaio: Potência máxima nominal do módulo nas condições de irradiância de 1.000 W.m^{-2} , espectro AM 1,5 e temperatura de célula de 25°C ;
- *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT) ou Temperatura nominal da célula nas condições de operação: Temperatura das células do módulo nas condições de irradiância de 800 W.m^{-2} , temperatura ambiente de 20°C e velocidade de vento de 1 m.s^{-1} .

Um detalhe importante é que a curva característica de corrente em função da tensão ($I \times V$) sofre influências da variação da temperatura da célula fotovoltaica e da irradiação solar, conforme pode ser visto Figura 7. Pode-se notar que com a redução da irradiância e com o aumento da temperatura na célula fotovoltaica ocasiona em uma menor potência a ser fornecida pelo módulo fotovoltaico e com uma maior

irradiância e uma menor temperatura na célula fotovoltaica ocasiona em uma maior potência a ser fornecida pelo módulo fotovoltaico.

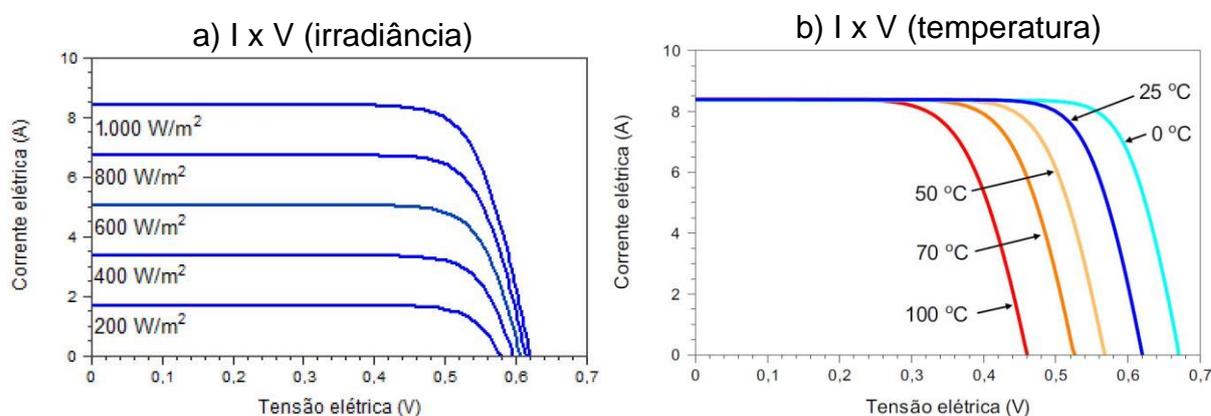


Figura 7 – Influência na curva característica de IxV em função: a) da variação da irradiância, b) da variação da temperatura da célula fotovoltaica.

Fonte: Adaptado de CRESESB (2014, p.126-127).

2.6.4 Controlador de Carga

O Controlador de carga tem o objetivo de proteger a bateria (ou banco de baterias) contra cargas e descargas excessivas, aumentando a sua vida útil. Existem controladores de carga com diferentes níveis de sofisticação, e são componentes críticos em sistemas fotovoltaicos isolados, pois, em caso de falha, a bateria poderá sofrer danos irreversíveis. O controlador de carga deve ser projetado considerando-se as especificidades dos diversos tipos de bateria (CRESESB, 2014).

2.6.5 Tecnologias e tipos de sistemas fotovoltaicos

Atualmente, as tecnologias de células fotovoltaicas mais comuns encontradas no mercado são de silício monocristalino, silício policristalino e filme fino de silício. A célula fotovoltaica de Si-monocristalino possui maior eficiência, porém são mais caras, em relação às policristalino e ao de filme fino (VILLALVA, 2015).

De acordo com Villalva (2015), os sistemas fotovoltaicos podem ser:

- Isolados (off-grid): desconectados da rede elétrica, geralmente ligados à bateria através de um controlador de carga, e fornece energia aos equipamentos em corrente contínua (CC). Para fornecer energia em corrente alternada (CA) necessita de um conversor para transformar CC em CA.

- Interligados à rede (on-grid): pode fornecer energia aos equipamentos locais e o excedente à rede elétrica da concessionária, através de inversores eletrônicos CC/CA habilitados para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, que possuem recursos que não existem nos conversores/inversores para sistemas autônomos ou isolados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do experimento

O experimento foi realizado no Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus São Miguel do Oeste (Figura 8), o qual possui a localização geográfica definida pelas coordenadas 26°44'35" de Latitude Sul (S) e 53°31'35" de Longitude Oeste (O) e de 655 metros acima do nível do mar, com temperatura média anual em 2017 entre 20 e 22 °C (INMET, 2018). De acordo com Climate-Data (2018), a temperatura média mais alta é para o mês de janeiro com 22,6 °C, e a mais baixa é para o mês de junho com 13,4 °C, com temperatura mínima de 7,2 °C em julho e máxima de 29 °C em janeiro. A região possui uma irradiação global horizontal com média anual entre 4,5 e 4,75 kWh m⁻² dia⁻¹ (PEREIRA, 2017).

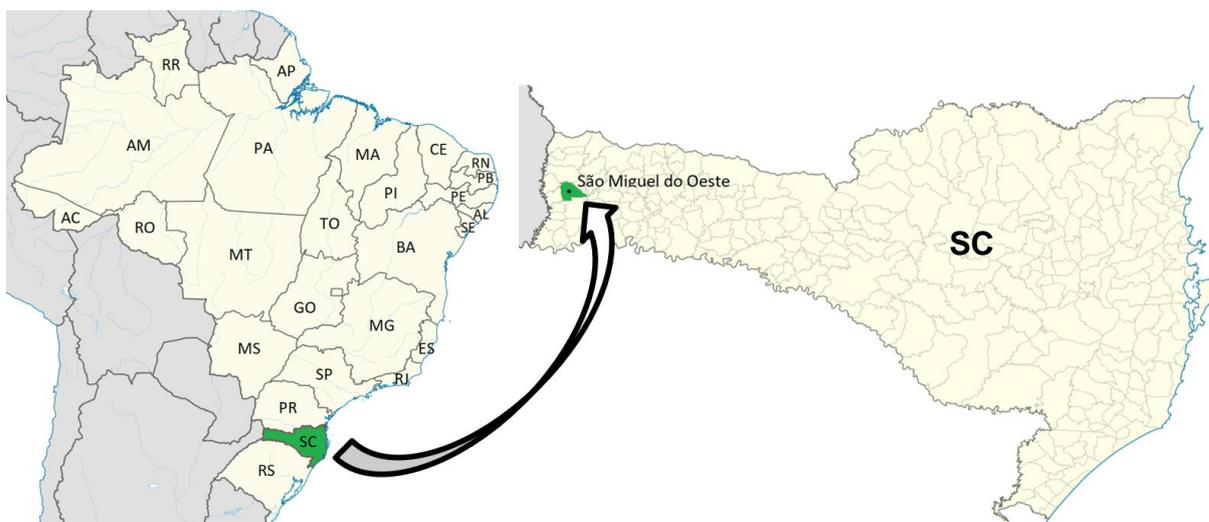


Figura 8 – Localização do experimento.
Fonte: Adaptado de ANEEL, 2018.

3.2 Material

A solução nutritiva para fornecimento de nutrientes para as plantas e para o controle da condutividade é formada por três componentes:

- Hidrogood Fert Composto, com todos os macronutrientes (Figura 9 a): Nitrogênio (N-10%), Fósforo (P-9%), Potássio(K-28%), Magnésio (Mg-3,3%), Enxofre (S-4,3%) e micronutrientes: Boro (B-0,06%), Cobre (Cu-

0,01%), Molibdênio (Mo-0,07%), Manganês (Mn-0,05%) e Zinco (Zn-0,02%) (HIDROGOOD, 2018);

- Nitrato de Cálcio (Figura 9 b);
- Ferro (Figura 9 c).

Segundo Hidrogood (2018), a recomendação de proporção é: Para 1.000 litros, 660g Composto Hidrogood Fert + 495g Nitrato de Cálcio + 20/30g Fe. Para todos os sistemas foi adotada a composição acima, com 20g de Fe-EDDHA.



Figura 9 – Compostos de nutrientes para confecção de solução nutritiva balanceada.

Os equipamentos componentes do projeto e estudo podem ser separados em: bancada para cultivo hidropônico NFT, protótipo de sistema hidropônico NFT automatizado, medidores de referência utilizados como padrões comparativos.

3.2.1 Bancada hidropônica NFT

Para o ensaio, foi utilizado uma bancada hidropônica, com um reservatório de solução nutritiva, conforme Figura 10.



Figura 10 – Formato de bancada hidropônica para ensaios.

A bancada é composta por:

- 3 perfis com 4.4 m de comprimento, de material polipropileno, distanciados de 23 cm (centro a centro). Cada perfil foi composto de 17 a 18 furos de 5,5 cm de diâmetro, espaçados por 25 cm de centro a centro. A bancada possui 6 perfis, dos quais foram separados 3 perfis para o sistema automatizado (Figura 11);



Figura 11 – Desenho esquemático da vista superior da bancada de teste.

- Um reservatório para a solução nutritiva com capacidade de 250 L;
- Desnível de recalque da bomba de 106 cm, considerando o fundo do tanque onde a bomba realiza a sucção da solução nutritiva e o início dos perfis na parte superior da entrada da solução nutritiva (Figura 12);
- Inclinação dos perfis de 3,39 graus para os dois sistemas (Figura 12).

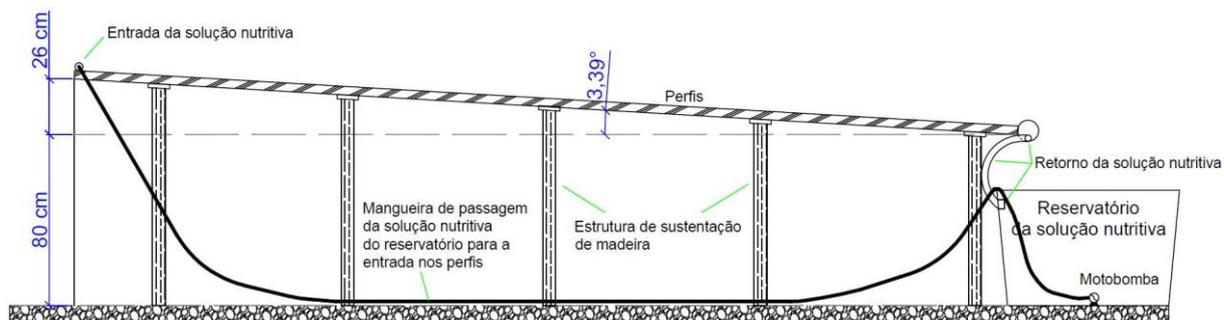


Figura 12 - Desenho esquemático da vista lateral da bancada de teste.

- Mangueira para conexão/circulação da solução nutritiva desde a bomba até a sua entrada nos perfis (Figura 13).



Figura 13 – Detalhe da entrada da solução nutritiva nos perfis do sistema automatizado.

Para a entrada de água na motobomba foi montado um pré-filtro com garrafa pet e tela de sombrite 70%, além de um filtro com um bico de pulverizador, conforme Figura 14. Com isso, evitando a circulação de detritos, fragmentos ou impurezas nos perfis. A motobomba utilizada possui tensão nominal de 12 V, 4,2 W e capacidade de fluxo de 240 L.h⁻¹.



Figura 14 – Montagem de filtro para bomba 12V CC.

3.2.2 Protótipo de sistema hidropônico NFT automatizado

O protótipo do sistema hidropônico NFT automatizado é representado por sensores e atuadores, controlador, registrador de dados, interface com o usuário/operador e a montagem geral do protótipo.

3.2.2.1 Sensores

Os sensores utilizados para o sistema hidropônico de automação são (Figura 15):

- Peagâmetro (Figura 15 a): para medição do pH da solução nutritiva;
- Módulo CE + Temperatura (Figura 15 b): para medição da CE da solução nutritiva, e de temperatura do líquido, com a finalidade de determinar de forma indireta a quantidade total de sais na solução. Para este medidor foi montado seu circuito elétrico, a programação de medição e levantamento de sua curva de resposta para a CE e para a temperatura;
- Medidor de Energia INA219 (Figura 15 c): foram utilizados 3 sensores INA219 para medição de tensão, corrente, potência e energia da rede, da bateria e do carregador da bateria;
- Sensor de Iluminância GY-302 CI BH1750VFI (Figura 15 d): para medir a iluminância em lux, com a finalidade de variar o tempo de fluxo da solução nutritiva.
- Sensor ultrassônico (Figura 15 e): para determinar o nível da solução nutritiva no reservatório, determinando a necessidade de inserção de água ao sistema;
- Sensor de temperatura e umidade do ar DHT22 (Figura 15 f): para realizar o controle do tempo de fluxo da solução nutritiva.

As características técnicas dos sensores são apresentadas na Tabela 5. Os dados na Tabela 5 referentes ao condutivímetro são as características apenas de sua célula, sem considerar o aparelho medidor, pois foi montado seu circuito de medição.

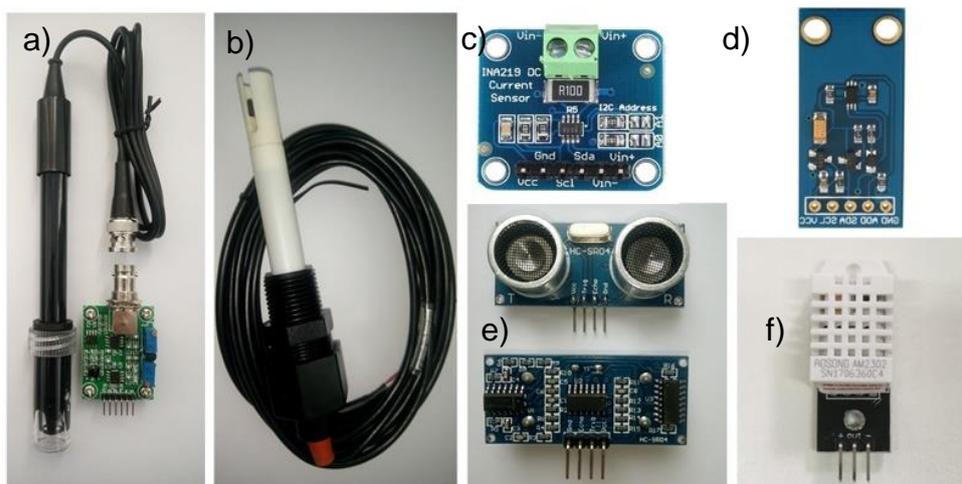


Figura 15 – Sensores utilizados para a automação hidropônica: a) Peagâmetro, b) Conduvímeter, c) Medidor de energia, d) Sensor de iluminância, e) Sensor Ultrassônico, f) Sensor de temperatura e umidade do ar.

Tabela 5 – Características de sensores utilizados para automação do sistema hidropônico

| Características | Peagâmetro (Figura 15 a) | Conduvímeter (Figura 15 b) | Medidor de Energia INA219 (Figura 15 c) | Iluminância GY-302 (Figura 15 d) | Ultrassônico (Figura 15 e) | Temperatura e Umidade do ar (Figura 15 f) |
|-------------------|-----------------------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------|--|
| Marca: | Diymore | Zhipu | - | - | Elec Freaks | Aosong |
| Modelo: | PH-4502C | K=1 | INA219 | GY-302 CI-BH1750V FI | HC-SR04 | DHT22 |
| Faixa de medição: | 0-14 pH | 0-20, 0-200, 0-2000 $\mu\text{S/cm}$ | 0 – 26 V 0 – 3,2 A | 1 - 65.535 Lux | 2 – 400 cm | 0 a 100% UR -40° a +80°C |
| Precisão: | $\pm 0,5$ pH | 1,5 % | 1 % | - | ± 3 mm | $\pm 2,0\%$ UR $\pm 0,5$ °C |
| Resolução: | $\pm 0,2$ PH | - | $\pm 0,78$ mA $\pm 6,35$ mV | 1 Lux | - | 0,1 |
| Tempo de resposta | ≤ 5 S | - | - | 120 ms | - | 2s |

Os seguintes medidores foram montados para a aplicação:

- Sensor de Verificação de perfis entupidos ou bomba danificada:

Para a verificação da passagem da solução nutritiva e entupimento dos perfis, foi realizado por condutividade elétrica por meio de terminais condutores instalados na parte final de cada perfil, que conduzem corrente elétrica do terminal positivo para o terminal de detecção, quando existe a passagem da solução nutritiva no final do perfil, conforme Figura 16. Assim, foi possível verificar se a solução nutritiva estava fluindo a partir dos perfis e se os perfis não estão com entupimento devido ao crescimento excessivo das raízes.

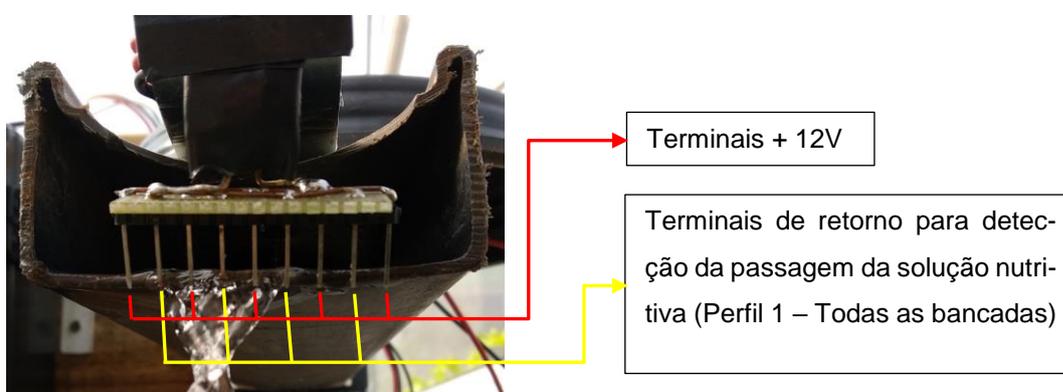


Figura 16 – Montagem de terminais para detecção da passagem da solução nutritiva.

Como o sistema foi criado de forma modular, o qual permite a instalação de até dez bancadas hidropônicas, seriam necessários muitos condutores elétricos para a leitura de todos os perfis além de muitas portas para detecção. Assim, para simplificar e reduzir custos foi montado o circuito da Figura 17 para que seja realizado, através da utilização de optoacopladores 4n25 (um para cada bancada), o qual ao ser acionado alimenta os terminais com + 12V todos os perfis de sua bancada.

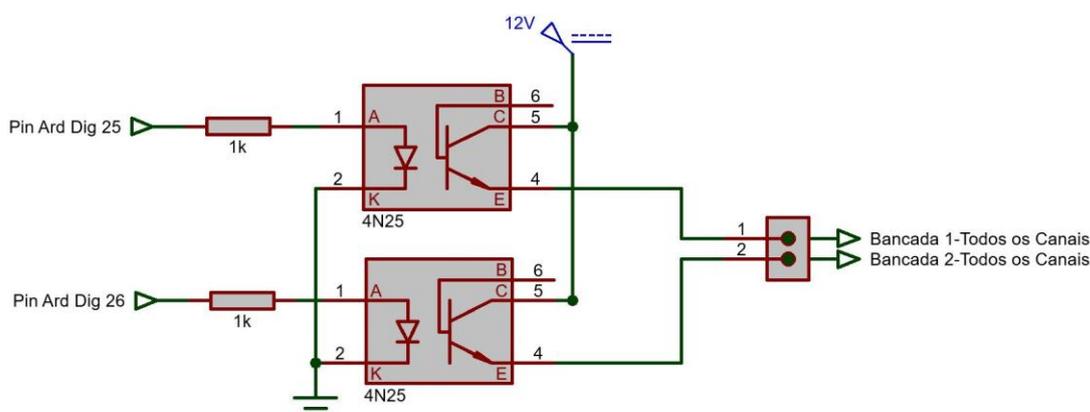


Figura 17 – Circuito para acionamento do polo positivo para cada bancada (1 até 10).

Já para a detecção da solução nutritiva, foi montado o circuito também com optoacopladores, conforme Figura 18, um para cada perfil. Assim, o perfil 1 das 10 bancadas compartilham o mesmo circuito. Por exemplo, ao ser acionado o optoacoplador 1 da Figura 17, todos os perfis da bancada 1 estarão com o terminal positivo energizado, pois todos os perfis da bancada terão terminais que foram interligados, e quando houver a passagem da solução nutritiva no final dos perfis, passando pelos terminais, de acordo com a Figura 16, é detectado pelo Arduino a mudança de estado de 0 V para 5V.

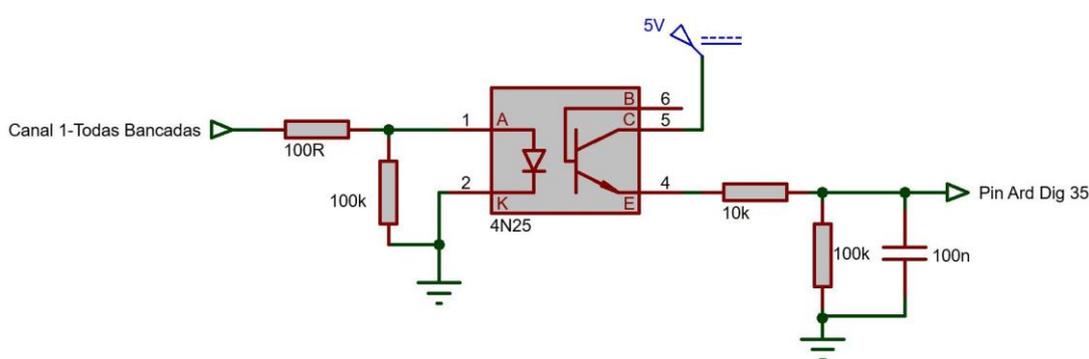


Figura 18 – Circuito para detecção da passagem da solução nutritiva nos perfis (1 ao 6).

A montagem do circuito de acionamento das bancadas (1 à 10) e do circuito de leitura dos perfis (1 ao 6) foi realizada em uma placa de fenolite perfurada, conforme Figura 19.

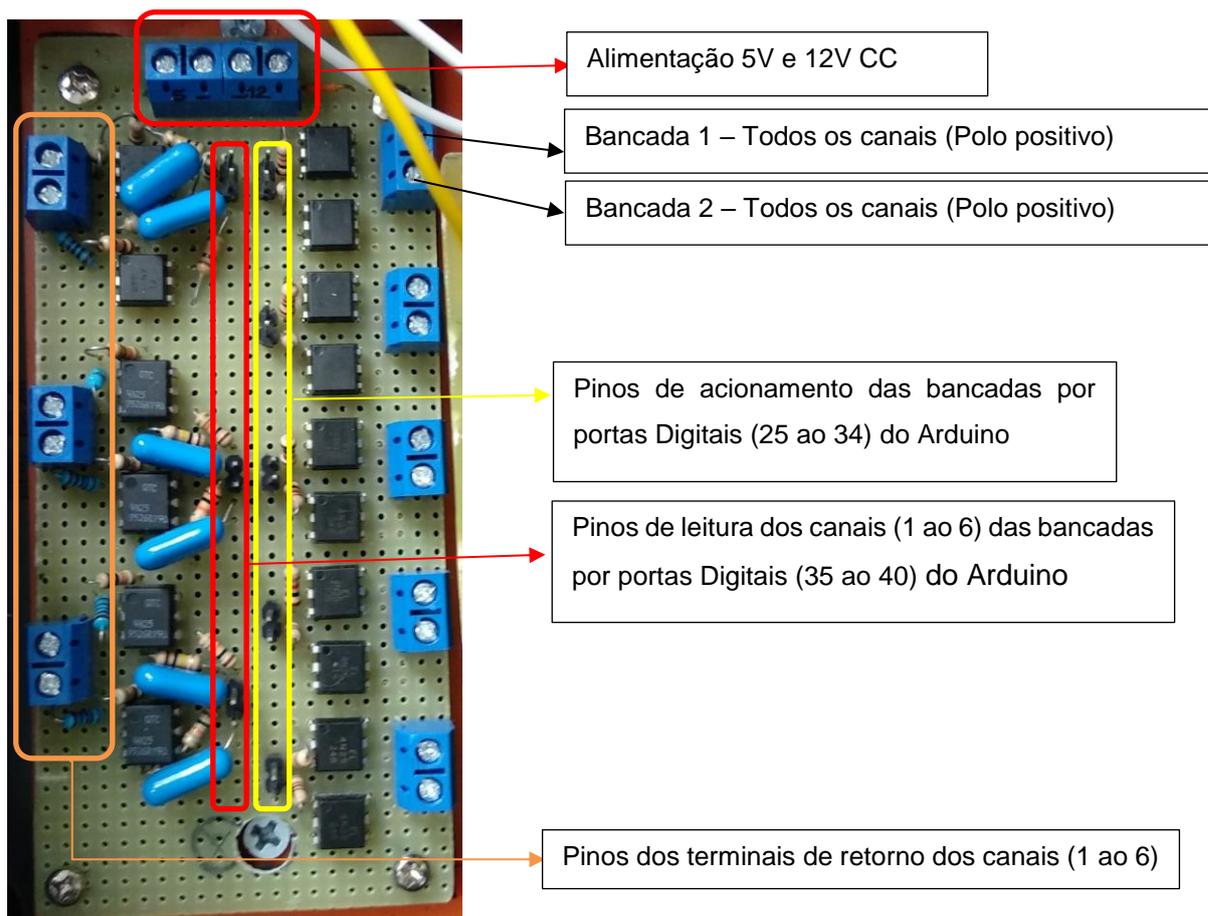


Figura 19 – Montagem do circuito de acionamento das bancadas e de leitura dos perfis.

As bancadas não são energizadas ao mesmo tempo, pois são acionadas uma por vez. Com isso, pode-se interconectar o retorno dos perfis 1 das 10 bancadas, e para os outros perfis da mesma forma, intercalando, assim, as leituras dos perfis de uma bancada por vez. Dessa forma, no Arduino terá como entradas de leitura, apenas a quantidade de perfis que uma bancada tiver (considerando que todas as bancadas tenham a mesma quantidade de perfis). Por exemplo, os condutores de leitura dos perfis 1 das 10 bancadas são interligados, sendo ligado apenas a uma porta de entrada do Arduino. Com isso, para um sistema de 10 bancadas com 6 perfis cada, é necessário apenas uma quantidade de 6 portas de leitura, considerando que todas tenham o mesmo número de perfis, e mais 10 portas de saídas para acionarem os optoacopladores das 10 bancadas. Com a instalação e com a intercalação das leituras das bancadas consegue-se economizar energia, condutores e portas necessárias no Arduino.

Foram instalados pontos de conexão no final de cada perfil, pois ao ser acionado a bomba, com o sistema operando normalmente após um certo período deverá existir a condução de eletricidade do terminal positivo para o retorno em cada perfil.

