

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO ALBERTO FRÜCHTENICHT

**SISTEMA EMBARCADO DE BAIXO CUSTO PARA SETORIZAÇÃO FLEXÍVEL DE
BARRA IRRIGADORA MÓVEL UTILIZADA NA IRRIGAÇÃO, FERTILIZAÇÃO E
PULVERIZAÇÃO DE VIVEIROS DE MUDAS DE HORTALIÇAS**

SÃO LEOPOLDO

2018

DIEGO ALBERTO FRÜCHTENICHT

SISTEMA EMBARCADO DE BAIXO CUSTO PARA SETORIZAÇÃO FLEXÍVEL DE BARRA
IRRIGADORA MÓVEL UTILIZADA NA IRRIGAÇÃO, FERTILIZAÇÃO E PULVERIZAÇÃO
DE VIVEIROS DE MUDAS DE HORTALIÇAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica, pelo Curso de
Engenharia Elétrica da Universidade do
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Me. João Olegário O.de Souza

São Leopoldo

2018

Dedico esse trabalho aos meus pais, avó,
bisavó e namorada, que me apoiaram sempre nos
momentos de dúvida e de dificuldades.

AGRADECIMENTOS

A conclusão de uma graduação requer, além de muita dedicação e esforço, o apoio e compreensão de todos do nosso convívio.

Agradeço primeiramente a Deus, por nunca me deixar desistir nem nos momentos mais escuros.

Em seguida, agradeço a minha amada Daiane, que sempre se mostrou firme ao meu lado, tolerando minhas ausências, estudos madrugada a dentro, finais de semana de trabalho e estresse antes das provas.

Aos meus pais por sempre priorizarem aos meus estudos, fazendo o possível para que eu tivesse sempre o necessário.

Aos meus amigos Jonas, Régis, Roger e Guilherme, pela parceria nesse longa caminhada da graduação.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, principalmente ao meu coordenador Alexandre pela compreensão e por me permitir eventuais ausências para a conclusão desse trabalho.

E por fim, mas não menos importante, ao meu professor e orientador Me. João Olegário pela sua paciência, dedicação e parceria, revisando inúmeras vezes essa monografia, sempre com ótimas sugestões.

RESUMO

O plantio em ambientes protegidos, como estufas, tem sido muito utilizado para o cultivo de mudas de hortaliças por apresentar melhor proteção contra intempéries, pragas ou doenças. Dentre os sistemas de irrigação adotados, a barra irrigadora móvel apresenta excelente uniformidade na irrigação e baixo consumo de água. Entretanto, dependendo do sistema de controle utilizado em função do alto custo de sistemas mais sofisticados, a barra irrigadora é capaz de inferir em modo automático apenas uma característica de irrigação ao longo de uma fileira da estufa, não atendendo de maneira satisfatória o volume de água para diferentes tipos de cultura dispostos nessa mesma fileira. Além disso, acarreta no desperdício de água, pois espaços vazios também acabam sendo irrigados. Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema embarcado de baixo custo afim de atender pequenos e médios produtores agrícolas e que permita a setorização da irrigação, acatando assim as necessidades individuais de água para cada tipo de cultura dispostas ao longo da estufa, e a não irrigação de espaços vazios. Primeiramente, se realizou uma pesquisa sobre métodos e sistemas de irrigação, sensoriamento e sistemas embarcados para assim definir os métodos e dispositivos a serem utilizados. Após, descreveu-se o desenvolvimento dos dispositivos de medição, controle e *interface*. Realizou-se também a construção de um sistema de barra irrigadora móvel em escala reduzida, englobando além da barra com 4 bicos pulverizadores, um quadro de comando para avanço e recuo da barra através de um motorreductor acionado por inversor de frequência e para acionamento da válvula de irrigação e da motobomba. Por fim, analisou-se os resultados obtidos nos testes realizados no protótipo.

Palavras-chave: Barra Irrigadora. Setorização. Sistemas Embarcados

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fazenda vertical em Kyoto.....	21
Figura 2 - Estufas de Moshav Hatzeva, no deserto de Arava.	21
Figura 3 - <i>IoT</i> no agronegócio	22
Figura 4 - Tela de configuração do controlador CI3 da Da-Ros	23
Figura 5 - Ímãs ao longo do trilho utilizados pelo controlador da Zwart	24
Figura 6 - Bandeja de isopor para mudas de hortaliças.	25
Figura 7 - Estufa em formato de arco, dentro da qual estão dispostas as bandejas com mudas.	26
Figura 8 - Mangueira com difusor.....	28
Figura 9 - Microaspersores montados na posição invertida sobre as bandejas em uma estufa	29
Figura 10 - Microaspersor rotativo.....	29
Figura 11 - Microaspersor estático	30
Figura 12 - Estrutura básica: a) Motorreductor, b) Tubulação Rígida, c) Trilho de Sustentação	31
Figura 13 - Bico pulverizador.....	32
Figura 14 - Arduino DUE	34
Figura 15 - Placa Wemos D1 Mini.....	36
Figura 16 - Bateria de LiPO e carregador USB	38
Figura 17 - Discos de <i>encoder</i> incremental e absoluto	40
Figura 18 - <i>Encoder</i> óptico	40
Figura 19 - <i>Encoder</i> KY-040.....	41
Figura 20 - Pinagem e forma de onda dos canais.....	42
Figura 21 - Ligação do <i>encoder</i> no Arduino	42
Figura 22 - Chaves fim de curso	43
Figura 23 - Tensiômetro analógico.....	44
Figura 24 - Sistema Irrigás®	44
Figura 25 - Sensor baseado no método de Blocos de Resistência Elétrica.....	45
Figura 26 - Sensor de umidade de solo para Arduino	46
Figura 27 - Ligação do sensor de umidade no Arduino.....	47
Figura 28 - Sensor EC-5 da Decagon	47
Figura 29 - Ligação do sensor DS18B20 – a) Modo parasita, b) Modo normal.....	49

Figura 30 - Sensor DS18B20 em invólucro à prova d'água	49
Figura 31 - Diagrama de blocos conversor tipo PWM	50
Figura 32 - Modulação PWM, com o equivalente senoidal	50
Figura 33 - Uso das entradas digitais e analógica em conversor de frequência	51
Figura 34 - Diagrama de blocos da estrutura do projeto	52
Figura 35 - IDE Arduino.....	55
Figura 36 - Proposta de tela de programação de receitas	57
Figura 37 - Proposta de tela de operação	58
Figura 38 - Proposta da tela de alarmes	59
Figura 39 - Proposta da tela de históricos.....	60
Figura 40 - Circuito de interligação dos sensores com o Wemos D1 Mini.	62
Figura 41 - Conjunto sensor finalizado.....	62
Figura 42 - Placa Wemos adquirida	63
Figura 43 - Circuito auxiliar para alimentação e <i>sleep</i> do Wemos D1 Mini	65
Figura 44 - Placa do circuito auxiliar de alimentação	66
Figura 45 - Procedimento de leitura do ADC do Wemos.....	67
Figura 46 - <i>Bytes</i> de dados do sensor DS18B20	69
Figura 47 - Fluxograma do conjunto Sensor	70
Figura 48 - Mensagem HTTP	71
Figura 49 - <i>Data Source</i> receptor HTTP com respectivos <i>Data Points</i>	72
Figura 50 - <i>Data Source</i> dos conjuntos sensores.....	72
Figura 51 - Componentes do conjunto sensor.....	73
Figura 52 - Conjunto sensor acomodado em caixa à prova d'água	73
Figura 53 - Fonte chaveada industrial	74
Figura 54 - Circuito de alimentação.....	75
Figura 55 - Circuito de interface das entradas digitais.	75
Figura 56 - Circuito de <i>interface</i> das saídas digitais.....	77
Figura 57 - Circuito subtrator.....	79
Figura 58 - Divisor de tensão para ajuste de offset.....	80
Figura 59 - Circuito amplificador não-inversor.....	81
Figura 60 - Circuito conversor analógico.....	82
Figura 61 - Shield do RTC.....	82
Figura 62 - <i>Encoder</i> KY-040.....	83
Figura 63 - Acoplamento e fixação do <i>encoder</i>	85

Figura 64 - Fluxograma do software do controlador.....	86
Figura 65 - Fluxograma do controle por programação horária – parte 1	88
Figura 66 - Fluxograma do controle por programação horária – parte 2.....	89
Figura 67 - Fluxograma do controle ON/OFF – parte 1.....	90
Figura 68 - Fluxograma do controle ON/OFF – parte 2.....	91
Figura 69 - Procedimento para coleta do volume de água: a) Célula vazia; b) Recipiente de coleta.....	92
Figura 70 - Fluxograma do controle por velocidade	96
Figura 71 - <i>Data Source</i> Modbus IP no ScadaBR.....	98
Figura 72 - <i>Data Points</i> do Modbus IP no ScadaBR	98
Figura 73 - Configuração do protocolo Modbus IP.....	98
Figura 74 - Tela inicial	99
Figura 75 - Tela de programação de receitas.....	100
Figura 76 - Tela de operação da estufa	101
Figura 77 - Tela de históricos.....	102
Figura 78 - Tela de histórico do sensor A.....	103
Figura 79 - Tela de alarmes	104
Figura 80 - Estrutura da barra irrigadora.....	105
Figura 81 - Porta do quadro de comando com chaves para acionamento manual .	106
Figura 82 - Montagem interna do quadro de comando	107
Figura 83 - Diagrama elétrico dos relés de <i>interface</i> do quadro de comando	108
Figura 84 - Diagrama elétrico das I/Os do inversor	109
Figura 85 - Recurso Relatórios do ScadaBR.....	110
Figura 86 - Dispositivos interligados junto à estrutura da barra irrigadora	111
Figura 87 - Protótipo desenvolvido.....	111
Figura 88 - Corrente do conjunto sensor para 3 situações de carga da bateria	114
Figura 89 - Configuração dos setores para a receita 1 – programação horária	116
Figura 90 - Configuração dos setores para a receita 2 – programação horária	117
Figura 91 - Configuração dos setores para a receita 3 – programação horária	118
Figura 92 - Configuração do setor A - controle ON/OFF	120
Figura 93 - Configuração do setor A - controle por velocidade	122
Figura 94 - Falha do feedback do inversor de frequência: a) Falha fora de <i>HOME</i> , b) <i>FeedBack</i> do inversor, c) Falha do inversor.....	124

Figura 95 - Falha do <i>feedback</i> da motobomba: a) Falha fora de <i>HOME</i> , b) <i>FeedBack</i> da motobomba, c) Falha da motobomba.....	125
Figura 96 - Tela de registro de alarmes	125
Figura 97 - Diagrama elétrico das entradas digitais do controlador	138
Figura 98 - Diagrama elétrico saídas digitais e conversor de 0 a 10 V	139
Figura 99 - Diagrama elétrico Arduino e RTC	140
Figura 100 - Diagrama elétrico do circuito de alimentação	140
Figura 101 - Diagrama elétrico <i>encoder</i> e conectores de entrada.....	141
Figura 102 - Circuito completo transmissor sem fio	142
Figura 103 - Diagrama elétrico de comando do protótipo	143
Figura 104 - Diagrama elétrico de força do protótipo	144
Figura 105 - Tela da estufa durante operação	148
Figura 106 - Planilha de cálculo para estimar duração da bateria.....	149
Figura 107 - Especificações do Arduino Due	150
Figura 108 - Diagrama elétrico Wemos D1 Mini.....	151
Figura 109 - Orçamento do sistema de irrigação da empresa Da-Ros	152
Figura 110 - Certificado de calibração do padrão de temperatura	153

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de descarga de bateria de LiPO.....	38
Gráfico 2 - Curva de resposta do sensor de umidade de solo.....	68
Gráfico 3 - Curva de tendência da resposta do sensor de umidade.....	68
Gráfico 4 - Relação entre frequência da barra e volume de água para pontos de coleta distintos	93
Gráfico 5 - Linha de tendência para relação entre volume de água e frequência da barra para frequências de 5 a 10 Hz	94
Gráfico 6 - Linha de tendência para relação entre volume de água e frequência da barra para frequências de 10 a 25 Hz	95
Gráfico 7 - Teste de repetibilidade do sensor.....	112
Gráfico 8 - Resultados da receita 1 - programação horária.....	117
Gráfico 9 - Resultados da receita 2 - programação horária.....	118
Gráfico 10 - Resultados da receita 3 - programação horária.....	119
Gráfico 11 - Resultados do teste 1 – controle ON/OFF	120
Gráfico 12 - Resultados do teste 2 – controle ON/OFF	121
Gráfico 13 - Resultados do teste 1 – controle por velocidade	122
Gráfico 14 - Resultados do teste 2 – controle por velocidade	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Métodos e sistemas de irrigação.....	27
Quadro 2 - Comparação entre Wemos D1 Mini e Arduino Due.....	36
Quadro 3 - Comparação entre tipos de bateria	37
Quadro 4 - Caracterização dos <i>encoders</i>	39
Quadro 5 - Características do sensor de umidade de solo	46
Quadro 6 - Características básicas do DS18B20	48
Quadro 7 - Função das entradas e saídas digitais do controlador	54
Quadro 8 - Valores de corrente do Wemos D1 Mini	64
Quadro 9 - Características básicas do PIC18F24K22	65
Quadro 10 - Características básicas do BC548C.....	77
Quadro 11 - Características básicas do diodo 1N4148.....	78
Quadro 12 - Características básicas do LM358	79
Quadro 13 - Interligação entre RTC e Arduino Due	83
Quadro 14 - Interligação entre pinos do <i>encoder</i> e Arduino Due	84
Quadro 15 - Parâmetros de rede do controlador.....	97
Quadro 16 - Estimativa da duração da bateria do conjunto sensor.....	114
Quadro 17 - Resultados do conversor de 0 a 10 V	115
Quadro 18 - Receitas utilizadas nos testes	116
Quadro 19 - Testes para do controle ON-OFF	119
Quadro 20 - Testes para o controle de velocidade.....	121
Quadro 21 - Comparação dos resultados do teste de controle por velocidade.....	123
Quadro 22 - Comparativo entre protótipo desenvolvido e controlador CI3.....	126
Quadro 23 - Parâmetros do inversor de frequência CFW-10	137
Quadro 24 - Lista de materiais do controlador	145
Quadro 25 - Lista de materiais da <i>interface</i> de operação e programação.....	145
Quadro 26 - Lista de materiais do transmissor sem fio (conjunto sensor).....	146
Quadro 27 - Lista de materiais do circuito auxiliar.....	146
Quadro 28 - Lista de materiais do quadro de comando	147
Quadro 29 - Custo do projeto completo	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média e desvio padrão dos volumes coletados.....	93
Tabela 2 - Resultado da verificação do sensor de temperatura	113

LISTA DE SIGLAS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor Analógico para Digital)
BJT	<i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor de Junção Bipolar)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i> (Conversor Digital para Analógico)
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Gatilho Isolado)
IHM	<i>Interface</i> Homem Máquina
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IP	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo da Internet)
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
LiPO	<i>Lithium Polymer</i> (Lítio Polímero)
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Metal Óxido Semicondutor)
NA	Normalmente Aberto
NCM	Nomenclatura Comum Mercosul
NF	Normalmente Fechado
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
PC	<i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
PPR	<i>Pulse Per Resoluiton</i> (Pulso por Revolução)
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
RTC	<i>Real Time Clock</i> (Relógio de Tempo Real)
STP	<i>Shielded Twisted Pair</i> (Par Trançado com Malha)
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i> (Protocolo de Controle de Transmissão)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Delimitação do Tema	17
1.2 Problema	18
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
1.4 Justificativa	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Estado da Arte	20
2.1.1 Controlador CI3 <i>Watering Booms</i> – Da-Ros.....	23
2.1.2 Controlador <i>Perfect Rain</i> – Zwart System	23
2.1.3 Diferencial	24
2.2 Cultivo Protegido	24
2.2.1 Viveiros de mudas	25
2.3 Métodos e Sistemas de Irrigação	26
2.3.1 Irrigação Manual com Regador ou Mangueira	27
2.3.2 Microaspersão	28
2.3.3 Barra Irrigadora Móvel.....	30
2.4 Sistemas Embarcados	33
2.4.1 Arduino	33
2.4.2 Shields.....	34
2.5 Rede de Sensores sem Fio (RSSFs)	34
2.5.1 Internet das Coisas e Padrão <i>Wi-Fi</i>	34
2.5.2 Baterias	37
2.6 Sensores	39
2.6.1 <i>Encoder</i>	39
2.6.2 Chave Fim de Curso	42
2.6.3 Sensores de Umidade	43
2.6.4 Sensor Digital de Temperatura.....	48
2.7 Inversores de Frequência	49
3 METODOLOGIA	52
3.1 Sensor de Posição da Barra	52

3.2 Transmissor sem Fio - Sensores de Umidade e Temperatura	53
3.3 Controlador	54
3.4 Métodos de Controle	55
3.5 Interface de Operação e Programação	56
3.5.1 Tela de Programação das Receitas	56
3.5.2 Tela da Operação da Estufa.....	57
3.5.3 Tela de Alarmes	58
3.5.4 Tela de Históricos.....	59
4 DESENVOLVIMENTO	61
4.1 Transmissor sem Fio – Conjunto Sensor de Umidade e Temperatura.....	61
4.1.1 Interligação do Sensor de Umidade e Temperatura ao Wemos D1 Mini.....	61
4.1.2 Verificação da Corrente de Consumo do Conjunto Sensor.....	63
4.1.3 Circuito Auxiliar para Alimentação e <i>Sleep</i> do Wemos D1 Mini	64
4.1.4 Leitura de Umidade	66
4.1.5 Leitura de Temperatura	69
4.1.6 Fluxograma de Funcionamento.....	70
4.1.7 Comunicação com a <i>Interface</i> de Operação e Programação.....	71
4.1.8 Dispositivo Finalizado.....	72
4.2 Hardware do Controlador	74
4.2.1 Circuito de Alimentação.....	74
4.2.2 Interfaceamento das Entradas Digitais.....	75
4.2.3 Interfaceamento das Saídas Digitais.....	76
4.2.4 Conversor Analógico 0 a 10 V.....	79
4.2.5 <i>Real Time Clock</i> – RTC.....	82
4.2.6 Encoder.....	83
4.3 Software do Controlador	85
4.3.1 Controle por Programação Horária	87
4.3.2 Controle por Umidade – ON/OFF.....	89
4.3.3 Controle por Umidade – via Velocidade da Barra	92
4.3.4 Comunicação com a <i>Interface</i> de Operação e Programação.....	96
4.4 Interface de Operação e Programação	99
4.4.1 Tela Inicial	99
4.4.2 Tela de Programação de Receitas	99
4.4.3 Tela de Operação da Estufa.....	100

4.4.4 Tela de Históricos.....	102
4.4.5 Tela de Alarmes	103
4.5 Montagem da Estrutura da Barra.....	105
4.6 Quadro de Comando	105
5 RESULTADOS.....	110
5.1 Estrutura Completa Interligada	110
5.2 Resposta do Sensor de Umidade	111
5.3 Resposta do Sensor de Temperatura.....	112
5.4 Verificação do Consumo de Corrente do Conjunto Sensor	113
5.5 Verificação do Conversor de 0 a 10 V	115
5.6 Testes do Controlador	115
5.6.1 Teste do Controle por Programação Horária.....	115
5.6.2 Testes do Controle por Umidade – Controle ON/OFF.....	119
5.6.3 Testes do Controle por Umidade – Controle por Velocidade	121
5.7 Testes dos Alarmes	124
5.8 Comparativo entre Protótipo e Controlador CI3.....	126
6 CONCLUSÃO	127
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	129
REFERÊNCIAS.....	130
APÊNDICE A – LISTA DE PARÂMETROS INVERSOR.....	137
APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO DO CONTROLADOR.....	138
APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO DO TRANSMISSOR SEM FIO	142
APÊNDICE D – DIAGRAMA DE COMANDO DO QUADRO DE COMANDO.....	143
APÊNDICE E – DIAGRAMA DE FORÇA DO QUADRO DE COMANDO	144
APÊNDICE F – LISTA DE MATERIAIS DO PROTÓTIPO	145
APÊNDICE G – TELA DA ESTUFA DURANTE OPERAÇÃO	148
APÊNDICE H – PLANILHA DE CÁLCULO DE DURAÇÃO DA BATERIA.....	149
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES ARDUINO DUE	150
ANEXO B – ESQUEMA ELÉTRICO DO WEMOS D1 MINI.....	151
ANEXO C – ORÇAMENTO CONTROLADOR CI3.....	152
ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO.....	153

1 INTRODUÇÃO

O plantio em ambientes protegidos tem grande importância na produção de hortaliças. Devido à alta sensibilidade dessas culturas, esse sistema pode assegurar a produção em qualquer época do ano e em condições ambientais desfavoráveis como alta umidade, vento excessivo, alta incidência de pragas, etc. (RODRIGUES, 2015). Cultivar mudas de hortaliças a céu aberto para posteriormente serem replantadas pelo produtor final, pode comprometer o seu desenvolvimento, bem como deixá-las expostas às intempéries, pragas ou doenças. Através do cultivo protegido, as mudas apresentam um nível tecnológico mais elevado, há um aumento da produtividade e por consequência aumento do retorno financeiro. (BEZERRA, 2003).

A escolha adequada do sistema de irrigação é fundamental para atender as necessidades de água e nutrição de cada tipo de cultura, as necessidades de cada estágio de seu desenvolvimento, bem como obter o máximo rendimento possível proporcionado por cada tipo de sistema de acordo com as condições climáticas de cada região. (LOPES FILHO, 2013). Se uma área estiver cultivando couve, e outra tomate, por exemplo, o manejo da irrigação nestas áreas será diferenciado, pois cada cultura possui necessidades distintas, aplicando-se a mesma regra para uma mesma cultura em estágios distintos de desenvolvimento (MAROUELLI; FREITAS; COSTA JÚNIOR, 2010). Diferentemente dos cultivos em solo, o cultivo protegido que utiliza recipientes com substratos necessita uma maior frequência de irrigação devido ao pequeno volume das bandejas, tubetes ou outro recipiente utilizado (GERVÁSIO, 2003).

Um ponto importante que o sistema de irrigação deve propiciar é a uniformidade, ou seja, a aplicação de um mesmo volume de água em cada muda disposta nas células das bandejas. Assim, quanto maior for o índice de uniformidade, mais semelhantes serão os volumes de água dispostos, proporcionando que cada uma receba o volume de água necessário ao seu desenvolvimento. Outro aspecto importante é a eficiência no uso de água que garante uma economia financeira pelo uso racional desse importante recurso natural.

Dentre os sistemas de irrigação utilizados, segundo Farias Júnior (2004), a barra irrigadora móvel apresenta boa uniformidade na irrigação e excelente eficiência no uso de água. A barra irrigadora, apesar de ser um excelente sistema dependendo do controle utilizado, acaba por irrigar de maneira semelhante uma fileira inteira de

uma estufa, fazendo com que o produtor despenda de um grande tempo em logística para garantir que a mesma fileira tenha mudas da mesma cultura e mesmo estágio de desenvolvimento, ou então, tenha que irrigar manualmente áreas da fileira com plantas que necessitam de maior volume de água para não inserir um volume de água acima do necessário em outra cultura ou planta com estágio de desenvolvimento distinto.

A alternativa proposta por este trabalho é desenvolver um sistema de controle de baixo custo que possibilite a setorização de seu funcionamento em uma mesma fileira, a fim de aperfeiçoar o desempenho da barra irrigadora. Desta forma, o produtor poderá efetuar diferentes características de irrigação para cada setor, permitindo uma irrigação correta, uniforme e com baixo consumo de água. Entretanto, para garantir que os setores atendam a demanda de volume de cada cultura ou estágio de vida, um conjunto sem fio de sensores de umidade e temperatura será desenvolvido para o monitoramento da irrigação.

O projeto visa o menor custo possível e fácil aquisição para os equipamentos e materiais necessários para a construção do protótipo, tanto em função do baixo orçamento disponível para sua construção, quanto para torná-lo um produto acessível aos pequenos e médios produtores.

1.1 Delimitação do Tema

Este trabalho limita-se a fazer um resumo dos métodos e sistemas de irrigação, das características do cultivo protegido, das redes de sensores sem fio e da tecnologia *Wi-Fi*, dos sensores de umidade e temperatura e dos sistemas embarcados, concentrando-se nas principais características das barras de irrigação e em suas limitações. O trabalho também engloba a construção de um sistema de barra irrigadora móvel em escala reduzida e de um quadro de comando para o acionamento do motorreductor da barra, válvula de irrigação e motobomba. Não faz parte deste trabalho determinar qual é o mais adequado sistema de irrigação para o plantio de mudas de hortaliças, nem determinar o volume e frequência de irrigação para qualquer cultura, cabendo estes ao conhecimento específico do produtor.

1.2 Problema

Impossibilidade de o produtor agrícola inferir, de maneira flexível e com baixo custo, diferentes características de irrigação em uma mesma fileira de estufa que utilize a barra irrigadora móvel como sistema de irrigação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um dispositivo de baixo custo que permita ao produtor agrícola setorizar de maneira flexível a operação de uma barra irrigadora móvel, através de sensoriamento, possibilitando que em uma mesma fileira de estufa sejam atendidas diferentes necessidades de irrigação.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) identificar uma tecnologia sem fio de baixo custo, com componentes de fácil aquisição e que possibilite a prototipagem de um sensor sem fio;
- b) identificar um sensor de umidade e um de temperatura de baixo custo e com dimensões compatíveis às bandejas de substratos e de fácil interligação aos dispositivos que serão desenvolvidos;
- c) determinar um método de baixo custo capaz de detectar a posição da barra irrigadora ao longo da estufa;
- d) desenvolver um controlador de baixo custo que comandará o acionamento e a velocidade da barra irrigadora, bem como da motobomba e da válvula de irrigação, conforme programação feita pelo produtor através de uma *interface*;
- e) desenvolver uma *interface* gráfica para programação e operação do dispositivo;
- f) montar um quadro de comando para o acionamento da barra irrigadora, da válvula de irrigação e da motobomba.;
- g) analisar o funcionamento do protótipo desenvolvido em laboratório e em campo.

1.4 Justificativa

Caso existam em uma mesma fileira de estufa diferentes culturas ou mudas em diferentes estágios de desenvolvimento, estas necessitarão obrigatoriamente de volumes e frequências de irrigação distintas. Para se adequar a tal situação, uma alternativa é realizar a setorização da irrigação e logisticamente separar as plantas de acordo com cultura ou estágio de crescimento, realizando uma programação individual da característica da irrigação em cada setor.

Com a setorização flexível, o produtor poderá determinar a quantidade de setores e o tamanho de cada setor, alterando-os quando necessário, além de poder potencializar o funcionamento da barra irrigadora móvel, que com controladores convencionais, limita-se a uma única característica de irrigação ao longo de toda uma fileira da estufa.

Em visitas realizadas à diferentes produtores agrícolas do estado do RS, percebeu-se que utilizam simples sistemas de controle em função do alto custo de sistemas mais sofisticados, ou até desconhecimento dos mesmos, o que acaba limitando o potencial da barra irrigadora.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta etapa são descritas as características gerais dos sistemas de irrigação, com foco na barra irrigadora móvel cuja automatização é o objetivo deste trabalho. Descreve também características das tecnologias sem fio, dos métodos e sistemas de irrigação, do Arduino e de sensores a serem utilizados na criação do protótipo.

2.1 Estado da Arte

As variadas condições climáticas, disponibilidade de recursos e diferentes relevos fizeram com que a evolução dos sistemas e métodos de irrigação fosse diferenciada ao redor do mundo. Assim como alguns países possuem abundância em água potável ou vastas extensões de terra, outros sofrem com a pouca quantidade de aquíferos ou falta de território para o plantio.

A China, por exemplo, possui vastas regiões para plantio e técnicas milenares, como a *Karez* que consiste em cortes horizontais e verticais no solo para o transporte de água dos lençóis freáticos até a lavoura por meio de canais. Em contrapartida, o Japão enfrenta uma baixa disponibilidade de solo cultivável, cerca de 13% de seu território, o que o levou a utilização da hidroponia, método que consiste em cultivar plantas sem uso da terra, utilizando soluções nutritivas em substituição, cultivadas em estufas. Já Israel não enfrenta problemas com a falta de território e sim de água potável, obrigando-o a desenvolver inúmeras alternativas, como a irrigação por gota a gota para reduzir drasticamente o consumo de água. Os Estados Unidos, assim como Israel, geraram grande parte do conhecimento sobre técnicas alternativas de irrigação. No estado americano da Califórnia, por exemplo, uma das soluções encontradas foi o uso de água de degelo das montanhas. (TELLES, 2010).

Em Kyoto, no Japão, a empresa Spread Co. pretende construir um viveiro com alta tecnologia, conforme ilustra a figura 1, capaz de reutilizar cerca de 98% da água. As “Fazendas Verticais” são uma alternativa para garantir o abastecimento da população e ao mesmo tempo contornar o problema da falta de espaços. O plantio será feito por sistemas hidropônicos e aeropônicos, com controle de umidade, luminosidade e uso da água. (CICLOVIVO, 2017).

Figura 1 - Fazenda vertical em Kyoto



Fonte: CICLOVIVO (2017)

Israel, que possui um território com características desérticas e semiáridas, detém uma das agriculturas mais eficientes do mundo, com elevado teor tecnológico. Com a irrigação por gotejamento (gota-a-gota) são capazes de produzir legumes, verduras, frutos e flores com pouco consumo de água. A figura 2 mostra um grande volume de estufas em Moshav Hatzeva, no deserto de Arava ao sul de Israel. (BLECHER, 2012).

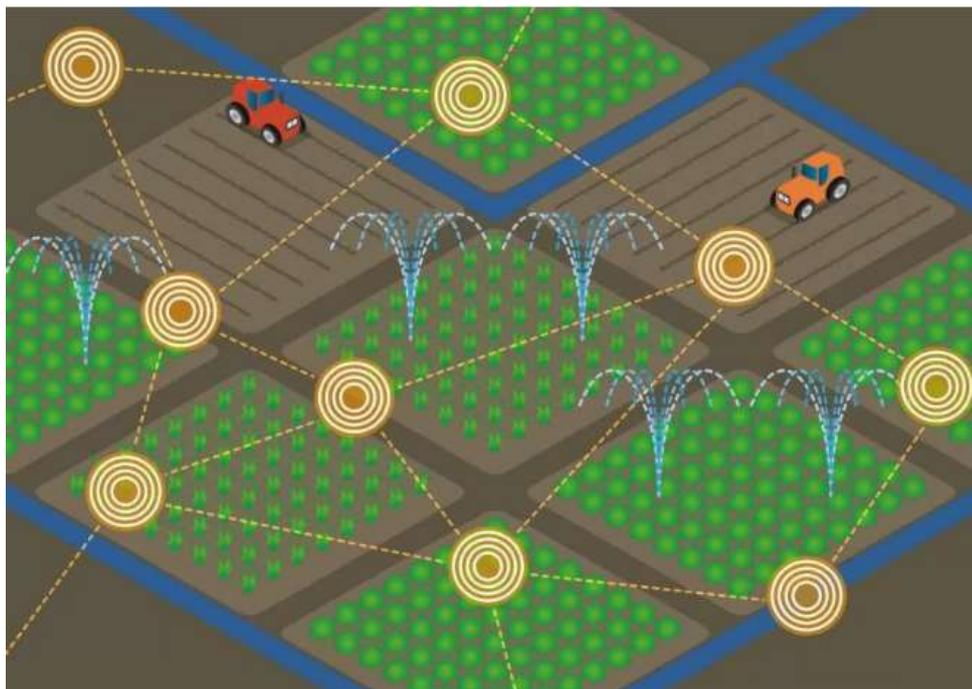
Figura 2 - Estufas de Moshav Hatzeva, no deserto de Arava.



Fonte: BLECHER (2012)

Dentre as diversas tecnologias empregadas, a Internet das coisas (*IoT*) tem se mostrado muito eficiente e com grande potencial ainda a ser explorado. A figura 3 ilustra o sensoriamento sem fio aplicado ao controle automático de máquinas agrícolas. MAXIMOCON (2017).

Figura 3 - *IoT* no agronegócio



Fonte: MAXIMOCON (2017)

Países como Austrália, Itália e Colômbia têm explorado essa tecnologia, aplicando-a a sensores sem fio para monitoramento de diversas variáveis. Na Austrália, por exemplo, a plantação do *Agapanthus*, planta nativa da África, é altamente beneficiada pelo *IoT*. Através de sensoriamento remoto é realizado o controle e monitoramento da temperatura, PH, oxigênio dissolvido, umidade e luminosidade de estufas, também realizam monitoramentos externos, como a direção e quantidade de chuvas e a velocidade do vento. (MAXIMOCON, 2017).

Quanto aos sistemas de barra irrigadora, uma alternativa muito viável para o baixo consumo de água e melhoria na qualidade da irrigação das plantas, empresas ao redor do mundo desenvolveram tecnologias capazes de aperfeiçoar o seu funcionamento como a Da-Ros e a Zwart Systems.

2.1.1 Controlador CI3 *Watering Booms* – Da-Ros

A empresa Da-Ros, da Itália, fornece um equipamento, chamado *CI3 Watering Booms* capaz de realizar o controle da velocidade, do número de ciclos da barra e a criação de 20 zonas independentes de irrigação. As zonas são configuradas no display por metros ou graficamente e permite 8 programações diárias. A figura 4 ilustra a tela de configuração do início e fim da zona, o número de ciclos e a velocidade. (DA-ROS, 2017)

Figura 4 - Tela de configuração do controlador CI3 da Da-Ros



INSERIMENTO ZONE						
ZONA		INIZ.	FINE	Np	M.	V.
01	ON	00.0	08.0	01	➔	05
02	ON	10.0	20.0	03	➔	07
03	OFF	----	----	--	--	--
04	OFF	----	----	--	--	--
05	OFF	----	----	--	--	--

1/4 >>

EXIT

Fonte: Adaptado de DA-ROS (2017)

2.1.2 Controlador *Perfect Rain* – Zwart System

Outro equipamento disponível é o *Perfect Rain DC Controller* da Zwart, empresa canadense. Ele oferece 64 zonas de irrigação, onde cada zona permite a programação da velocidade e número de ciclos da barra, bem como um cronograma de irrigação. Cada zona é delimitada através do posicionamento de ímãs ao longo do trilho, os quais são detectados por sensores, conforme ilustra a figura 5. (ZWART SYSTEM, 2017).

Figura 5 - Ímãs ao longo do trilho utilizados pelo controlador da Zwart



Fonte: Adaptado de ZWART SYSTEMS (2017)

2.1.3 Diferencial

Acredita-se que com custo de imposto e importação, esses equipamentos teriam um custo muito elevado para o pequeno e médio produtor. Desta forma, a proposta desse trabalho consiste em desenvolver um produto de baixo custo, com componentes de fácil aquisição no mercado nacional e que seja capaz de atender os objetivos propostos no capítulo anterior.

2.2 Cultivo Protegido

O cultivo protegido consiste na utilização de ambientes cobertos ou fechados para o plantio como estufas, túneis ou telados.

Esta prática traz grandes vantagens como possibilitar o controle de variáveis climáticas tais como temperatura, umidade, radiação solar, possibilidade de automação de atividades como a irrigação e o controle da incidência solar, proteção contra intempéries como chuva e granizo, entre outros, proporcionando aumento da produção, da produtividade e da qualidade dos produtos agrícolas. (TESTESLAF, 2011).

O cultivo protegido possibilita o cultivo em substratos, em solos ou em soluções nutritivas (hidropônica), permitindo assim o cultivo de diferentes culturas como flores,

folhagens, hortaliças, viveiros de mudas florestais e de hortaliças, etc. (TESTESLAF, 2011).

O substrato é todo material usado como meio de crescimento de plantas em substituição ao solo, sendo composto de um ou mais materiais orgânicos ou minerais. (GRUBER, 2006). São depositados em vasos, tubetes, bandejas como demonstrado na figura 6, ou em sacolas plásticas. Necessita que sejam depositados nutrientes junto à água no momento da irrigação, método chamado de fertirrigação. (GRUBER, 2006).

Figura 6 - Bandeja de isopor para mudas de hortaliças.



Fonte: TERMOTÉCNICA (2017)

2.2.1 Viveiros de mudas

O viveiro de produção de mudas consiste em uma área destinada à produção, manejo e proteção das mudas até que tenham se desenvolvido suficientemente para serem transplantadas ao local definitivo. Entre as principais instalações de um viveiro pode-se destacar a casa do viveirista, galpão para trabalho em dias de chuva, reservatórios de água para irrigação, depósitos, almoxarifado, local de produção, casa de vegetação (estufas) e casa de sombra (sombreados). (WENDLING; FERRARI; GROSSI, 2002). Testezlaf (2011) emprega a denominação telado para casa de sombra.

As estufas, onde ficam dispostas as mudas após a semeadura para seu desenvolvimento, possuem diversos formatos e dimensões. Conforme Modolo (2015), a estrutura e a cobertura a serem adotadas na estufa dependem dos fatores

econômicos e climáticos do local onde será instalada. A figura 7 demonstra uma montagem real de estufa com a disposição das bandejas.

Figura 7 - Estufa em formato de arco, dentro da qual estão dispostas as bandejas com mudas.



Fonte: MODOLO (2015, p. 37)

Segundo Brandão e Marouelli (2016) a produção de mudas de hortaliças por viveiristas é feita exclusivamente em bandejas, fabricadas em isopor ou resina plástica, que podem possuir 128, 200, 288 células, entre outros valores.

2.3 Métodos e Sistemas de Irrigação

De acordo com Dicionário Escolar da Academia Brasileira de Letras entende-se método como o modo de proceder ou agir em determinada atividade. (BECHARA, 2012). Já por sistema, entende-se como conjunto de elementos que se inter-relacionam. (BECHARA, 2012).

Desta forma, pode-se entender como sistema de irrigação um conjunto de equipamentos, acessórios e modos de operação automatizados ou não, que de forma organizada e sistêmica são capazes de irrigar diferentes culturas, através de diferentes métodos, e como método a maneira da água ser inserida nesta cultura.

Conforme Testezlaf (2011) os métodos de irrigação mais difundidos são aspersão, localizada, de superfície e subterrânea dentre os quais se destacam os sistemas de irrigação comumente utilizados, conforme ilustra o quadro 1:

Quadro 1 - Métodos e sistemas de irrigação

Métodos	Características da irrigação	Sistemas de irrigação
Localizada	Aplicada em área limitada sobre o solo, preferencialmente abaixo da copa das plantas.	Gotejamento; Microaspersão; Borbulhamento; Exsudação.
Aspersão	Aplicada sobre plantas e sobre o solo.	Aspersão Convencional; Aspersão Mecanizada.
Superfície	Aplicada somente à superfície do solo, de forma parcial ou total.	Inundação; Sulcos;
Subterrânea	Aplicada abaixo da superfície solo.	Elevação do lençol freático; Gotejamento subsuperficial; Hidropônica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na produção de mudas de hortaliças, os sistemas fixos por microaspersão são muito utilizados por molharem áreas menores, de forma localizada. Quando a produção é em pequena escala, costuma-se usar o regador com crivo fino, mangueira com crivo fino ou difusor fixado na ponta. Quando a produção é em grande escala a irrigação também pode ser feita por sistemas automatizados de aspersão como a barra irrigadora móvel, com velocidade controlada sobre as bandejas das mudas dispostas ao longo da estufa. (BRANDÃO; MAROUELLI, 2016).

2.3.1 Irrigação Manual com Regador ou Mangueira

A irrigação manual é aplicada em pequenas áreas devido ao trabalho ser puramente braçal. Segundo Testezlaf (2011), esse tipo de irrigação requer intensivo

trabalho humano, possui baixa uniformidade na aplicação, perdas consideráveis de água e baixa eficiência. Entretanto, o investimento inicial é baixo.

O regador com crivo fino é uma das maneiras de realizar a irrigação de forma manual sem agredir a planta, ainda em fase de formação. Segundo Brandão e Marouelli (2016), as gotas aplicadas sobre as mudas devem ter pequeno calibre para que elas não sofram danos mecânicos.

Com o mesmo intuito pode-se utilizar mangueiras com crivo ou difusor conforme ilustra a figura 8, tendo como vantagem em relação ao regador a não necessidade de reabastecimento e maior alcance.

Figura 8 - Mangueira com difusor



Fonte: COSTA JÚNIOR (2017, p. 12)

2.3.2 Microaspersão

A microaspersão é um sistema de irrigação baseado no método localizado, no qual os emissores liberam jatos finos que atingem pequenas distâncias antes de tocar o solo. São instalados fixos na posição em pé ou invertida, de acordo com a finalidade de projeto, e ilustrados na figura 9. (TESTEZLAF, 2011).

Figura 9 - Microaspersores montados na posição invertida sobre as bandejas em uma estufa



Fonte: TERRA MOLHADA (2017)

Neste sistema, a tubulação, motobomba e demais componentes não são móveis. Os emissores são os microaspersores, que são um dispositivo mecânico onde a própria pressão da água na tubulação onde está instalado faz com que ele entre em funcionamento, pulverizando um jato de água ao seu redor. Encontram-se comercialmente modelos com partes móveis, chamados de rotativos ou dinâmicos e outros fixos, chamados de sprays ou estáticos, demonstrados nas figuras 10 e 11 respectivamente.

Figura 10 - Microaspersor rotativo



Fonte: GARDENA (2017)

Figura 11 - Microaspersor estático



Fonte: PTI CONEXÕES (2017)

2.3.3 Barra Irrigadora Móvel

A barra irrigadora móvel, segundo Farias Júnior (2004, p. 10),

É um equipamento com tração própria, para aplicação de água, solução nutritiva e defensivos químicos, que corre em um trilho suspenso na estrutura da estufa ou em um corredor no solo, em velocidade variável de acordo com a necessidade do usuário, cobrindo apenas o segmento do viveiro que necessita de tratamento

Apesar de denominada como um método de aspersão por Brandão e Marouelli (2016), ao se analisar o quadro 1, é possível verificar que a barra irrigadora possui uma característica importante da irrigação localizada: irrigar uma área limitada do solo. Segundo Júnior (2004) o grande diferencial da barra é a precisão, ou seja, fornece a quantidade certa de água, nutrientes ou defensivos no local exato. Além disso, permite a pulverização de defensivos, possuindo dois sistemas independentes na mesma barra, um para irrigar e outro para pulverizar, aumentando a segurança do trabalhador já que este não fica em contato direto com o defensivo.

A base de sua construção é composta por uma tubulação rígida na qual são fixados os bicos pulverizadores; uma mangueira, responsável por fornecer a água para a tubulação rígida; um sistema de tração, que pode ser, por exemplo, um conjunto de polias e correias; um trilho de sustentação; um motorreductor conectado ao sistema de tração; um sistema de controle de velocidade do motor e um painel de comando.

A figura 12 ilustra uma barra irrigadora em movimento, onde pode-se perceber a tubulação rígida com os bicos pulverizadores, os trilhos de sustentação e o motorreductor.

Figura 12 - Estrutura básica: a) Motorreductor, b) Tubulação Rígida, c) Trilho de Sustentação



Fonte: Adaptado de AGRIESTUFA (2016)

Os bicos pulverizadores, demonstrados na figura 13, são responsáveis por emitir o jato d'água à superfície da bandeja. É importante a regulação dos jatos dos bicos para que se sobreponham garantindo cobertura total e uniformidade da área de aplicação. Existem diversos tipos e formatos, cada qual com características específicas para atender às especificações do projeto hidráulico e da área de irrigação.

Figura 13 - Bico pulverizador



Fonte: Elaborado pelo autor

Esses sistemas contam geralmente com um painel de controle, onde há um botão liga/desliga, um potenciômetro interligado ao conversor de frequência onde o operador ajusta manualmente a velocidade da barra irrigadora, uma botoeira de emergência e, em alguns casos, um interruptor horário para acionamento automático inversor de frequência, dispositivos de proteção (DPS, relé térmico, disjuntor termomagnético, etc.) e sensores fim de cursos. Pode ainda contar com um contador, para o controle da quantidade de ciclos de movimentação da barra, chamados popularmente como o número de “passadas” da barra.