Caso exista um entupimento em algum perfil, o tempo é maior para que a solução nutritiva chegue no final do canal nos terminais, podendo ser gerado um alerta de entupimento de perfil. Entretanto, caso a bomba venha a não funcionar, os terminais de retorno nunca apresentarão condução podendo ser gerado um alerta de que a bomba de fluxo está danificada.

- Medição de CE e temperatura de líquido:

A célula de medição de CE e de temperatura (Figura 15 b) foi adquirida pronta, o qual possui juntamente com a célula de condutividade um sensor NTC (10k). Seus circuitos de acionamento e leitura foram criados, realizando uma programação específica para este medidor. Para verificação de sua resposta foi realizado sua comparação aos medidores de referência utilizados em laboratórios.

Para realizar o circuito, deve-se alternar a polaridade dos eletrodos do condutivímetro, para evitar o efeito de polarização que causa o acúmulo de íons na superfície dos eletrodos, criando uma resistência de polarização em sua superfície, levando a medições erradas.

Para realizar a inversão da polarização foi montado o circuito da Figura 20, com uma ponte de transistores BC517, e um resistor de 330Ω em série com os eletrodos do condutivímetro, criando um circuito divisor de tensão. A leitura da condutividade é realizada somente quando a corrente é acionada no sentido do resistor de 330Ω para os terminais do condutivímetro, conforme indicado na Figura 20.

Para a medição da temperatura, foi montado o circuito divisor de tensão, com o sensor NTC em série com um resistor de $10\text{ k}\Omega \pm 1\%$ (Figura 20).

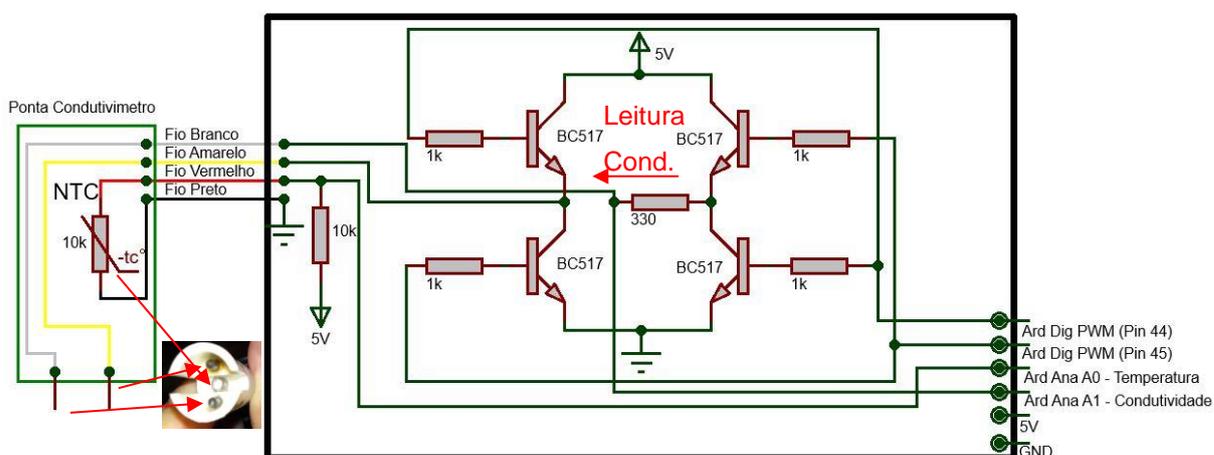


Figura 20 – Circuito montado para medição de condutividade e de temperatura do líquido, com detalhe dos eletrodos e do sensor NTC.

A construção do circuito da Figura 20 pode ser visualizada no Anexo A. Sua programação é detalhada na metodologia.

3.2.2.2 Atuadores

Os atuadores utilizados para o sistema de automação hidropônico são:

- Bomba 12V CC (Figura 21 a): para o controle da circulação da solução nutritiva;
- Bomba peristáltica 1 – 12V CC (Figura 21 b): para elevação da CE, através da inserção de um volume de solução concentrada de Hidrogood Fert Composto, proveniente de um reservatório de 5L;
- Bomba peristáltica 2 – 12V CC (Figura 21 b): para elevação da CE, através da inserção de adição de uma solução concentrada de Nitrato de Cálcio, proveniente de um reservatório de 5L;
- Bomba peristáltica 3 – 12V CC (Figura 21 b): para elevação da CE, por meio da inserção de adição de uma solução concentrada de Ferro, proveniente de um reservatório de 5L;
- Bomba peristáltica 4 – 12V CC (Figura 21 b): para elevação do pH, a partir da inserção de adição de uma solução concentrada de Hidróxido de potássio (KHO), proveniente de um reservatório de 2L;
- Bomba peristáltica 5 – 12V CC (Figura 21 b): para redução do pH, através da adição de uma solução concentrada de ácido fosfórico (H_3PO_4), proveniente de um reservatório de 2L;
- Válvula Solenóide 180° Rosca 3/4" x 1/2" – 12V CC (Figura 21 c): para a adição de água ao reservatório, com reposição devido a evapotranspiração e para diminuição da CE;
- Buzzer: para emitir alertas sonoros (Figura 21 d).

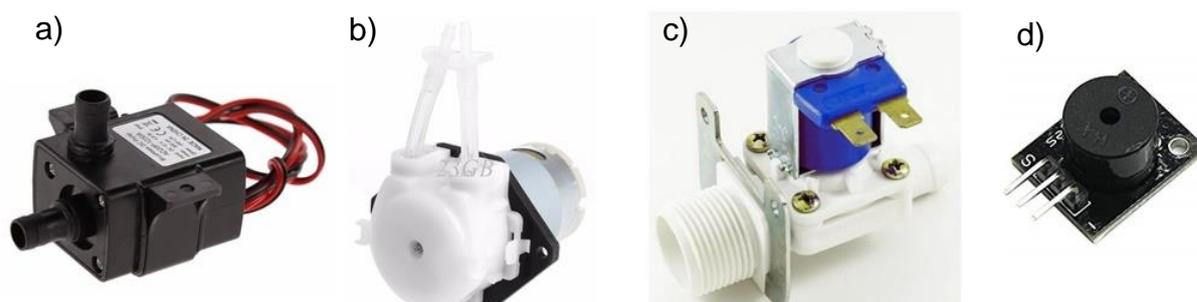


Figura 21 – Atuadores utilizados para a automação hidropônica: a) Bomba 12V CC, b) Bomba peristáltica 12V CC, c) Válvula solenoide 12V CC, d) Buzzer.

Para o acionamento da motobomba (Figura 21 a), das bombas peristálticas (Figura 21 b), Figura 23 e Figura 24) e da eletroválvula (Figura 21 c) foi construído o circuito para acionamento com o arduino por meio de transistores BC517-NPN, conforme Figura 22, o que possibilita controlar o fluxo das bombas ao acionar os componentes por *Pulse Width Modulation* (PWM).

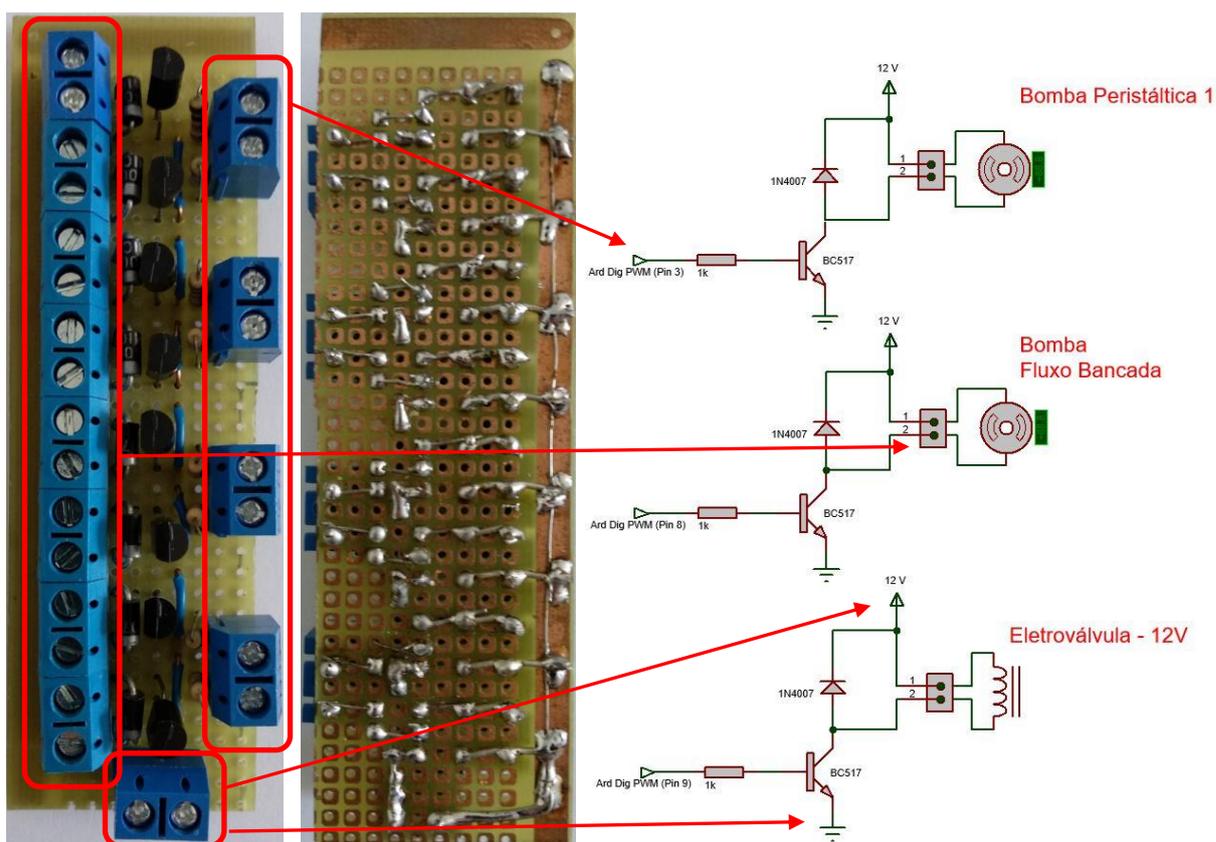


Figura 22 – Circuito de acionamento das 5 bombas peristálticas, da bomba da solução nutritiva e da eletroválvula.

A montagem das bombas peristálticas foi realizada em um caixa com seu circuito no interior (Figura 23).

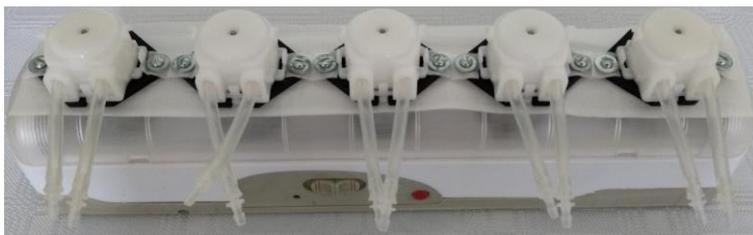
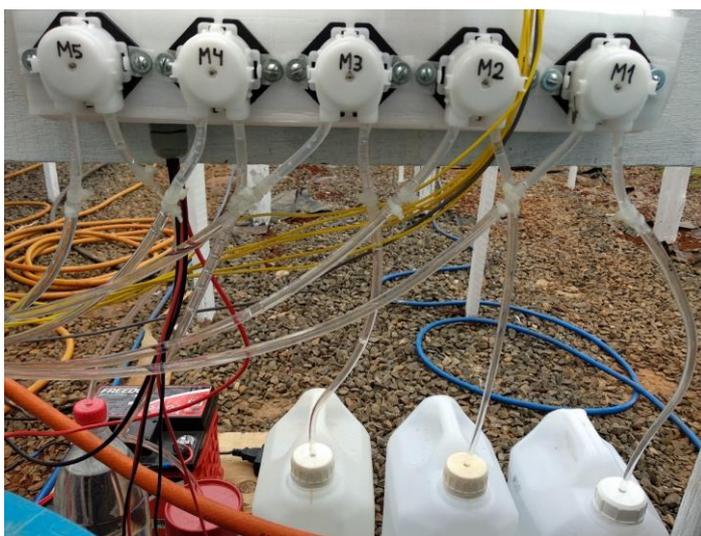


Figura 23 – Montagem de bombas peristálticas.

A fixação da caixa das bombas peristálticas foi realizada na estrutura de madeira da bancada hidropônica e os recipientes de 5L das soluções nutritivas concentradas ficaram alocados no solo, em um nível inferior às bombas peristálticas (Figura 24). O local de despejo da solução nutritiva concentrada pelas bombas peristálticas também ficou em um nível inferior à posição das bombas, fixado juntamente com o cano de retorno da solução nutritiva de circulação nos perfis, conforme pode ser observado na Figura 29.



M1 - Composto de nutrientes
 M2 - Nitrato de Cálcio
 M3 - Ferro
 M4 - Hidróxido de potássio (KHO), para elevação do pH
 M5 - ácido fosfórico (H_3PO_4) para redução do pH

Figura 24 – Instalação de bombas peristálticas.

3.2.2.3 Controlador e registrador de dados

O controlador utilizado foi o Arduino Mega 2560 R3 (Anexo B), escolhido por possuir várias entradas e saídas, além do baixo custo que atende às necessidades desta automação. Para registrar o horário dos dados coletados, é utilizado um módulo *Real Time Clock* (RTC), modelo DS3231 (Anexo B) conectado ao controlador Arduino Mega, por meio de conexão serial I2C, com o Arduino Mega como mestre e o RTC como escravo. Os dados são armazenados em um módulo de cartão micro sd (Anexo

B). As características do controlador Arduino Mega 2560 R3 podem ser vistas na Tabela 11 do Anexo B.

Para a ligação dos circuitos com o Arduino foi montado uma Shield (Anexo C), que consiste em uma placa de hardware que pode ser plugada em cima do Arduino Mega, facilitando sua remoção caso seja necessário.

A programação do microcontrolador foi realizada na linguagem C++, através do software livre Arduino (IDE), versão 1.8.5.

3.2.2.4 Interface Homem Máquina – IHM

A interface com o usuário foi realizada via tela IHM Nextion 2.4", LCD-TFT (Anexo D), com resolução 320x240, com tela sensível ao toque, comunicação serial UART. O display possui microcontrolador (ARM7 48 MHz) e armazenamento próprio para cartão SD, evitando a necessidade de alto tráfego de dados entre o Arduino Mega e o display. A edição de sua interface foi realizada por intermédio do programa Nextion Editor.

3.2.2.5 Fonte de alimentação do circuito

Para a alimentação geral do sistema de automação, foi utilizado uma fonte CC de notebook (19V, 3,42A, 65W). Como o sistema utiliza tensões de 12V e 5V, foi montado um circuito com reguladores de tensão para sua redução, conforme circuito elétrico do Anexo E. Os três reguladores de tensão LM7812 foram ligados em paralelo para fornecimento de corrente maior, como cada regulador fornece 1,5 A, a fonte 12 V pode fornecer 4,5 A. Os resistores de 0,1 Ω foram ligados em série à saída de cada regulador para igualar as correntes de cada regulador. Para os reguladores LM7805 também foi realizada da mesma forma, porém apenas com 2 reguladores, fornecendo 3 A. Já o regulador de tensão 2576T fornece 3 A e pode ser desligado a partir de seu pino 5, ligado ao pino digital 46 do Arduino. Ao ser ligado em 0 V o regulador é acionado e, ao ser ligado em 5V, o regulador é desligado, possibilitando o desligamento dos sensores que não necessitam realizar medições o tempo todo, economizando energia.

Os três medidores INA219 foram ligados de forma a medir a tensão, corrente e potência da fonte da Rede, da Bateria e do Carregador da bateria.

Os dois relés ligados com os optoacopladores 4n25 do Anexo F compõe o módulo de relé apresentado na Figura 25, em que o relé 1 corresponde à alimentação do sistema pela rede ou pela bateria. Já o relé 2 aciona o conversor *step down* para carregar a bateria, diminuindo a tensão da rede de 19V para 13,8V. Estes componentes, assim como os três medidores INA219 foram instalados na tampa da caixa, conforme Figura 25.

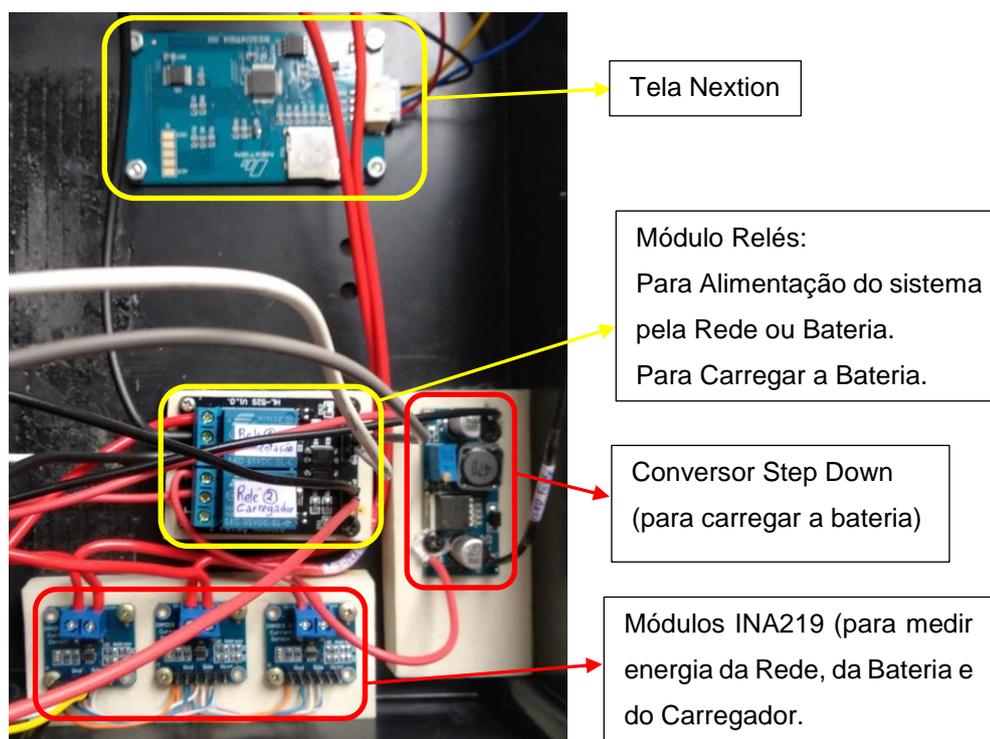


Figura 25 – Ligações do módulo relé, tela nextion, medidores INA219 e carregador da bateria.

3.2.2.6 Montagem geral do sistema automatizado

O protótipo do sistema hidropônico NFT automatizado foi montado em uma caixa plástica preta de dimensões 200X140X90mm. Na parte frontal da tampa, foi instalada a tela Nextion com um botão para liga-la e desliga-la, e dois leds de indicação do sistema, led verde indica que o sistema está sem problemas e o led vermelho indica que o sistema possui algum problema, que pode ser visto na tela. Na parte superior da caixa foram posicionados os sensores DHT22 de temperatura e umidade do ar, e o sensor de iluminância GY-302, conforme Figura 26.



Figura 26 – Visão frontal e superior da caixa do sistema de automação.

Na parte inferior da caixa foram instaladas as conexões de alimentação do sistema (Figura 27), C1 é o conector da alimentação da Rede de 19V, C2 é o conector da alimentação da bateria de 12V, sendo que B1 aciona a alimentação da Rede, e B2 aciona a alimentação da bateria, as duas alimentações possuem proteção por fusível entre os conectores e os botões. Já a chave seletora CH2 é para selecionar a alimentação do arduino, pela bateria ou pela rede. A chave seletora CH1 serve para poder monitorar os dados, apenas leitura dos dados é permitida quando na posição Leitura e, quando na posição Gravar/Reset, permite a gravação de nova programação no Arduino ou seu Reset pela serial ou pelo botão B3. Caso a chave seletora CH1 esteja na posição Leitura, não permitirá a gravação de uma nova programação ou seu reset pela serial ou pelo botão B3.



Figura 27 – Visão inferior da caixa do sistema de automação.

Na lateral esquerda da caixa foram posicionados o conector para ponta de prova do pH, o conector usb para comunicação e gravação do Arduino com o computador, e o Buzzer (Figura 28).

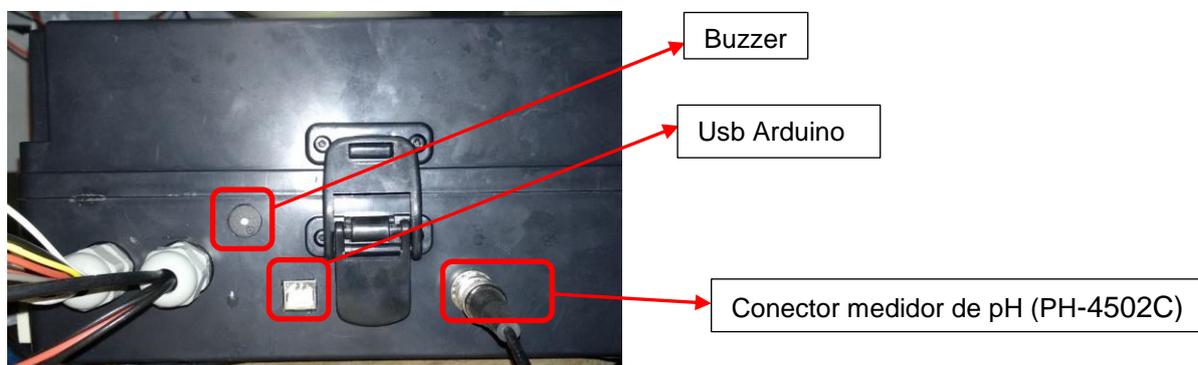
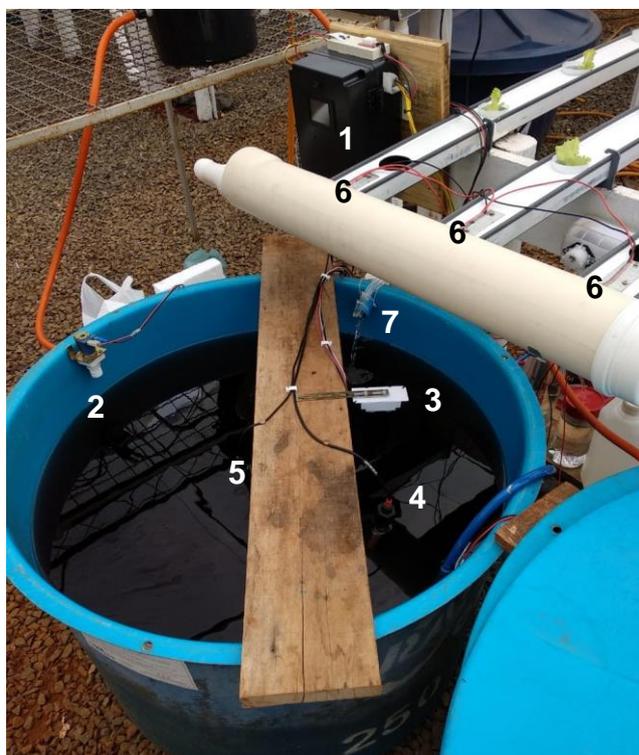


Figura 28 – Visão lateral esquerda da caixa do sistema de automação

A montagem final da caixa com todas as instalações dos componentes e ligações elétricas pode ser vista no Anexo F.

A posição dos sensores pH, condutivímetro, da eletroválvula no reservatório pode ser vista na Figura 29, os quais foram posicionados afastados do retorno da solução nutritiva da bancada e da entrada de água pela eletroválvula, de forma a não sofrerem variações bruscas nas suas medições.



- 1 – Caixa com sistema de automação;
- 2 – Eletroválvula para entrada de água;
- 3 – Sensor ultrassônico;
- 4 – Sensor de condutividade e temperatura da água;
- 5 – Sensor de pH;
- 6 – Sensor de passagem de solução nutritiva no perfil.
- 7 – Retorno da solução nutritiva dos canais e entrada da solução nutritiva das bombas peristálticas 1, 2 e 3 para aumento da condutividade e nutrição das plantas.

Figura 29 – Posicionamento dos sensores e componentes do sistema automatizado.

3.2.3 Medidores de referência

Para os testes comparativos de medições dos sensores de condutividade foram utilizados medidores como referência para condutividade, utilizando o condutímetro CVM- HMCDB-150 (Figura 30 a), e o condutímetro portátil, o qual não possui descrição de suas características (Figura 30 d).

Para levantamento da curva de resposta do sensor de tensão da bateria por meio do circuito resistivo em série, e para a medição do consumo de potência e posterior cálculo de consumo de energia foi utilizado o multímetro UNI-T, modelo UT71E (Figura 30 b). Para a medição e acompanhamento de pH foi utilizado o peagômetro Extech, modelo Ph100 (Figura 30 c).

A balança portátil Xtrad, modelo MH-200 foi utilizada para medir o peso das mudas de alface no início e no final do cultivo (Figura 30 e).

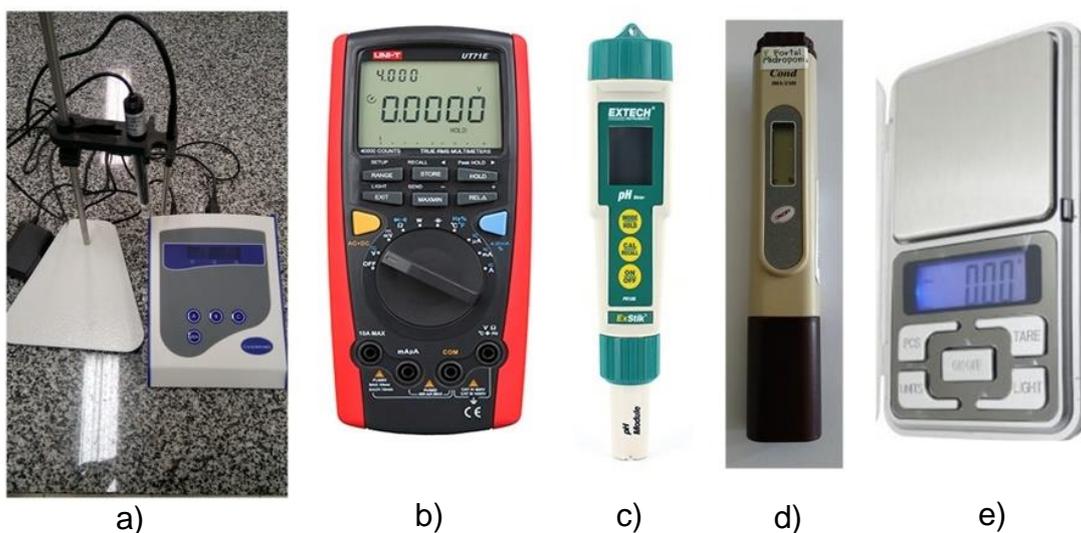


Figura 30 – Medidores de referência utilizados: a) Condutímetro, b) Multímetro-Wattímetro, c) Peagômetro portátil, d) Condutímetro portátil, e) Balança portátil.