O conversor de frequência tem por finalidade controlar a velocidade do motorreductor e, por consequência, da barra irrigadora. A velocidade de deslocamento da barra determina o volume da lâmina aplicada às mudas, permitindo assim ao agricultor um controle mais preciso do volume de água aplicado.

O volume total de água aplicado pode ser controlado pela combinação da velocidade da barra com o número de ciclos dela. É possível obter um mesmo volume com uma velocidade baixa e um pequeno número de ciclos, ou uma velocidade maior com um número maior de ciclos. A quantidade de ciclos da barra, bem como sua velocidade é determinada de forma empírica pelo operador, baseado em sua experiência e tem como ponto determinante fatores climáticos, tipo e estágio de cada cultura. Este trabalho não tem o intuito de determinar a melhor combinação desses fatores.

Em geral, há dois sensores fim de cursos posicionados nas extremidades da estufa cujas funções são de reverter e/ou interromper o movimento da barra. Assim,

a barra fica nesse “vai-e-vem” até a quantidade de ciclos programadas no contador (quando existir) forem concluídas ou operador desligá-la.

2.4 Sistemas Embarcados

Sistemas embarcados, parte integrante de muitos dispositivos modernos, são sistemas eletrônicos computacionais desenvolvidos para um propósito específico. Tem como características gerais o baixo custo, tamanho reduzido, baixo consumo de energia, entre outros. (CARISSIMI; NETTO; CARRO, 2010).

Antes do projeto final do sistema, é possível simulá-lo em plataformas de prototipagem, dentre as quais podem se destacar o Arduino, Raspberry Pi, Beagle Bone, etc. Este projeto faz uso da plataforma Arduino.

2.4.1 Arduino

O Arduino é plataforma de prototipagem eletrônica, que teve origem no *Interaction Design Institute* na cidade de Ivrea, Itália, em 2005. É um sistema barato, de código aberto e fácil programação e que tem encontrado grande aceitação no mercado, principalmente no meio acadêmico. Atualmente existem inúmeras versões do Arduino, dentre as quais podemos destacar a Uno, Duemilanove e Mega. (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

Cada versão possui características de hardware distintas e se enquadram em níveis distintos de funcionalidade e desempenho, conforme as exigências de projetos.

O Arduino DUE, ilustrado na figura 14, é uma placa com funcionalidades mais avançadas, geralmente utilizadas em projetos mais complexos, que envolvem funções matemáticas mais complexas e um elevado número de entradas e saídas. É baseado em um microcontrolador ARM de 32bits, possui 54 entradas e saídas digitais, 12 entradas analógicas e 2 saídas analógicas. A especificação completa pode ser vista no Anexo A - Especificações do Arduino. (ARDUINO, 2017).

Figura 14 - Arduino DUE



Fonte: ARDUINO (2017)

2.4.2 Shields

Shields são placas fornecidas para agregar alguma função específica ao Arduino, geralmente quando esta não é nativa em sua própria placa. Existem diversos modelos de Shields, com funções como RTC (*Real Time Clock* – Relógio de tempo real), cartão SD, Ethernet, drive para motores de passo, etc.

2.5 Rede de Sensores sem Fio (RSSFs)

Redes de sensores sem fio (RSSFs) são sistemas integrados capazes de monitorar o ambiente através de sensores, onde cada sensor é um nó da rede, pode realizar coleta de dados e transmiti-los sem a necessidade de cabos até um nó integrador que irá processá-los. (HERNANDEZ; KALIL, 2013).

A rede sem fio é composta de diversos dispositivos como sensores, microcontroladores e *interface* de rede. O Arduino, com uso de Shields, permite a conectividade com diversos padrões como o Ethernet, *Wi-Fi*, Bluetooth, ZigBee, entre outros. (HERNANDEZ; KALIL, 2013).

2.5.1 Internet das Coisas e Padrão *Wi-Fi*.

O termo Internet das Coisas, ou *Internet of Things (IoT)* em inglês, foi utilizado pela primeira vez por Kevin Ashton em 1999. (UCKELMANN et al., 2011).

A internet das coisas consiste na ideia de interligar diversos dispositivos através da rede, permitindo a troca de informações e a automação de processos.

As redes sem fio facilitam a conectividade de dispositivos à rede, sendo a tecnologia *Wi-Fi* a mais empregada na *IoT*. (DOKNIC, 2014).

Um exemplo de emprego dessa tecnologia na agricultura é o sistema da australiana *National Farmers Federation*, o qual permite aos agricultores acesso às informações como nível de irrigação e de fertilizantes, nível de crescimento da planta, etc. através de sensoriamento sem fio e conexão à rede para obtenção dos dados. (ALBERTIN, ALBERTO LUIZ, 2018).

O padrão *Wi-Fi* é baseado no padrão IEEE 802.11 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, ou *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) do inglês e é mantido pela entidade *Wi-Fi Alliance*. Esse padrão sofreu variações ao longo dos anos, encontrando-se, entre outros, os padrões 802.11b, 802.11a, 802.11g, 802.11n, 802.11ac, cada qual com suas particularidades. (INFOWESTER, 2018).

O módulo ESP8266 da Espressif é capaz de se conectar facilmente à rede *Wi-Fi*. Ele tem suporte nativo ao protocolo TCP/IP e, dependendo do modelo, tem antenas embutidas na PCB ou externas. Possui pinos de entrada e saída digital, pinos de entrada analógica, RTC e pode hospedar aplicações de variadas complexidades. (ESPRESSIF, 2017).

A Wemos Mini, ilustrada pela figura 15, é uma placa de prototipagem, assim como o Arduino. Possui integrada um ESP8266EX, 1 pino de entrada analógica de 10 bits, 11 pinos de entrada/saída digital, sendo que todos, exceto o pino D0, possuem suporte a interrupção, PWM, I2C, e One-Wire e sua programação pode ser realizada pela própria IDE do Arduino com o uso de bibliotecas específicas como *ESP8266WiFi.h*. (WEMOS, 2018). O esquema completo da placa encontra-se no Anexo B – Esquema Elétrico do Wemos D1 Mini.

Figura 15 - Placa Wemos D1 Mini



Fonte: WEMOS (2018)

O quadro 2 faz uma comparação entre as informações da Wemos D1 Mini e do Arduino Due.

Quadro 2 - Comparação entre Wemos D1 Mini e Arduino Due

Especificação	Wemos D1 Mini	Arduino Due
Microcontrolador	ESP8266EX	AT91SAM3X8E
Clock	80 / 160 MHz	84 Mhz
Flash	4 Mb	512 kb
Entrada/Saída Digital	11	54
Entrada Analógica-ADC	1	12
Saída Analógica-DAC	0	2
Bits do ADC	10	12
Pinos Digitais (Vcc)	3,3 V	3,3 V
DAC (Vcc)	-	0,55 ~ 2,75 V
ADC (Vcc)	0 ~ 3,3 V	0 ~ 3,3 V
Tensão de Entrada	4,3V ~ 6,5 V	7 ~ 12 V

Fonte: Adaptado de WEMOS (2018) e ARDUINO (2017)

2.5.2 Baterias

Em dispositivos sem fio, como sensores, o uso de baterias se torna quase que indispensável. Existem baterias de diversos formatos, níveis de tensão, capacidades de carga, densidades de energia e características construtivas. O quadro 3 demonstra algumas características de baterias de distintas formas construtivas.

Quadro 3 - Comparação entre tipos de bateria

Formato	Química	Tensão Nominal	Recarregável
AA, AAA, C e D	Alcalina ou Zinco-Carbono	1,5 V	Não
9V	Alcalina ou Zinco-Carbono	9 V	Não
Moeda (<i>Coin</i>)	<i>Lithium</i>	3 V	Não
<i>Flat Pack</i>	<i>Lithium Polymer</i>	3,7 V	Sim
AA, AAA, C e D	<i>NiMH ou NiCd</i>	1,2 V	Sim
Bateria veicular	Chumbo-Ácido	12,6 V	Sim

Fonte: Adaptado de SPARKFUN (2017)

Segundo Sparkfun (2017), as baterias de *Lithium Polymer*- LiPo são muito utilizadas em circuitos eletrônicos embarcados, pois elas possuem a maior densidade de carga prontamente disponível no mercado, que é a relação entre a capacidade de carga e as dimensões da bateria, ou seja, é possível ter baterias de tamanho reduzido com uma capacidade de carga relativamente alta, além, é claro, do fato de serem recarregáveis. Essas características são excelentes para dispositivos móveis, o que justifica seu uso predominante em aparelhos celulares, por exemplo.

Entretanto, ainda segundo Sparkfun (2017), são necessários alguns cuidados com este tipo de bateria, como não exceder 4,2 V em sua carga (*Charge Cut-Off Voltage* – Tensão de Desligamento na Carga) e não a descarregar abaixo de aprox. 3,0 V (*Discharge Cut-Off Voltage* – Tensão de Desligamento na Descarga) sob o risco de danificá-la e até mesmo incendiá-la. Em função disso, algumas baterias de LiPo possuem um pequeno circuito eletrônico junto a bateria para proteção, desconectando-a quando a tensão for inferior a 3,0 V. A figura 16 demonstra uma

bateria de LiPo com circuito de proteção integrado, um carregador adequado para esse tipo de bateria e uma conexão feita por meio de conectores que impossibilitam a inversão de sua polaridade. A quantidade de ciclos estimada para as baterias de LiPo, segundo Battery University (2017), é em média 250, podendo ser aumentada com o uso de carregadores apropriados, com armazenamento adequado isento de calor e umidade, etc.

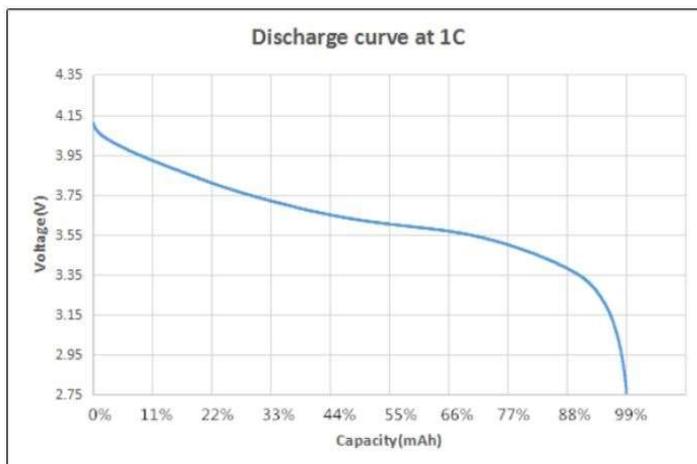
Figura 16 - Bateria de LiPO e carregador USB



Fonte: SPARKFUN (2017)

O gráfico 1 demonstra a curva de descarga de uma bateria de LiPO de 200 mAh 3.7V. A descarga é realizada sob carga de 200 mA (1C).

Gráfico 1 - Curva de descarga de bateria de LiPO



Fonte: GODSON TECHNOLOGY (2017)

2.6 Sensores

Este item descreverá as características dos sensores que serão utilizados no desenvolvimento do protótipo.

2.6.1 Encoder

Encoders são transdutores de movimentos rotativos para sinais elétricos. Suas características construtivas são ilustradas no quadro 4. (TCS3, 2017). São amplamente utilizados quando se faz necessário determinar distâncias, velocidades ou posições de máquinas ou equipamentos. (HIT TECNOLOGIA, 2018).

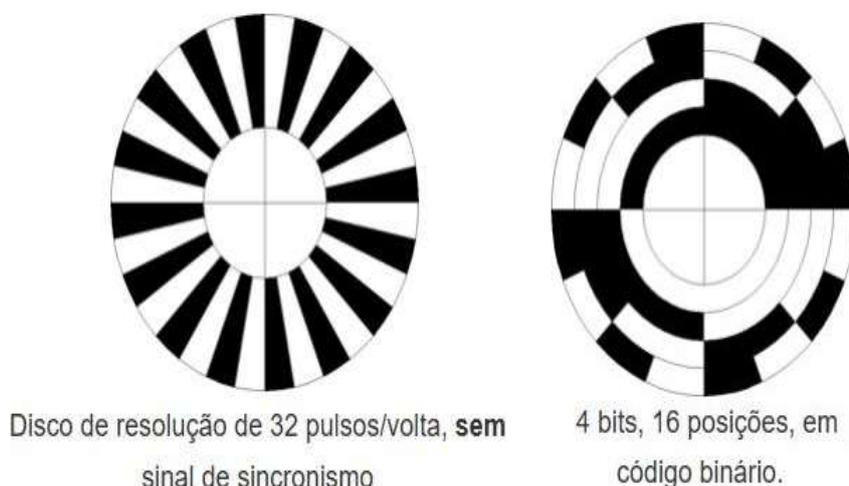
Quadro 4 - Caracterização dos *encoders*

Leitura do elemento codificador	Contato ou sem contato
Tipo de saída	Absoluta ou incremental
Método a leitura do elemento codificador	Condução elétrica, magnético, óptico, capacitivo.

Fonte: Adaptado de TCS3 (2017, p. 10)

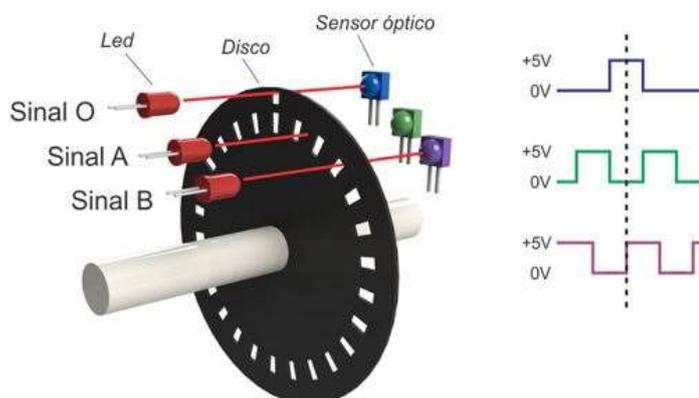
Encoders com contato são aqueles que empregam contato mecânico entre uma escova e o disco, ilustrado na figura 17, realizando sua leitura por meio de condução elétrica. Já *encoders* sem contato empregam métodos de leitura destes discos como o magnético, óptico ou capacitivo. Os *encoders* com método óptico são os mais empregados atualmente e permitem elevada resolução, precisão e eficiência para altas velocidades. Geralmente usam um fototransistor ou fotodiodo como elemento sensor, conforme ilustra a figura 18. Quando essas características não são fundamentais para a aplicação, o *encoder* com contato pode atender satisfatoriamente. (TCS3, 2017).

Figura 17 - Discos de *encoder* incremental e absoluto



Fonte: Adaptado de HIT TECNOLOGIA (2018)

Figura 18 - *Encoder* óptico



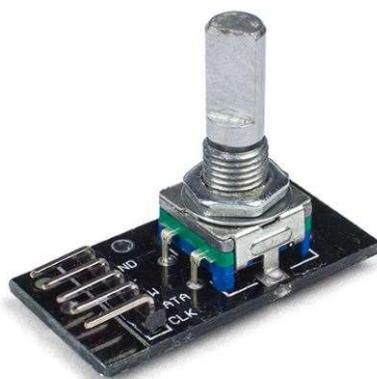
Fonte: HIT TECNOLOGIA (2018)

Os *encoders* absolutos fornecem em sua saída uma palavra digital, em código binário ou Gray, que determina a posição absoluta do seu eixo. A quantidade de posições mapeadas depende da quantidade de bits de saída. Um *encoder* absoluto com 4 bits de saída, por exemplo, possui até 2^4 ou 16 posições mapeadas. Quanto maior o número de bits de saída, mais posições são mapeadas e mais expressivo é o custo do *encoder*. Sua grande vantagem é de justamente fornecer em sua saída a posição absoluta do eixo e, mesmo em caso de falta de energia, essa informação permanecer. (HIT TECNOLOGIA, 2018).

Os *encoders* incrementais geram um trem de pulsos para cada volta completa do seu eixo (pulsos por revolução – PPR) e, através de sua contabilização, pode-se determinar a posição relativa do eixo do *encoder*. São fáceis de usar e mais baratos, quando comparados aos *encoders* absolutos. Em função da saída ser um trem de pulsos e não uma palavra digital específica para cada posição, o *encoder* incremental precisa ser referenciado em caso de falta de energia. (HIT TECNOLOGIA, 2018).

Um *encoder* incremental de baixo custo desenvolvido para prototipagem é o KY-040, ilustrado na figura 19. Ele pode ser facilmente integrado ao Arduino através da biblioteca *RotaryEncoder.h*. que provê *debouncing* e rotinas de checagem para uma contagem mais robusta e melhor imunidade a ruídos. (MATHERTEL, 2017).

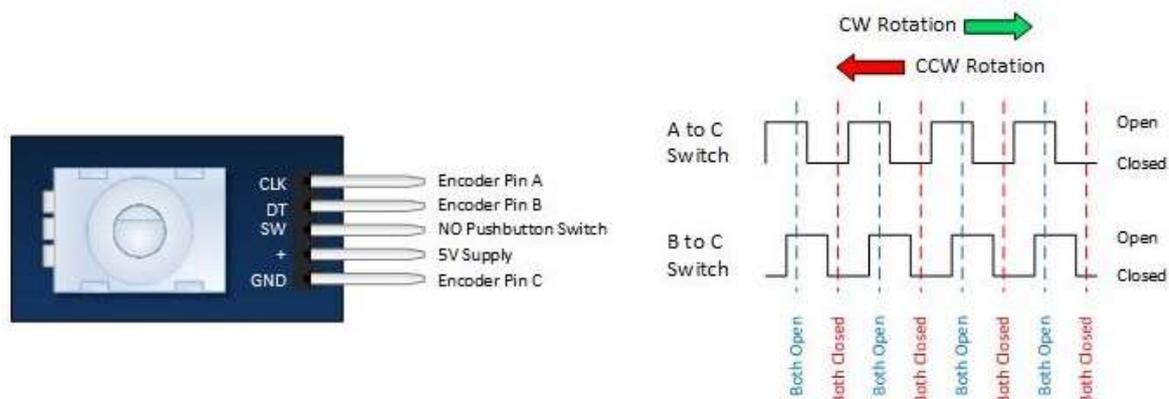
Figura 19 - *Encoder* KY-040



Fonte: ROBOCORE (2017)

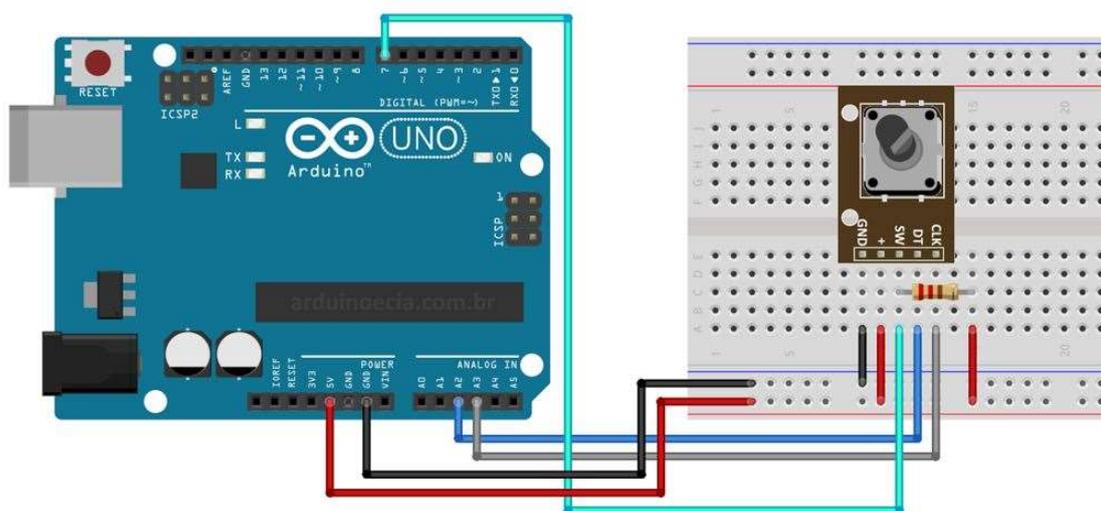
Trata-se de um *encoder* incremental de 20 PPR com dois canais de saída. Através da leitura da borda de subida e descida destes canais, trabalho este realizado pela biblioteca, pode-se determinar, além da posição do eixo em função da contabilização dos pulsos, o sentido de giro: horário ou anti-horário. A figura 20 ilustra os pinos do *encoder* e o trem de pulsos gerado em pelos seus dois canais. (HENRYSBENCH, 2017).

Figura 20 - Pinagem e forma de onda dos canais



Fonte: Adaptado de HENRYSBENCH (2017)

A figura 21 exemplifica a ligação do *encoder* nas estradas analógicas do Arduino.

Figura 21 - Ligação do *encoder* no Arduino

Fonte: ARDUINO E CIA (2018)

2.6.2 Chave Fim de Curso

Chaves fim de curso são dispositivos eletromecânicos onde um atuador aciona um conjunto de contatos elétricos por meio de uma ligação mecânica. Quando ocorre contato físico de um objeto com o atuador, este comuta mecanicamente os contatos

de posição. Os contatos podem ser normalmente abertos (NA) ou normalmente fechado (NF). (ROCKWELL, 2017).

Existem diversos formatos de atuadores com o objetivo de se adequar ao movimento do objeto, conforme ilustra a figura 22.

Figura 22 - Chaves fim de curso



Fonte: RTECH (2017)

2.6.3 Sensores de Umidade

A medição da umidade do solo é um fator extremamente importante na irrigação, pois além de permitir reduzir gastos com energia elétrica e água, permite ao agricultor conhecer as características de consumo de água da plantação e assim determinar quanto e quando será necessário irrigar. (BRANDERALI, 2010).