As características técnicas dos medidores podem ser vistas na Tabela 6, com exceção do medidor portátil de condutividade (Figura 30 d) o qual não foi encontrado suas especificações, porém foi comparado sua medição com o condutímetro de bancada (Figura 30 a).

Tabela 6 – Características de sensores utilizados para automação do sistema hidropônico

| Características | Condutivímetro (Figura 30 a) | Multímetro-Wattímetro (Figura 30 b) | Peagâmetro (Figura 30 c) | Balança (Figura 30 e) |
|-------------------|---------------------------------|--|-----------------------------|--------------------------|
| Marca: | CVM | Unit-Trend | Extech | Xtrad |
| Modelo: | HMCDB-150 | UT71E | Ph100 | MH-200 |
| Faixa de medição: | 0 - 20 mS/cm | Tensão DC: 400 mV-40V Corrente DC: 400µA-10A Potência: 0-2500W | 0,00 a 14,00 | 0,01 – 200g |
| Precisão: | 2% Fundo de Escala | Tensão DC: ±(0,025%+5d) Corrente DC: ±(0,1%+15d) Potência: ±(2%+10d) | ± 0,01 +1digit pH | - |
| Resolução: | 146,7 uS/cm | Tensão DC: 10µV - 1mV Corrente DC: 0,01µA - 1mA Potência: 0,1W | ± 0,01pH | ± 0,01 g |

3.3 Métodos

O sistema hidropônico automatizado foi projetado para realizar o controle em malha fechada de:

- pH: com 2 bombas peristáltica, uma para a adição de ácido fosfórico na solução nutritiva para a redução do pH, e outra para a adição de Hidróxido de potássio na solução nutritiva para o aumento do pH;
- CE: com a inserção de água para redução da CE por meio da liberação da eletroválvula, e pela adição de um volume de nutrientes para aumento da CE através de três bombas peristálticas.

Já o controle do fluxo da solução nutritiva é realizado em malha aberta, através da variação de tensão contínua na motobomba, pela técnica PWM ou modulação por largura de pulsos (maior tensão para aumentar o fluxo, e menor tensão para redução do fluxo).

As variáveis de temperatura e umidade do ar, temperatura do líquido, verificação de fluxo de água dentro dos perfis por condutividade e a intensidade de luz não

são controladas, apenas são monitorados para ajuste do tempo de acionamento de fluxo da solução nutritiva e para emitir alertas de anomalias no sistema. Na Figura 31, é possível observar o diagrama esquemático com os componentes da automação do sistema hidropônico NFT.

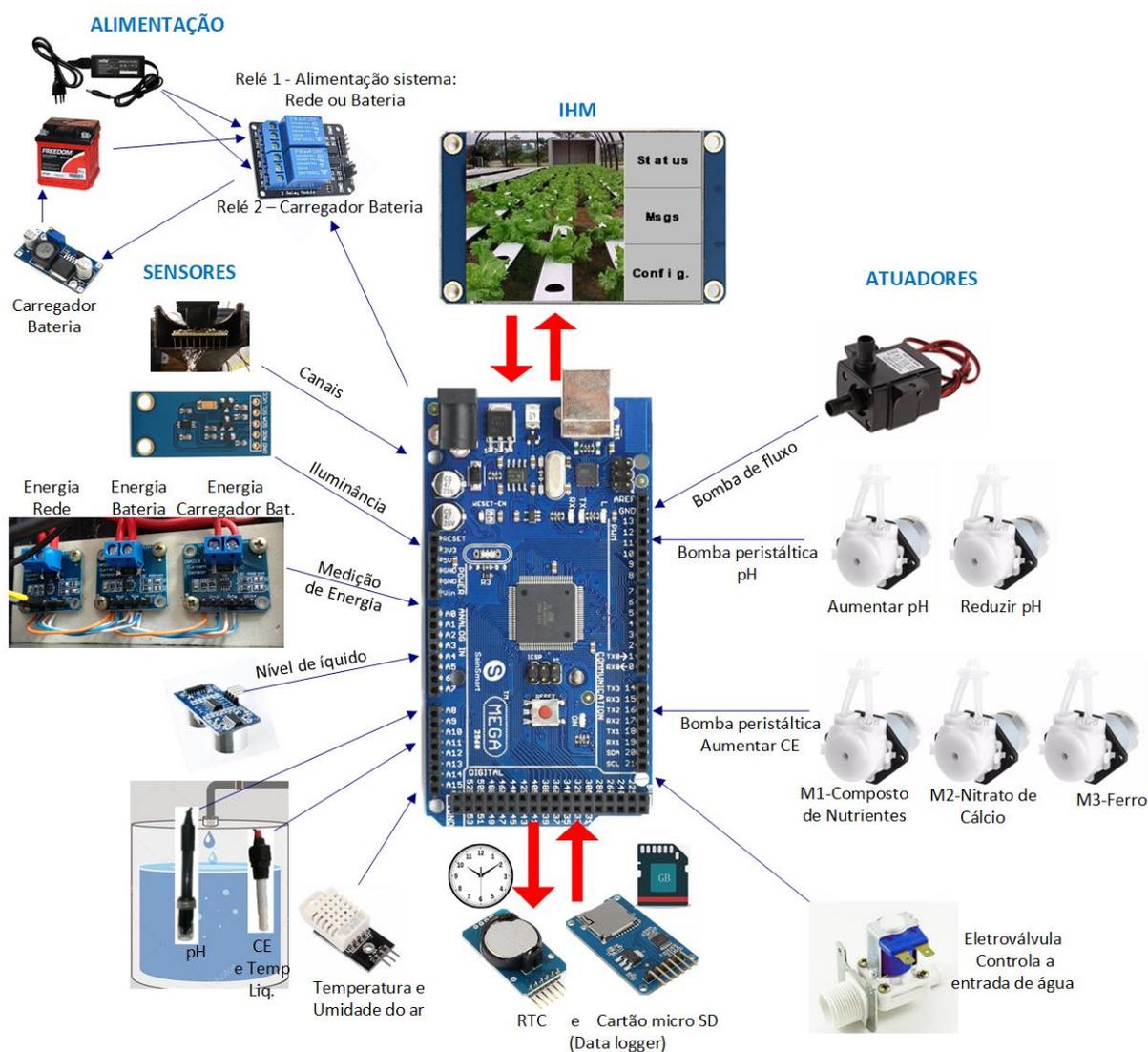


Figura 31 – Diagrama esquemático do sistema hidropônico automatizado.

A automação e análise do sistema hidropônico é abordada na seguinte sequência:

- Dimensionamento da bomba para fluxo de nutrientes;
- Preparo da solução nutritiva, bancadas e plantas;
- Verificação de resposta e calibração de sensores de: tensão, temperatura e condutividade de líquido;
- Programação, instalação e testes iniciais do sistema;
- Medição do consumo de energia do sistema;

- f) Dimensionamento do sistema fotovoltaico;
- g) Dimensionamento de baterias;
- h) Análise do sistema hidropônico convencional e automatizado;
- i) Levantamento de custos.

3.3.1 Dimensionamento da bomba de fluxo de nutrientes

A bomba utilizada é do tipo centrífuga, com instalação na forma de sucção afogada, posicionada no fundo do tanque e na face oposta ao retorno da solução nutritiva, para melhor circulação. Seu dimensionamento foi realizado, segundo Filippo Filho (2015), porém as perdas distribuídas (trechos retilíneos), e as perdas em acessórios/conexões foram desconsideradas devido ao pequeno percurso, baixa vazão e baixa pressão, com apenas um conector L.

A equação da potência útil fornecida pela bomba ao fluido é dada pela Equação (1).

$$P_b = \gamma \cdot Q_b \cdot H_b \quad (1)$$

Em que:

P_b = potência útil fornecida pela bomba ao fluido, W;

Q_b = vazão útil na descarga da bomba, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

H_b = altura útil de elevação da bomba, m (altura geométrica desde o nível inferior da água do tanque até a saída superior nos perfis, com as perdas já citadas desconsideradas);

$\gamma = \rho \cdot g$ → peso específico da água, $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ($\gamma = 9810 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$, para $T = 20^\circ\text{C}$, $\rho = 1.000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $P = 1 \text{ atm}$ e $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

Para fornecer a potência útil P_b , a bomba exige uma potência motriz $P_{\text{mecânica}}$ maior para vencer as perdas internas de conversão, conforme Equação (2).

$$P_{\text{mecânica}} = \frac{P_b}{\eta_b} \quad (2)$$

A potência exigida da rede elétrica é dada pela Equação (3).

$$P_{\text{elétrica}} = \frac{P_{\text{mecânica}}}{\eta_m} \quad (3)$$

Em que:

η_b = rendimento ou eficiência da bomba, decimal;

η_m = rendimento ou eficiência do motor, decimal.

3.3.2 Preparo da solução nutritiva, bancadas e plantas

A solução nutritiva foi preparada no tanque com capacidade de 250L, porém foi preenchido com 200L, com condutividade inicial de 1 mS.cm^{-1} , com a seguinte composição:

- 132g de Hidrogood Fert Composto;
- 99g Nitrato de Cálcio;
- 4g Ferro.

A CE no sistema automatizado foi ajustado na programação para aumentar a condutividade diariamente em $0,1 \text{ mS.cm}^{-1}$, até atingir 2 mS.cm^{-1} , se estabilizando neste valor.

Toda preparação necessária para compor a solução nutritiva a ser colocada nos tanques foi realizada com a pesagem de cada nutriente. Em seguida, foram moídos os grânulos e, então, dissolvidos em água separadamente cada nutriente (Figura 32), e depois foram misturados os três compostos dissolvidos em um recipiente para serem então colocados nos tanques até atingir a condutividade necessária.



Figura 32 – Preparo da solução nutritiva.

Para a preparação da solução nutritiva que foi colocada nos recipientes de 5L do sistema automatizado (Figura 33), foi realizado o mesmo processo, porém sem misturar os três nutrientes, colocando cada nutriente em um recipiente separado de 5L para ser adicionado posteriormente no tanque pelo sistema automatizado. Isto foi necessário para evitar reações químicas indesejadas que ocorreriam devido a

concentração elevada de elementos químicos com potencial de ligação, exemplo: Fe e P; Ca e P (FURLANI et al., 2009).



Figura 33 – Solução nutritiva em recipientes de 5L.

A concentração da solução nos recipientes de 5L foi colocada com a proporção de duas vezes o peso inserido inicialmente no tanque para o início dos testes.

A CE e o pH foram medidos diariamente para acompanhamento com os medidores portáteis.

Os perfis das bancadas foram lavados internamente e externamente antes da colocação das plantas de alface para os testes.

Para o teste foram utilizadas mudas de alface crespa, as quais foram compradas com tamanho de 4 folhas, próprio para o início da fase em sistema hidropônico definitiva. No entanto, como as mudas foram germinadas em substrato, para inserir no sistema hidropônico, foram primeiro lavadas as raízes, pesadas individualmente, identificadas e colocadas em recipientes de copos plásticos descartáveis. Os copos plásticos utilizados foram perfurados e cortados no fundo em formato de X para servir de sustentação para as mudas, para reduzir a luz solar nas raízes e diminuir a criação de algas (Figura 34 e Figura 35).



Figura 34 – Preparação das mudas de alface crespa para colocar no sistema hidropônico.



Figura 35 – Mudas em copos plásticos descartáveis inseridas nos perfis.

A bancada possui 48 mudas ao todo. As mudas foram identificadas pela sua posição na bancada e nos perfis conforme a Figura 36 e Figura 37, por números e letras, por exemplo:

- 1A01 = Perfil 1, sistema **A**utomatizado, 1^a muda;
- 2A16 = Perfil 2, sistema **A**utomatizado, 16^a muda;
- 3A01 = Perfil 3, sistema **A**utomatizado, 1^a muda;

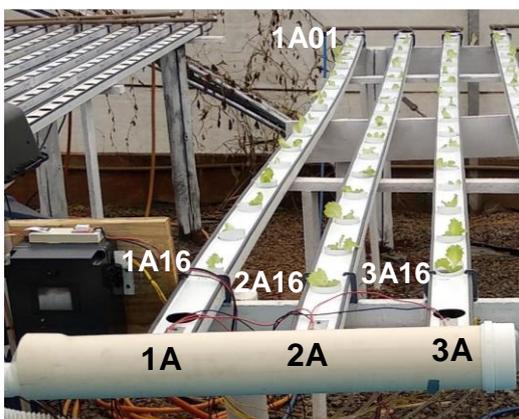


Figura 36 – Inserção e identificação de mudas nas bancadas e nos perfis.

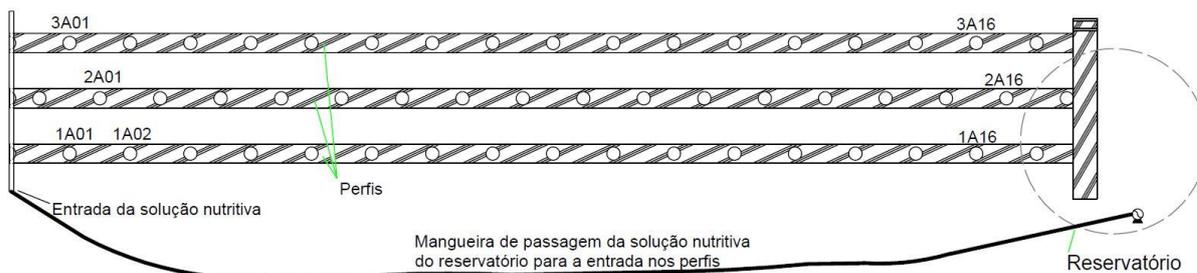


Figura 37 – Posição e identificação de mudas nas bancadas e nos perfis.

3.3.3 Verificação de resposta e calibração de sensores

Para os sensores de tensão da bateria do sistema convencional, condutividade e temperatura do líquido do sistema automatizado foi realizado, inicialmente, medições com os medidores de referência e com os sensores montados. Com os dados coletados foi levantada a resposta do sensor e verificado qual a melhor função que representa sua resposta comparativa ao medidor de referência. Após o levantamento da resposta desses sensores foi realizado o comparativo de médias e desvio padrão com os medidores de referência e com a função de resposta levantada para o medidor.

Para os sensores listados a seguir foi levantado sua resposta, conforme descrito na sequência.

3.3.3.1 Medidor de Temperatura do Líquido com condutímetro

Para verificar a resposta foi utilizado água, a qual foi colocada no congelador inicialmente, até atingir uma temperatura próxima de 3 °C então, foram realizadas medições da temperatura pelo medidor do condutímetro de bancada e com o circuito do condutímetro do sistema automatizado até a água atingir a temperatura ambiente de 25 °C aproximadamente, e então a água foi aquecida um pouco a cada nova medida, até se atingir 50 °C. Com os dados, foi verificado a resposta do medidor de temperatura com sensor NTC 10k do condutímetro em relação ao medidor de temperatura do condutímetro de bancada.

No Arduino, a programação para leitura da temperatura foi realizada a lógica conforme o fluxograma apresentado no Anexo G. Para conseguir leituras mais estáveis, para cada medição apresentada na tela do computador, é medido 100 vezes o

valor analógico para temperatura, passando a realizar a média dos 60 valores medianos e, então, é calculado o valor em tensão de 0 a 5V para representação da resposta da temperatura. O valor de 100 medidas foi adotado após verificações práticas que demonstram estabilidade e, para poucas medidas, a resposta apresentou variações.

3.3.3.2 Medidor de Condutividade

Para realizar as medições de tensão analógica do condutivímetro e comparar com a condutividade medida pelo condutivímetro de bancada, foi utilizado inicialmente água pura e então acrescentado a cada medição a solução nutritiva que é utilizada no sistema hidropônico, aumentando assim sua condutividade para uma resposta mais fiel à aplicação. Foram realizadas medições com o condutivímetro de bancada, com o condutivímetro do sistema automatizado e com o condutivímetro portátil em laboratório no dia 29/01/2019, antes do início dos testes de cultivo em bancada (Figura 38).



Figura 38 – Levantamento de resposta de sensor de condutividade do sistema automatizado em comparação com o de bancada.

A lógica de programação feita para realizar a medição de condutividade pelo condutivímetro criado para o sistema automatizado pode ser visualizada no Anexo H. A inversão da polarização do condutivímetro é feita a com um ciclo de 84 μ s,

correspondendo à uma frequência de aproximadamente 11,9 kHz evitando, assim, o efeito de polarização e erro de medição.

Durante o cultivo iniciado dia 11/02/2019 foram realizadas medições de pH e de Condutividade a cada dia com os medidores portáteis para verificação e acompanhamento.

Ao final do teste do sistema hidropônico que durou 12 dias, foi verificado novamente sua resposta em comparação com o medidor de bancada e o medidor portátil para verificar sua variação/descalibração durante o período. No entanto, neste caso, o teste foi realizado na casa de vegetação, onde o sistema foi instalado (Figura 39).

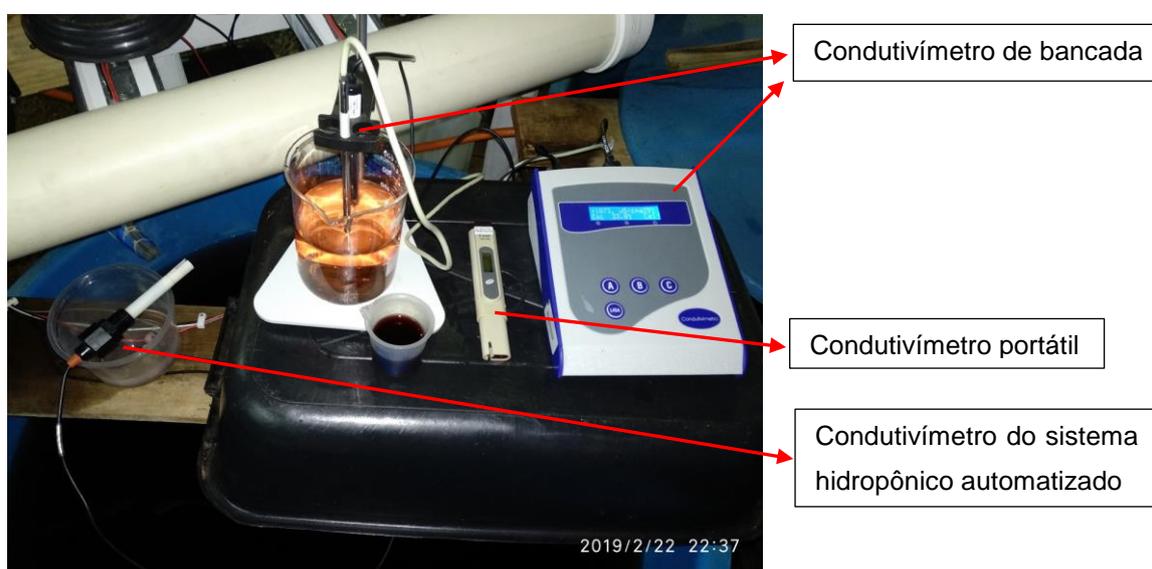


Figura 39 – Verificação de resposta do condutivímetro do sistema automatizado ao final do cultivo de 12 dias.

3.3.3.3 Sensor de entupimento de perfis ou de bomba danificada

Para o sensor de passagem da solução nutritiva no final dos perfis, foi realizado teste de tempo de leitura desde o momento em que é acionado a bomba até ser detectado pelos sensores, sendo realizado para cada perfil individualmente e o tempo para os 3 sensores detectarem também, além de ser verificado se os sensores não estão detectando passagem de solução sem o devido acionamento da bomba. Este ensaio foi realizado no 1º dia de início do cultivo (11/02/2019), no 6º dia e no último dia (12º dia, 22/02/2019), para verificar a variação do tempo de detecção, uma vez que com o crescimento das raízes das mudas, o tempo para o líquido da solução nutritiva chegar ao final do perfil tende a aumentar devido ao atraso no fluxo ou

redução da velocidade da solução. Para cada ensaio foram realizados 5 testes para cada sensor.

3.3.3.4 Sensor de queda de tensão da rede elétrica

Para a verificação do sensor de queda de tensão da rede, foram realizados testes de queda de tensão proposital e logo após, com o religamento da rede ao sistema, e verificado se o sensor detectou ou não a variação. Foram realizadas 20 manobras de ligar e desligar.

3.3.4 Programação geral do sistema

3.3.4.1 Programação Interface IHM

A interface IHM Nextion possui uma tela principal (Figura 40), a qual dá acesso à outras três telas:

- Tela de Status do sistema (Figura 41): ao abrir a tela de status a tela nextion solicita os dados atualizados, a qual mostra os valores das últimas medições, e configurações.

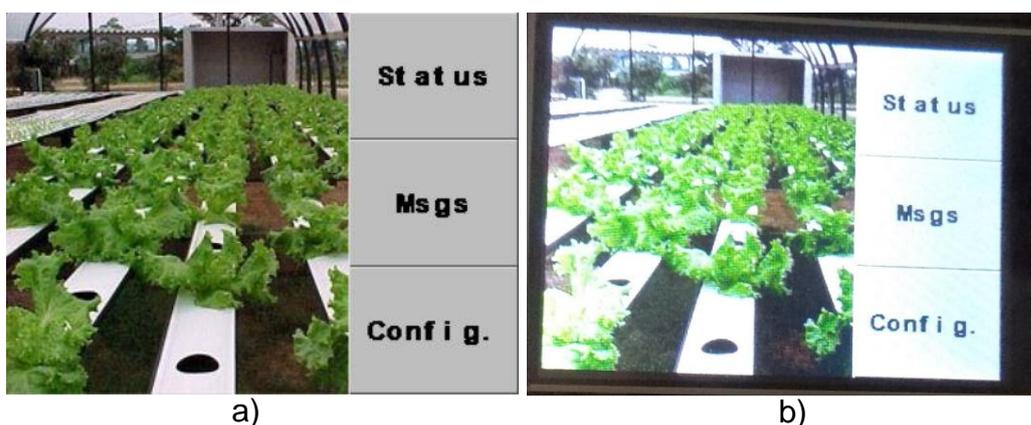


Figura 40 – a) Tela principal do sistema no software nextion e b) Tela principal real.



Figura 41 – a) Tela de status do sistema no software nextion e b) Tela de status real.

- Tela de Mensagens do Sistema (Figura 42): mostra a alimentação da rede, se está ligada ou desligada, o valor da tensão da bateria, se a bomba está funcionando ou se está danificada, e se os perfis estão sem problemas, ou quais perfis estão com problemas.



Figura 42 – a) Tela de mensagens do sistema no software nextion e b) Tela de mensagens real.

- Tela de configuração (Figura 43): nesta tela pode ser ajustado a faixa do valor de pH, valor mínimo e valor máximo, com 1 valor de diferença sempre. Pode ser ajustado o valor inicial da condutividade, a qual o sistema se encarrega de incrementar até 2mS/cm durante o cultivo. E pode ser ajustado o número de bancada e de perfis a serem conectados ao sistema.

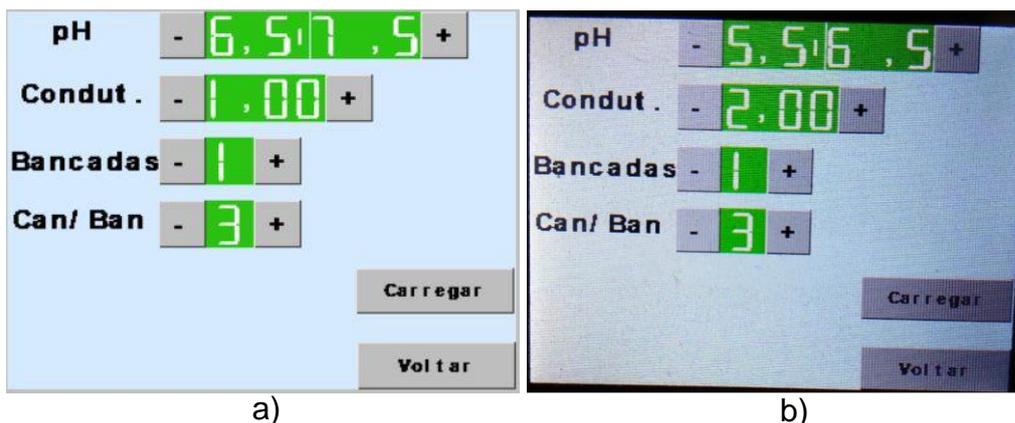


Figura 43 – a) Tela de configuração do sistema no software nextion e b) Tela de configuração real.

3.3.4.2 Programação Arduino Mega

A programação geral do sistema foi realizada em C++ na IDE do arduino, totalizando 1354 linhas. O fluxograma do Anexo I detalha a sequência da lógica da programação realizada em C++ no Arduino para um melhor entendimento.

Para o turno de rega do fluxo da solução nutritiva nos perfis, foi criado um método a partir de uma função que depende de três fatores, relacionados à luminosidade, temperatura e umidade do ar, que alteram o tempo de permanência no modo ligado e desligado da bomba de solução nutritiva. Contudo, com a temperatura e a iluminância do ambiente mais elevada e menor umidade relativa do ar, existe uma maior absorção de água pelas plantas, enquanto que com a temperatura e a iluminância do ambiente baixa e maior umidade relativa do ar, existe uma menor absorção de água pelas plantas. Assim, o método consiste em três fatores, um para cada variável: temperatura do ar, umidade do ar e para a iluminância. O fator final é utilizado para calcular o tempo de permanência da bomba ligada e esse fator final engloba os três fatores anteriores. Os fatores possuem as seguintes características:

Fator 1 - Temperatura do ar: foi limitado entre 5 e 40 °C, o qual é transformado em um fator com variação de 0,2 até 1, onde 5 °C ou menor corresponde à 0,2 e 40 °C ou maior corresponde à 1, e entre 5 e 40 °C correspondem proporcionalmente de 0,2 a 1.

Fator 2 – Umidade do ar: foi limitado entre 20% e 100%, o qual é transformado em um fator de 1 a 0,2, onde 100% corresponde à 0,2 e 20% corresponde a 1. Para uma umidade intermediária o fator é inversamente proporcional.

Fator 3 – Luminosidade do ambiente: foi limitado entre 1 a 40000 lux, o qual é transformado em um fator de 0,01 a 1 proporcionalmente.

Considerando que os fatores de temperatura e umidade do ar afetam em maior proporção a necessidade de água pela planta, o fator final é considerado com 40% do Fator 1, 40% do Fator 2 e 20% do Fator 3. Este Fator final é multiplicado por um período adotado de 20 minutos, o resultado corresponde ao tempo de bomba ligada, conforme Equação (4) e (5). E o tempo de bomba desligada é de 25 minutos subtraído o tempo já calculado de bomba ligada, conforme Equação (6). Assim somando-se o tempo de bomba ligada e bomba desligada o valor será sempre de, no máximo, 25 minutos. Ao final, o tempo é convertido em milissegundos, pois é o formato de tempo de base para o Arduino. O tempo de 20 e 25 minutos foram adotados em razão das altas temperaturas do período de ensaio, pois a temperatura ambiente dentro da casa de vegetação chega em torno de 55 °C.

$$Fator\ Final = (Fator\ 1 * 0,4) + (Fator\ 2 * 0,4) + (Fator\ 3 * 0,2) \quad (4)$$

$$Tempo_{Bomba\ Ligada} = 20 * Fator\ Final\ (min) \quad (5)$$

$$Tempo_{Bomba\ Desligada} = 25 - Tempo_{Bomba\ Ligada}\ (min) \quad (6)$$

3.3.5 Consumo de energia

Com o sistema hidropônico em funcionamento, foram realizadas medições de potência ativa (em W), ao durante um período de 24h, a cada 10 segundos, através do multímetro Unit-ET71E (Figura 44). Medindo o consumo apenas da rede, não medido o consumo pela bateria, pois o multímetro mede o consumo em CA. Com o consumo médio diário aproximado de todo o sistema automatizado, será comparado com a medição pelo sensor INA219, que realiza as medições de consumo pela rede e pela bateria.



Figura 44 – Medições de energia com multímetro Unit-T UT71E, a) com a bomba ligada e b) com a bomba desligada.

Como o sistema automatizado aciona a bomba por tempos que dependem da luminosidade, temperatura e umidade do ar, que são condições variáveis ao longo dos dias, este consumo pode apresentar variações para outros dias e períodos do ano. Portanto, se trata apenas de um consumo médio diário.

3.3.6 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

O sistema hidropônico NFT automatizado pode ser instalado com uma alimentação por módulo fotovoltaico, o sistema funcionará off-grid, em que o módulo somente realiza a recarga da bateria, e esta alimenta todo o sistema com o bombeamento da solução nutritiva e a automação hidropônica. A escolha do módulo fotovoltaico foi realizada após a medição do consumo de energia do sistema automatizado. Uma vez definido o módulo fotovoltaico, foi escolhido um controlador de carga de 12V com uma capacidade de corrente superior à corrente fornecida pela soma das correntes dos módulos, pois como o sistema é em 12V, conectados somente em paralelo.

Segundo Villalva (2015), para o dimensionamento da quantidade de módulos fotovoltaicas para o sistema de automação são necessários os seguintes dados:

- Corrente de curto-circuito do módulo (I_{sc});
- Tensão de operação (12 V adotado no sistema);
- Número de horas diárias de insolação do local (horas de sol pleno);
- Potência consumida pela carga a ser atendida.

O sistema fotovoltaico considerado é do tipo isolado (off-grid), considerando o mês crítico, que possui as médias mais desfavoráveis para o sistema (menor

radiação solar). O sistema fotovoltaico deverá realizar a recarga das baterias para que as mesmas atendam o consumo durante 4 dias consecutivos (período que não haveria recarga em razão das chuvas ou tempo nublado).

O dimensionamento do sistema fotovoltaico seguirá o método proposto por Cresesb (2014), com algumas adaptações para este sistema.

Primeiro, com o valor medido do valor médio diário de energia requerida para cada um dos meses do ano. A potência necessária para o painel fotovoltaico, por sua vez, é obtida através da Equação (7).

$$P_m = \frac{E_{h/dia}}{HSP \cdot Red_1 \cdot Red_2} \quad (7)$$

Em que:

$E_{h/dia}$: quantidade de energia consumida diariamente no mês (Wh.dia⁻¹);

HSP : horas de sol pleno no plano do painel fotovoltaico com uma irradiância de 1000 W.m⁻² (h.dia⁻¹);

Red_1 : fator de redução da potência dos módulos fotovoltaicos, em relação ao seu valor nominal, englobando os efeitos de: i) um eventual acúmulo de sujeira na superfície ao longo do tempo de uso; ii) degradação física permanente ao longo do tempo; iii) tolerância de fabricação para menos, em relação ao valor nominal; iv) perdas devido à temperatura. A este fator Red1 atribui-se, por padrão, o valor de 0,75 (decimal), para módulos fotovoltaicos de c-Si;

Red_2 : fator de redução da potência devido às perdas no sistema, incluindo fiação, controlador, diodos etc. A este valor recomenda-se, como padrão, o valor de 0,9 (decimal).

O fator de HSP pode ser calculado pela Equação (8):

$$HSP = \frac{\text{irradiância ao longo de 1 dia (Wh.m}^{-2}\text{)}}{1000 \text{ (Wh.m}^{-2}\text{)}} \quad (8)$$

A partir da potência dos painéis (P_m) calculada pela Equação (7), obtém-se, a seguir, por meio da Equação (9), a corrente que deve ser gerada pelo painel fotovoltaico.

$$I_m = \frac{P_m}{V_{sist}} \quad (9)$$

Em que:

I_m : corrente do módulo fotovoltaico (A);

V_{sist} : tensão nominal do sistema (V). Essa tensão é igual à tensão nominal do banco de baterias.

Pode-se, então, calcular o número de módulos a serem conectados em paralelo pela Equação (10):

$$N^0_{mod-par} = \frac{I_m}{I_{sc} \cdot 1,25} \quad (10)$$

Em que:

$N^0_{mod-par}$: número de módulos em paralelo para atender o sistema de armazenamento;

I_{sc} : corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico (A).

É considerada a corrente de curto-circuito do módulo fotovoltaico acrescida de um fator mínimo de segurança de 25%, assumindo que o módulo pode receber uma radiação de até 1.250 W m^{-2} (ainda que por curtos períodos).

Analisando a Figura 45

Figura 45, que mostra a irradiação solar para a cidade de São Miguel do Oeste, para a instalação do módulo é adotado plano inclinado aos 27° N , ângulo igual a latitude (CRESESB, 2014).

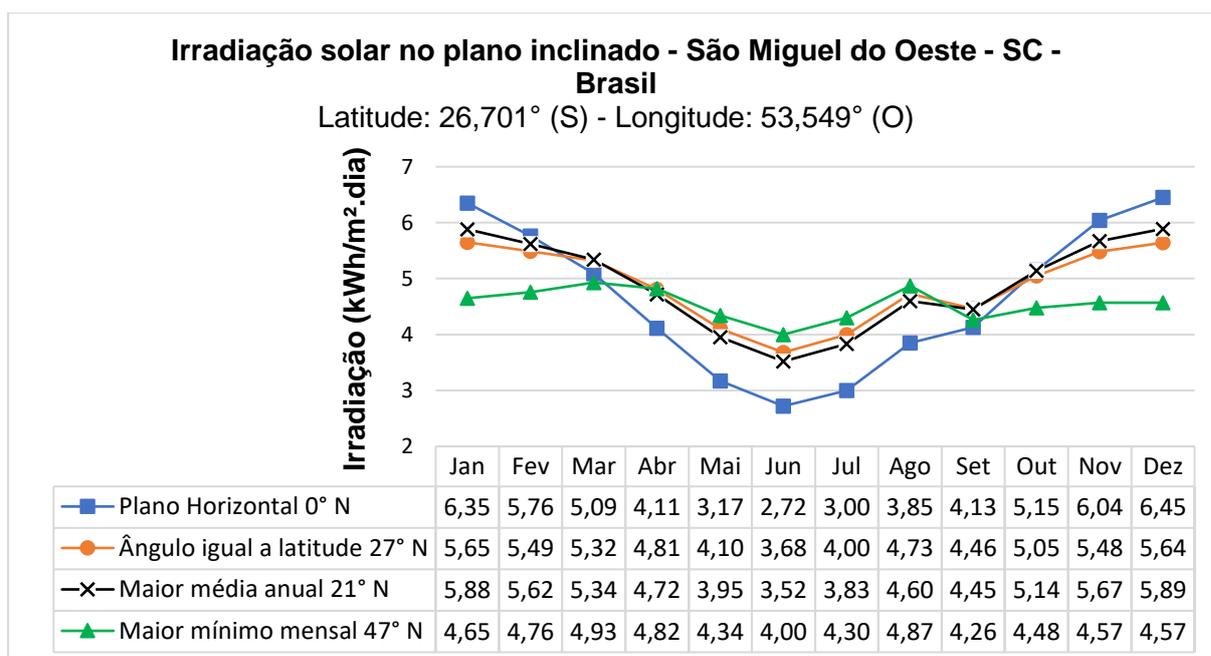


Figura 45 – Irradiação solar no plano inclinado na cidade de São Miguel do Oeste, SC-Brasil. Fonte: Adaptado de CRESESB (2014).

3.3.7 Dimensionamento de Baterias

Foram utilizadas baterias estacionárias de chumbo-ácido para armazenar energia. Para o dimensionamento do banco de baterias de um sistema fotovoltaico é necessário saber:

- a demanda de energia diária do sistema (energia consumida);
- a profundidade de descarga permitida para a bateria a ser utilizada;
- a autonomia do banco de baterias, ou seja, a quantidade de dias que o banco de baterias conseguirá suprir as cargas, caso não se tenha geração de energia devido a dias nublados ou chuvosos;
- tensão de operação;

A tensão das baterias adotada é de 12V, e pretende-se que o sistema possa alimentar o sistema de automação durante 4 dias ininterruptos, sem que haja nenhuma recarga nesse período.

Com o consumo de energia necessário medido, é possível definir o consumo em Wh.dia⁻¹ do projeto a partir da Equação (11):

$$E_C = \frac{E_{Wh/dia}}{\eta_{bat}} \quad (11)$$

Em que:

E_C : consumo em Wh.dia⁻¹ do projeto;

$E_{Wh/dia}$: quantidade de energia consumida diariamente em corrente contínua em determinado mês (Wh.dia⁻¹);

η_{bat} : eficiência global da bateria (decimal);

A energia a ser armazenada é calculada pela Equação (12).

$$E_A = \frac{E_C \cdot N_{dias}}{P_D} \quad (12)$$

Em que:

E_A = Energia total armazenada no período no banco de baterias em Wh;

N_{dias} = é o número de dias de autonomia (o qual varia em função da região onde se instala o sistema);

E_C = Energia consumida em Wh.dia⁻¹;

P_D = Profundidade de descarga permitida (20%, 50%, 80% etc.).

A determinação da capacidade de carga do banco de baterias é especificada pela Equação (13).

$$C_{\text{banco de baterias}} = \frac{E_A}{V_{\text{banco}}} \quad (13)$$

Em que:

$C_{\text{banco de baterias}}$ = Capacidade de carga do banco de baterias em ampere-hora [Ah];

E_A = Energia armazenada no banco de baterias em Wh;

V_{banco} = Tensão do banco de baterias, que é de 12V;

O número de baterias em paralelo é dado basicamente pela Equação (14).

$$N_{\text{BatPar}} = \frac{C_{\text{banco de baterias}}}{C_{\text{bateria}}} \quad (14)$$

Em que:

N_{BatPar} = Número de conjuntos de baterias ligados em paralelo;

C_{bateria} = Capacidade de carga de cada bateria em ampere-hora (Ah).

3.3.8 Análise do sistema hidropônico convencional e automatizado

O cultivo hidropônico no sistema automatizado foi realizado com uma cultivar de alface crespa. O delineamento utilizado é de blocos ao acaso, com um tratamento, com 48 mudas para analisar as variações no sistema hidropônico automatizado.

No sistema convencional, o tempo de funcionamento da motobomba é geralmente ajustado por um timer analógico, com ajuste mínimo de 15min ligados e 15 min desligados. É realizada a comparação do sistema convencional com o sistema criado, com 10min ligados e 5 min desligados, para o período das 6h às 22h, e 10min ligados e 30min desligados, para o período de 22h às 6h.

No sistema automatizado, o tempo da circulação é proporcional à iluminância, temperatura do ar, e inversamente proporcional à umidade do ar, conforme descrito anteriormente.

A duração do cultivo foi de 12 dias após o transplante, e as plantas foram avaliadas quanto às seguintes características:

- Diferença de massa fresca total durante o cultivo: o pé de alface total foi pesado antes de ser colocado no sistema hidropônico automatizado. Ao final do período, as plantas foram novamente pesadas com uso de uma balança digital de precisão (0,01 g).

3.3.9 Levantamento de custos do projeto

O custo do projeto para automação de um sistema hidropônico foi levantado, considerando apenas o custo construtivo do sistema de automação, e adaptações necessárias, sem o lucro e sem custo da instalação e manutenção, os custos da instalação do sistema hidropônico, como bancadas e tanques, os quais já estavam previstos em um sistema convencional e, portanto, não foram considerados. Com base nos testes é realizada a análise de manutenção necessária no sistema automatizado.

Foram levantados os custos considerando três sistemas, e todos os casos foi desconsiderado o controle do pH, uma vez que o sensor não apresentou leituras confiáveis. Cada sistema é considerado para uma ou dez bancadas hidropônicas:

Sistema de automação básico: é considerado apenas para seu funcionamento ligado à rede elétrica e com uma pequena bateria de 7Ah para o sistema emitir os alertas, possui controle da CE, sem o controle do pH, e sem a temporização da bomba dependente da iluminância, temperatura do ar e umidade do ar.

Sistema de automação intermediário: é considerado ligado à rede elétrica, com reserva de energia para um dia, com uma bateria de capacidade de 70Ah para uma bancada e 5 baterias para dez bancadas, podendo acionar a bomba por algumas horas até ser solucionado os problemas ou retorno da rede, possui o controle da CE, sem o controle do pH, e com a temporização da bomba dependente da iluminância, temperatura do ar e umidade do ar.

Sistema de automação fotovoltaico isolado: é considerado com as mesmas funcionalidades do sistema intermediário, porém o sistema conta com alimentação fotovoltaica e baterias para um sistema isolado, com reserva de energia para 4 dias sem receber energia solar, para dias nublados e de chuva.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1.1 Dimensionamento da bomba de fluxo de nutrientes

A vazão necessária para cada perfil é de 1,5 L.min⁻¹, como são utilizados 3 perfis, a vazão total para uma bancada de 3 perfis é de 4,5 L.min⁻¹, que corresponde à 270 L.h⁻¹ ou 7,5*10⁻⁵ m³.s⁻¹. A altura útil de elevação é de 1,06 m. Assim, dada a Equação (1), a potência útil fornecida pela bomba ao fluido é de 0,78 W, conforme Equação (15).

$$P_b = 9810 * 7,5 * 10^{-5} * 1,06 = 0,78 W \quad (15)$$

Para o cálculo da potência mecânica, conforme Equação (2), é considerado um rendimento de 70%.

$$P_{mecânica} = \frac{0,78}{0,7} = 1,114 W \quad (16)$$

E para o cálculo da potência elétrica, dada pela Equação (3), foi considerado um rendimento de 50%.

$$P_{elétrica} = \frac{1,114}{0,5} = 2,23W \quad (17)$$

Assim, a potência elétrica da bomba 12 V utilizada no sistema deve ser maior ou igual à 2,23 W. Analisando as bombas 12 V CC disponíveis foi adotado a bomba Brushless DC Pump, Modelo AD20P-1230A, com capacidade de 240 L.h⁻¹, 4,8 W.

Ressalta-se que o fluxo da bomba escolhida é um pouco inferior ao valor máximo, porém para os testes a bomba atende as exigências, com um fluxo medido de 1,33 L.min⁻¹. Para um cultivo com maior quantidade de perfis a bomba deve possuir uma capacidade maior, pois cada perfil exige um fluxo entre 1 a 2 L.min⁻¹ para a planta de alface. A fase final do cultivo de alface exige um fluxo próximo de 2 L.min⁻¹.

4.1.2 Verificação de resposta e calibração de sensores

Para cada um dos sensores que foram criados ou que não possuíam características de suas medidas foram levantadas suas respostas e verificado o funcionamento de cada sensor.

4.1.2.1 Medidor de Temperatura do líquido com condutivímetro

Os dados coletados da resposta do medidor de temperatura com sensor NTC-10k podem ser vistos no Anexo J.

Como se trata de um sensor NTC, o qual sua resistência diminui com o aumento de temperatura, sua tensão de leitura pelo arduino também diminui com o aumento da temperatura do líquido, conforme Figura 46. A função que representa a temperatura do líquido lido pelo Arduino Mega, é dado por regressão linear negativa, conforme Equação (18).

$$T_{\text{líquido}} = -20,898 * \text{Leitura Arduino}(V) + 77,477 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (18)$$

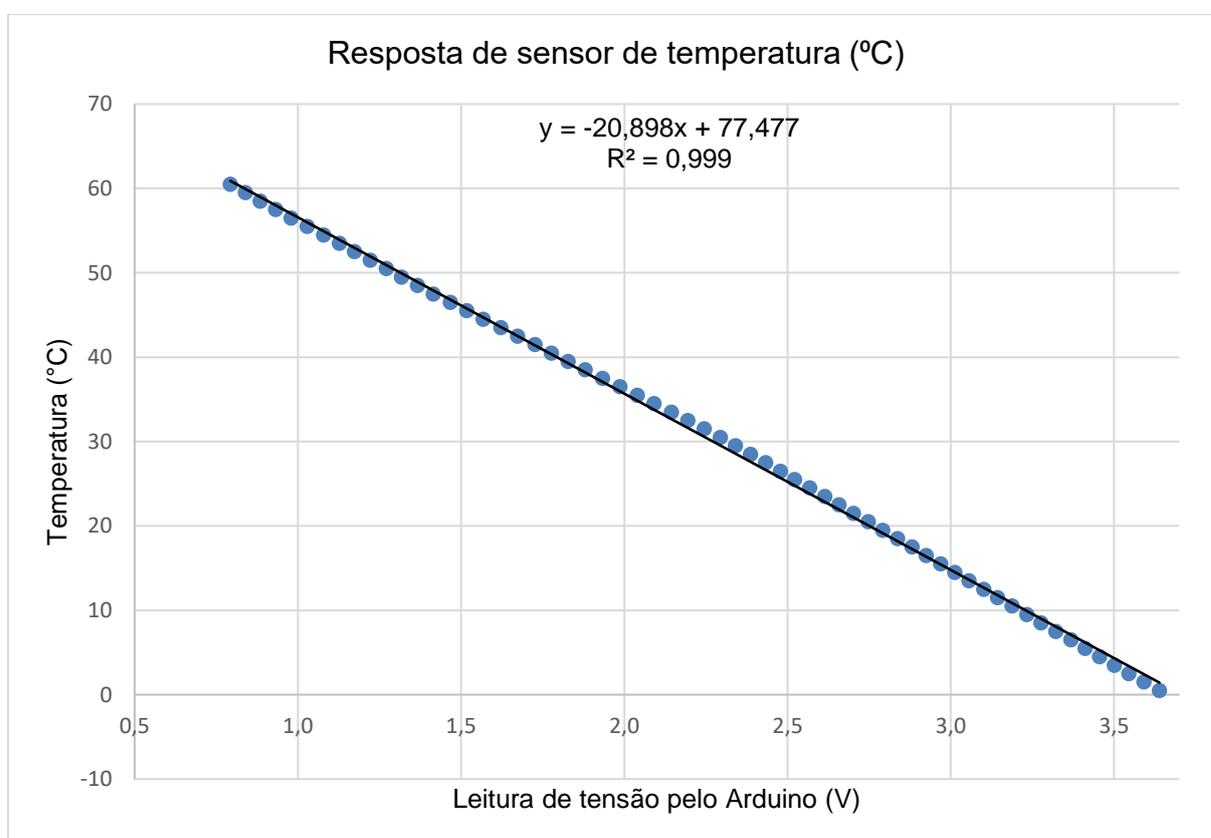


Figura 46 – Resposta de sensor de temperatura NTC-10k do condutivímetro.

O coeficiente de determinação é de 0,999, o que indica uma boa representação pela função dos dados coletados.

4.1.2.2 Medidor de Condutividade

Antes do início dos testes de cultivo em bancada hidropônica foi levantado a resposta do medidor de condutividade, o qual teve seu circuito e sua programação

criados para esta aplicação. Os dados coletados constam no Anexo K, com as medições comparando os três medidores, medidor de bancada, portátil e do sistema automatizado. A comparação entre os três medidores se deve ao fato de ser realizado o acompanhamento/verificação da condutividade com o medidor portátil.

A função que representa a condutividade do líquido lido pelo Arduino Mega, é dado por regressão logarítmica, conforme Equação (19).

$$CE_{\text{líquido}} = -2,205 * \text{Leitura Arduino}(V) + 3,0508 \text{ (mS.cm}^{-1}\text{)} \quad (19)$$

Apresentando coeficiente de determinação de 0,9987, indicando uma boa representação pela função dos dados coletados, conforme Figura 47.

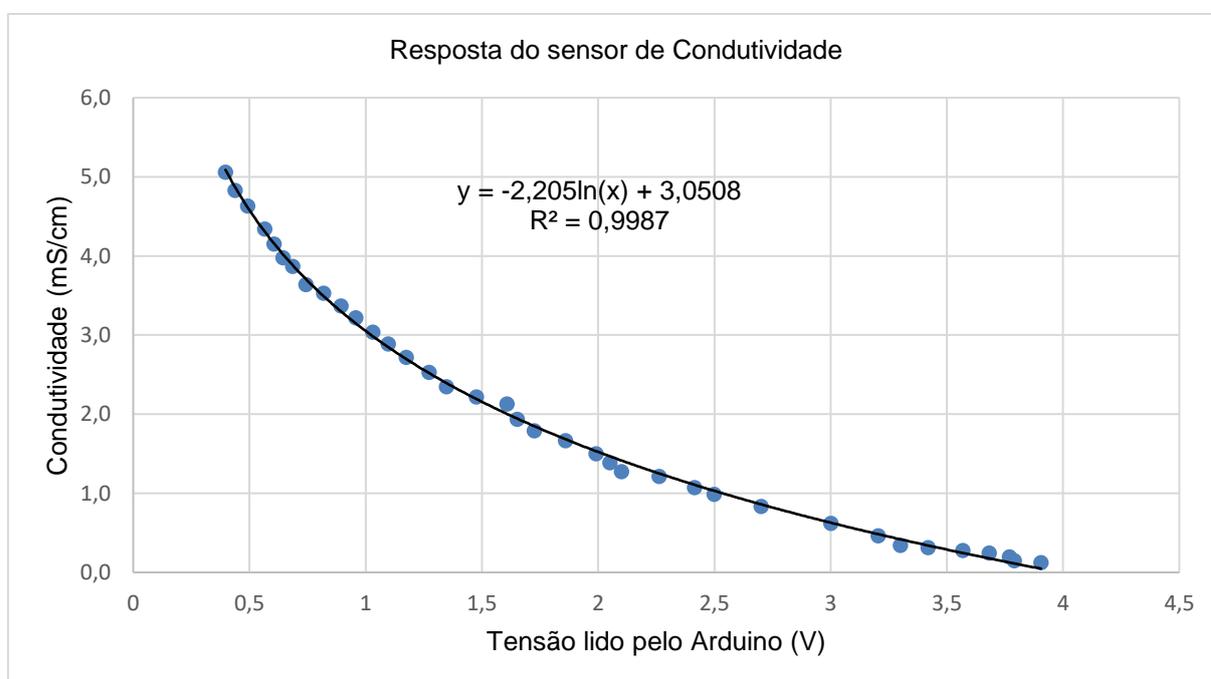


Figura 47 – Resposta do condutivímetro do sistema automatizado em relação ao de bancada antes do início dos testes de cultivo hidropônico.

Durante o acompanhamento da CE com o medidor portátil foi observado que o medidor do sistema automatizado realizou medições em corretamente até uma condutividade de $1,20 \text{ mS.cm}^{-1}$, porém após passar desse valor o sensor do sistema automatizado sofreu uma descalibração, devido ao tempo imerso na solução nutritiva e porque o sistema adicionou uma quantidade de solução nutritiva maior do que o necessário, elevando a CE de $1,20 \text{ mS.cm}^{-1}$ para $2,5 \text{ mS.cm}^{-1}$. A CE foi reestabelecida manualmente, retirando parte da solução nutritiva e adicionando água novamente. O erro ocorreu devido a variação muito baixa da CE entre uma leitura e outra, em que o sistema interpretou que a quantidade da solução nutritiva inserida no último

acionamento das bombas peristálticas alterou muito pouco a CE, passando a jogar uma quantidade muito elevada no próximo acionamento. O problema foi contornado limitando o tempo de acionamento para 2 minutos, evitando excessos em caso de erros de medições.

Outro problema observado foi que a cada inserção da solução nutritiva no tanque a condutividade apresentava um fator de $0,03 \text{ mS.cm}^{-1}$ inferior à medida correta comparada com o medidor portátil. O problema foi corrigido com a utilização da função logarítmica (Equação (19) acrescentada de um fator de 0,03 ao valor da constante de 3,0508 da função em cada nova inserção da solução nutritiva, conforme Equação (20).

$$CE_{\text{líquido}} = -2,205 * \text{Leitura Arduino}(V) + 3,0508 + \text{fator de calibração (mS.cm}^{-1}) \quad (20)$$

O fator da descalibração se deve ao fato de que com o aumento da CE no tanque, a concentração de sais em volta dos eletrodos aumentar a resistência do circuito (Figura 48), diminuindo a condutividade da medição, necessitando de um acréscimo compensativo.



Figura 48 – Oxidação provocada pela ação salina da solução em volta dos eletrodos do condutivímetro.

Ao final do teste do cultivo hidropônico, foram levantados novamente os dados de resposta do condutivímetro para verificar sua precisão. Os dados medidos constam no Anexo L.

Com o novo levantamento de resposta do sensor, a função que melhor representa a condutividade do líquido lido pelo Arduino Mega, é dado pela função polinomial quadrática, conforme Equação (21).

$$CE_{\text{líquido}} = 2,8698 * \text{Leitura Arduino}(V)^2 - 24,577 * \text{Leitura Arduino}(V) + 52,815 \text{ (mS.cm}^{-1}) \quad (21)$$

Apresentando coeficiente de determinação de 0,9985, indicando uma boa representação pela função dos dados coletados, conforme Figura 49.