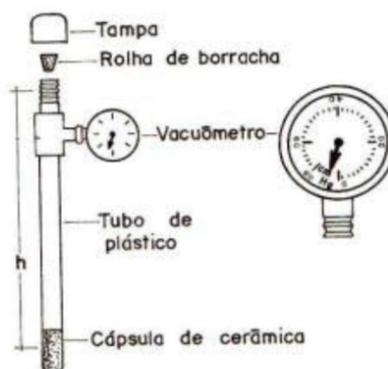
Uma tecnologia de medição de umidade bastante difundida é a tensiometria. Conforme Azevedo e Silva (1999, p.8)

O tensiômetro consiste em uma cápsula porosa geralmente de cerâmica ou porcelana, conectada a um medidor de vácuo (que pode ser um vacuômetro metálico ou um manômetro de mercúrio) através de um tubo plástico ou de outro material, tendo todas estas partes preenchidas com água. A cápsula porosa é permeável à água e aos solutos na solução do solo, sendo, entretanto, impermeável a gases e à matriz do solo, até determinado nível de tensão

Quando o solo estiver saturado de água e o tensiômetro analógico, ilustrado pela figura 23, estiver completamente cheio, não haverá fluxo de água pela cápsula,

não decaindo a pressão. À medida que o solo for secando, a água sai pela cápsula criando vácuo, cuja amplitude é indicada pelo vacuômetro. (AZEVEDO; SILVA, 1999).

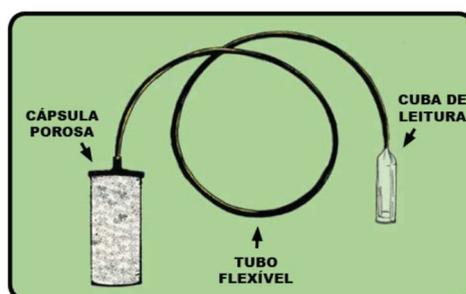
Figura 23 - Tensiômetro analógico



Fonte: SILVEIRA; STONE (1994)

Outra tecnologia, patenteada pela Embrapa, é o Irrigas. É composto por uma cápsula porosa, enterrada ao solo ou substrato, conectada através de um tubo flexível a uma cuba de leitura, demonstrada na figura 24. A cápsula deixa passar ar quando os poros não estão totalmente cheios de água. À medida que o solo umedece, esses poros fecham e não há passagem de ar, impedindo a entrada de água na cuba. Quando o solo seca, volta a ter passagem de ar e a água passa a entrar na cuba de leitura. (MAROUELLI; FREITAS; COSTA JÚNIOR, 2010). Em equipamentos automáticos como o controlador MRI da Hidrosense, o Irrigas trabalha com gás pressurizado nos poros da cápsula cerâmica e a leitura dos sensores pela central de medição é feita pneumaticamente, através de micro tubos, não havendo cuba de leitura. (HIDROSENSE, 2017).

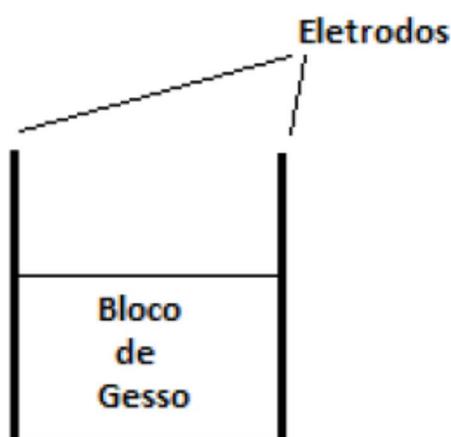
Figura 24 - Sistema Irrigás®



Fonte: MAROUELLI; FREITAS; COSTA JÚNIOR (2010, p. 13)

Outro método que pode ser destacado é o método dos Blocos de Resistência Elétrica. Dois eletrodos, conforme figura 25, são inseridos em blocos capazes de absorverem água como blocos de cimento, argila, gesso, etc. e posteriormente são enterrados no solo. A quantidade de água presente altera a resistência elétrica entre os eletrodos, já que a água apresenta melhor condutividade elétrica que o solo. Sendo assim, a resistência elétrica medida é inversamente proporcional a umidade do solo. (MENDES, 2006).

Figura 25 - Sensor baseado no método de Blocos de Resistência Elétrica



Fonte: MADALOSSO (2014, p. 20)

A equação polinomial obtida experimentalmente por Mendes (2006) que relaciona o teor de umidade absorvida pelo solo com a resistência elétrica, normalizada a 25°C, é demonstrada abaixo pela equação 1.

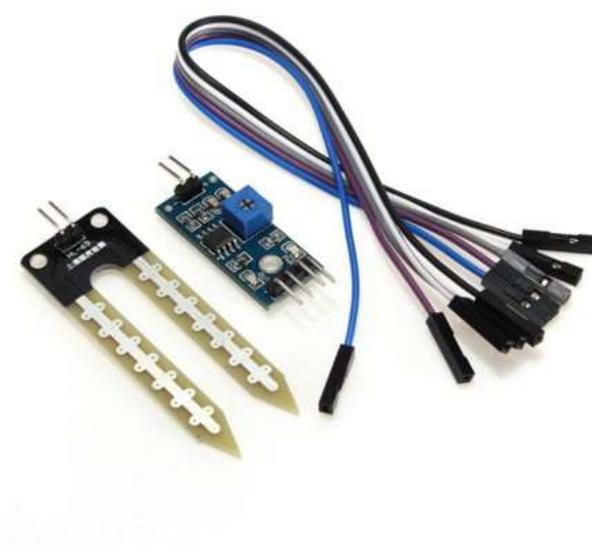
$$R = -a_1 \times U^7 + a_2 \times U^6 - a_3 \times U^5 + a_4 \times U^4 - a_5 \times U^3 + a_6 \times U^2 - a_7 \times U + a_8 \quad (1)$$

onde a_1 é igual a 0,00000000102 , a_2 é igual a 0,00000040016 , a_3 é igual a 0,00006415196, a_4 é igual a 0,00547471378, a_5 é igual a 0,27280483741, a_6 é igual a 8,28062708986, a_7 é igual a 154,65822054297 e a_8 é igual a 1651,17365275634

Uma derivação do método de Blocos, bastante encontrada em meio a fornecedores de componentes para a construção de sistemas embarcados, é a de sensores com dois eletrodos, os quais não são inseridos em blocos, sendo estes

conectados diretamente ao solo. Um exemplo desses sensores é sensor de umidade de solo para Arduino, ilustrado na figura 26. Ele possui dois eletrodos que detectam a condutividade do solo, que é proporcional a sua umidade e um módulo eletrônico, baseado no circuito integrado comparador de tensão LM393, que converte esta leitura em um sinal proporcional de tensão. (14CORE, 2018). As características do sensor estão dispostas no quadro 5.

Figura 26 - Sensor de umidade de solo para Arduino



Fonte: VIDA DE SILICIO (2018)

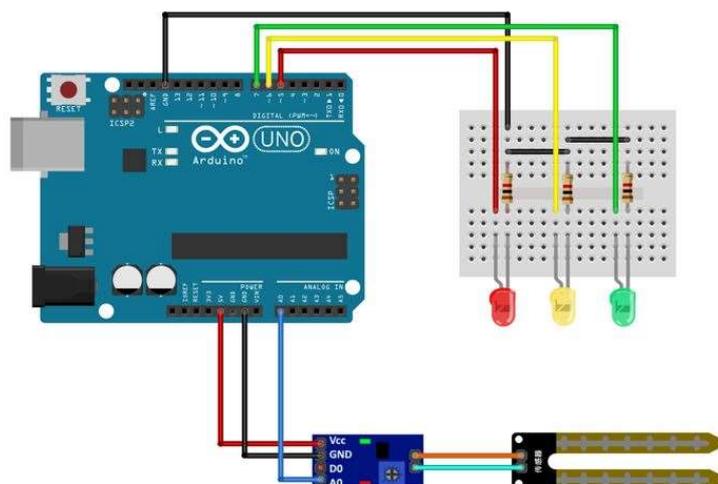
Quadro 5 - Características do sensor de umidade de solo

Item	Min.	Máx.	Unid.
Tensão	3,3	5	V
Corrente	0	35	mA
Saída	0	4,2	V

Fonte: Adaptado de 14CORE (2018)

A figura 27 exemplifica a ligação do sensor de umidade de solo à uma entrada analógica do Arduino. O sensor possui 4 pinos: 2 para alimentação (Vcc e GND), uma saída digital (D0), que aciona quando a umidade atingir o valor desejado que é estabelecido via o trimpot presente na placa, e uma saída analógica (A0) inversamente proporcional à umidade detectada pelos eletrodos.

Figura 27 - Ligação do sensor de umidade no Arduino



Fonte: FILIPEFLOP (2018)

Um outro método difundido são os sensores capacitivos que se baseiam na variação da capacitância elétrica entre placas condutoras paralelas separadas por um meio dielétrico (solo). Baseado em um oscilador, a partir da medida da variação da frequência, a permissividade do solo pode ser determinada e conseqüentemente seu conteúdo de água através de uma equação obtida por meio de um processo de verificação e ajuste. (SEGUNDO, 2010).

O sensor EC-5 da Decagon, ilustrado na figura 28 utiliza o princípio capacitivo e opera em uma frequência de 70Mhz para minimizar os efeitos de textura e salinidade do solo. (DECAGON, 2018).

Figura 28 - Sensor EC-5 da Decagon

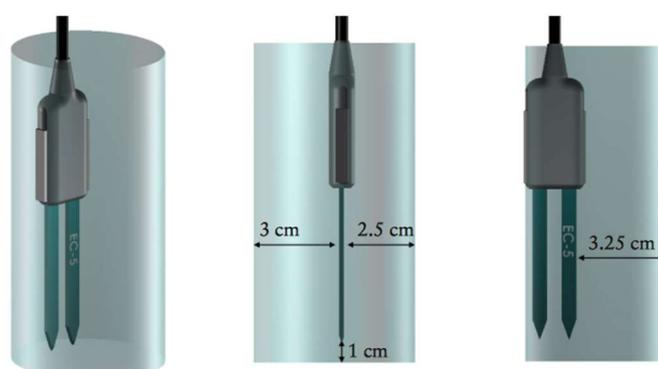


Figure 4: Idealized Measurement Volume of Decagon EC-5 Sensor

Fonte: DECAGON (2018)

2.6.4 Sensor Digital de Temperatura

A grande maioria dos sensores de temperatura disponíveis no mercado são analógicos, tendo como grandeza de saída a resistência elétrica como termistores (NTC e PTC) e as termorresistências (Pt100) ou a tensão elétrica, como os termopares, por exemplo. (BEGA et al., 2006) Para a leitura dessas grandezas se faz necessário o condicionamento do sinal para uma faixa de tensão (0 – 3,3 V, por ex.) e a leitura por meio de um Conversor Analógico Digital (ADC – *Analog Digital Converter*) de um microcontrolador. Caso este microcontrolador não possua um ADC, é necessário a implementação de um externamente.

Os sensores de temperatura digitais, como o DS18B20, possibilitam a leitura de temperatura através de um pino digital do microcontrolador, o que é extremamente vantajoso quando, por exemplo, o microcontrolador possui apenas um ADC como é o caso do Wemos, e este já estiver em uso.

O DS18B20 da Dallas Semiconductor é um sensor de temperatura digital, com resolução configurável que utiliza o protocolo One-Wire. O quadro 6 demonstra um resumo de suas características.

Quadro 6 - Características básicas do DS18B20

Parâmetro	Min.	Máx.	Unid.
Medição de temperatura	-55	125	°C
Resolução	9	12	bits
Alimentação	3,0	5,0	V

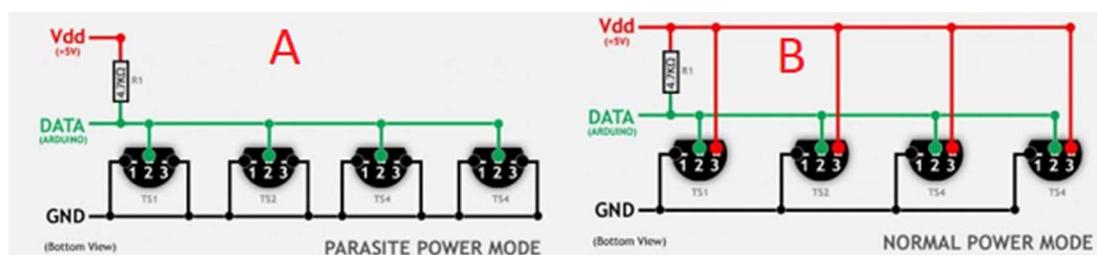
Fonte: Adaptado de DALLAS (2018)

Este sensor pode ser facilmente implementado com o Arduino através da biblioteca *OneWire.h*. Segundo Tweaking4All (2017), algumas das características deste protocolo são:

- Definição de um número de série para cada sensor, permitindo sua identificação individual e possibilitando a conexão de múltiplos sensores em um mesmo pino digital do microcontrolador.
- Definição de um CRC para tratar eventuais colisões no barramento como em caso de envio simultâneo de informações de múltiplos sensores.
- Definição de funções para leitura e configuração dos sensores.

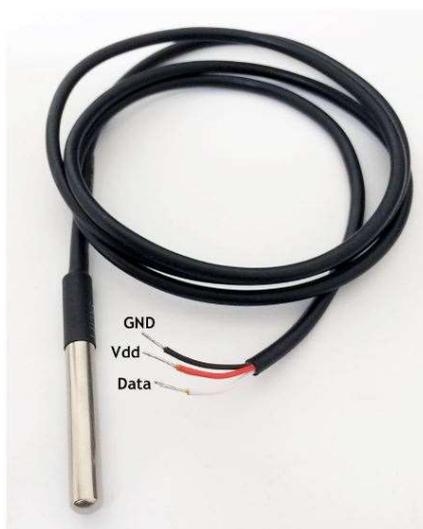
Ele permite a ligação elétrica em modo normal ou modo parasita ilustrado pela figura 29. É necessário um resistor *pull-up* de 4.7 kΩ no pino DATA do sensor. A figura 30 ilustra o sensor dentro de um invólucro à prova d'água, cujas dimensões são 30 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro.

Figura 29 - Ligação do sensor DS18B20 – a) Modo parasita, b) Modo normal



Fonte: Adaptado de TWEAKING4ALL (2017)

Figura 30 - Sensor DS18B20 em invólucro à prova d'água



Fonte: TWEAKING4ALL (2017)

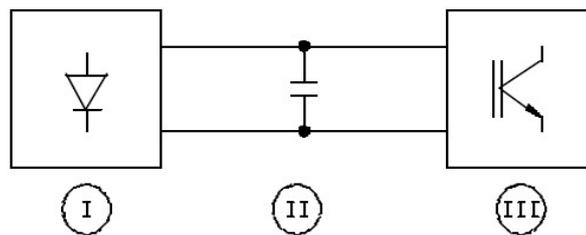
2.7 Inversores de Frequência

Os inversores de frequência são dispositivos eletrônicos destinados ao controle de velocidade de motores de indução trifásicos. Este é o método mais eficiente para o controle de velocidade deste tipo de motor e consiste na variação da frequência da fonte alimentadora provendo um ajuste contínuo de velocidade e conjugado em relação a carga. (WEG, 2017).

Existem diversas formas construtivas dos inversores de frequência. Este trabalho abordará os inversores de frequência com modulação por largura de pulso (PWM), por serem mais difundidos no mercado.

O inversor de frequência com modulação por largura de pulso (PWM) é composto basicamente por 3 blocos, conforme ilustra a figura 31. (WEG, 2017).

Figura 31 - Diagrama de blocos conversor tipo PWM

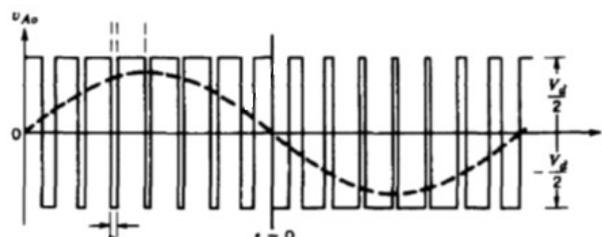


Fonte: WEG (2017, p. 190)

- I. Ponte retificadora (diodos) alimentada por rede monofásica ou trifásica;
- II. Filtro capacitivo, formando o circuito intermediário (link CC);
- III. Inversor CC-CA constituído por transistores de potência.

A ponte retificadora transforma tensão alternada em tensão contínua. O banco de capacitores realiza a filtragem e alimenta com tensão contínua a ponte inversora formada por transistores de potência (BJT, IGBT ou MOSFET). Um circuito de controle microcontrolado, através do comando das bases dos transistores, gera pulsos para o motor, obedecendo à modulação PWM senoidal, com tensão e frequências controladas, conforme ilustra a figura 32. A variação da tensão e frequência (U/f) são feitas linearmente até a frequência nominal do motor. A partir desse ponto, como a tensão já está no limite nominal, há apenas a variação da frequência. (WEG, 2017).

Figura 32 - Modulação PWM, com o equivalente senoidal



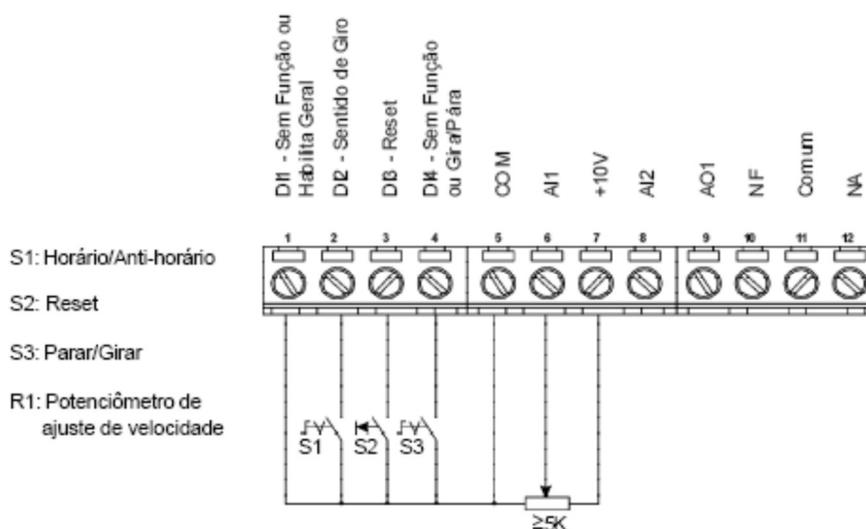
Fonte: Adaptado de MOHAN; UNDELAND; ROBBINS (1995, p. 201)

A configuração do inversor é feita através de uma *Interface Homem Máquina* – IHM, na qual se alteram os parâmetros como tensão nominal, corrente nominal do motor, proteções, etc., para que o dispositivo trabalhe de acordo com as especificações de projeto. A lista e descrição de cada parâmetro são disponibilizadas no manual específico de cada fabricante. Em alguns modelos, pode-se realizar essa configuração via cabo e software específicos.

Além disso, é importante configurar adequadamente a função das entradas e saídas digitais e da entrada analógica. Pelas entradas digitais o inversor receberá os comandos de partida, parada, reversão, etc. As saídas digitais (contato seco) servirão como indicativos de falha, motor rodando, entre outros, para o operador ou sistema de controle. As entradas analógicas servirão como referência de controle (*SetPoint*) para ajuste de velocidade, seja via potenciômetro ou sistema de controle, como um microcontrolador.

A figura 33 demonstra um exemplo de utilização das entradas digitais e da entrada analógica, bem como suas respectivas funções.

Figura 33 - Uso das entradas digitais e analógica em conversor de frequência



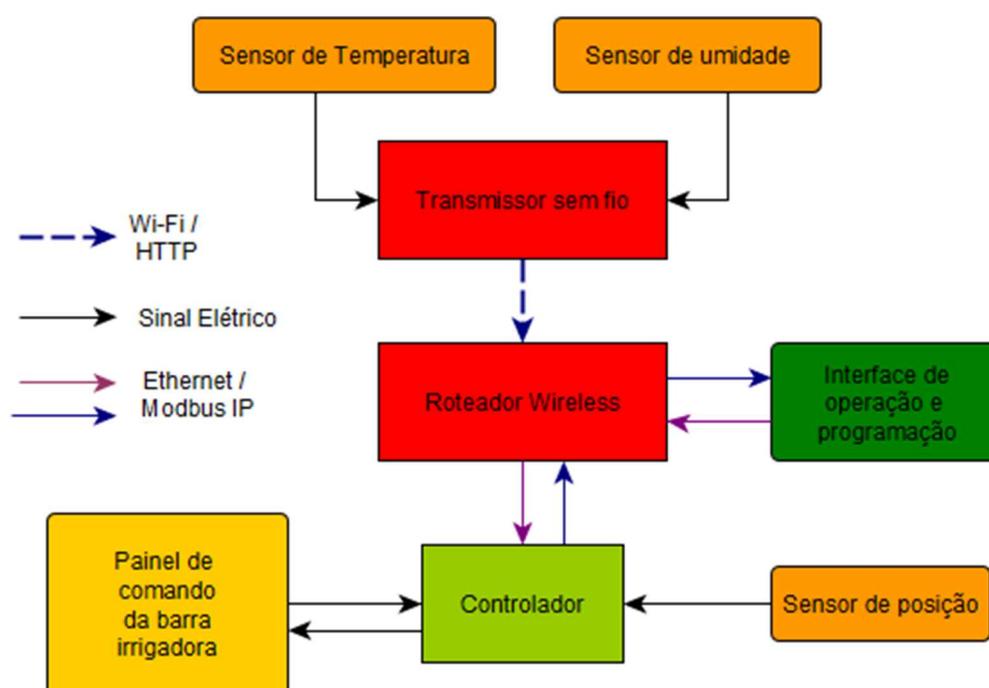
Fonte: WEG (2006, p. 55)

Em relação à denominação, apesar de popularmente chamado de inversor de frequência, a tabela Nomenclatura Comum MERCOSUL (NCM) disponível no site da Secretaria da Fazenda define a nomenclatura correta como conversor de frequência. (SEFAZ, 2017).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo foram determinadas as etapas do projeto e suas características, com base no estudo das tecnologias realizado anteriormente. A figura 34 apresenta o diagrama de blocos da estrutura do projeto. Os subcapítulos a seguir descrevem as etapas dessa estrutura.