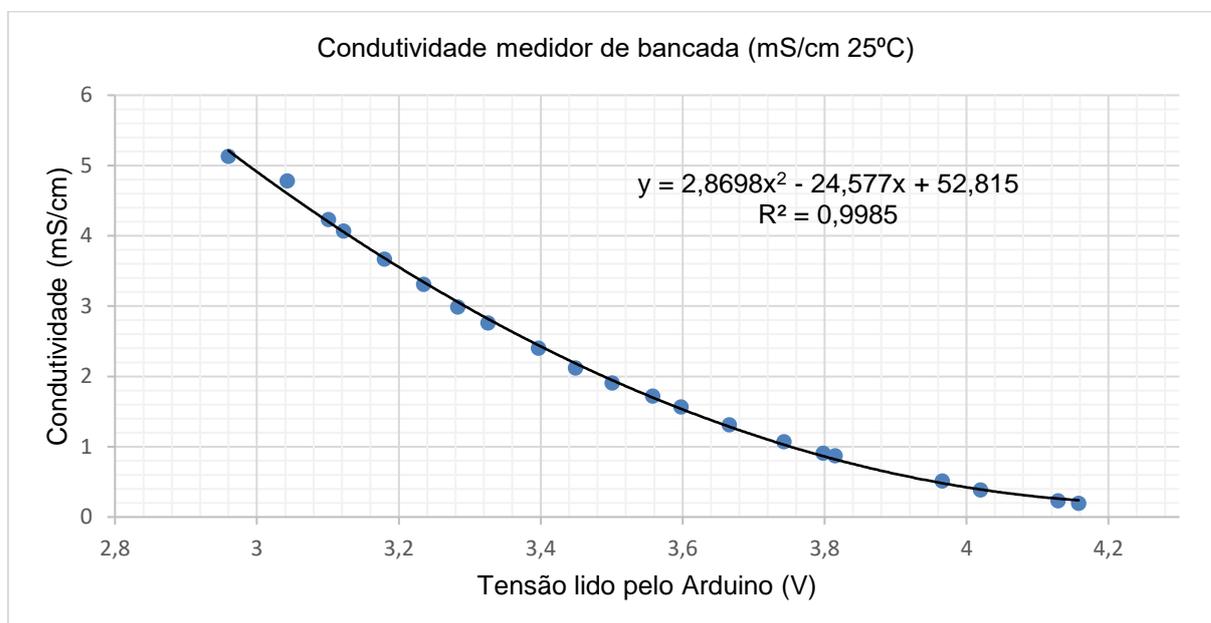


Figura 49 – Resposta do condutivímetro do sistema automatizado em relação ao de bancada no final do cultivo hidropônico.

Verificando a diferença dos resultados entre as Equações inicial (logarítmica), inicial com valor de calibração de final do cultivo (logarítmica com acréscimo de calibração) e final (polinomial), conforme Tabela 7, pode-se observar um erro que varia de 0,24 até 4,55 mS.cm⁻¹ comparado a função inicial com a função final de calibração, sendo prejudicial para as plantas um erro dessa magnitude. Já a função inicial adicionando o fator de calibração apresentou diferença de 0,117 a 0,340 mS.cm⁻¹, com a condutividade real próxima de 2 mS.cm⁻¹, erros considerados aceitáveis para o cultivo hidropônico de alface.

Tabela 7 – Diferenças entre repostas iniciais de finais do sensor de condutividade

| Tensão-Ard (V) | Cond (mS/cm) | Função inicial $-2,205 \cdot \ln(x) + 3,0508$ | Função inicial + Calibração $-2,205 \cdot \ln(x) + 4,8$ | Função Final Polinomial | Erro CE Final - Inicial (mS/cm) | Erro CE Final - Inicial Ca- librado (mS/cm) |
|----------------|--------------|--|---|----------------------------|--|---|
| 4,158 | 0,1945 | -0,091 | 1,658 | 0,240 | 0,331 | -1,418 |
| 4,129 | 0,2309 | -0,076 | 1,673 | 0,263 | 0,339 | -1,410 |
| 4,020 | 0,3874 | -0,017 | 1,732 | 0,393 | 0,410 | -1,340 |
| 3,966 | 0,5147 | 0,013 | 1,762 | 0,482 | 0,469 | -1,280 |
| 3,815 | 0,8705 | 0,098 | 1,848 | 0,821 | 0,723 | -1,026 |

Tabela 7 – Continuação.

| | | | | | | |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 3,798 | 0,9088 | 0,108 | 1,857 | 0,868 | 0,760 | -0,990 |
| 3,743 | 1,073 | 0,140 | 1,890 | 1,029 | 0,889 | -0,860 |
| 3,666 | 1,310 | 0,186 | 1,935 | 1,285 | 1,098 | -0,651 |
| 3,598 | 1,566 | 0,228 | 1,977 | 1,538 | 1,311 | -0,439 |
| 3,558 | 1,719 | 0,252 | 2,001 | 1,700 | 1,448 | -0,302 |
| 3,501 | 1,907 | 0,288 | 2,037 | 1,946 | 1,658 | -0,091 |
| 3,449 | 2,12 | 0,321 | 2,070 | 2,187 | 1,866 | 0,117 |
| 3,397 | 2,40 | 0,354 | 2,104 | 2,443 | 2,089 | 0,340 |
| 3,326 | 2,76 | 0,401 | 2,150 | 2,818 | 2,418 | 0,668 |
| 3,283 | 2,99 | 0,430 | 2,179 | 3,060 | 2,630 | 0,881 |
| 3,235 | 3,31 | 0,462 | 2,211 | 3,342 | 2,879 | 1,130 |
| 3,180 | 3,67 | 0,500 | 2,249 | 3,681 | 3,181 | 1,432 |
| 3,122 | 4,07 | 0,540 | 2,290 | 4,057 | 3,517 | 1,768 |
| 3,101 | 4,23 | 0,555 | 2,305 | 4,198 | 3,643 | 1,894 |
| 3,043 | 4,78 | 0,597 | 2,346 | 4,601 | 4,004 | 2,255 |
| 2,960 | 5,13 | 0,658 | 2,407 | 5,211 | 4,553 | 2,804 |

4.1.2.3 Sensor de entupimento de perfis ou de bomba danificada

Para verificar o entupimento de perfis e se a bomba está danificada ou obstruída foi construído o sensor no final dos perfis, o qual detecta a passagem da solução nutritiva que deve ocorrer em um determinado tempo, caso não seja detectada a passagem o perfil está obstruído, podendo perder todas as plantas deste perfil. O sensor de passagem de solução nutritiva foi inicialmente construído apenas com dois eletrodos, um terminal positivo por bancada e um terminal de retorno para o arduino, conforme Figura 50 a). Porém, como a saída da solução nutritiva no final do perfil ocorre algumas vezes pelas laterais e não pelo centro, a detecção nem sempre ocorre. A solução apresentada na Figura 50 b), foi aumentar a quantidade de terminais ao longo da saída do perfil, com os terminais intercalados entre positivo e retorno.

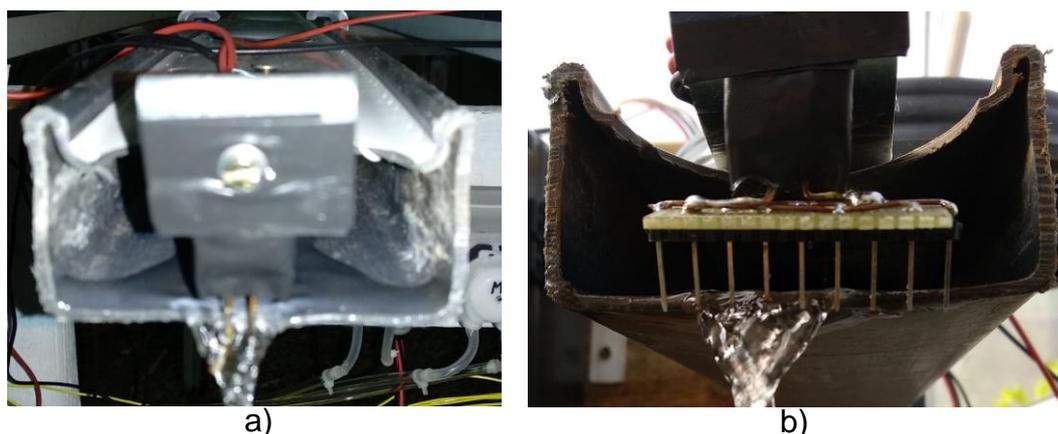


Figura 50 – Conexão de terminais para detecção da solução nutritiva a) forma inicial b) forma final.

O tempo de detecção da solução nutritiva no final de cada perfil, pode ser visto na Tabela 8. Os testes demonstraram que o sensor foi eficaz em detectar a passagem da solução nutritiva nos perfis, pode-se perceber que o perfil 1 sempre recebe a solução nutritiva antes que os perfis 2 e 3. Isto ocorre na mesma sequência de chegada da solução nutritiva aos perfis, devido a entrada da solução nutritiva no início dos perfis estar mais próxima do perfil 1, posteriormente do perfil 2 e 3.

Tabela 8 – Teste de tempo de detecção de passagem da solução nutritiva no final dos perfis ao longo do teste de cultivo hidropônico

| Nº Teste | Tempo Perfil 1 (ms) | Tempo Perfil 2 (ms) | Tempo Perfil 3 (ms) | Tempo Perfis 1,2 e 3 (ms) | Desl 1 | Desl 2 | Desl 3 |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|--------|--------|--------|
| Teste inicial sem as mudas nos perfis | | | | | | | |
| Teste 1: | 12454 | 13304 | 13604 | 13656 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 2: | 13002 | 13354 | 13553 | 13457 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 3: | 13103 | 13354 | 13554 | 13657 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 4: | 13053 | 13354 | 13504 | 13457 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 5: | 13004 | 13353 | 13503 | 13506 | 0 | 0 | 0 |
| Média: | 12923 | 13344 | 13544 | 13547 | | | |
| Teste inicial com as mudas nos perfis | | | | | | | |
| Teste 1: | 23657 | 26207 | 27708 | 27262 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 2: | 24257 | 26307 | 27457 | 27111 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 3: | 24556 | 25957 | 27207 | 26962 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 4: | 24406 | 25958 | 26707 | 26962 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 5: | 23256 | 26106 | 27057 | 27012 | 0 | 0 | 0 |
| Média: | 24026 | 26107 | 27227 | 27062 | | | |
| Teste intermediário durante o cultivo com as mudas nos perfis | | | | | | | |
| Teste 1: | 23006 | 27257 | 28508 | 28563 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 2: | 24307 | 27307 | 28408 | 28463 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 3: | 24257 | 27358 | 28407 | 28363 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 8 – Continuação.

| | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|---|---|---|
| Teste 4: | 24357 | 27357 | 28308 | 28312 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 5: | 24305 | 27307 | 28408 | 28413 | 0 | 0 | 0 |
| Média: | 24046 | 27317 | 28408 | 28423 | | | |
| Teste final do cultivo com as mudas nos perfis | | | | | | | |
| Teste 1: | 34709 | 37709 | 39160 | 39118 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 2: | 33008 | 37911 | 39161 | 39168 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 3: | 33009 | 38010 | 39160 | 39168 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 4: | 33058 | 37860 | 39260 | 39269 | 0 | 0 | 0 |
| Teste 5: | 33058 | 37859 | 39210 | 39168 | 0 | 0 | 0 |
| Média: | 33368 | 37870 | 39190 | 39178 | | | |

A permanência de líquido da solução nutritiva nos terminais de detecção após o desligamento da bomba poderia incorrer em erros de leitura, acusando que existe a passagem quando poderia não ter. Para verificar essa possibilidade, foram feitos testes deixando a bomba desligada e verificando se os contatos apresentavam condução elétrica. Os testes demonstraram que quando a bomba não é acionada e ligando ao mesmo tempo o terminal de alimentação da bancada, os terminais de retorno não receberam energia, conforme colunas “Desl 1”, “Desl 2” e “Desl 3” da Tabela 8. Caso apresentassem condução o valor da variável da coluna seria 1, o que demonstraria o acúmulo de líquido nos terminais, que poderiam apresentar falsas medições, mesmo sem a passagem da solução nutritiva.

Um fato observado foi que, com o crescimento das raízes, a solução nutritiva leva mais tempo para percorrer o perfil, a saída da solução nutritiva ocorre com uma velocidade cada vez menor. As raízes retardam o fluxo e, inicialmente após o início da rega, ao final do perfil surge uma fina lâmina de solução. Por isso, os terminais dos sensores devem ser posicionados bem próximos à saída do perfil.

Outro problema observado foi o desgaste dos terminais devido ao efeito de eletrólise, conforme Figura 51, que diminui seu tempo de vida útil, aumentando sua manutenção e substituição. Por isso, o ideal é que sejam construídos de aço inox, ou que a medição seja feita com sensores sem contato direto com o líquido, como com sensores indutivos.

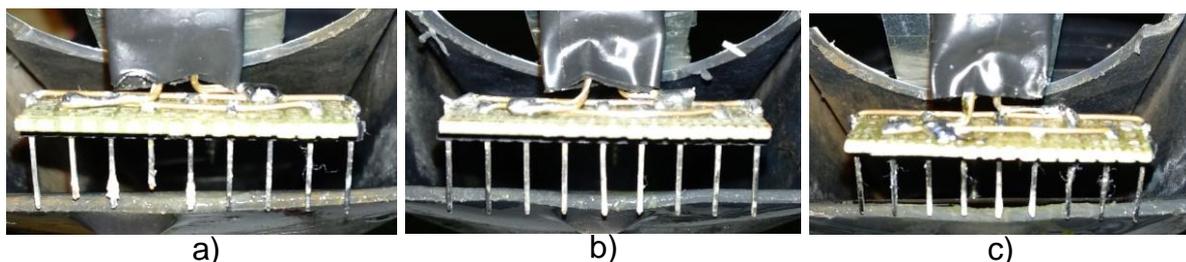


Figura 51 – Desgaste dos terminais durante o período dos testes, a) Perfil 1, b) Perfil 2, c) Perfil 3.

4.1.2.4 Sensor de queda de tensão da rede elétrica

A programação foi realizada para que a detecção da alimentação de energia da rede seja feita por interrupção do tipo “FALLING”, acionando a interrupção quando o pino passa de nível alto para baixo (de 5 V para 0 V). Isto faz com que, independentemente da posição em que a programação está sendo executada, irá atender a interrupção, ligando a alimentação do sistema todo pela bateria, e então retorna para onde estava sendo executado o código.

O teste para verificação da alimentação consistiu em ligar e desligar a alimentação da rede, bem como verificar pela tela do sistema hidropônico (Figura 52) e via serial na tela do computador (Figura 53). Quando existe a queda de energia da rede, o sistema mantém os leds verde e vermelho ligados ao mesmo tempo, indicando que o sistema está funcionando, porém apenas com energia da bateria.

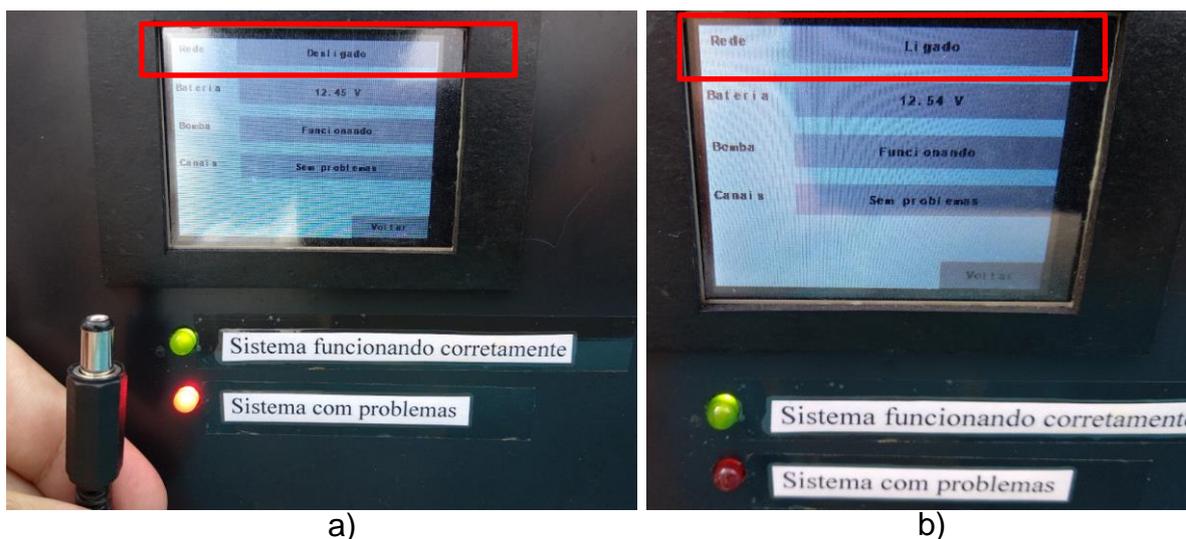


Figura 52 – Testes de detecção de queda de energia e alimentação de emergência por bateria, a) Sem energia da Rede, b) Com energia da Rede.

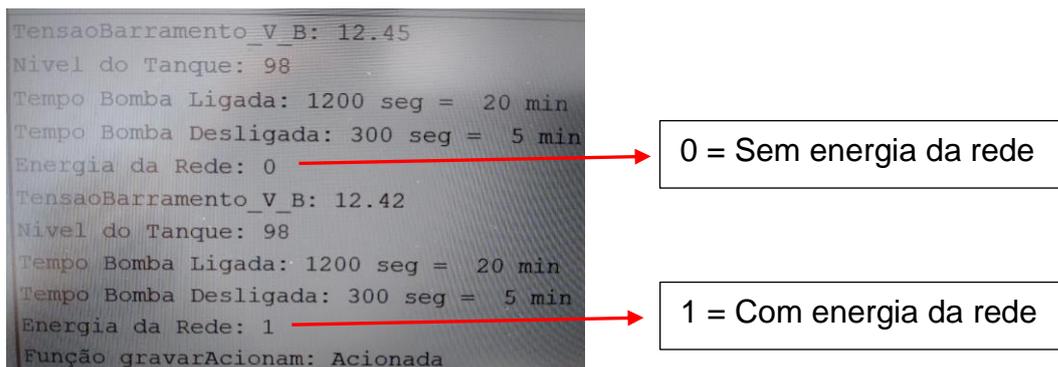


Figura 53 – Informação de dados via serial usb, para computador.

Para as 20 manobras, desligando e religado a energia da rede o sistema funcionou corretamente, tanto via tela do sistema como via serial usb pelo computador.

4.1.3 Programação geral do sistema

O sistema de temporização da bomba de solução nutritiva dependente da iluminação, temperatura e umidade relativa do ar funcionou conforme programado. Para o dia 21/02/2019 a Figura 54 mostra a variação da iluminação dentro da casa de vegetação, atingindo seu valor máximo das 11h às 16h, conforme dados no Anexo M.

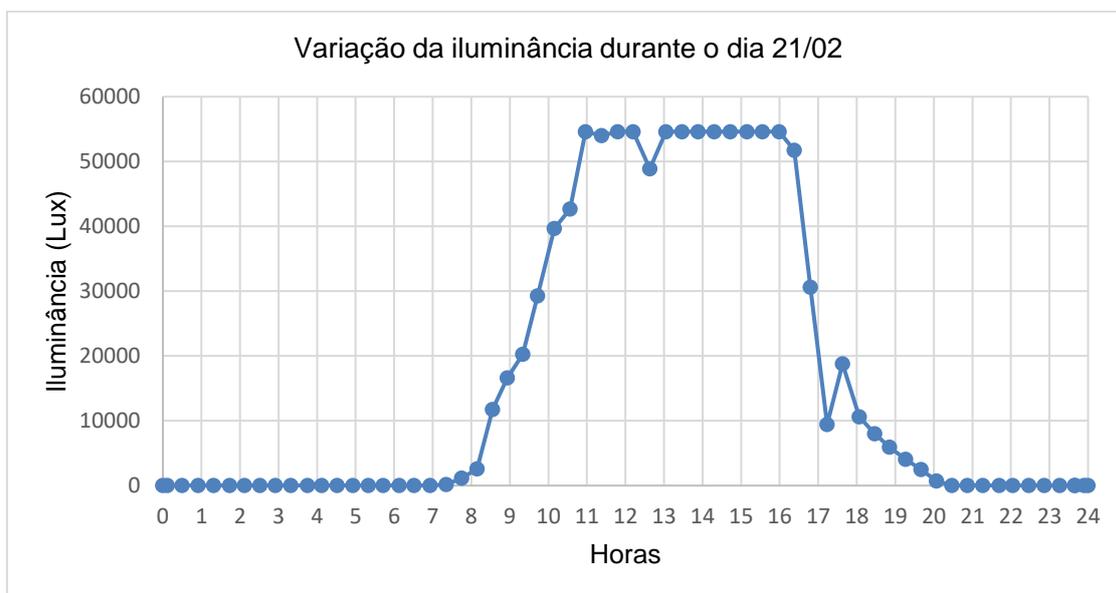


Figura 54 – Variação da iluminação durante o dia 21/02/2019.

A variação da temperatura e da umidade relativa do ar para o dia 21/02/2019 pode ser vista na Figura 55. Nota-se que a umidade relativa dentro da casa de vegetação sofre uma queda significativa durante o dia, com uma queda de 99,9% à noite

para 21,9% durante o dia. Da mesma forma, a temperatura apresenta variações significativas, passando de 20,6 °C durante a noite para 56,6 °C durante o dia.

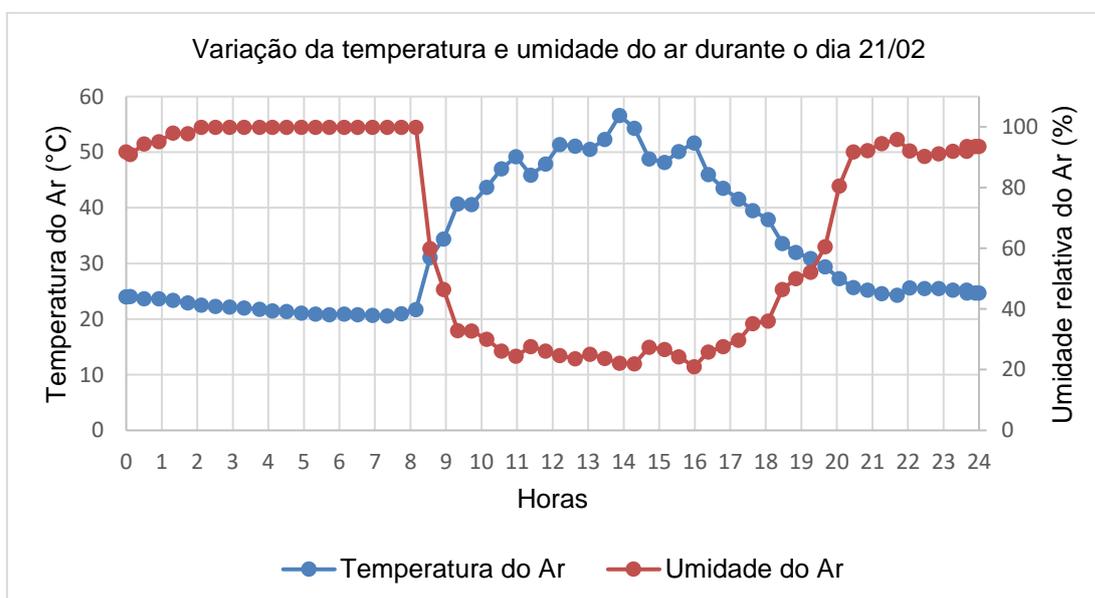


Figura 55 – Variação da temperatura e da umidade relativa do ar durante o dia 21/02/2019.

A variação do tempo de bomba ligada e desligada para o turno de rega para o dia 21/02/2019 pode ser vista na Figura 56. Nota-se que entre às 10h e 18h o tempo de bomba ligada se estabelece em seu valor máximo de 20 minutos, assim como o tempo de bomba desligada se estabelece no valor mínimo de 5 minutos, isto devido aos altos valores de iluminância e temperatura do ar, assim como a baixa umidade relativa do ar. Com o sistema criado, para o dia 21/02/2019 o sistema ficou com maior tempo de bomba ligada das 9h às 20h, e no período das 0h às 9 h e das 20h às 24h o tempo de bomba desligada foi superior ao de ligada.

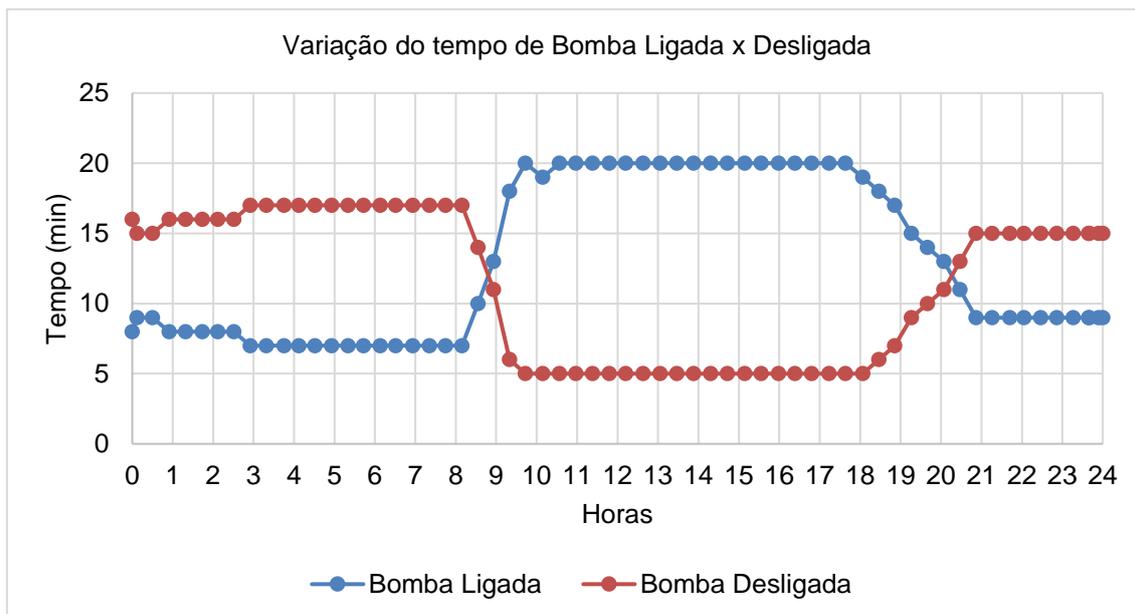


Figura 56 – Variação do tempo de turno de rega em função da iluminância, temperatura e umidade relativa do ar para o sistema automatizado.

O sistema automatizado criado, em que o tempo de acionamento da bomba de fluxo da solução nutritiva em função inversamente proporcional à umidade relativa do ar e proporcional à iluminância e a temperatura, pode auxiliar a planta a ter uma melhor circulação da solução nutritiva dependendo dos fatores climáticos adversos que podem prejudicar seu desenvolvimento.

Para a leitura dos sensores de passagem da solução nutritiva de perfis, a programação teve de ser alterada em função do aumento do tempo que a circulação da solução nutritiva leva para chegar até o final do perfil a partir do momento de acionamento da bomba, isto devido ao aumento do tamanho das raízes das plantas que reduzem a velocidade de passagem da solução nutritiva com o crescimento do cultivo.

Já o controle do pH se mostrou impraticável, uma vez que com o sensor utilizado sua medição apresenta uma variação muito elevada quando instalado no tanque, continuamente submerso. Mesmo com uma tentativa de estabilizar sua leitura por programação não foi possível utilizar para controlar o pH, uma vez que um acréscimo de base ou ácido em grandes quantidades poderiam ser inseridas de forma equivocada pudessem comprometer todo o cultivo. Para as medições em pequenos recipientes e com as soluções de pH 4 e pH 7 o medidor forneceu medidas próximas e estáveis, mas ao ser inserido no tanque com 200L apresentou variações de 2,51 à 7,99 no pH, quando o pH real era de 5,39 e 5,38, respectivamente.

4.1.4 Consumo de energia

O sistema apresenta um consumo com: a bomba ligada e a tela desligada em torno de 9 W da Rede; quando a tela e a bomba estão ligadas o consumo sobe para aproximadamente 11 W; e quando a bomba e a tela estão desligadas o consumo é de aproximadamente 2 W. No momento em que é acionado o sistema de controle da condutividade com as três bombas peristálticas, estando a tela desligada, o consumo foi de 15,4 W.

Utilizando o multímetro Unit UT71E, medindo o consumo do sistema com a fonte de 220VCA-19VCC utilizada para alimentar o sistema, a média da potência do sistema automatizado para um período de 24h foi de 5,77 W, sem considerar o consumo da bateria, pois o multímetro mede a potência apenas em CA.

Já com o medidor INA219 a média da potência para um período de 24h foi de 5,727 W, porém a medição é após a fonte de 19 V, medido em CC. Considerando que a fonte apresenta perdas de potência, os resultados apresentados estão coerentes. A média de potência fornecida pela bateria durante o mesmo período foi de 1,821 W, medido pelo sensor INA219. A média de potência total fornecida (fonte + bateria) para um período de 24 h é de aproximadamente 7,548 W, que representa um consumo de 181,15 W.h.dia⁻¹.

Considerando a tarifa atual da concessionária da Copel para um consumidor subgrupo B1 (residencial) de 0,769 R\$.kW⁻¹.h⁻¹. Em um mês o custo é de aproximadamente:

$$Custo = Energia * Tarifa = (0,007548 * 24 * 30) * 0,769 = R\$ 4,18$$

4.1.5 Dimensionamento do sistema fotovoltaico

Considerando que para a instalação do módulo é adotado plano inclinado aos 27° N, ângulo igual a latitude, o fator HSP adotado é considerando para o mês de junho, o qual apresenta menor valor, 3,68 h.dia⁻¹. Dado o valor médio diário de energia requerida de 181,15 Wh.dia⁻¹, a potência necessária para o painel fotovoltaico é obtida a partir da Equação (7).

$$P_m = \frac{181,15}{3,68 * 0,75 * 0,9} = 72,927 W \quad (22)$$

Com base na potência dos painéis (P_m) calculada pela Equação (22), obtém-se, a seguir, por meio da Equação (9), a corrente que deve ser gerada pelo painel fotovoltaico:

$$I_m = \frac{72,927}{12} = 6,077 \text{ A} \quad (23)$$

O módulo fotovoltaico adotado é da marca Komaes, modelo KM(P)85, 85 Wp, I_{sc} de 5,1A.

O número de módulos a serem conectados em paralelo é dado pela Equação (10):

$$N^0_{mod-par} = \frac{6,077}{5,1 * 1,25} = 0,95 \cong 1 \quad (24)$$

4.1.6 Dimensionamento de Baterias

Para o dimensionamento da bateria é adotado para a eficiência global da bateria um fator de 0,8, e com o consumo médio diário de 181,15 Wh.dia⁻¹, é possível definir o consumo em Wh.dia⁻¹ do projeto:

$$E_C = \frac{181,15}{0,8} = 226,44 \text{ (Wh. dia}^{-1}\text{)} \quad (25)$$

Considerando uma profundidade de descarga de 30%, a energia a ser armazenada é de:

$$E_A = \frac{226,44 * 4}{0,30} = 3019,167 \text{ Wh} \quad (26)$$

A determinação da capacidade de carga do banco de baterias é:

$$C_{\text{banco de baterias}} = \frac{3019,167}{12} = 251,59 \text{ Ah} \quad (27)$$

O número de baterias em paralelo é:

$$N_{BatPar} = \frac{251,59}{70} = 3,59 \cong 4 \text{ Baterias} \quad (28)$$

Assim, são necessárias 4 baterias de 70 Ah, com uma profundidade de descarga de 30%, para uma autonomia de 4 dias.

4.1.7 Análise do sistema hidropônico convencional e automatizado

As mudas de alface crespa do sistema automatizado obtiveram valores de massa inicial, massa final e ganhos de massas conforme Tabela 9, considerando o período de 12 dias de cultivo.

Tabela 9 – Massas das mudas de alface crespa no início e no final do cultivo no sistema automatizado

| Sistema automatizado | | | | | | | | | |
|----------------------|------------------|----------------|----------------------|------------------|----------------|----------------------|------------------|----------------|----------------------|
| | Perfil 1A | | | Perfil 2A | | | Perfil 3A | | |
| Posi- ção | Massa inicial | Massa final | Ganho de massa | Massa inicial | Massa final | Ganho de massa | Massa inicial | Massa final | Ganho de massa |
| 1 | 0,88 | 14,35 | 13,47 | 1,09 | 18,4 | 17,31 | 1,39 | 15,46 | 14,07 |
| 2 | 1,49 | 21,98 | 20,49 | 1,41 | 17,14 | 15,73 | 1,06 | 16,06 | 15,00 |
| 3 | 1,69 | 20,6 | 18,91 | 1,19 | 16,28 | 15,09 | 1,38 | 14,99 | 13,61 |
| 4 | 1,23 | 19,49 | 18,26 | 1,18 | 19,52 | 18,34 | 1,15 | 18,79 | 17,64 |
| 5 | 1,10 | 17,33 | 16,23 | 1,12 | 16,19 | 15,07 | 1,00 | 13,23 | 12,23 |
| 6 | 1,15 | 19,3 | 18,15 | 0,92 | 15,41 | 14,49 | 1,43 | 14,92 | 13,49 |
| 7 | 1,38 | 15,52 | 14,14 | 1,19 | 16,9 | 15,71 | 1,28 | 22,8 | 21,52 |
| 8 | 1,56 | 24,74 | 23,18 | 0,81 | 13,85 | 13,04 | 1,55 | 20,39 | 18,84 |
| 9 | 1,19 | 12,95 | 11,76 | 1,18 | 15,76 | 14,58 | 1,18 | 17,07 | 15,89 |
| 10 | 1,21 | 5,74 | 4,53 | 1,47 | 23,9 | 22,43 | 0,98 | 15,72 | 14,74 |
| 11 | 1,14 | 12,92 | 11,78 | 1,22 | 18,64 | 17,42 | 1,13 | 18,28 | 17,15 |
| 12 | 0,88 | 8,21 | 7,33 | 1,92 | 26,75 | 24,83 | 1,37 | 20,63 | 19,26 |
| 13 | 1,51 | 17,91 | 16,4 | 0,9 | 13,35 | 12,45 | 0,71 | 9,3 | 8,59 |
| 14 | 0,98 | 9,62 | 8,64 | 1,34 | 17,12 | 15,78 | 0,85 | 24,68 | 23,83 |
| 15 | 1,07 | 13,88 | 12,81 | 1,26 | 17,64 | 16,38 | 1,54 | 27,86 | 26,32 |
| 16 | 1,44 | 10,63 | 9,19 | 1,10 | 10,96 | 9,86 | 1,24 | 22,63 | 21,39 |
| Média | 1,24 | 15,32 | 14,08 | 1,21 | 17,36 | 16,16 | 1,20 | 18,30 | 17,10 |

A partir da média de ganho de massa pode-se perceber que houve um ganho de massa maior para o perfil ligado mais ao final do cano da entrada da solução nutritiva, com ganhos de 14,08 g, 16,16 g e 17,10 g para a entrada no perfil 1, 2 e 3, respectivamente.

A Figura 57 apresenta a variação do tempo de bomba ligada e desligada do sistema automatizado para o dia 21/02/2019, em comparação ao que é praticado geralmente com um sistema convencional com timer analógico. Com o sistema automatizado pode-se perceber que a variação do tempo de acionamento da motobomba apresentou uma suavização na inversão dos períodos dos turnos de rega em relação ao que é praticado com um sistema convencional com timer analógico, em que são

ajustados tempos múltiplos de 15 minutos, geralmente com 30 min ligados e 15 min desligados das 6h às 22h e com 15 min ligados e 60 min desligados das 22h às 6h.

O sistema automatizado apresenta sua variação do tempo de acionamento da bomba conforme as variações da iluminância, temperatura e umidade do ar, o que para o início do dia essas variações apresentam uma variação mais rápida, das 8h às 9:30h (Figura 57), pois, ao aparecer a iluminação solar, logo se aquece em uma casa de vegetação, porém ao entardecer o sistema mantém por um período maior sua temperatura e umidade do ar na casa de vegetação, apresentando uma variação do tempo de bomba acionada e desligada com um tempo mais lento, das 18h às 21h (Figura 57).

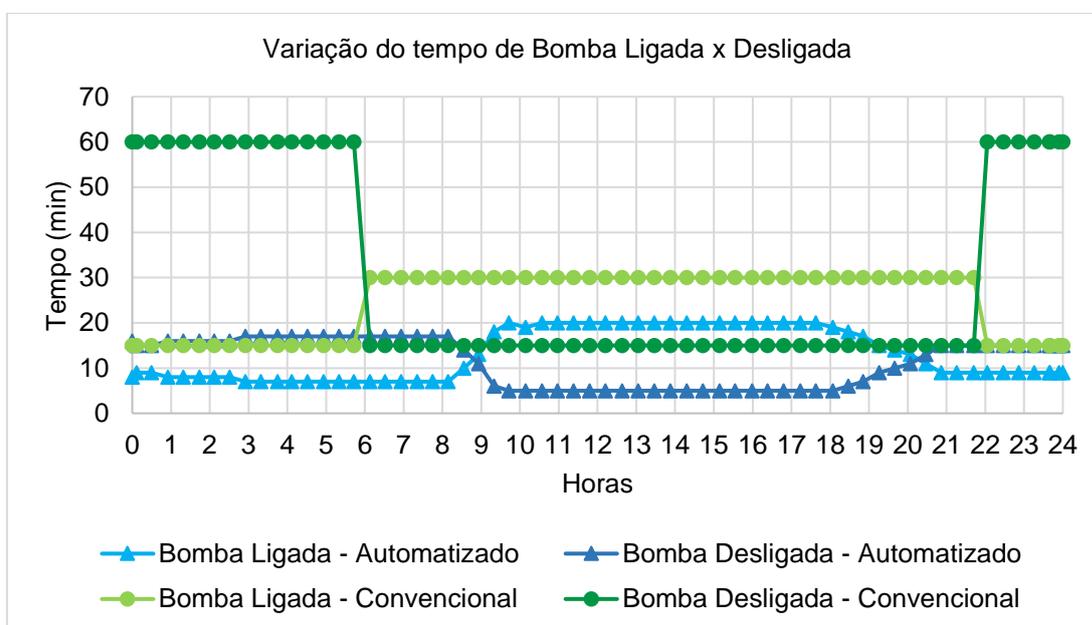


Figura 57 – Variação do tempo de bomba ligada e desligada para o sistema automatizado comparado com um convencional.

Já para um sistema convencional as variações do tempo de bomba ligada e desligada são de 15 a 30 minutos, conforme a configuração ajustada, pois é o período disponível no timer analógico.

Nos testes do sistema automatizado foram ajustados para que os tempos de bomba ligada e bomba desligada fossem de no mínimo 5min e no máximo 20 minutos, respectivamente, porém esse tempo pode ser ajustado.

Pode-se perceber que o sistema apresentou uma saturação entre as 10 e 17h, pois os fatores foram ajustados para valores que foram ultrapassados durante esse período. A iluminação ultrapassou os 40.000 lux, a temperatura do ar ultrapassou os

40 °C, e a umidade relativa do ficou próximo do valor mínimo de 20%, conforme dados no Anexo M.

4.1.8 Levantamento de custos do projeto

O custo total de cada nível de automação para o sistema hidropônico é apresentado na Tabela 10. O sistema hidropônico automatizado básico para uma bancada evidencia um custo de R\$ 657,90, e de R\$ 1.076,90 para 10 bancadas, considerando o custo por bancada, para todos os níveis dos sistemas com 10 bancadas o custo é menor em relação à uma bancada, pois o sistema necessita apenas de uma quantidade maior de motobombas e uma fonte de alimentação com capacidade maior.

Tabela 10 – Custo de diferentes níveis do sistema hidropônico automatizado

| Sistema | Custo (R\$) | |
|--------------------------------|--------------------|--------------------|
| | 1 Bancada | 10 Bancadas |
| Básico (Anexo O e P) | 657,90 | 1.076,90 |
| Intermediário (Anexo Q e R) | 859,63 | 2.292,23 |
| Completo (Anexo S e T) | 2.183,03 | 7.458,73 |

O sistema se encarece quando são consideradas as baterias e o módulo fotovoltaico para o sistema completo, porém o sistema de automação é relativamente barato comparado ao lucro que pode ser obtido com as vendas do cultivo de alface e considerando o risco da perda das mudas por conta das falhas nos sistemas hidropônicos, visto que o sistema automatizado pode alertar para que o operador solucione a tempo.

O sistema foi realizado com uma bancada de 3 perfis, porém pode atender até 10 perfis, é necessário substituir a bomba de circulação da solução nutritiva para atender a demanda, além de aumentar o número de baterias e da capacidade da fonte de alimentação em CC.

O módulo de sensor de perfis foi considerado com uma baixa vida útil, de 3 meses, pois apresentou uma degradação acelerada, sendo que neste período será necessária sua substituição.

A descrição detalhada dos custos de cada componente e dos diferentes níveis do sistema automatizado pode ser vista nos Anexos N a T.

5. CONCLUSÕES

A automação modular do sistema hidropônico NFT de baixo custo relativo pode ser de grande ajuda para o manejo do cultivo de alface e outras culturas, pois pode reduzir perdas e o trabalho necessário para a correção da CE.

O sistema de automação modular de baixo custo relativo para o cultivo NFT proporcionou o controle da CE e do tempo de acionamento da motobomba para circulação da solução nutritiva, com seu tempo dependendo da iluminância, temperatura e umidade do ar o que proporcionou uma suavização na troca dos períodos dos turnos de rega que são variações bruscas no sistema convencional, pois o timer analógico não permite ajustes menores do que tempos múltiplos de 15 minutos. No entanto, o controle do pH não foi possível com o sensor PH-4502C continuamente submerso, pois apresentou variações de medição de pH de 2,51 à 7,99, quando o valor medidor com o medidor de referência era de 5,39 e 5,38, respectivamente, apenas em medições com pequenos recipientes com as soluções de pH 4 e pH 7, o medidor realizou medições próximas ao valor real. Como a variação aceitável do pH para o cultivo hidropônico de alface é entre 5,5 e 6,5, os valores do medidor não foi eficaz neste caso.

O sensor de CE criado para a aplicação se mostrou aplicável para o sistema, porém necessita de uma conferência e acompanhamento de calibração, pois, com o tempo, o acúmulo da sais em seus eletrodos alterou sua calibração significativamente, sendo necessário corrigi-la por meio da programação. Para aplicações que não exigem que o sensor esteja submerso continuamente sua medição apresenta um coeficiente de representação acima de 0,99 em relação ao medidor de bancada. Um sensor de condutividade indutivo poderia ser uma melhor opção, a ser analisado para esta condição considerando que o medidor deve ficar submerso todo o tempo. Já a medição da temperatura com o NTC 10k acoplado ao condutímetro não apresentou descalibração ao longo do teste, com um coeficiente de representação de 0,999 em relação ao medidor de bancada utilizado como referência, indicando uma boa representação pela função dos dados coletados.

O sensor de queda de energia provou ser confiável quanto à alimentação de emergência por baterias em caso de queda de energia da rede, gerando alertas visuais e sonoros para o operador. O sensor de identificação da passagem da solução nutritiva e identificação de bomba danificada pelos terminais instalados no final do

perfil apresentou ser funcional, porém com baixa vida útil, estimado em 3 meses devido à deterioração dos terminais pelo efeito de eletrólise, o qual pode ser solucionado com a utilização de terminais de aço inoxidável, ou com a detecção por indução, sem o contato com a solução nutritiva.

O sistema montado com uma tela sensível ao toque apresentou uma interface de fácil visualização e manuseio pelo operador o que pode contribuir para a aceitação como produto comercial.

Para o estudo com apenas três perfis na bancada, uma bomba com potência de 2,23W é o suficiente para atender a demanda. O sistema de automação apresentou um baixo consumo de energia, com uma média de 7,548 W, que representa durante um dia $181,15 \text{ W.h.dia}^{-1}$. Com a tarifa para consumidor B1 de $0,769 \text{ R\$.kW}^{-1}.\text{h}^{-1}$ o custo mensal seria de aproximadamente R\$ 4,18.

Para o funcionamento do sistema hidropônico automatizado isolado da rede de energia com módulo fotovoltaico e uma autonomia de 4 dias com banco de baterias, o sistema necessita de um painel de 73 W ou superior, e de 4 baterias de 70 Ah.

O sistema hidropônico automatizado na configuração básica para uma e para dez bancadas apresentou custo relativamente baixo de R\$ 657,90 e R\$ 1.076,90 respectivamente, o qual não possui alimentação de emergência, apenas para emissão de alertas. O sistema com configuração intermediária para uma e para dez bancadas também apresentou custo relativamente baixo de R\$ 859,63 e R\$ 2.292,23, o qual possui baterias que podem alimentar durante um dia o sistema caso ocorra uma queda de energia, além da emissão de alertas para anomalias no sistema. Já para um sistema completo, isolado da rede, com alimentação por módulo fotovoltaico e reserva de energia durante 4 dias por baterias apresentou um custo relativamente alto de R\$ 2.183,03 e R\$ 7.458,73 para uma e para dez bancadas, respectivamente. Devido ao alto custo do módulo fotovoltaico e das baterias. O custo do sistema de automação ainda pode ser reduzido significativamente com a compra direta de componentes e sua montagem em uma placa de circuito impresso, sem a necessidade da compra dos módulos dos medidores.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Mapa dos Empreendimentos de Geração de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/portal/home/webmap/viewer.html?webmap=45374c61bd3e40e3a484878003fae937>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

ALBERONI R. B.; **Hidroponia**: Como instalar e manejar o plantio de hortaliças dispensando o uso do solo. São Paulo: Nobel, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6023**: informação e documentação / referências / elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

BELTRANO, José et al. **Cultivo en hidroponía**. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2015. Disponível em: <<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46752>>. Acesso em: 18 jul. 2018.

CALORI, Alex H. et al. Electrical conductivity and plant spacing on baby leaf table beet and lettuce production. **Horticultura Brasileira**, v.32, n.4, p.426-433, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620140000400009>>. Acesso em: 22 ago. 2018.

CAPELLI, Alexandre. **Automação industrial**: controle do movimento e processos contínuos. 3. ed. São Paulo: Érica, 2013.

CARUSO, G. et al. 2011. Effects of cultural cycles and nutrient solutions on plant growth, yield and fruit quality of alpine straw-berry (*Fragaria vesca* L.) grown in hydroponics. **Sci. Hort.** 129 (3), 479–485.

CARRUTHERS, Steven. **Hydroponic Gardening**. Australia: Casper Publications, 2015.

CASTRUCCI, P. de L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

CLIMATE-DATA. Dados climáticos para cidades mundiais. 2018. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/santa-catarina/sao-miguel-do-oeste-43599/>>. Acesso em 19 jul. 2018.

CRESESB. **Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio Brito**. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>>. Acesso em: 21 jul. 2018.

DALASTRA, C. **Nutrição e produção de alface americana em função da vazão, periodicidade de exposição e condutividade elétrica da solução nutritiva em**

sistema hidropônico. 2017. 102p. Tese (Doutor e Agronomia. Especialidade: Sistemas de Produção). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio De Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152065>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

DOUGLAS, J. S. **Hidroponia: cultura sem-terra**. 6.ed. São Paulo: Nobel, 1987. Fernando Ribeiro da Silva. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética]. **Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira**. Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: <http://bi-bsp.planejamento.gov.br/bitstream/handle/identem/242/NT_EnergiaSolar_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 jun. 2018.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Bombas, ventiladores e compressores: fundamentos**. São Paulo: Érica, 2015. 320 p.

FRANCHI, C. M. **Controle de processos industriais: princípios e aplicações**. São Paulo: Érica, 2011.

FURLANI, P.R. et al. **Cultivo Hidropônico de Plantas: Parte 2 - Solução Nutritiva**. 2009. Artigo em Hipertexto. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/hidroponiap2/index.htm>. Acesso em: 21 jun. 2018.

FURLANI, P.R. et al. 1999. Estruturas para o cultivo hidropônico. In: Informe Agropecuário: Cultivo protegido de hortaliças em solo e hidroponia. Silveira, **L.C.P.**; Bolo-nhezi, D. (Eds.); v. 20. n. 200/201. Maio/1999. p.25-40. Epamig. ISSN: 0102-0536. Belo Horizonte/MG.

GENUNCIO, G. C. et al. Hydroponic lettuce production in different concentrations and flow rates of nutrient solution. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 3, set. 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362012000300028>. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-05362012000300028>. Acesso em: 21 jun. 2018.

GILL, Reetinder. **Nutrient Management for Growing Dandelion (Taraxacum officinale L.) in Nutrient Film and Deep Flow Hydroponics**. 2016. 62p. Dissertação (Master of Science in Horticultur) - University of Arkansa, Fayetteville, 2015. Disponível em: <<http://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3044&context=etd>>. Acesso em: 17 jul. 2018.

GOLNARAGHI, M. F; KUO, B. C. **Sistemas de controle automático**. Tradução e revisão técnica Fernando Ribeiro da Silva. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GONDIM, A. R. O. Condutividade elétrica na produção e nutrição de alface em sistema de cultivo hidropônico NFT. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 894-904, dez. 2010. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7228>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

GOYAL, N. K. **Hydrobase: An IoT Gardening Application**. 2016. 81p. Dissertação (Master of Computer Science). Department of Computer Science, San Jose State University, San Jose/CA-USA, 2016. Disponível em: <http://scholarworks.sjsu.edu/etd_projects/503/>. Acesso em: 17 jul. 2018.

HIDROGOOD. **Hidrogood Fert Nacional**. Disponível em: <<https://hidrogood.com.br/produto/insumos/hidrogood-fert-nacional>>. Acesso em: 19 nov. 2018.

HUE, N.V.; SILVA, J.A.; ARIFIN, R. Sewage sludge-soil interactions by plants as measured by plant and soil chemical composition. **Journal of Environmental Quality**, v. 17, n.3, p. 384-390, 1988. DOI: 10.2134/jeq1988.00472425001700030007x. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/jeq/abstracts/17/3/JEQ0170030384>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Estações Automáticas. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoes-automaticas>>. Acesso em 19 jul. 2018.

JESUS FILHO, José Damião de. **Hidroponia: Cultivo sem solo**. Viçosa-MG: CPT, 2009.

LIMA, J. E. L. **Sistema de Comunicação e Controlo para Hidroponia.2014**. 142p. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecatrónica). Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga/Guimarães, Portugal, 2014. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/34363/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Jos%C3%A9%20Evaristo%20Lopes%20Lima_2014.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2018.

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. London: Academic Press, 1995.

MARTINEZ, H. E. P. **Manual prático de hidroponia**. 3.ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2016.

MORALES, Rafael. **Hidroponia catarinense cresce com o apoio da Epagri**. Revista Hidroponia, Novo Hamburgo, 13 set. 2017. Disponível em: <<http://www.revistahidroponia.com.br/noticias/29217/Hidroponia-catarinense-cresce-com-o-apoio-da-Epagri>>. Acesso em 21 jun. 2018.

NISE, Norman S. **Engenharia de sistemas de controle**. Tradução e revisão técnica Fernando Ribeiro da Silva. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

OLIVEIRA, Cláudio Luís Vieira; ZANETTI, Humberto Augusto Piovesana. **Arduino descomplicado**: como elaborar projetos de eletrônica. São Paulo: Érica, 2015.

PALANDE, V.; ZAHEER, A.; GEORGE, K. Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth. **Elsevier**, v.129, p.482-488, 2018. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918302473>>. Acesso em: 19 jul. 2018.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2018.

PEREZ E., Laura. **Hydroponics for the home**. San Jose, C.R.: IICA, 2008.

RAVIV, M.; LIETH, J. H. **Soilless Culture: Theory and Practice**. Amsterdam: Elseiver, 2008, 625p.

RESH, Howard M. **Hydroponics: Food Production**. New York: CRC Press, 2013.

RESH, Howard M. **Hydroponics for the home grower**. New York: CRC Press, 2015.

RODRIGUES, R. R. et al. Salinidade no desenvolvimento de cultivares de alface. **AGRARIAN ACADEMY**, Goiânia, v.2, n.04, p.70, 2015. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2015b/salinidade.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

SEUNJUN LEE; JIYOUNG LEE. Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods, **Scientia Horticulturae**, Ohio, v.195, p.206-215, set. 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423815301758>>. Acesso em: 11 jul. 2018.

STEVAN JUNIOR, Sergio Luiz; SILVA, Rodrigo Adamshuk. **Automação e instrumentação industrial com arduino: teoria e projetos**. São Paulo: Érica, 2015.

SOARES, T. M. et al. Produção de alface utilizando águas salinas em sistema hidropônico. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 2, p. 235-248, abr.-jun, 2007. ISSN 1808-3765. Disponível em: <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3303>>. Acesso em: 28 jun. 2018.

SON, J.E.; KIM, H.J.; AHN, T.I. Hydroponic Systems. In: KOZAI, T.; NIU, G.; TAKAGAKI, M. **Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production**. USA: Elsevier, 2016. Cap.17, p.213-221.

TEIXEIRA, Nilva Teresinha. **Hidroponia: uma alternativa para pequenas áreas**. Guaíba: Agropecuária, 1996.

TOLMASQUIM, Maurício T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. **World Population Prospects: The 2017 Revision**. United Nations Publications, 2017.

VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica**: Conceitos e Aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2015.

ANEXO A – CIRCUITO CONSTRUÍDO PARA O MEDIDOR DE CONDUTIVIDADE E TEMPERATURA

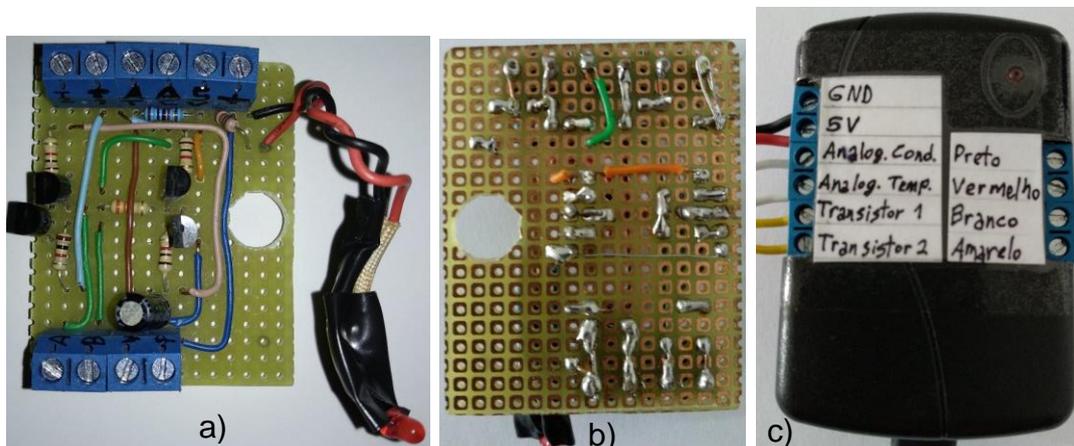


Figura 58 – Circuito montado para leitura da condutividade, a) visão frontal da placa, b) visão inferior, c) estrutura final do condutivímetro.