Figura 34 - Diagrama de blocos da estrutura do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1 Sensor de Posição da Barra

Conforme a programação, a barra irrigadora executará uma quantidade distinta de ciclos de avanço e retorno em cada setor. Em função disso, é necessário detectar sua passagem pelo limite do setor para que recue e continue a irrigação do setor anterior ou avance para o posterior. Para realizar essa localização, no eixo do motorreductor que traciona a barra irrigadora, será instalado um *encoder* KY-040 que rotacionará quando a barra estiver em deslocamento horizontal.

A conexão entre o eixo do motorreductor e o *encoder* deve ser feito por um acoplamento, preferencialmente elástico, para que a vibração do sistema mecânico

não danifique ou interfira no funcionamento do *encoder*. O cabeamento do *encoder*, quando instalado em campo, deverá ter uma malha aterrada no intuito de reduzir as interferências eletromagnéticas, principalmente as impostas pelo chaveamento do inversor. Este cabo será levado até o controlador.

3.2 Transmissor sem Fio - Sensores de Umidade e Temperatura

O sensor sem fio é baseado no Wemos D1 Mini que se conectará via *Wi-Fi* com o roteador e assim com a *interface* de operação e programação, sendo alimentado por uma bateria de LiPo de 3,7 V.

Como o intuito é utilizar a saída de 3,3 V regulada do Wemos para a alimentação do sensor de umidade, limitando sua saída analógica a 3.3 V também, a tensão da bateria se torna insuficiente, já que é inferior a tensão de operação mínima de 4.3 V do Wemos. Em função disso será adotada uma fonte chaveada *step-up* para aumentar a tensão da bateria ao nível de 5 V.

Na entrada analógica do Wemos é o sensor de umidade de solo para Arduino, ilustrado na figura 26. A medição de temperatura será realizada pelo sensor digital DS18B20, ilustrado na figura 30, o qual será conectado a uma de suas entradas digitais, formando um conjunto sensor. Tanto o sensor de umidade quanto o de temperatura apresentam dimensões adequadas ao tamanho das células das bandejas e preço acessível.

A alimentação dos sensores é “chaveada” para que sejam energizados somente no momento da leitura, reduzindo assim o consumo de bateria.

Para a carga da bateria, será adotado um carregador USB para baterias de LiPo. Ela deverá ser removida e inserida no carregador, pois este não fará parte do conjunto sensor.

Em cada subárea da fileira da estufa que se deseja criar um setor pode ser inserido um desses conjuntos. A identificação de cada sensor é por meio de seu IP, que será inserido em uma tabela de IPs estáticos dentro do roteador, em função de seu endereço MAC. Desta forma, a *interface* de operação e programação pode identificar o sensor “A”, “B”, “C”, etc.

3.3 Controlador

O controlador é composto por um Arduino Due. Ele possui recursos de hardware superior ao UNO e ao MEGA e, apesar do custo também ser superior, não é ao ponto de inviabilizá-lo para o projeto. Suas especificações encontram-se no Anexo A - Especificações do Arduino Due.

O controlador tem ligação direta com o painel de comando da barra irrigadora, contendo o inversor de frequência do motorreductor e os relés/contatores para acionamento da válvula de irrigação e motobomba. Terá 8 entradas digitais e 5 saídas digitais a relé, conforme ilustra o quadro 7.

Quadro 7 - Função das entradas e saídas digitais do controlador

Entradas Digitais	Função	Saídas Digitais	Função
1	Automático	1	Avança Barra
2	Manual	2	Recua Barra
3	Fim de Curso Posição Inicial	3	Aciona Motobomba
4	Fim de Curso Posição Final	4	Aciona Válvula de Irrigação.
5	Feedback do Inversor	5	Reserva
6	Feedback da Motobomba		
7	Reserva		
8	Reserva		

Fonte: Elaborado pelo autor

As entradas digitais 5 e 6 monitoraram se de fato o inversor e motobomba, respectivamente, entraram em operação após o comando ser efetuado. Esse *feedback* é proveniente de um contato seco do relé de *status* do inversor e do contato auxiliar do contator da motobomba.

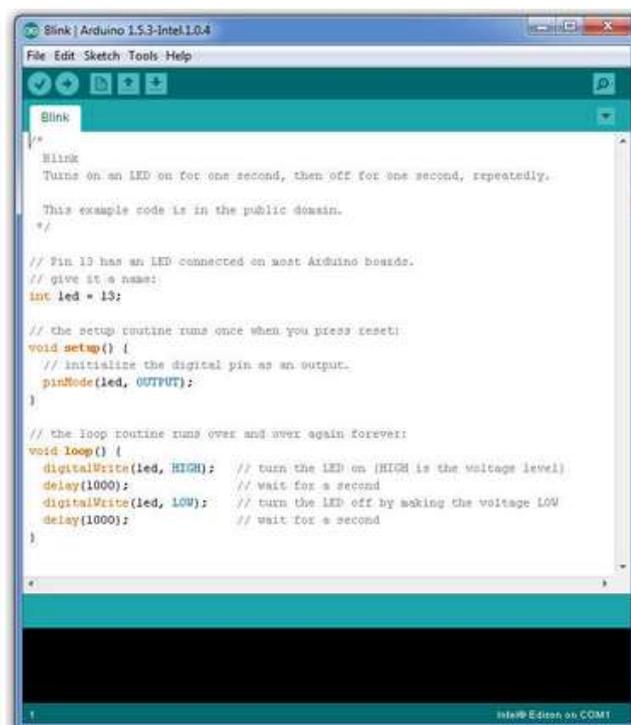
A saída analógica do Arduino é interligada a um conversor para alterar seu *range* de 0,55 V a 2,75 V para 0 a 10 V, que é o padrão das entradas analógicas dos inversores.

O *encoder* KY-040 é alimentado pelo controlador, e seus dois canais conectados a duas das entradas analógicas do Arduino.

O controlador é alimentado por uma fonte chaveada industrial 220Vca/24Vcc e se comunica com os demais dispositivos via rede Ethernet, através de um *shield* acoplado ao Arduino. Um cabo de rede sai do controlador e vai até o roteador.

A figura 35 ilustra a IDE gratuita responsável pela compilação do programa e sua transferência entre PC e Arduino.

Figura 35 - IDE Arduino



Fonte: INTEL (2017)

3.4 Métodos de Controle

Foram desenvolvidos três métodos de controle da irrigação: um por programação horária, onde o operador define o número de ciclos e frequência (velocidade) para cada setor e o horário em que a irrigação deve ocorrer e dois controles automáticos em função da umidade do setor: ON/OFF e por velocidade. No

controle ON/OFF o operador define o *SetPoint* de umidade desejado e a velocidade da barra irrigadora. No controle por velocidade, é definido apenas o *SetPoint*, e o controlador calcula a velocidade da barra necessária para inserir uma aproximação do volume necessário para atingir a umidade desejada. Em ambos os casos o disparo da irrigação ocorre quando a umidade atingir um valor abaixo de um mínimo estabelecido durante os testes.

Para correlacionar a umidade (volume de água) com a frequência da barra, realizou-se testes em campo, coletando e analisando os volumes de água obtidos em uma célula da bandeja para cada frequência distinta. No controle ON/OFF a barra deve aguardar por um tempo pré-determinado afim de esperar pela estabilização da leitura do sensor. Após esse tempo, o controlador decide se deve ou não irrigar novamente.

3.5 Interface de Operação e Programação

A *interface* de operação e programação foi desenvolvida no software ScadaBR, instalado em um PC, e se comunica via rede Modbus TCP/IP com os demais dispositivos, através de um cabo Ethernet conectado até o roteador. Sua função é permitir que o produtor possa visualizar as condições da estufa e realizar a programação da irrigação, conforme as seguintes telas disponíveis. A escolha do ScadaBR deve-se a sua gratuidade, já que o presente trabalho se trata de um protótipo de baixo custo, e a sua compatibilidade com diversos protocolos, como o Modbus TCP/IP.

3.5.1 Tela de Programação das Receitas

Esta tela permite o produtor criar receitas. Para cada horário pré-determinado, ele pode selecionar um setor e informar a quantidade de ciclos que a barra deve operar nesse setor, inclusive podendo definir que esse setor não será executado neste horário (0 ciclos).

Os horários passíveis de escolha são pré-determinados (e fixos) afim de evitar sobreposição de programações. Por exemplo, se o setor A1 está programado para iniciar seu ciclo as 08:00, o setor A2 não poderá iniciar as 08:01, já que a barra deverá

executar toda a programação estipulada para o setor A1 e só após a conclusão que estará disponível para os demais setores. A figura 36 ilustra uma proposta de tela.

Figura 36 - Proposta de tela de programação de receitas

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.2 Tela da Operação da Estufa

Esta tela possui um *layout* da estufa, onde o produtor pode acompanhar o andamento da produção. Possui um campo onde ele define a posição de início e de fim de cada setor (em metros inteiros), bem como a velocidade (frequência do inversor) de irrigação.

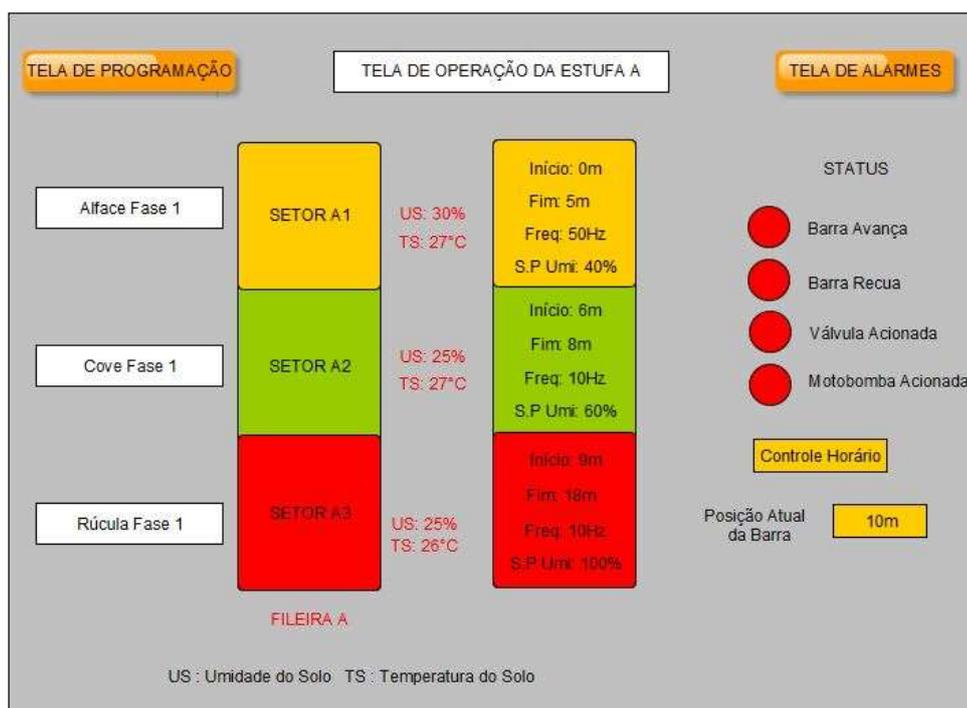
Em cada setor também há um indicativo de sua temperatura e umidade e um campo de texto onde o operador informa, apenas com intuito indicativo, o cultivo atual.

Nesta tela, também é possível visualizar o status do acionamento do inversor (barra avança e recua), da válvula de irrigação e da motobomba e a posição atual da barra informada pelo *encoder*.

Há um botão onde é selecionado o método de controle desejado para a estufa, por programação horária ou por umidade, bem como um campo onde é inserido o valor de umidade desejado (*SetPoint*).

A figura 37 ilustra a proposta para a tela de operação da estufa.

Figura 37 - Proposta de tela de operação

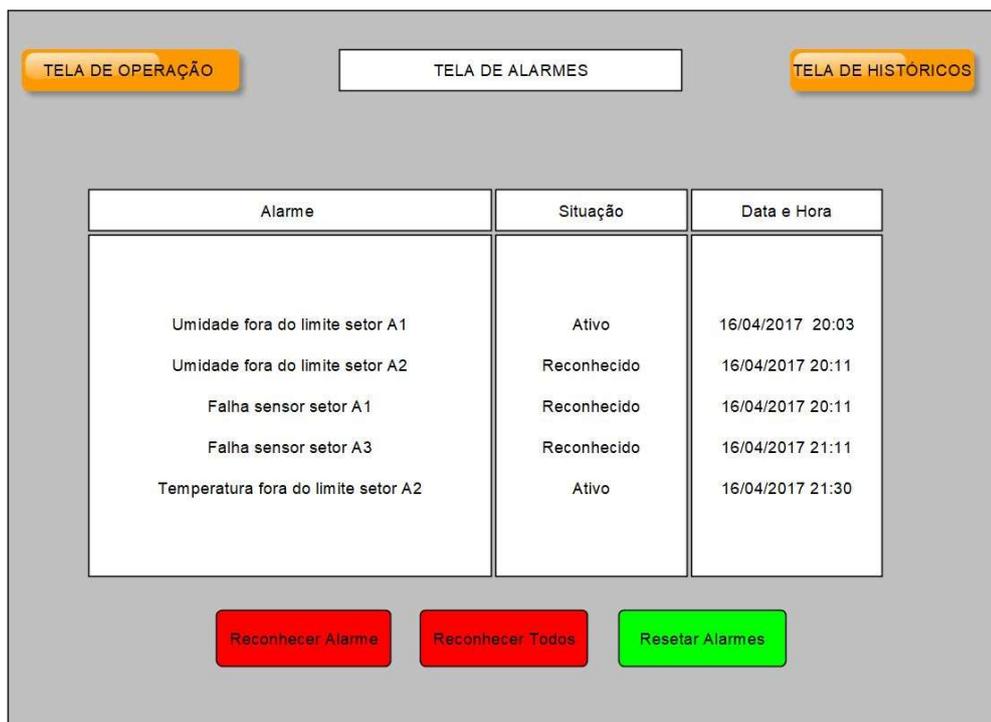


Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.3 Tela de Alarmes

Esta tela conta com um histórico de alarmes, permitindo ao produtor rever informações de quando não estava presente na área produtiva. Os alarmes são relativos a umidade ou temperatura fora de limites mínimos e máximos, falha de algum dos sensores ou falha no acionamento do inversor ou motobomba. A figura 38 ilustra a proposta para a Tela de Alarmes.

Figura 38 - Proposta da tela de alarmes



A interface da tela de alarmes apresenta três botões de navegação no topo: 'TELA DE OPERAÇÃO' (laranja), 'TELA DE ALARMES' (branco) e 'TELA DE HISTÓRICOS' (laranja). O conteúdo principal é uma tabela com três colunas: 'Alarme', 'Situação' e 'Data e Hora'. Abaixo da tabela, há três botões de ação: 'Reconhecer Alarme' (vermelho), 'Reconhecer Todos' (vermelho) e 'Resetar Alarmes' (verde).

Alarme	Situação	Data e Hora
Umidade fora do limite setor A1	Ativo	16/04/2017 20:03
Umidade fora do limite setor A2	Reconhecido	16/04/2017 20:11
Falha sensor setor A1	Reconhecido	16/04/2017 20:11
Falha sensor setor A3	Reconhecido	16/04/2017 21:11
Temperatura fora do limite setor A2	Ativo	16/04/2017 21:30

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5.4 Tela de Históricos

Essa tela conta com gráficos de tendência dos sensores de cada setor, permitindo assim que o operador possa visualizar a temperatura ou umidade dentro de um intervalo de tempo. A proposta para a tela encontra-se na figura 39.

Figura 39 - Proposta da tela de históricos



Fonte: Elaborado pelo autor

4 DESENVOLVIMENTO

Esta etapa aborda o desenvolvimento do controlador, do transmissor sem fio, da *interface* de operação e programação e do quadro de comando.

4.1 Transmissor sem Fio – Conjunto Sensor de Umidade e Temperatura

Esta seção descreve o desenvolvimento do sensor sem fio de umidade de temperatura, bem como sua comunicação com a *interface* de operação. O circuito completo do conjunto sensor encontra-se no Apêndice C – Diagrama Elétrico do Transmissor sem Fio.

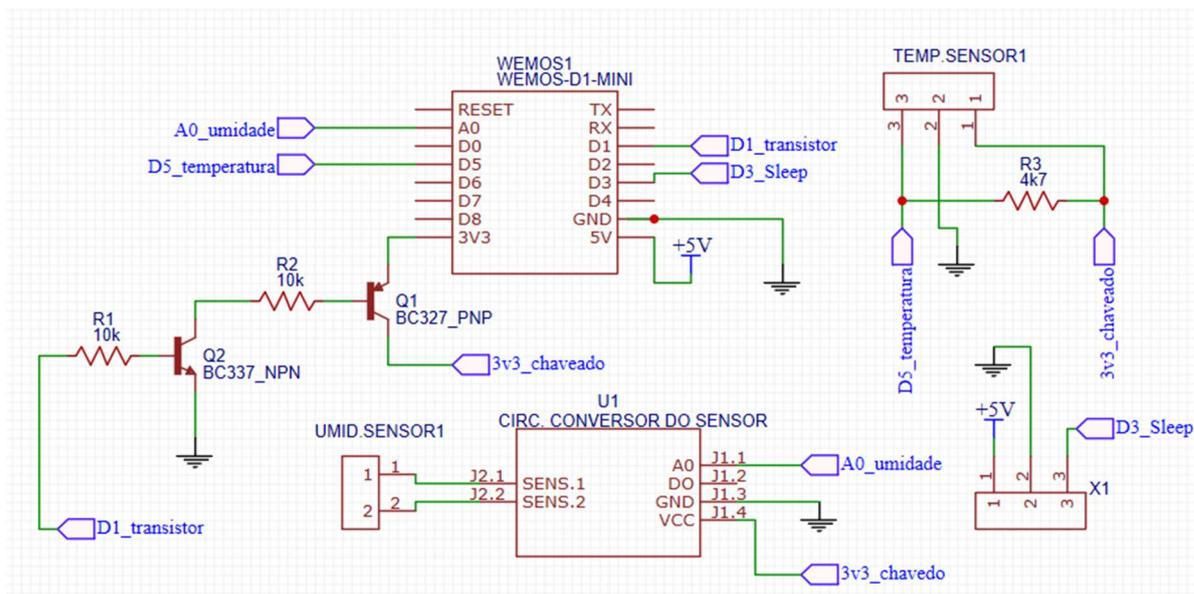
4.1.1 Interligação do Sensor de Umidade e Temperatura ao Wemos D1 Mini

O sensor de umidade de solo foi conectado na única entrada analógica disponível no Wemos D1 Mini. O sensor de temperatura foi conectado a uma entrada digital. A alimentação desses 2 sensores é proveniente do pino 3,3 V do Wemos, garantindo assim que a saída do sensor de umidade não ultrapasse essa tensão, pois é o limite da entrada analógica.

Afim de reduzir o consumo de bateria, a alimentação desses sensores é “chaveada” por transistores. Desta forma, somente quando o Wemos estiver conectado na rede *Wi-Fi* que estes serão alimentados.

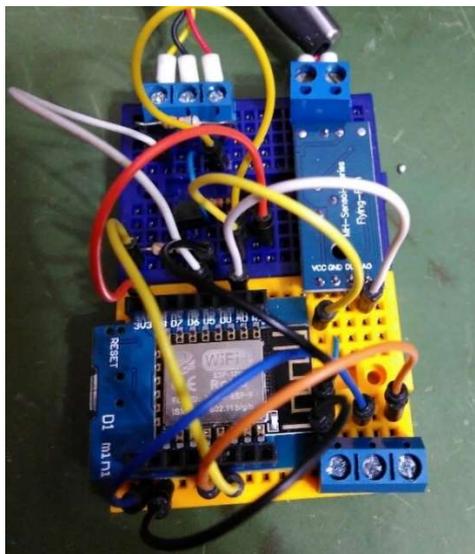
A figura 40 ilustra o circuito de interligação dos sensores de umidade e temperatura com o Wemos, e a figura 41 demonstra a montagem do conjunto sensor em *proto-board*.

Figura 40 - Circuito de interligação dos sensores com o Wemos D1 Mini.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 41 - Conjunto sensor finalizado



Fonte: Elaborado pelo autor

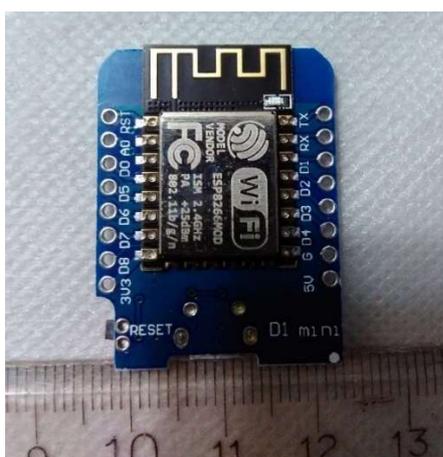
O transistor Q2 satura o transistor Q1 que alimenta os sensores. O transistor BC327 tem o h_{FE} mínimo igual 100 para uma corrente de coletor (I_C) de 100 mA. (ON, 2018). Um resistor de 10 k Ω em sua base, considerando a tensão na junção base-emissor (V_{BE}) de 0,7 V é mais que suficiente para garantir os 10 mA de consumo dos sensores, apresentado no quadro 8. A potência dissipada em ambos resistores é de 0,676 mW, podendo ser adotado um resistor comercial de 1/8W.

A saída digital D3, ilustrada na figura 40, tem por objetivo informar para o circuito auxiliar, descrito no subcapítulo 4.1.3, que o ciclo de funcionamento do conjunto sensor, descrito no fluxograma do subcapítulo 4.1.6, já foi efetuado e desta forma ele pode entrar em modo *Sleep*, preservando o consumo de bateria.

4.1.2 Verificação da Corrente de Consumo do Conjunto Sensor

O Wemos D1 Mini, ilustrado na figura 42 foi adquirido em uma loja *online* e apresenta algumas características distintas da analisada na Metodologia, apresentado na figura 15. Enquanto o primeiro descreve o chip como ESP8266EX, este último o descreve como ESP8266MOD.