ANEXO B – MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA E MÓDULOS RTC E DATALOGGER UTILIZADOS NO SISTEMA

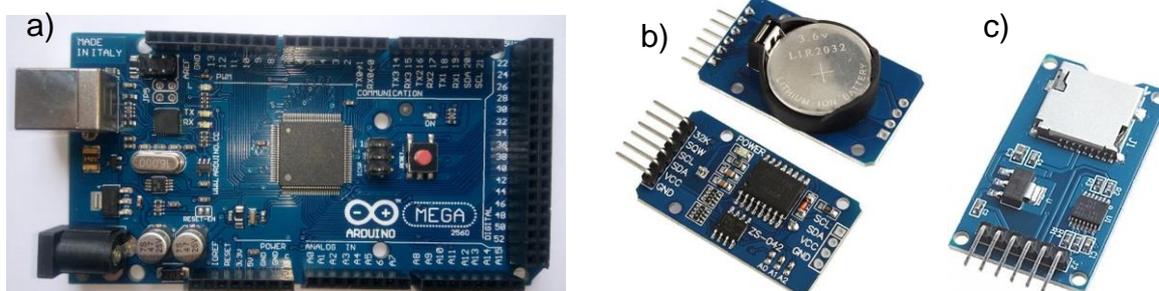


Figura 59 – a) Sistema controlador Arduino Mega 2560 R3, b) Módulo RTC DS3231 e c) Módulo cartão micro sd.

Tabela 11 – Características do controlador Arduino Mega 2560 R3

| Característica | Descrição |
|-----------------------------|--|
| Microcontrolador | ATmega2560 |
| Tensão de Operação | 5V |
| Alimentação | 7-12V (via plug P4), ou 5V (via USB) |
| Portas Digitais | 54 (sendo 15 portas como PWM, com resolução 8 bits, e 6 portas como interrupções externas) |
| Portas Analógicas | 16 (somente entrada analógica, com resolução 10 bits) |
| Corrente Contínua Pinos I/O | 40mA |
| Memória Flash | 256KB (8KB usado no bootloader) |
| EEPROM | 4KB |
| Velocidade do Clock | 16MHz |
| Comunicação Serial | Serial (4 portas UARTs), SPI, I2C |
| Comprimento x Largura | 101,52 x 53,3 mm |
| Peso | 37 g |

ANEXO C – SHIELD MONTADO PARA O ARDUINO MEGA

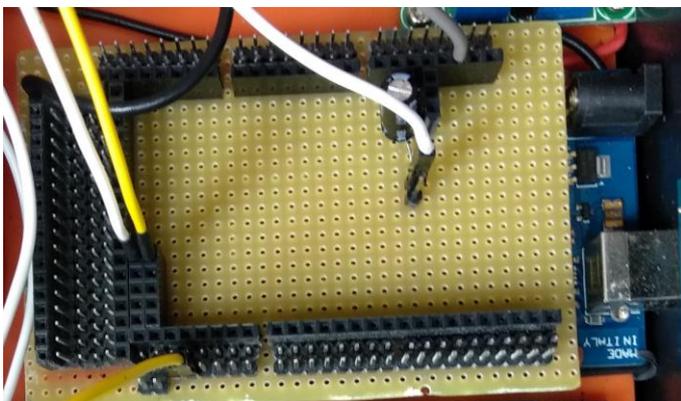


Figura 60 – Shield montado para o Arduino Mega.

ANEXO D – TELA DE INTERFACE IHM TOUCH

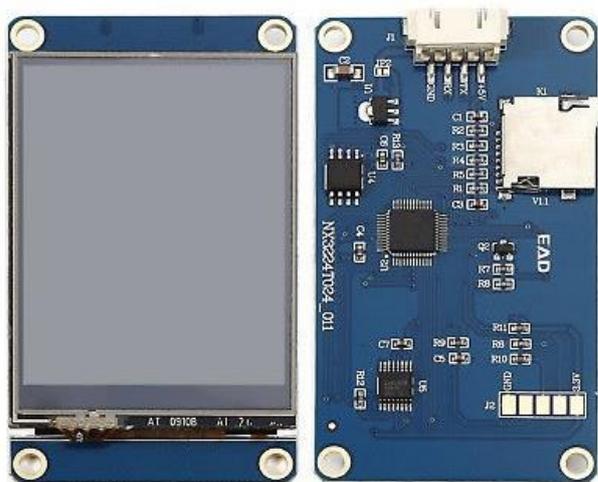


Figura 61 – Tela de interface IHM touch.

ANEXO E – CIRCUITO DE FONTE DE ALIMENTAÇÃO PARA O SISTEMA

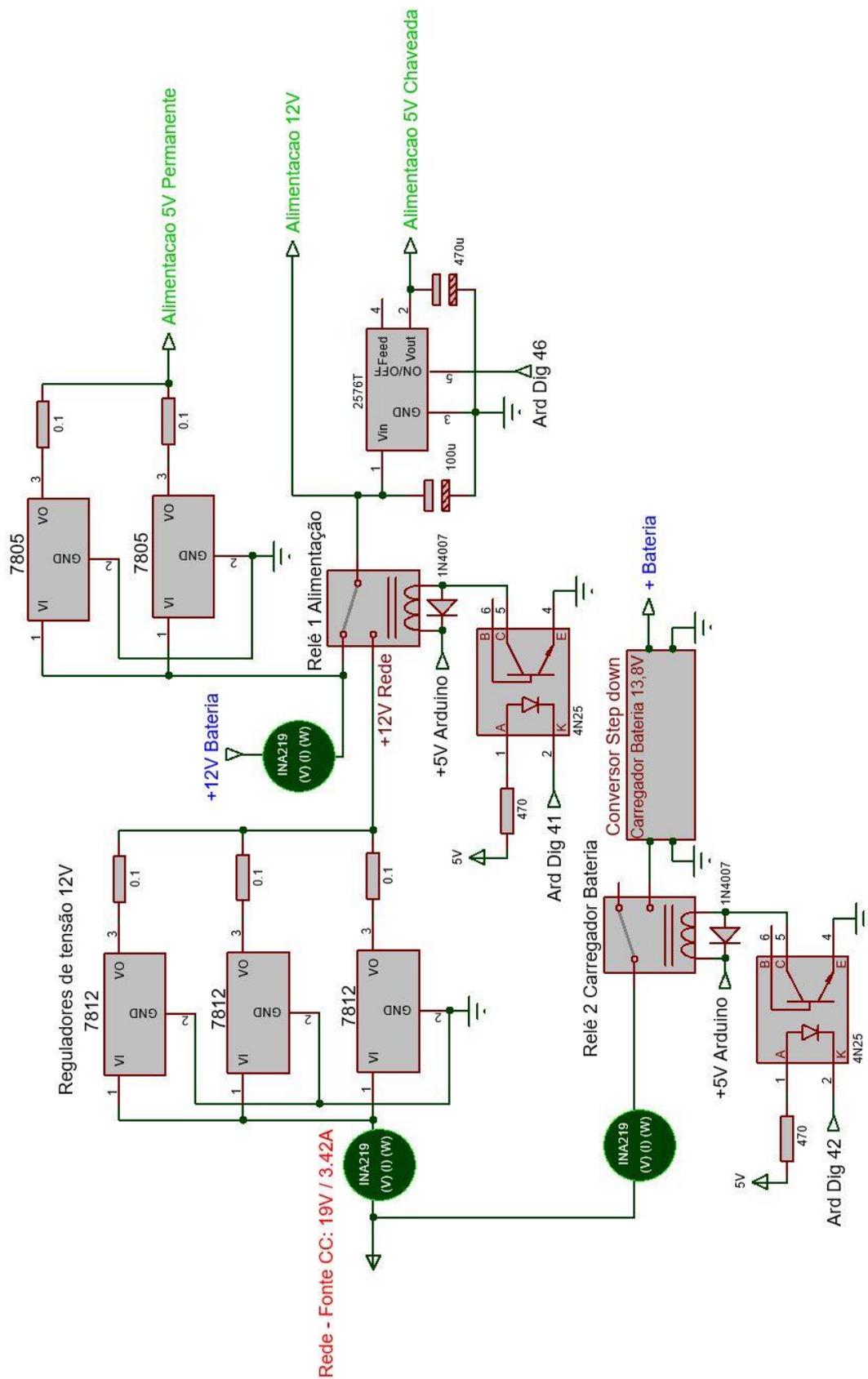


Figura 62 – Circuito de fonte de alimentação para o sistema.

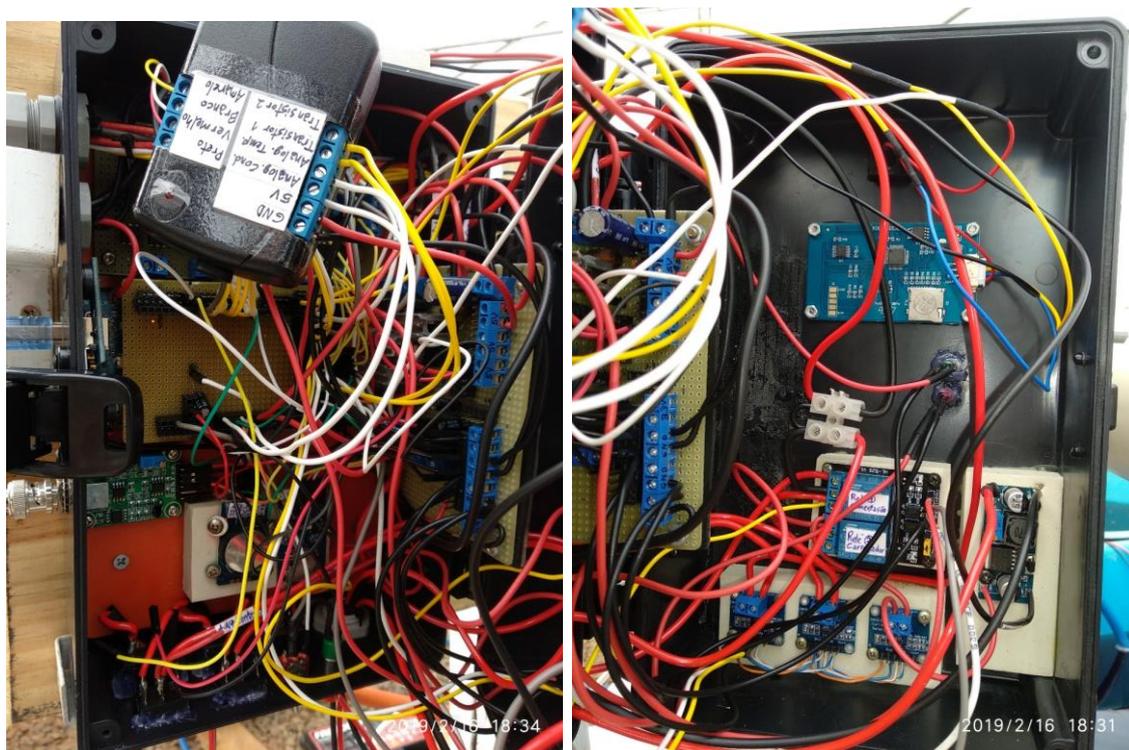
ANEXO F – CAIXA DO SISTEMA DE AUTOMAÇÃO FINALIZADO

Figura 63 – Caixa do sistema de automação finalizado.

ANEXO G – FLUXOGRAMA DE LEITURA DE TENSÃO DO SENSOR NTC 10K DO CONDUTIVÍMETRO PARA LEVANTAMENTO DA FUNÇÃO DE RESPOSTA DO SENSOR DE TEMPERATURA DO LÍQUIDO

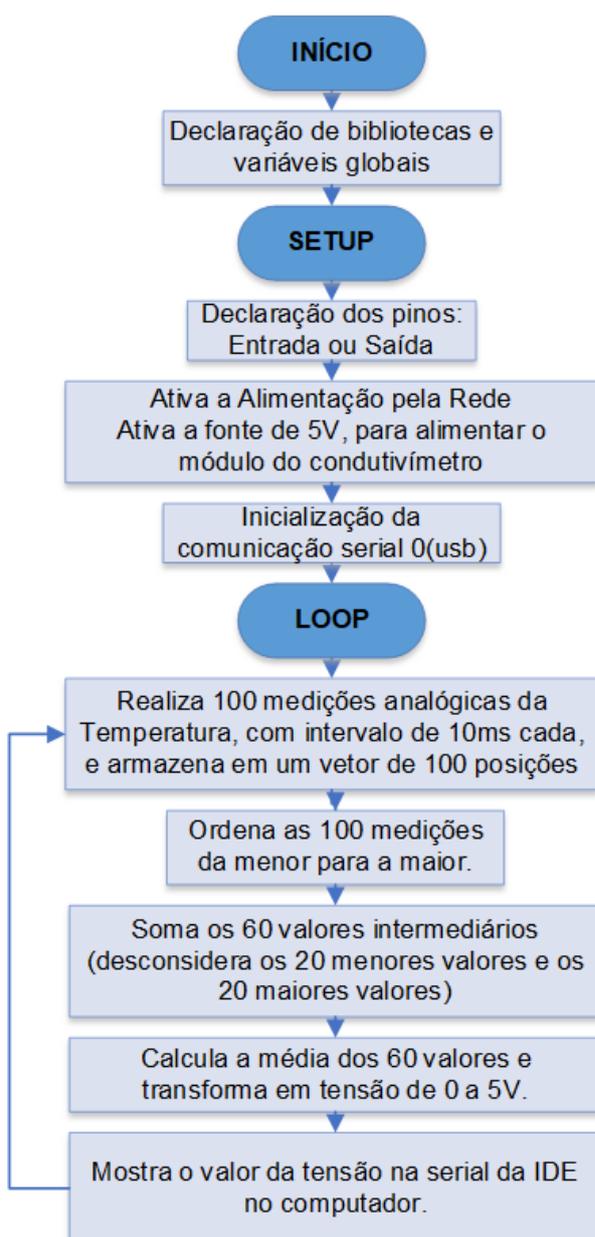


Figura 64 – Fluxograma de leitura de tensão do sensor NTC 10k do condutivímetro para levantamento da função de resposta do sensor de temperatura do líquido.

**ANEXO H – FLUXOGRAMA DE MEDIÇÃO DE TENSÃO ANALÓGICA DO
CONDUTIVÍMETRO PARA COMPARAÇÕES COM O CONDUTIVÍMETRO DE
BANCADA E VERIFICAÇÃO DE FUNÇÃO DE RESPOSTA**

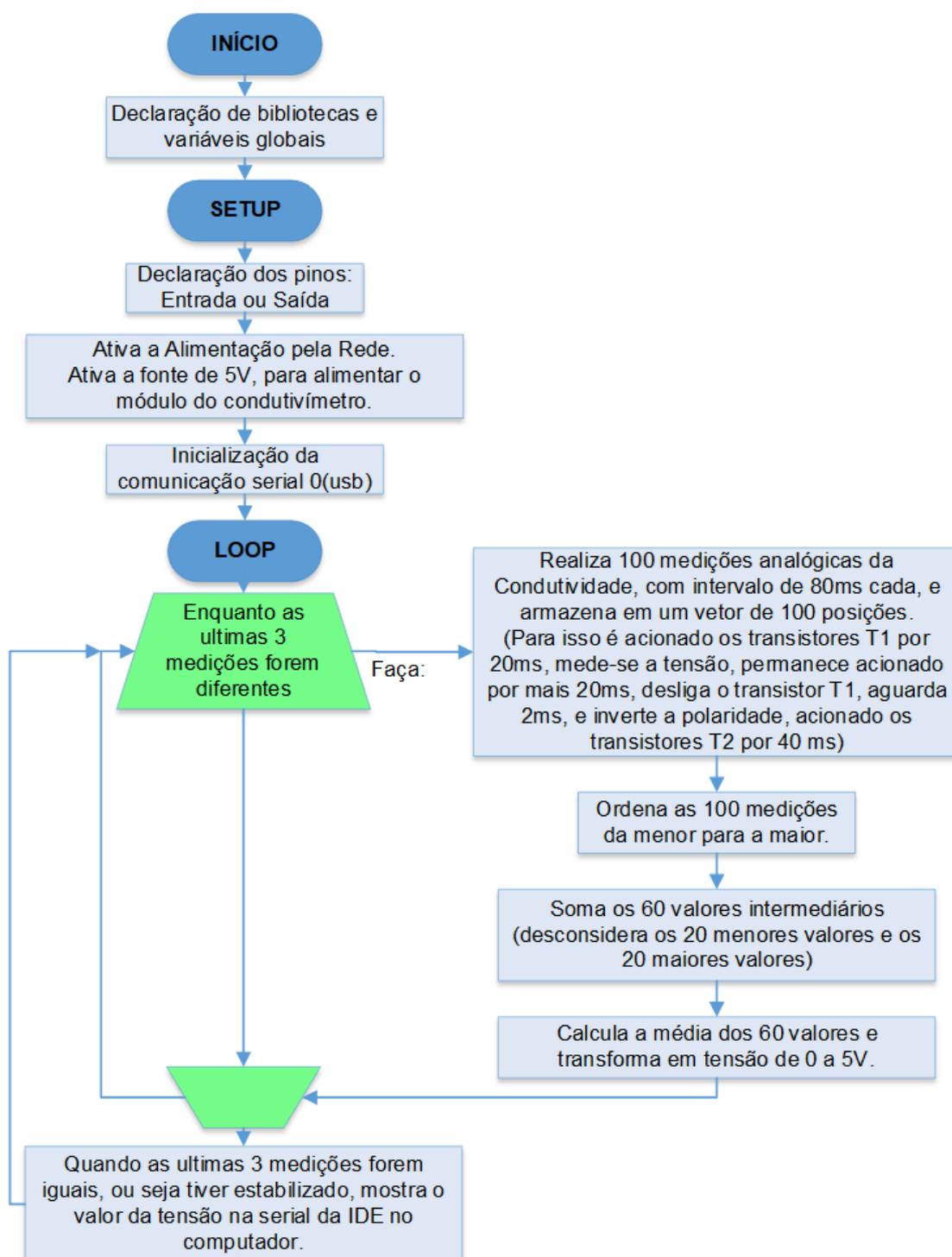


Figura 65 – Fluxograma de medição de tensão analógica do condutivímetro para comparações com o condutivímetro de bancada e verificação de função de resposta.

ANEXO I – FLUXOGRAMA RESUMIDO DA PROGRAMAÇÃO DO ARDUINO

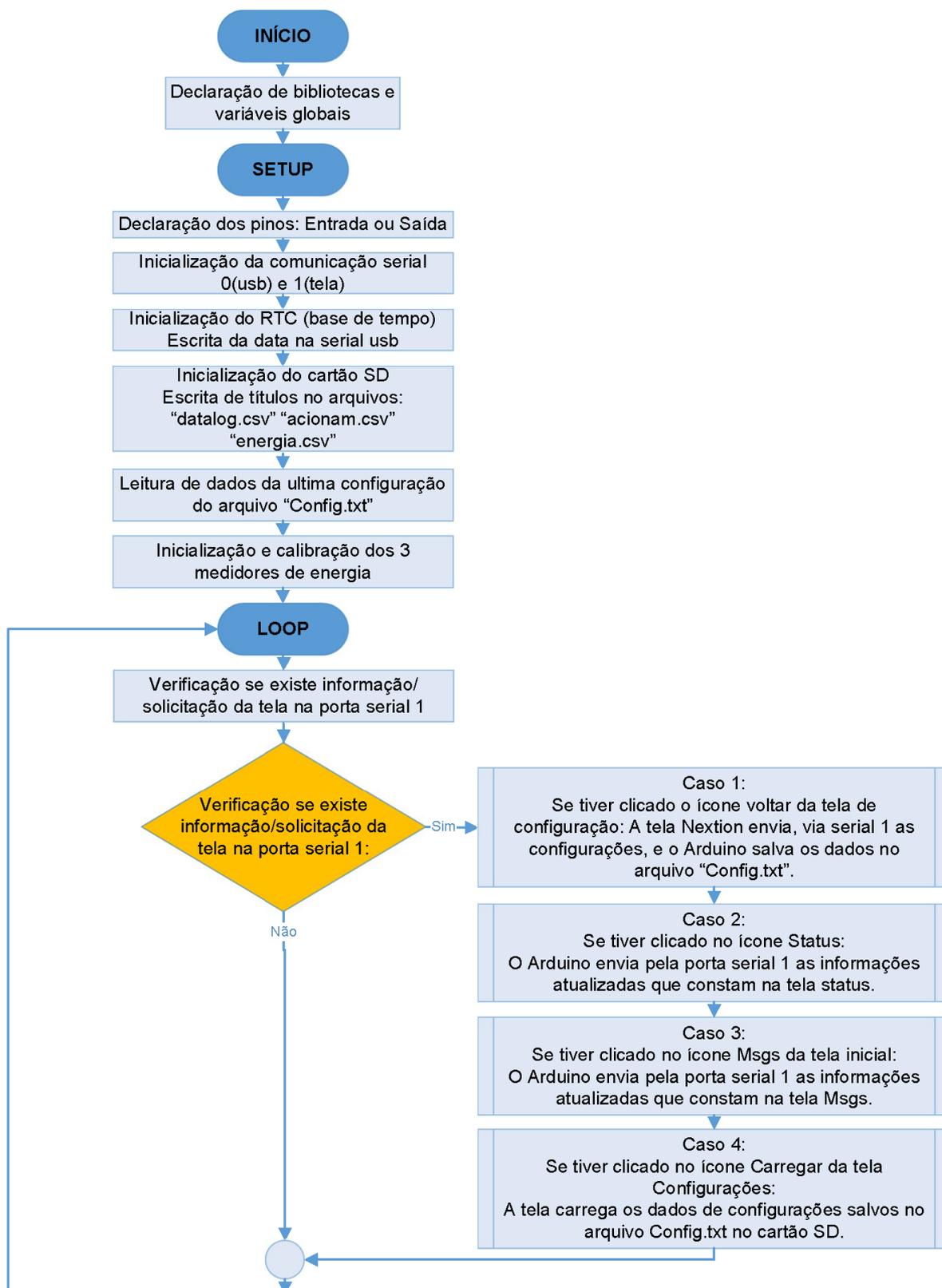


Figura 66 – Parte 1 do Fluxograma resumido da programação do Arduino.

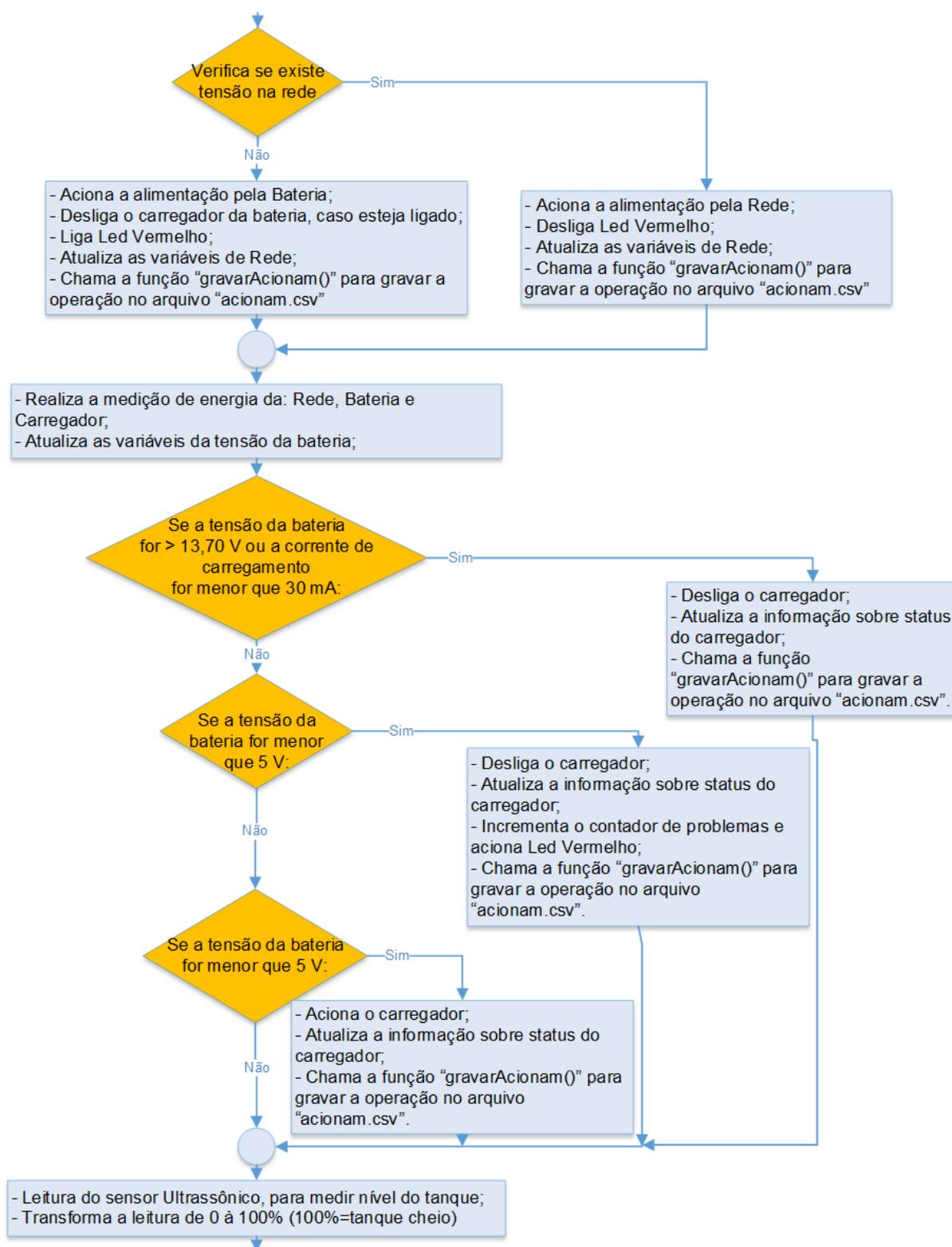


Figura 67 – Parte 2 do fluxograma resumido da programação geral do Arduino.