Figura 42 - Placa Wemos adquirida



Fonte: Elaborado pelo autor

Em função das referências da placa Wemos com o chip ESP8266MOD serem bastante pobres, realizou-se em bancada testes de consumo de corrente quando o módulo estava conectado na rede *Wi-Fi* e quando estava em *Sleep*, onde em ambos o módulo foi alimentado com 5 V. Os valores estão ilustrados no quadro 8. A função no código C utilizada para que o módulo entre em *Sleep* foi a “*ESP.deepSleep(time)*”, onde *time* é o tempo em que o módulo deve permanecer “dormindo”.

Quadro 8 - Valores de corrente do Wemos D1 Mini

Condição	Valor de Corrente (mA)
Conectado na rede <i>Wi-Fi</i>	78,4
Conectado, sensores energizados e sensor de umidade imerso em água	88,6
Em modo <i>Sleep</i>	2,2

Fonte: Elaborado pelo autor

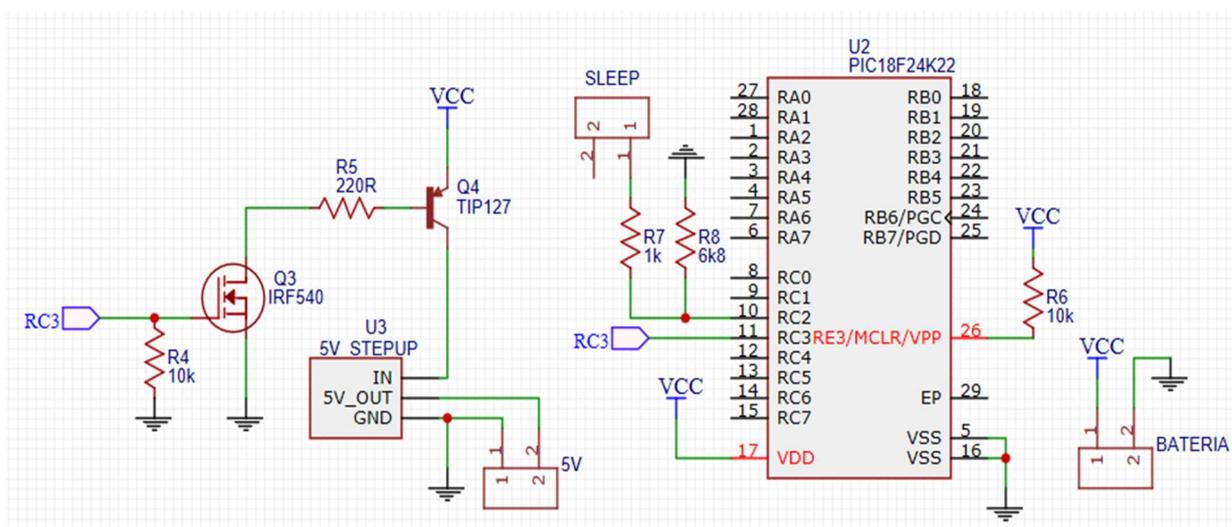
Com base nas informações do quadro 8 outro teste realizado foi da variação da tensão da alimentação. Para isso, variou-se a tensão de entrada de alimentação para os níveis que podem ser assumidos pela bateria no processo de descarga, ou seja, de 4,2 V a 3,0 V.

Com tensões abaixo de 4,3 V o módulo não conectava na rede *Wi-Fi* e a corrente passava ao exorbitante valor de 234 mA. Isso deve-se provavelmente ao fato do regulador de tensão existente na placa ter um *dropout* de aproximadamente 1V, e assim o módulo entrar em um modo de erro.

4.1.3 Circuito Auxiliar para Alimentação e *Sleep* do Wemos D1 Mini

Tendo ciência de que o consumo do módulo quando conectado na rede *Wi-Fi* não é passível de alteração, e que com tensões abaixo de 4,3 V não será possível alimentá-lo, optou-se então por desenvolver um circuito auxiliar que pudesse diminuir o consumo de corrente quando estivesse em *sleep* e que pudesse fornecer uma tensão de no mínimo 4,3 V mesmo quando alimentado por uma bateria de LiPo.

Para tal objetivo, desenvolveu-se o circuito ilustrado na figura 43.

Figura 43 - Circuito auxiliar para alimentação e *sleep* do Wemos D1 Mini

Fonte: Elaborado pelo autor

Este circuito utiliza um PIC18F24K22, atuando como um RTC externo. Ele pode operar dentro da faixa de tensão da bateria de LiPo e possui baixo consumo de corrente. Suas características básicas encontram-se no quadro 9.

Quadro 9 - Características básicas do PIC18F24K22

Parâmetro	Min.	Tip.	Máx.	Unid.
Tensão de Alimentação (<i>Supply Voltage</i>)	2,3	-	5,5	V
Corrente de Alimentação (<i>Supply Current</i>) a 25°C e 3,0V	21	50	-	µA
Corrente de Alimentação (<i>Supply Current</i>) a 25°C e 5,0V	21	55	-	µA
<i>Input High Level</i> (1,8 < V _{DD} < 4,5)		0,25V _{DD} +0,8		V
<i>Input Low Level</i> (1,8 < V _{DD} < 4,5)		0,15V _{DD}		V

Fonte: Adaptado de MICROCHIP (2018)

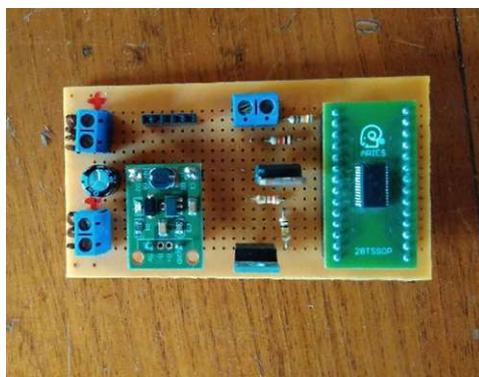
O PIC18F24K22, através da saída digital RC3, satura o Q3 que por sua vez satura o Q4 que alimenta a fonte *step-up* pela bateria. Esta fonte mantém 5V para o conjunto sensor, mesmo que a tensão da bateria diminua. Após o conjunto sensor executar sua rotina de leitura, ele acionará a entrada RC2 do PIC, através da saída digital D3, sinalizando que pode entrar em *Sleep*. Este, por sua vez, quando recebe

essa sinalização, cortará o MOSFET e o transistor, desligando a alimentação da fonte *step-up* e, conseqüentemente, do conjunto sensor. Decorrido o tempo configurado para *sleep* (15s para os testes em campo) o PIC volta a energizar a fonte *step-up* e aguarda uma nova sinalização do conjunto sensor.

Os resistores R7 e R8 realizam um divisor de tensão afim de que a entrada do PIC não receba uma tensão superior à sua alimentação, o que ocorrerá quando a tensão da bateria estiver próxima a 3 V. Desta forma, quando a saída do Wemos estiver em nível alto, a tensão sobre o pino do PIC será de no máximo 2,91 V, considerando a tolerância inferior de 5% para o R7 e a superior de 5% para o R8. Esse valor de tensão obtido é suficiente para a interpretação de nível alto e baixo da entrada RC2 para toda a faixa de utilização da bateria, conforme indicado no quadro 9. A potência adotada para ambos foi de $\frac{1}{8}W$ por se tratar de um sinal de baixíssima corrente.

O circuito foi montando em uma placa universal, conforme ilustra a figura 44.

Figura 44 - Placa do circuito auxiliar de alimentação



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.4 Leitura de Umidade

A leitura de umidade é realizada através da leitura da entrada analógica de 10 bits do Wemos, no qual está conectado o Sensor para Umidade de Solo para Arduino adquirido.

Afim de associar o volume de água inserido no substrato com a umidade percentual indicada pelo sensor e na ausência de informações sobre o Coeficiente de Retenção de Água e da Umidade Máxima do substrato em uso, realizou-se alguns testes descritos a seguir. Previamente, secou-se o substrato em uma estufa por 48

horas a uma temperatura de 65°C, baseando-se em testes realizados por Fermino e Kämpf (2012).

Com o substrato seco e depositado nas células de 50 ml, mas sem compactá-lo, inseriu-se com o auxílio de seringas 0,5 ml de água em intervalos de 10 min., procurando distribuir uniformemente a água pela superfície, até perceber-se que a água seria drenada pelo furo abaixo da célula, o que ocorreu com um volume de 7 ml. Com um recipiente, coletou-se essa sobra, que totalizou 1,71 ml, e subtraiu-se do volume inicial obtendo-se assim 5,29 ml. Considerou-se então 5,0 ml o volume máximo de água que esse substrato é capaz de reter, este foi o valor atribuído para 100% de umidade. Para resultados mais concretos, se faz necessário ensaios em laboratórios, com equipamentos e técnicas específicas.

Desta forma, com o sensor de umidade inserido em uma célula vedada na parte inferior e com substrato igualmente seco, inseriu-se 0,5 ml até 5,0 ml em intervalos de 10 min, procurando distribuir uniformemente a água pela superfície afim de levantar a curva do sensor e correlacioná-la com a umidade percentual. Fez-se necessário esse intervalo de tempo devido à demora em estabilização da leitura do sensor de umidade. A figura 45 ilustra o procedimento de leitura do ADC.

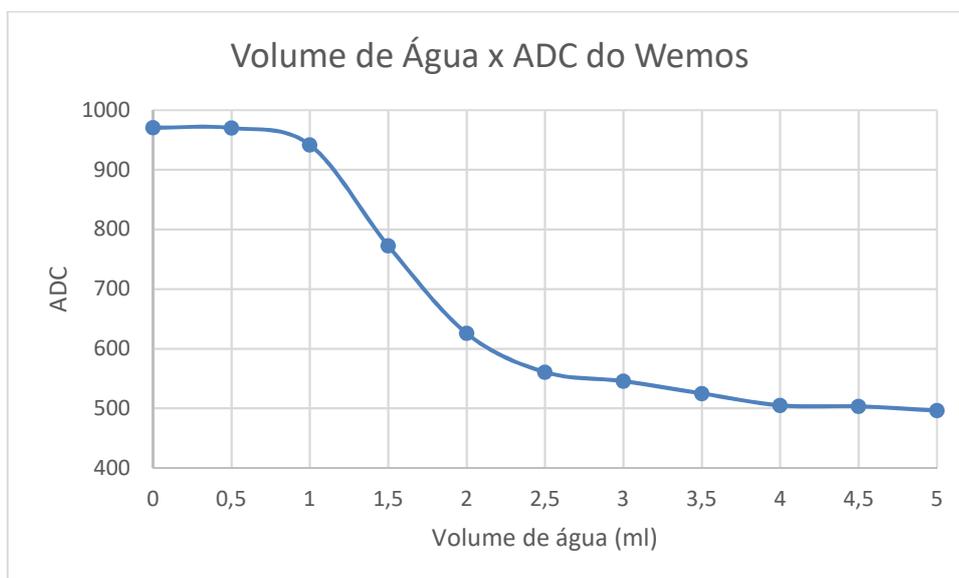
Em cada passo, coletou-se 5 vezes uma média de 100 leituras do ADC do Wemos com um intervalo de aproximadamente 20 segundos. A curva obtida encontra-se no gráfico 2.

Figura 45 - Procedimento de leitura do ADC do Wemos



Fonte: Elaborado pelo autor

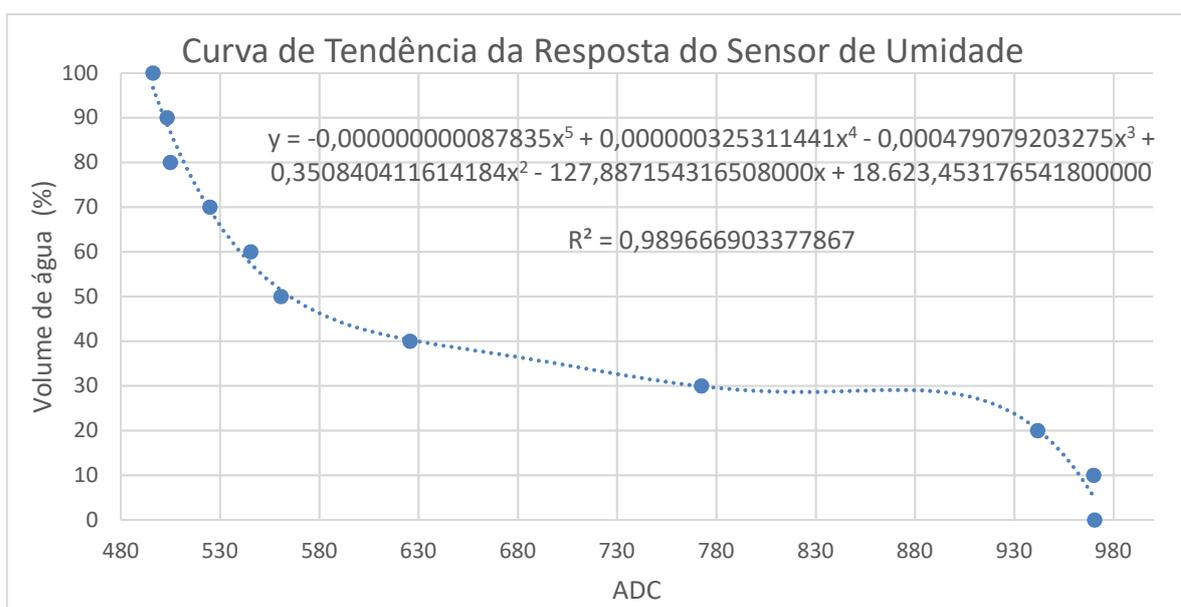
Gráfico 2 - Curva de resposta do sensor de umidade de solo



Fonte: Elaborado pelo autor

Em razão da resposta do sensor não ser linear, optou-se por realizar sua linearização por meio de um polinômio, utilizando a ferramenta de linha de tendência do software Excel, demonstrada no gráfico 3. Neste caso, como o objetivo é obter a umidade percentual em função da leitura do ADC, invertem-se os eixos em relação ao gráfico 2.

Gráfico 3 - Curva de tendência da resposta do sensor de umidade



Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de tendência da resposta do sensor foi inserida no código do Transmissor sem Fio, afim de obter o volume percentual de água (chamado de umidade percentual) para cada valor de ADC lido.

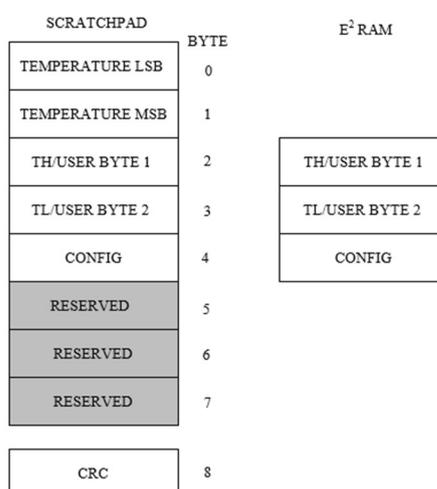
4.1.5 Leitura de Temperatura

A medição de temperatura, por meio do sensor DS18B20, foi realizada através da entrada digital D5 do Wemos.

A biblioteca *OneWire.h* dispõe de diversas funções que facilitam a integração desse sensor. Para encontrar o sensor na rede, utilizou-se a função *ds.search(addr)*, onde *addr* é um vetor de 8 bytes, que armazena seu endereço. A função *ds.select(addr)*, seleciona o sensor cujo endereço foi encontrado. Assim, os comandos seguintes realizados terão efeito sobre o sensor que foi selecionado.

A função *ds.read(addr)* foi utilizada para realizar a leitura dos bytes de dados correspondentes à temperatura e ao CRC. A figura 46 ilustra todos os bytes de dados do sensor, chamado de *scratchpad*.

Figura 46 - Bytes de dados do sensor DS18B20



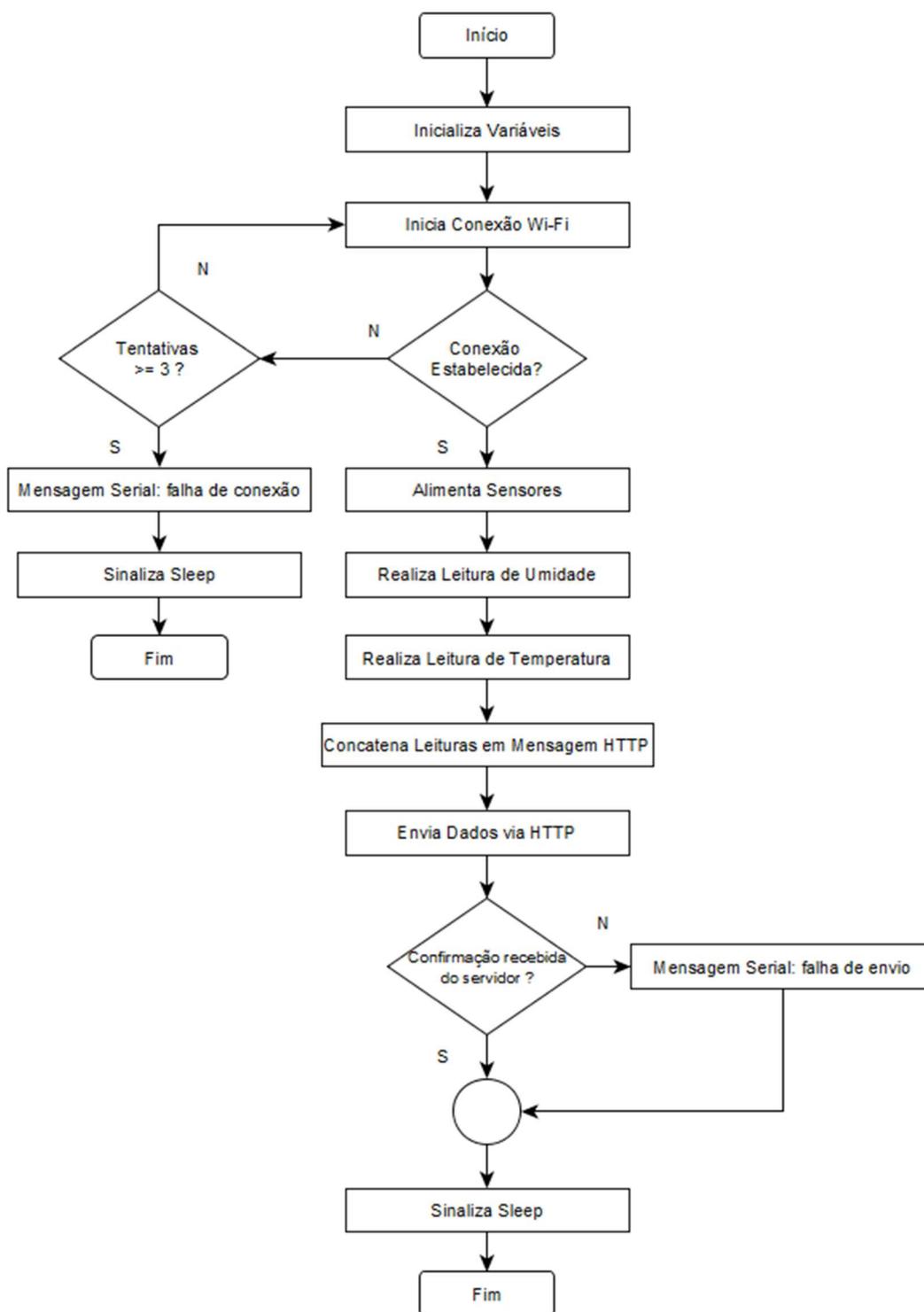
Fonte: Adaptado de DALLAS (2018)

Para obter a temperatura, a leitura dos bytes 0 e 1 foi concatenada em uma variável de 16 *bits* e posteriormente convertida para *float*.

4.1.6 Fluxograma de Funcionamento

A figura 47 ilustra o fluxograma de funcionamento do conjunto sensor.

Figura 47 - Fluxograma do conjunto Sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.7 Comunicação com a *Interface* de Operação e Programação

Para a recepção dos dados do sensor, utilizou-se um recurso do ScadaBR chamado Receptor HTTP. Este recurso “escuta” todas as mensagens na porta 8080 no caminho “httpds” provenientes de um cliente HTTP.

Cada sensor foi configurado com um IP fixo na tabela de DHCP do roteador e como um cliente HTTP, através da biblioteca “*ESP8266HTTPClient.h*”. Em seu código, após a leitura de umidade e temperatura, concatena-se uma mensagem que contém o IP do ScadaBR, *192.168.0.100*, a porta *8080*, o caminho *httpds* onde o Receptor “escuta” as mensagens e os parâmetros *umi* e *temp* separados pelo símbolo “&”. A mensagem completa aparece exemplificada como um comentário na figura 48.

Figura 48 - Mensagem HTTP

```
HTTPClient http;
```

```
String StringOne = "http://192.168.0.100:8080/ScadaBR/httpds?umi=";
StringOne = StringOne+A;
String StringTwo = "&temp=";
StringTwo = StringTwo+B;
String Msg_Http = StringOne+StringTwo;
// ("http://192.168.0.100:8080/ScadaBR/httpds?umi=80.42&temp=18.44");
```

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 49 ilustra a configuração de um *Data Source*, que é a denominação de um objeto de comunicação do ScadaBR, como um Receptor HTTP. Nesta configuração, define-se o IP do cliente e os *Data Points* com os respectivos parâmetros. Esses parâmetros são os mesmos utilizados na mensagem enviada pelo conjunto sensor. Desta forma, o Receptor HTTP faz uma “varredura” na mensagem em busca desses parâmetros, atribuindo ao respectivo *Data Point* os valores neles encontrados.

Figura 49 - *Data Source* receptor HTTP com respectivos *Data Points*

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 50 ilustra os *Data Sources* criados para os 5 conjuntos sensores, com seus respectivos endereços IP.

Figura 50 - *Data Source* dos conjuntos sensores

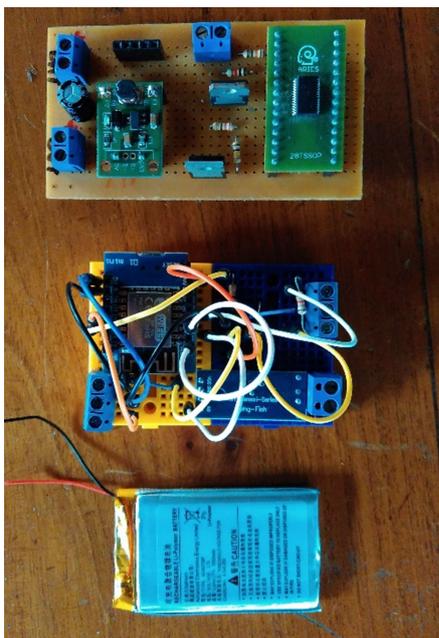
Nome	Tipo	Conexão	Status
Arduino_TCP	Modbus IP	192.168.0.101:502	
Auxiliares	Data Source Virtual	1 segundo(s)	
Sensor_A	Receptor HTTP	192.168.0.200	
Sensor_B	Receptor HTTP	192.168.0.201	
Sensor_C	Receptor HTTP	192.168.0.202	
Sensor_D	Receptor HTTP	192.168.0.203	
Sensor_E	Receptor HTTP	192.168.0.204	

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.8 Dispositivo Finalizado

As figuras 51 ilustra todos os componentes pertencentes ao conjunto sensor e a figura 52 demonstra o conjunto montado dentro de uma caixa a prova d'água.

Figura 51 - Componentes do conjunto sensor.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 52 - Conjunto sensor acomodado em caixa à prova d'água



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Hardware do Controlador

Esta seção descreve o desenvolvimento do hardware do controlador. Nos subcapítulos a seguir estão descritas as características, os circuitos elétricos e os cálculos dimensionais de cada etapa de seu desenvolvimento, levando em conta a nomenclatura utilizada no projeto do circuito completo, disponível no Apêndice B - Diagrama Elétrico do Controlador.

4.2.1 Circuito de Alimentação

O circuito de alimentação tem por objetivo alimentar o Arduino e seus periféricos. A entrada desse circuito é proveniente de uma fonte chaveada de uso industrial, da marca BHS, entrada bivolt e saída 24 V 2,5 A, conforme ilustra a figura 53.

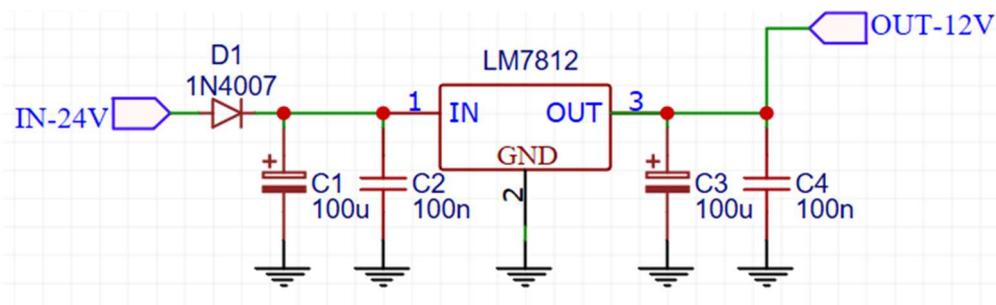
Figura 53 - Fonte chaveada industrial



Fonte: Elaborado pelo autor

O circuito de alimentação, ilustrado pela figura 54, fornece 12 V para alimentação do Arduino e para a alimentação do conversor de 0 a 10 V, visto que precisa fornecer uma tensão de saída com fundo de escala em 10 V. A alimentação do *encoder* e do RTC é fornecida pelo próprio Arduino.

Figura 54 - Circuito de alimentação



Fonte: Elaborado pelo autor

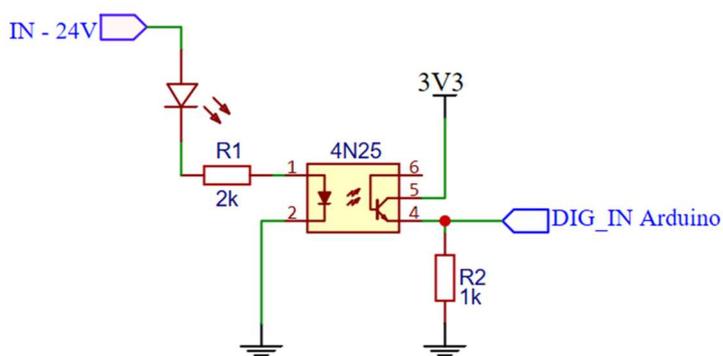
Os capacitores utilizados são a recomendação do *datasheet* do fabricante do regulador. O diodo D1 tem a função de proteção contra inversão de polaridade da alimentação provinda da fonte chaveada. A corrente drenada pelo regulador é extremamente baixa, visto que é apenas para alimentação do Arduino, *encoder* e RTC.

4.2.2 Interfaceamento das Entradas Digitais

Visando reduzir o consumo de corrente do circuito de alimentação proposto anteriormente, e assim a potência dissipada pelo regulador de tensão, utilizou-se para as entradas digitais e os relés das saídas digitais o nível de tensão de 24 V, sendo assim alimentados pela própria fonte industrial.

Afim de condicionar o sinal das entradas digitais de 24 V para 3,3 V, que é o padrão do Arduino Due, desenvolveu-se o seguinte circuito, ilustrado pela figura 55.

Figura 55 - Circuito de interface das entradas digitais.



Fonte: Elaborado pelo autor

Adotou-se um optoacoplador 4N27 em configuração emissor comum afim de não inverter o nível lógico do acionamento.

Considerando o resistor de emissor adotado de 1 k Ω e a tensão de 3,3 V, a corrente de coletor mínima necessária seria de 3,3 mA. Adotando-se uma corrente para o LED do opto de 10 mA, a corrente de coletor a 25°C seria, segundo Vishay (2018), de aproximadamente 8 mA, sendo o suficiente para a saturação do transistor do optoacoplador. O resistor R_1 foi dimensionando seguindo a equação 2.

$$R_1 = \frac{24V - V_{LED} - V_{OPTO}}{10mA} \quad (2)$$

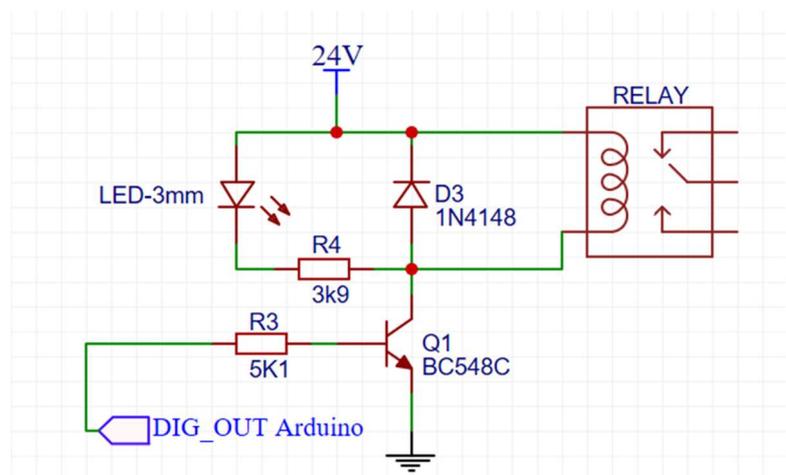
onde V_{LED} é a tensão sobre o LED externo, considerada 2 V, V_{OPTO} é a tensão sobre o LED do optoacoplador, considerada como 1,3 V.

O resistor obtido foi de 2070 Ω , sendo adotado o valor comercial ligeiramente inferior de 2 k Ω 5%. A potência dissipada, considerando a tolerância, é de 225 mW, sendo adotado a potência comercial de $\frac{1}{2}W$. A tolerância do resistor não tem efeito significativo no valor de corrente, resultando em 10,8 mA para o valor inferior da tolerância e 9,8 mA para o superior.

Para as demais entradas digitais adotou-se o mesmo procedimento.

4.2.3 Interfaceamento das Saídas Digitais

Com o objetivo de isolar o controlador dos dispositivos externos, adotou-se saídas digitais a relés, sendo suas bobinas com tensão de 24 V, podendo assim serem alimentadas pela fonte industrial, não dissipando potência do regulador de tensão da alimentação do controlador. Como as saídas digitais do Arduino não são capazes de drenar muita corrente, adotou-se o circuito ilustrado pela figura 56.

Figura 56 - Circuito de *interface* das saídas digitais

Fonte: Elaborado pelo autor

O pino “DIG_OUT” refere-se a uma saída digital do Arduino, que, quando em nível alto, fornece-se 3,3 V.

As características básicas do transistor BC548C encontram-se no quadro 10.

Quadro 10 - Características básicas do BC548C

Parâmetro	Min.	Máx.	Unid.
V_{CE}	-	30	V
h_{FE}	420	800	-
I_C		500	mA

Fonte: Adaptado de MOTOROLA (2018)

A corrente de coletor (I_C) adotada foi de 21 mA, sendo 5 mA adotado para o LED de 3mm e 16 mA para a bobina do relé.

A corrente de base (I_B) para tal I_C é determinada pela equação 3. Utilizando um h_{FE} de 420, obtido no quadro 10, resultando em 50 μ A. Afim de garantir uma saturação forte, esse valor é multiplicado por 10, resultando em 500 μ A.

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (3)$$

onde I_B , I_C e h_{FE} são a corrente de base, corrente de coletor e ganho DC do transistor, respectivamente.

O R_3 passa a ser dimensionado a partir da equação 4.

$$R_3 = \frac{3.3V - V_{BE}}{I_B} \quad (4)$$

onde V_{BE} é 0.7 V e I_B é a corrente de base considerando saturação forte.

Desta forma, R_3 é 5200 Ω . Foi adotado o resistor comercial ligeiramente inferior desse valor, 5,1 k Ω 5%. A maior potência dissipada, levando em conta sua tolerância, é de 1,4 mW, sendo assim adotado o valor comercial de 1/8W.

O resistor R_4 é determinado através da equação 5.

$$R_4 = \frac{24V - V_{LED}}{I_{LED}} \quad (5)$$

onde V_{LED} é a tensão sobre o LED, 2V, e I_{LED} é a sua corrente, 5 mA.

Desta forma, o R_4 é 4400 Ω . Adotou-se um resistor comercial de 3,9 k Ω 5%. A tolerância do resistor não tem efeito significativo no valor de corrente, resultando em 5,93 mA para o valor inferior da tolerância e 5,37 mA para o superior. A maior potência dissipada, levando em conta sua tolerância, é de 130 mW, sendo adotado o valor comercial de 1/4W.

O diodo D1 em antiparalelo tem a função de “roda livre”, afim de dissipar a força contra eletromotriz gerada pela bobina do relé quando esta for desligada. Adotou-se então o diodo 1N4148, cujas características básicas encontram-se no quadro 11.

Quadro 11 - Características básicas do diodo 1N4148

Parâmetro	Valor	Unid.
V_{RRM} - Máxima Tensão Repetitiva Reversa	100	V
I_F - Corrente Direta	200	mA

Fonte: Adaptado de NEXPERIA (2018)

4.2.4 Conversor Analógico 0 a 10 V

Conforme demonstrado no quadro, a saída analógica do Arduino apresenta uma faixa de 0,5 V a 2,75 V. Com o intuito de eliminar esse offset de 0,5 V, adotou-se um circuito subtrator, baseado em Amplificador Operacional (AmpOp). Em função da alimentação disponível ser assimétrica, utilizou-se o LM358, que é um circuito integrado (CI) que possui dois amplificadores operacionais no mesmo encapsulamento. Suas características básicas estão demonstradas no quadro 12.

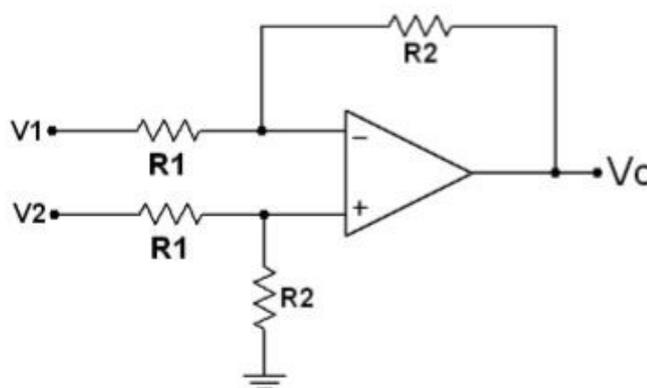
Quadro 12 - Características básicas do LM358

Parâmetro	Min.	Típ.	Máx.	Unid.
Alimentação – <i>Single Supply</i>	3	-	32	V
Corrente de Alimentação	-	500	-	μA
Tensão Diferencial de Entrada	-	-	32	V

Fonte: Adaptado de TEXAS (2018)

Segundo Wendling (2010), a equação 6 define o amplificador operacional atuando como um subtrator. A figura 57 ilustra seu circuito.

Figura 57 - Circuito subtrator



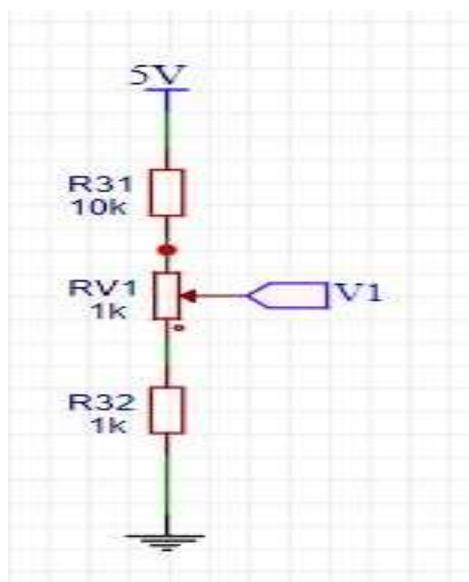
Fonte: Adaptado de WENDLING (2010)

$$V_O = (V_2 - V_1) \times \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

onde V_2 é a tensão na entrada não inversora, V_1 é a tensão na entrada inversora, e V_O é a tensão de saída.

A tensão na entrada não inversora é proveniente do DAC do Arduino, garantindo assim que V_2 seja sempre maior que V_1 . Na entrada inversora, inseriu-se um divisor de tensão a fim de ajustar V_1 em 0,5 V. Desta forma, quando o DAC estiver em seu valor inicial de 0,5V, a tensão da entrada não inversora menos a da entrada inversora resultará em zero, e por consequência a saída em 0 V, eliminando assim o *offset*. O divisor de tensão para ajuste de *offset* utilizado é demonstrado na figura 58.

Figura 58 - Divisor de tensão para ajuste de offset



Fonte: Elaborado pelo autor

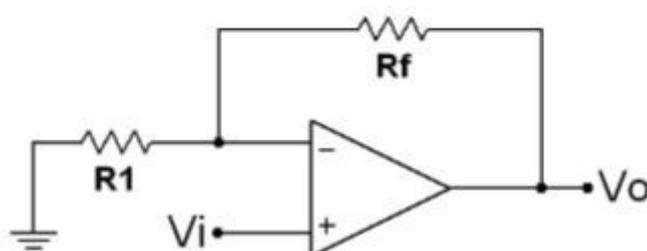
Utilizou-se a tensão de 5 V disponibilizada pelo próprio Arduino. Como 0,5 V é 10% de 5 V, o trimpot R_{V1} deve ser ajustado ao ponto de que sua parcela de resistência somada a R_{32} totalize 1,2 k Ω que representa 10% da resistência total do divisor, 12 k Ω , obtendo-se assim 0,5 V no ponto V_1 .

Deixou-se o ganho do subtrator como unitário através do uso de valores idênticos para os resistores correspondentes a R_2 e a R_1 do circuito ilustrado na figura 57. O valor adotado foi de 250 k Ω 5% 1/8W. É importante que os resistores da malha

de ganho tenham um valor significativamente superior aos resistores do divisor de tensão para que este último não exerça influência sobre o ganho do circuito.

Com a eliminação do offset, a saída máxima do circuito subtrator, com o DAC em fundo de escala, passa a ser 2,25 V. Para que seja atingido 10 V de fundo de escala é necessário um aumento de 4,444 vezes. Para essa amplificação, utilizou-se um amplificador não inversor, ilustrado na figura 59, cuja equação característica está demonstrada na equação 7.

Figura 59 - Circuito amplificador não-inversor



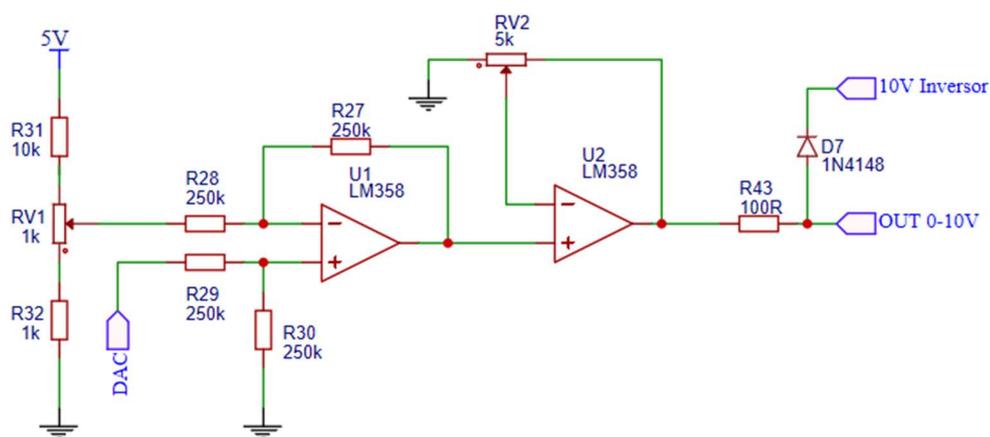
Fonte: Adaptado de WENDLING (2010)

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) x V_i \quad (7)$$

onde V_o é a tensão de saída e V_i é a tensão de entrada.

Para ajuste do ganho, os resistores R_f e R_1 foram substituídos por um trimpot de 5 k Ω . O circuito completo encontra-se ilustrado na figura 60. O LM358 foi alimentado com 12 V, já que é necessário que a saída apresente 10 V quando em fundo de escala. O diodo D_7 tem a função de “clamp”, “grampeando” a saída aos 10 V fornecidos pelo inversor, caso a saída do conversor ultrapasse 10 V. O resistor R_{43} serve apenas para limitar a corrente em caso de condução de D_7 .

Figura 60 - Circuito conversor analógico



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.5 Real Time Clock – RTC

Em função das receitas de irrigação, se faz necessário que o Arduino possua um RTC. Como esse circuito não é nativo na placa, utilizou-se um RTC externo. O circuito adotado é um *shield* para Arduino, baseado no circuito integrado DS1302, ilustrado na figura 61.

Figura 61 - Shield do RTC



Fonte: Elaborado pelo autor

A interligação entre os pinos do RTC e os pinos do Arduino estão demonstradas no quadro 13. O RTC é alimentado com 5 V do próprio Arduino.

Quadro 13 - Interligação entre RTC e Arduino Due

Pino RTC	Pino Arduino
RESET	33
DATA	35
CLOCK	39
VCC	-
GND	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizou-se a biblioteca “*virtuabotixRTC.h*”. Desta, foram utilizadas as seguintes funções e variáveis: “*myRTC.updateTime()*”, que faz a leitura da data e da hora do RTC e atualiza as variáveis “*myRTC.hours*” e “*myRTC.minutes*” que armazenam, respectivamente, a hora e os minutos; “*myRTC.setDS1302Time()*”, que escreve a data e a hora desejadas no RTC.

4.2.6 Encoder

O *encoder* utilizado foi o KY-040 conforme ilustrado pela figura 62, sendo alimentado pelo Arduino.

Figura 62 - *Encoder* KY-040



Fonte: Elaborado pelo autor

A interligação entre os pinos do *encoder* e os pinos do Arduino estão demonstradas no quadro 14.

Quadro 14 - Interligação entre pinos do *encoder* e Arduino Due

Pino Encoder	Pino Arduino
DATA (Canal A)	A2
CLOCK (Canal B)	A3
VCC	-
GND	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Utilizou-se a biblioteca “RotaryEncoder.h”. Desta, utilizou-se duas funções: “*get.Position()*”, que retorna o número de pulsos gerados pelo movimento do *encoder* e “*set.Position()*”, que permite atualizar o valor do *encoder*.

A quantidade de pulsos retornadas pelo *encoder* é multiplicada por uma variável “*k_enc*” que tem por objetivo converter o número de pulsos lidos em deslocamento horizontal, em metros. A atualização do valor do *encoder* tem por objetivo corrigir possíveis erros de leitura, como, por exemplo, em caso da correia ligada ao motorreductor “patinar”, fazendo com que o *encoder* incremente a posição da barra, sem que essa de fato tenha se deslocado. Desta forma, cada vez que o fim de curso, localizado na posição inicial da barra for acionado, a função “*set.Position()*” é chamada, referenciando novamente o *encoder* pra o valor 0.

Para a instalação do *encoder* no motorreductor, usinou-se um acoplamento em *nylon*, com diâmetro de 35 mm e 60 mm de comprimento. Realizou-se um furo passante de 5 mm de diâmetro em seu centro, e de uma extremidade até metade de seu comprimento, fez-se uma rosca M12 a qual é utilizada para fixar o acoplamento no eixo do motorreductor. Na outra extremidade do acoplamento, é encaixado o *encoder*, que está fixo em um suporte confeccionado com um perfil “U” de 2”. A figura 63 ilustra o conjunto montado.

O cabo utilizado para alimentação e dados do *encoder* foi um de par trançado com malha, ou *Shield Twisted Pair* (STP).