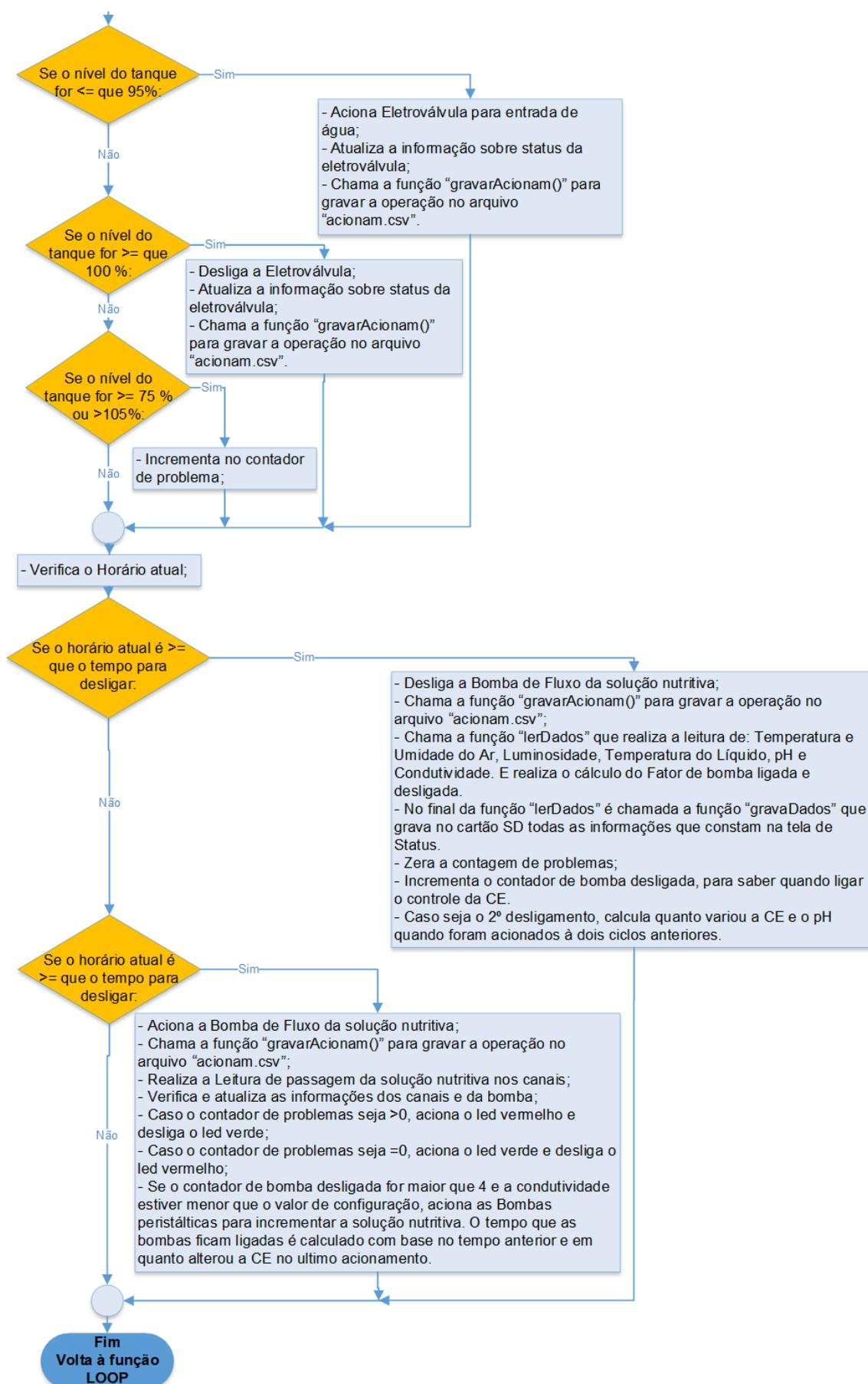


Figura 68 - Parte 3 do fluxograma resumido da programação geral do Arduino.

**ANEXO J – TABELA DE DADOS COLETADOS DA RESPOSTA DO MEDIDOR DE
TEMPERATURA DO CONDUTIVÍMETRO**

Tabela 12 – Dados coletados de resposta do medidor de temperatura do condutivímetro

| Ard (V) | Temp (°C) | Ard (V) | Temp (°C) | Ard (V) | Temp (°C) |
|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
| 3,639 | 0,5 | 2,702 | 21,5 | 1,727 | 41,5 |
| 3,592 | 1,5 | 2,658 | 22,5 | 1,673 | 42,5 |
| 3,546 | 2,5 | 2,614 | 23,5 | 1,622 | 43,5 |
| 3,501 | 3,5 | 2,568 | 24,5 | 1,568 | 44,5 |
| 3,456 | 4,5 | 2,522 | 25,5 | 1,518 | 45,5 |
| 3,412 | 5,5 | 2,478 | 26,5 | 1,467 | 46,5 |
| 3,368 | 6,5 | 2,433 | 27,5 | 1,415 | 47,5 |
| 3,322 | 7,5 | 2,387 | 28,5 | 1,367 | 48,5 |
| 3,277 | 8,5 | 2,340 | 29,5 | 1,318 | 49,5 |
| 3,233 | 9,5 | 2,294 | 30,5 | 1,271 | 50,5 |
| 3,188 | 10,5 | 2,245 | 31,5 | 1,222 | 51,5 |
| 3,144 | 11,5 | 2,195 | 32,5 | 1,174 | 52,5 |
| 3,101 | 12,5 | 2,144 | 33,5 | 1,127 | 53,5 |
| 3,056 | 13,5 | 2,091 | 34,5 | 1,079 | 54,5 |
| 3,012 | 14,5 | 2,040 | 35,5 | 1,029 | 55,5 |
| 2,969 | 15,5 | 1,987 | 36,5 | 0,980 | 56,5 |
| 2,925 | 16,5 | 1,933 | 37,5 | 0,932 | 57,5 |
| 2,881 | 17,5 | 1,880 | 38,5 | 0,885 | 58,5 |
| 2,837 | 18,5 | 1,828 | 39,5 | 0,840 | 59,5 |
| 2,792 | 19,5 | 1,777 | 40,5 | 0,793 | 60,5 |
| 2,747 | 20,5 | | | | |

**ANEXO K – TABELA DE DADOS COLETADOS DE MEDIÇÕES DE
CONDUTIVIDADE ANTES DO INÍCIO DO CULTIVO HIDROPÔNICO**

Tabela 13 – Medições de condutividade antes do início do cultivo hidropônico

| Tensão medida pelo Arduino (V) | Condutividade (medidor de bancada) (mS/cm 25°C) | Condutividade (medidor portátil) (mS/cm) | Tensão medida pelo Arduino (V) | Condutividade (medidor de bancada) (mS/cm 25°C) | Condutividade (medidor portátil) (mS/cm) |
|---------------------------------------|--|---|---------------------------------------|--|---|
| 3,905 | 0,125 | 0,13 | 1,608 | 2,130 | 1,78 |
| 3,790 | 0,148 | 0,15 | 1,477 | 2,220 | 1,95 |
| 3,769 | 0,198 | 0,20 | 1,348 | 2,350 | 2,09 |
| 3,682 | 0,246 | 0,25 | 1,273 | 2,530 | 2,24 |
| 3,569 | 0,280 | 0,27 | 1,175 | 2,720 | 2,40 |
| 3,420 | 0,313 | 0,31 | 1,097 | 2,890 | 2,52 |
| 3,300 | 0,341 | 0,33 | 1,031 | 3,040 | 2,58 |
| 3,205 | 0,463 | 0,45 | 0,958 | 3,220 | 2,73 |
| 3,002 | 0,620 | 0,6 | 0,894 | 3,370 | 2,80 |
| 2,702 | 0,837 | 0,78 | 0,819 | 3,530 | 2,99 |
| 2,499 | 0,987 | 0,91 | 0,743 | 3,640 | 3,13 |
| 2,415 | 1,074 | 1,00 | 0,687 | 3,870 | 3,25 |
| 2,263 | 1,214 | 1,13 | 0,645 | 3,980 | 3,35 |
| 2,101 | 1,274 | 1,21 | 0,606 | 4,150 | 3,44 |
| 2,051 | 1,387 | 1,27 | 0,566 | 4,340 | 3,53 |
| 1,992 | 1,502 | 1,35 | 0,493 | 4,630 | 3,67 |
| 1,860 | 1,667 | 1,47 | 0,438 | 4,830 | 3,83 |
| 1,725 | 1,792 | 1,62 | 0,397 | 5,060 | 4,03 |
| 1,653 | 1,938 | 1,68 | | | |

**ANEXO L – TABELA DE DADOS COLETADOS DE MEDIÇÕES DE
CONDUTIVIDADE NO FINAL CULTIVO HIDROPÔNICO**

Tabela 14 – Medições de condutividade no final cultivo hidropônico

| Tensão medida pelo Arduino (V) | Condutividade medidor de bancada (mS/cm 25°C) | Condutividade medidor portátil (mS/cm) |
|---------------------------------------|--|---|
| 4,158 | 0,1945 | 0,19 |
| 4,129 | 0,2309 | 0,24 |
| 4,02 | 0,3874 | 0,41 |
| 3,966 | 0,5147 | 0,51 |
| 3,815 | 0,8705 | 0,84 |
| 3,798 | 0,9088 | 0,88 |
| 3,743 | 1,073 | 1,02 |
| 3,666 | 1,31 | 1,23 |
| 3,598 | 1,566 | 1,44 |
| 3,558 | 1,719 | 1,54 |
| 3,501 | 1,907 | 1,76 |
| 3,449 | 2,12 | 1,95 |
| 3,397 | 2,4 | 2,15 |
| 3,326 | 2,76 | 2,43 |
| 3,283 | 2,99 | 2,62 |
| 3,235 | 3,31 | 2,87 |
| 3,18 | 3,67 | 3,11 |
| 3,122 | 4,07 | 3,5 |
| 3,101 | 4,23 | 3,59 |
| 3,043 | 4,78 | 3,95 |
| 2,96 | 5,13 | 4,17 |

ANEXO M – DADOS COLETADOS PARA O DIA 21/02/2019

Tabela 15 – Dados coletados de iluminância, temperatura e umidade do ar para determinação do tempo de acionamento da motobomba

| Hora | Min | Seg | Temperatura do Ar | Umidade do Ar | Iluminância | Bomba Ligada - Automatizado (min) | Bomba Desligada - Automatizado (min) |
|------|-----|-----|-------------------|---------------|-------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 24,00 | 91,80 | 5,83 | 8 | 16 |
| 0 | 7 | 23 | 24,10 | 90,90 | 5,00 | 9 | 15 |
| 0 | 30 | 53 | 23,70 | 94,40 | 5,83 | 9 | 15 |
| 0 | 55 | 31 | 23,70 | 95,10 | 5,83 | 8 | 16 |
| 1 | 19 | 40 | 23,40 | 98,00 | 5,00 | 8 | 16 |
| 1 | 44 | 6 | 22,90 | 97,80 | 5,00 | 8 | 16 |
| 2 | 7 | 42 | 22,50 | 99,90 | 5,00 | 8 | 16 |
| 2 | 31 | 43 | 22,30 | 99,90 | 5,83 | 8 | 16 |
| 2 | 55 | 24 | 22,20 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 3 | 19 | 26 | 22,00 | 99,90 | 5,00 | 7 | 17 |
| 3 | 45 | 18 | 21,80 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 4 | 7 | 45 | 21,50 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 4 | 31 | 25 | 21,40 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 4 | 56 | 1 | 21,10 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 5 | 20 | 14 | 20,90 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 5 | 43 | 46 | 20,80 | 99,90 | 5,00 | 7 | 17 |
| 6 | 8 | 26 | 20,90 | 99,90 | 5,00 | 7 | 17 |
| 6 | 31 | 16 | 20,80 | 99,90 | 5,00 | 7 | 17 |
| 6 | 56 | 3 | 20,70 | 99,90 | 5,83 | 7 | 17 |
| 7 | 21 | 53 | 20,60 | 99,90 | 182,50 | 7 | 17 |
| 7 | 45 | 32 | 21,00 | 99,90 | 1134,17 | 7 | 17 |
| 8 | 9 | 27 | 21,70 | 99,90 | 2560,83 | 7 | 17 |
| 8 | 33 | 14 | 31,10 | 59,90 | 11751,67 | 10 | 14 |
| 8 | 56 | 20 | 34,40 | 46,40 | 16613,33 | 13 | 11 |
| 9 | 20 | 8 | 40,70 | 32,90 | 20244,17 | 18 | 6 |
| 9 | 43 | 55 | 40,60 | 32,80 | 29299,17 | 20 | 5 |
| 10 | 9 | 12 | 43,70 | 30,00 | 39650,00 | 19 | 5 |
| 10 | 34 | 35 | 47,00 | 26,20 | 42663,33 | 20 | 5 |
| 10 | 58 | 10 | 49,20 | 24,50 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 11 | 23 | 1 | 45,90 | 27,60 | 53985,83 | 20 | 5 |
| 11 | 48 | 10 | 47,90 | 26,20 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 12 | 12 | 55 | 51,40 | 24,70 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 12 | 38 | 11 | 51,10 | 23,60 | 48872,50 | 20 | 5 |
| 13 | 3 | 28 | 50,50 | 25,10 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 13 | 28 | 52 | 52,30 | 23,70 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 13 | 53 | 41 | 56,60 | 22,10 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 14 | 18 | 50 | 54,30 | 21,90 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 14 | 43 | 13 | 48,80 | 27,40 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 15 | 9 | 12 | 48,20 | 26,70 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 15 | 33 | 17 | 50,10 | 24,30 | 54612,50 | 20 | 5 |
| 15 | 59 | 7 | 51,70 | 21,00 | 54612,50 | 20 | 5 |

| | | | | | | | |
|-------|----|----|-------|-------|----------|-------|-------|
| 16 | 23 | 37 | 46,00 | 25,80 | 51734,16 | 20 | 5 |
| 16 | 48 | 50 | 43,50 | 27,60 | 30617,50 | 20 | 5 |
| 17 | 14 | 47 | 41,60 | 29,70 | 9423,33 | 20 | 5 |
| 17 | 38 | 30 | 39,50 | 35,20 | 18764,17 | 20 | 5 |
| 18 | 4 | 6 | 37,90 | 36,00 | 10624,17 | 19 | 5 |
| 18 | 28 | 41 | 33,60 | 46,40 | 8015,83 | 18 | 6 |
| 18 | 51 | 31 | 32,00 | 50,00 | 5929,17 | 17 | 7 |
| 19 | 16 | 14 | 30,90 | 52,10 | 4060,83 | 15 | 9 |
| 19 | 40 | 44 | 29,40 | 60,50 | 2504,17 | 14 | 10 |
| 20 | 4 | 34 | 27,30 | 80,50 | 712,50 | 13 | 11 |
| 20 | 28 | 1 | 25,70 | 91,80 | 20,00 | 11 | 13 |
| 20 | 52 | 3 | 25,20 | 92,20 | 0,00 | 9 | 15 |
| 21 | 16 | 26 | 24,60 | 94,50 | 30,00 | 9 | 15 |
| 21 | 42 | 7 | 24,30 | 95,90 | 30,83 | 9 | 15 |
| 22 | 3 | 54 | 25,60 | 92,10 | 0,00 | 9 | 15 |
| 22 | 28 | 39 | 25,50 | 90,30 | 0,00 | 9 | 15 |
| 22 | 52 | 27 | 25,50 | 91,20 | 0,00 | 9 | 15 |
| 23 | 16 | 21 | 25,20 | 92,00 | 0,00 | 9 | 15 |
| 23 | 39 | 4 | 25,20 | 92,00 | 0,00 | 9 | 15 |
| 23 | 40 | 13 | 24,70 | 93,60 | 0,00 | 9 | 15 |
| 23 | 54 | 56 | 24,70 | 93,60 | 0,00 | 9 | 15 |
| 24 | 0 | 0 | 24,70 | 93,60 | 0,00 | 9 | 15 |
| Média | | | 32,41 | 67,78 | 16035,96 | 12,86 | 11,44 |

ANEXO N – TABELA DE CUSTOS DE CADA COMPONENTE DO SISTEMA HIDROPÔNICO AUTOMATIZADO

Tabela 16 – Custos de componentes do projeto de automação do sistema hidropônico

| Item | Qde | Um | Custo unitário | Custo total de aquisição | Vida Útil estimada |
|--|-----|----|----------------|--------------------------|--------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 | 5 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 | 5 |
| Sensor INA219 | 3 | pç | R\$23,90 | R\$71,70 | 5 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 | 5 |
| Sensor DHT22 | 1 | pç | R\$9,93 | R\$9,93 | 5 |
| Bomba peristáltica 12V | 5 | pç | R\$28,00 | R\$140,00 | 2 |
| Bomba 12 V CC | 1 | pç | R\$32,00 | R\$32,00 | 5 |
| Ponta de medição de condutivímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 | 2 |
| Medidor de pH | 1 | pç | R\$48,00 | R\$48,00 | 5 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 | 5 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 | 5 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 | 5 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 | 5 |
| Sensor de luminosidade BH1750FVI | 1 | pç | R\$10,90 | R\$10,90 | 5 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 | 5 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 | 5 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 | 5 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 | 5 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 | 5 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 | 5 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 | 5 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 | 5 |
| Chave táctil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 | 5 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 | 5 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 | 5 |
| Módulo de acionamento de motores e eletroválvula (montado) | 1 | pç | R\$25,00 | R\$25,00 | 5 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 | 5 |
| Fio flexível 1,5 mm2 | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 | 5 |
| Fio flexível 0,5 mm2 | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 | 5 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 | 5 |
| Módulo sensor de canais (montado) | 3 | pç | R\$3,00 | R\$9,00 | 0,25 |
| Baterias de 70Ah | 4 | pç | R\$265,90 | R\$1.063,60 | 4 |
| Módulo fotovoltaico 85W | 1 | pç | R\$350,00 | R\$350,00 | 10 |
| TOTAL | | | | R\$2183,03 | |

**ANEXO O – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO
AUTOMATIZADO BÁSICO COM 1 BANCADA**

Tabela 17 – Custos do sistema hidropônico automatizado básico para 1 bancada

| Item | Qde | Um | Custo unitário | Custo total de aquisição |
|---|-----|----|----------------|--------------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 |
| Bomba peristáltica 12V | 3 | pç | R\$28,00 | R\$84,00 |
| Bomba 12 V CC | 1 | pç | R\$32,00 | R\$32,00 |
| Ponta de medição de condutivímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 |
| Chave táctil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 |
| Módulo de acionamento de motores e eletro- válvula (montado) | 1 | pç | R\$25,00 | R\$25,00 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 |
| Fio flexível 1,5 mm ² | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 |
| Fio flexível 0,5 mm ² | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 |
| Módulo sensor de perfis (montado) | 3 | pç | R\$3,00 | R\$9,00 |
| Bateria de 7Ah | 1 | pç | R\$85,00 | R\$85,00 |
| TOTAL | | | | R\$657,90 |

**ANEXO P – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO
AUTOMATIZADO BÁSICO COM 10 BANCADAS**

Tabela 18 – Custos do sistema hidropônico automatizado básico para 10 bancadas

| Item | Qde | Un | Custo unitário | Custo total de aquisição |
|---|-----|----|----------------|--------------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 |
| Bomba peristáltica 12V | 3 | pç | R\$28,00 | R\$84,00 |
| Bomba 12 V CC | 10 | pç | R\$32,00 | R\$320,00 |
| Ponta de medição de condutivímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 |
| Chave táctil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 |
| Módulo de acionamento de motores e eletro- válvula (montado) | 3 | pç | R\$25,00 | R\$75,00 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 |
| Fio flexível 1,5 mm ² | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 |
| Fio flexível 0,5 mm ² | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 |
| Módulo sensor de perfis (montado) | 30 | pç | R\$3,00 | R\$90,00 |
| Bateria de 7Ah | 1 | pç | R\$85,00 | R\$85,00 |
| TOTAL | | | | R\$1.076,90 |

**ANEXO Q – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO
AUTOMATIZADO INTERMEDIÁRIO COM 1 BANCADA**

Tabela 19 – Custos do sistema hidropônico automatizado intermediário para 1 Bancada

| Item | Qde | Um | Custo unitário | Custo total de aquisição |
|--|-----|----|----------------|--------------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 |
| Sensor DHT22 | 1 | pç | R\$9,93 | R\$9,93 |
| Bomba peristáltica 12V | 3 | pç | R\$28,00 | R\$84,00 |
| Bomba 12 V CC | 1 | pç | R\$32,00 | R\$32,00 |
| Ponta de medição de condutivímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 |
| Sensor de luminosidade BH1750FVI | 1 | pç | R\$10,90 | R\$10,90 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 |
| Chave táctil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 |
| Módulo de acionamento de motores e eletroválvula (montado) | 1 | pç | R\$25,00 | R\$25,00 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 |
| Fio flexível 1,5 mm2 | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 |
| Fio flexível 0,5 mm2 | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 |
| Módulo sensor de perfis (montado) | 3 | pç | R\$3,00 | R\$9,00 |
| Baterias de 70Ah | 1 | pç | R\$265,90 | R\$265,90 |
| TOTAL | | | | R\$859,63 |

**ANEXO R – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO
AUTOMATIZADO INTERMEDIÁRIO COM 10 BANCADAS**

Tabela 20 – Custos do sistema hidropônico automatizado intermediário para 10 bancadas

| Item | Qde | Um | Custo unitário | Custo total de aquisição |
|--|------------|-----------|-----------------------|---------------------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 |
| Sensor DHT22 | 1 | pç | R\$9,93 | R\$9,93 |
| Bomba peristáltica 12V | 3 | pç | R\$28,00 | R\$84,00 |
| Bomba 12 V CC | 10 | pç | R\$32,00 | R\$320,00 |
| Ponta de medição de condutímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 |
| Sensor de luminosidade BH1750FVI | 1 | pç | R\$10,90 | R\$10,90 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 |
| Chave táctil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 |
| Módulo de acionamento de motores e eletroválvula (montado) | 1 | pç | R\$25,00 | R\$25,00 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 |
| Fio flexível 1,5 mm2 | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 |
| Fio flexível 0,5 mm2 | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 |
| Módulo sensor de perfis (montado) | 30 | pç | R\$3,00 | R\$90,00 |
| Baterias de 70Ah | 5 | pç | R\$265,90 | R\$1.329,50 |
| TOTAL | | | | R\$2.292,23 |

**ANEXO S – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO
AUTOMATIZADO COMPLETO COM 1 BANCADA**

Tabela 21 - Custos do sistema hidropônico automatizado completo para 1 Bancada

| Item | Qde | Um | Custo unitário | Custo total de aquisição |
|--|-----|----|----------------|--------------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 |
| Sensor INA219 | 3 | pç | R\$23,90 | R\$71,70 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 |
| Sensor DHT22 | 1 | pç | R\$9,93 | R\$9,93 |
| Bomba peristáltica 12V | 5 | pç | R\$28,00 | R\$140,00 |
| Bomba 12 V CC | 1 | pç | R\$32,00 | R\$32,00 |
| Ponta de medição de condutímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 |
| Medidor de pH | 1 | pç | R\$48,00 | R\$48,00 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 |
| Sensor de luminosidade BH1750FVI | 1 | pç | R\$10,90 | R\$10,90 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 |
| Chave tátil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 |
| Módulo de acionamento de motores e eletroválvula (montado) | 1 | pç | R\$25,00 | R\$25,00 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 |
| Fio flexível 1,5 mm2 | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 |
| Fio flexível 0,5 mm2 | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 |
| Módulo sensor de perfis (montado) | 3 | pç | R\$3,00 | R\$9,00 |
| Baterias de 70Ah | 4 | pç | R\$265,90 | R\$1.063,60 |
| Módulo fotovoltaico 85W | 1 | pç | R\$350,00 | R\$350,00 |
| TOTAL | | | | 2183,03 |

**ANEXO T – TABELA DE CUSTOS PARA O SISTEMA HIDROPÔNICO
AUTOMATIZADO COMPLETO COM 10 BANCADAS**

Tabela 22 - Custos do sistema hidropônico automatizado completo para 10 bancadas

| Item | Qde | Um | Custo unitário | Custo total de aquisição |
|--|-----|----|----------------|--------------------------|
| Arduino Mega R3 | 1 | pç | R\$33,60 | R\$33,60 |
| Display Nextion 2.4" | 1 | pç | R\$62,20 | R\$62,20 |
| Sensor INA219 | 3 | pç | R\$23,90 | R\$71,70 |
| Módulo Relé 2 canais 5V | 1 | pç | R\$12,50 | R\$12,50 |
| Sensor DHT22 | 1 | pç | R\$9,93 | R\$9,93 |
| Bomba peristáltica 12V | 5 | pç | R\$28,00 | R\$140,00 |
| Bomba 12 V CC | 10 | pç | R\$32,00 | R\$320,00 |
| Ponta de medição de condutivímetro | 1 | pç | R\$63,92 | R\$63,92 |
| Medidor de pH | 1 | pç | R\$48,00 | R\$48,00 |
| Sensor ultrassônico | 1 | pç | R\$16,32 | R\$16,32 |
| Módulo fonte de alimentação (montado) | 1 | pç | R\$50,00 | R\$50,00 |
| Módulo shield Arduino Mega (montado) | 1 | pç | R\$10,00 | R\$10,00 |
| Leds | 2 | pç | R\$0,20 | R\$0,40 |
| Sensor de luminosidade BH1750FVI | 1 | pç | R\$10,90 | R\$10,90 |
| Módulo regulador de tensão LM2596 | 1 | pç | R\$8,78 | R\$8,78 |
| RTC DS3231 | 1 | pç | R\$14,90 | R\$14,90 |
| Módulo Cartão Micro SD | 1 | pç | R\$7,90 | R\$7,90 |
| Buzzer | 1 | pç | R\$6,90 | R\$6,90 |
| Adaptador J4 Fêmea 2,1mm | 2 | pç | R\$2,50 | R\$5,00 |
| Adaptador J4 Macho 2,1mm | 2 | pç | R\$2,10 | R\$4,20 |
| Chave gangorra | 3 | pç | R\$1,61 | R\$4,83 |
| Chave alavanca | 2 | pç | R\$2,03 | R\$4,06 |
| Chave tátil | 1 | pç | R\$2,69 | R\$2,69 |
| Porta fusível 5A | 2 | pç | R\$4,00 | R\$8,00 |
| Caixa preta | 1 | pç | R\$42,00 | R\$42,00 |
| Módulo de acionamento de motores e eletroválvula (montado) | 3 | pç | R\$25,00 | R\$75,00 |
| Conector prensa cabos | 4 | pç | R\$4,00 | R\$16,00 |
| Fio flexível 1,5 mm2 | 10 | m | R\$0,53 | R\$5,30 |
| Fio flexível 0,5 mm2 | 20 | m | R\$0,42 | R\$8,40 |
| Eletroválvula 12 V | 1 | pç | R\$35,00 | R\$35,00 |
| Módulo sensor de perfis (montado) | 30 | pç | R\$3,00 | R\$90,00 |
| Baterias de 70Ah | 17 | pç | R\$265,90 | R\$4.520,30 |
| Módulo fotovoltaico 85W | 5 | pç | R\$350,00 | R\$1.750,00 |
| TOTAL | | | | 7458,73 |