Figura 63 - Acoplamento e fixação do *encoder*

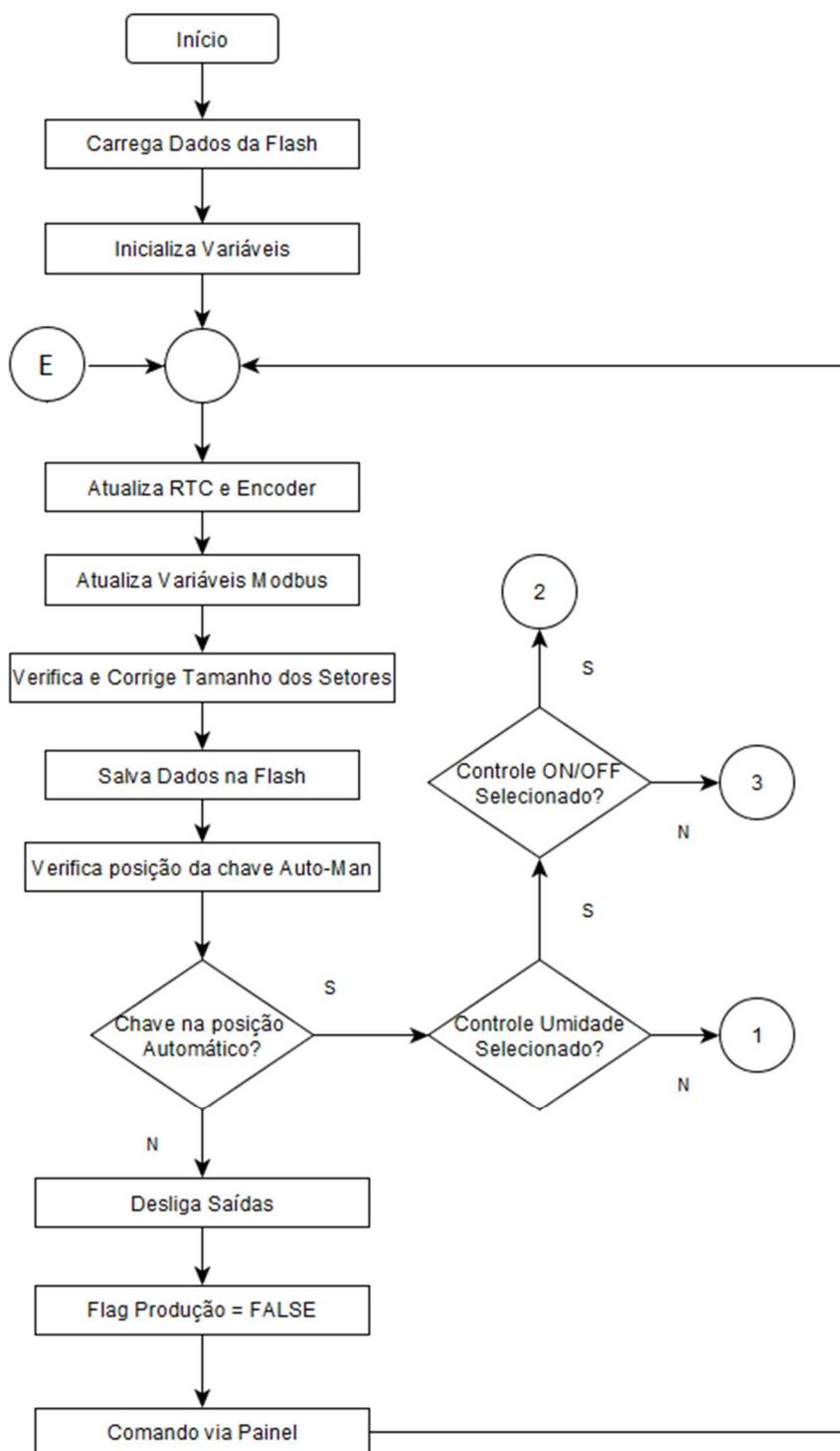
Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Software do Controlador

A figura 64 ilustra a estrutura de funcionamento do software do controlador. As etapas “Carrega Dados da Flash” e “Inicializa Variáveis” fazem parte da função *setup* do programa do Arduino, já as demais fazem parte da função *loop*.

Foram desenvolvidas 3 formas distintas de controle da irrigação: via programação horária (ponto 1 do fluxograma); via umidade, em um controle ON/OFF (ponto 2 do fluxograma) e via umidade, através do controle da velocidade da barra (ponto 3 do fluxograma). A operação em Manual é realizada via painel de controle, de forma independente ao controlador. Desta forma, é possível manter a barra em operação em caso de falha do controlador ou da *interface* de operação e programação.

Figura 64 - Fluxograma do software do controlador



Fonte: Elaborado pelo autor

A etapa “Verifica e Corrige Dados dos Setores” tem o objetivo que setores com tamanho incondizentes não sejam criados. Por exemplo: o início do setor B não pode ter um valor inferior ao fim do setor A; o fim do setor C não pode ser menor que o seu início. Caso seja inserido um valor de início para algum setor menor que o fim do setor

anterior, este valor é automaticamente alterado, recebendo o mesmo valor do fim deste setor anterior. Caso seja inserido um valor para fim do setor menor que seu próprio início, esse valor é automaticamente alterado para o mesmo valor do início. Após a correção, as variáveis Modbus são novamente atualizadas.

4.3.1 Controle por Programação Horária

Neste modo de operação o produtor define em horários pré-estabelecidos na tela de programação de receitas, qual setor e quantos ciclos este deve irrigar. O intuito de disponibilizar os horários e não os deixar à livre escolha é impedir a sobreposição de programações, já que, como é uma única barra que irriga toda uma fileira, esta não pode estar as 08:00 horas em uma programação irrigando o setor A, e as 08:02 horas em outra programação, por exemplo, irrigando o setor E.

O intervalo de 1 hora entre programações foi estabelecido para fins de testes, podendo ser alterado, desde que se respeite os limites de tempo afim de evitar sobreposições. Estes limites devem ser levantados em campo frente as características da estrutura de cada produtor.

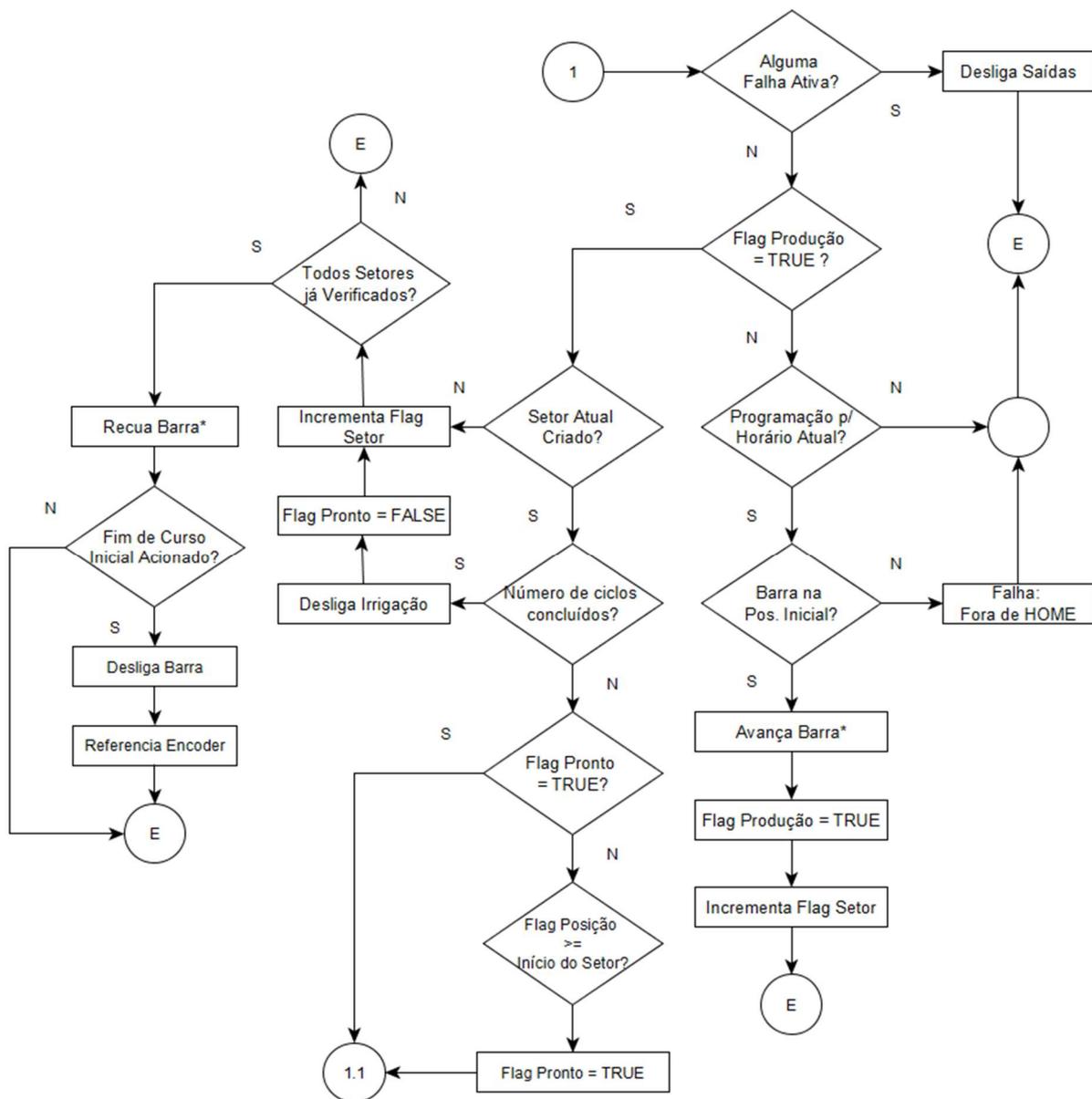
A velocidade para cada setor é definida na tela de operação da estufa, e, para esse modo de controle, a medição da umidade e temperatura tem cunho apenas indicativo.

Quando o horário do RTC do Arduino for igual a um dos horários propostos, a barra irrigadora inicia o avanço, irrigando os setores selecionados, com a frequência e a quantidade de ciclos (limitados a 3) desejadas. A irrigação é concluída primeiramente em um setor para então prosseguir ao setor seguinte, caso esse exista.

Com o conhecimento prévio por parte do produtor, em função de sua experiência sobre a frequência (velocidade) e a quantidade de ciclos necessários para cada cultura e seu respectivo estágio de vida, este pode programar as receitas nos horários desejados e deixar a operação em modo automático, não necessitando assim depender tempo na operação manual da barra irrigadora, e garantindo a irrigação conforme os parâmetros desejados.

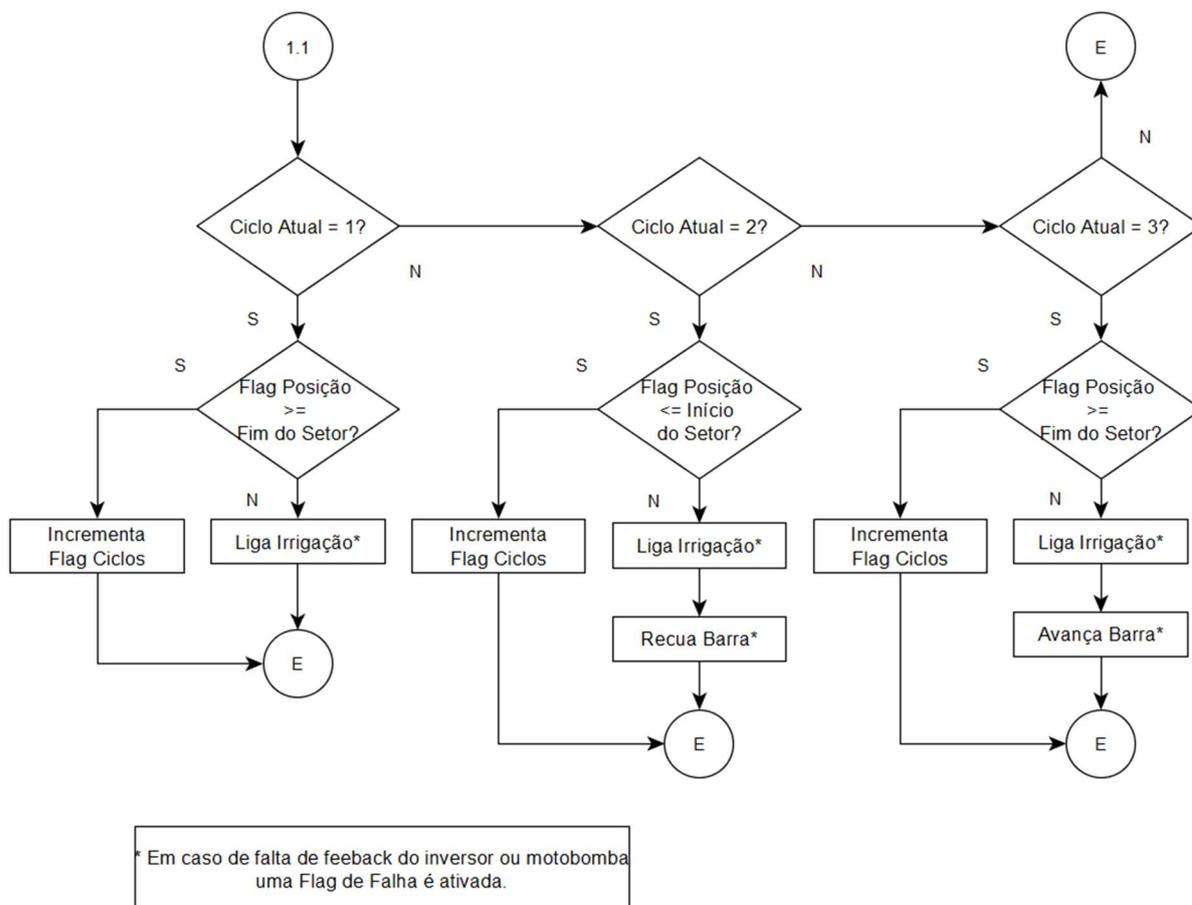
As figuras 65 e 66 ilustram o fluxograma de funcionamento no modo de controle por programação horária.

Figura 65 - Fluxograma do controle por programação horária – parte 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 66 - Fluxograma do controle por programação horária – parte 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2 Controle por Umidade – ON/OFF

Neste modo de controle, o produtor ajusta o percentual de umidade que deseja para cada setor e a frequência da barra irrigadora. Estas configurações são realizadas na tela de operação da estufa. Em função da disponibilidade de recursos, construiu-se apenas um sensor e, portanto, esse controle e o controle por velocidade serão realizados apenas no setor A.

Para que esse controle tenha um resultado satisfatório, a velocidade deve ser escolhida adequadamente para que em um ciclo o volume de água depositado não exceda drasticamente o valor de umidade desejado.

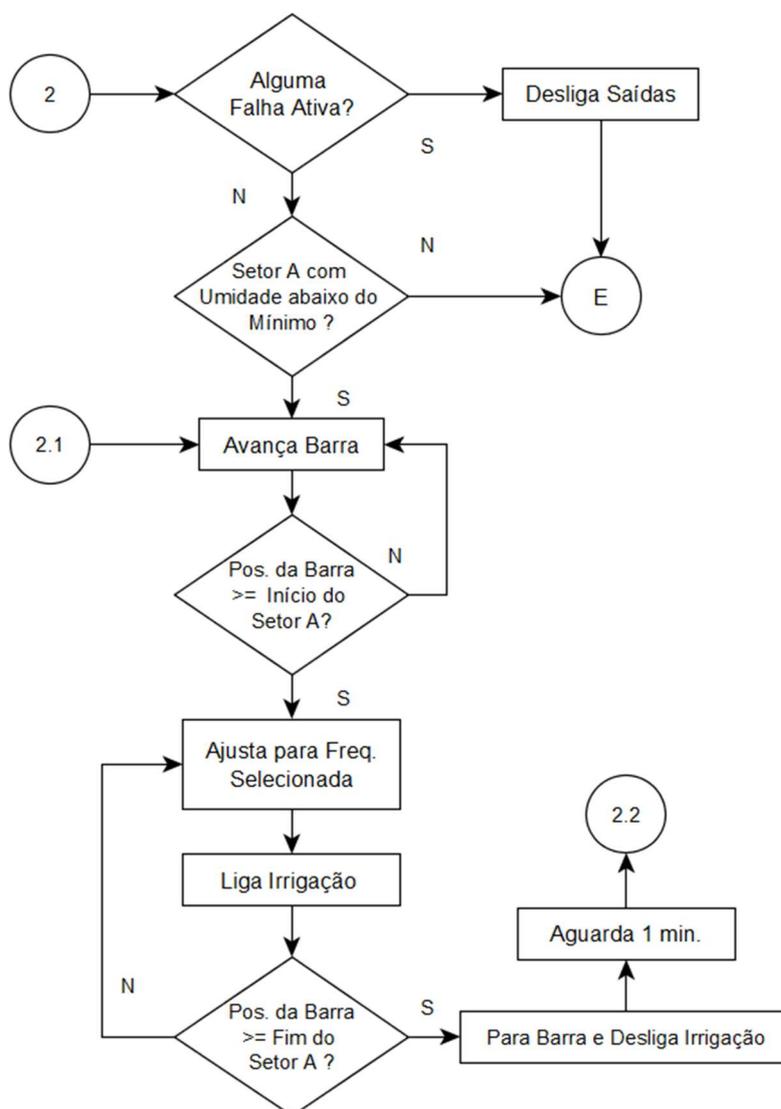
Estando a barra na posição inicial (*HOME*), o controlador verifica se o setor A está com a umidade abaixo do mínimo estabelecido. Em caso positivo, a barra inicia o avanço. Adentrando no setor, realiza-se a irrigação com a velocidade estipulada. Ao

chegar no final do setor, a barra irrigadora para e aguarda por 1 minuto para a estabilização do sensor de umidade. Após esse tempo, verifica se a umidade atual é maior que a umidade desejada. Em caso positivo, a barra retorna para a posição inicial sem irrigar, em caso negativo retorna irrigando. Estando novamente na posição inicial, reinicia-se o ciclo de verificação.

O valor de umidade mínima bem como o tempo de estabilização deve ser ajustado em campo, atendendo as diferentes realidades das instalações.

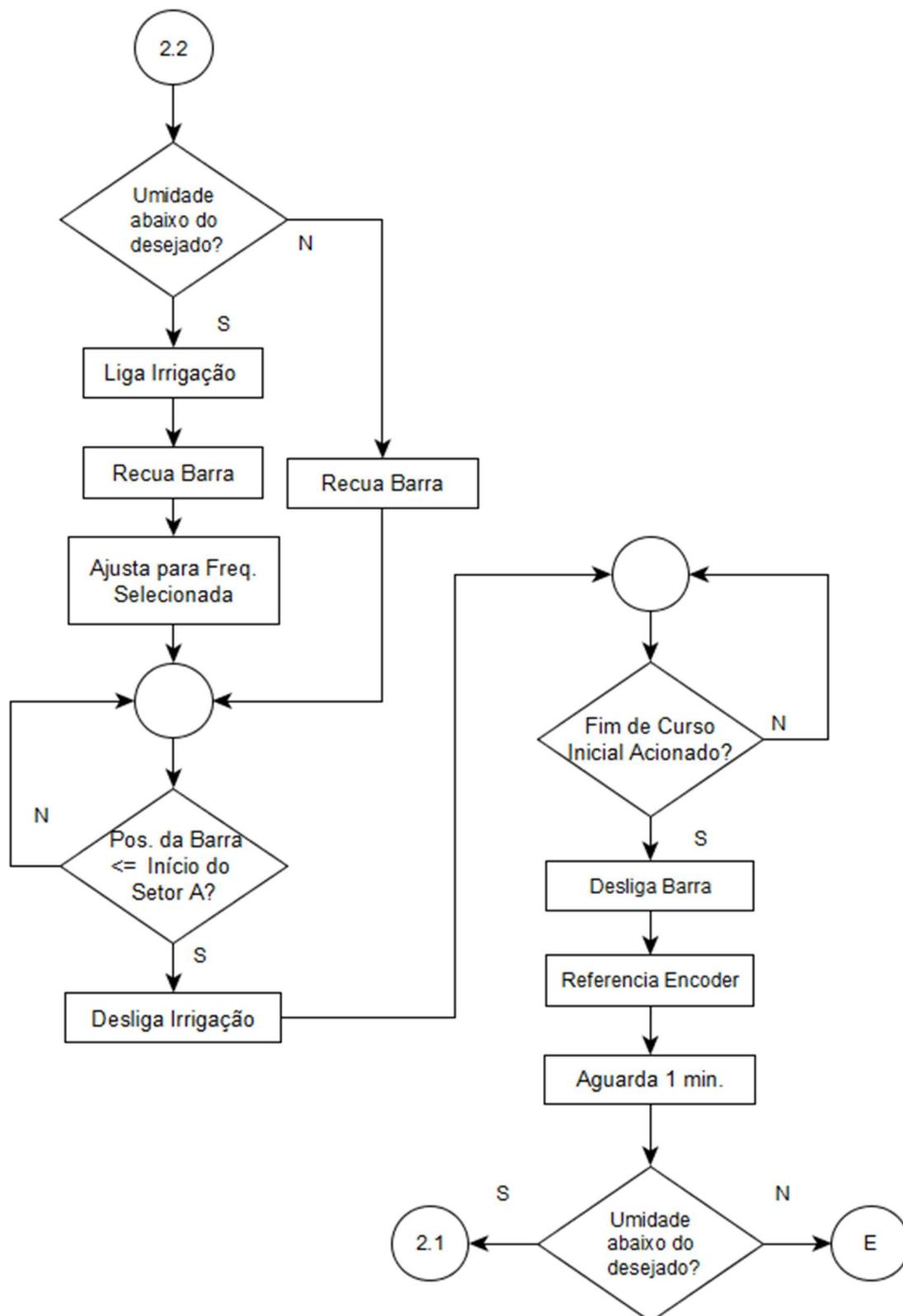
As figuras 67 e 68 ilustram o fluxograma de funcionamento.

Figura 67 - Fluxograma do controle ON/OFF – parte 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 68 - Fluxograma do controle ON/OFF – parte 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.3 Controle por Umidade – via Velocidade da Barra

Neste modo de controle, o disparo da irrigação ocorre quando a umidade estiver abaixo de um limite, estipulado para fins de testes em 10%.

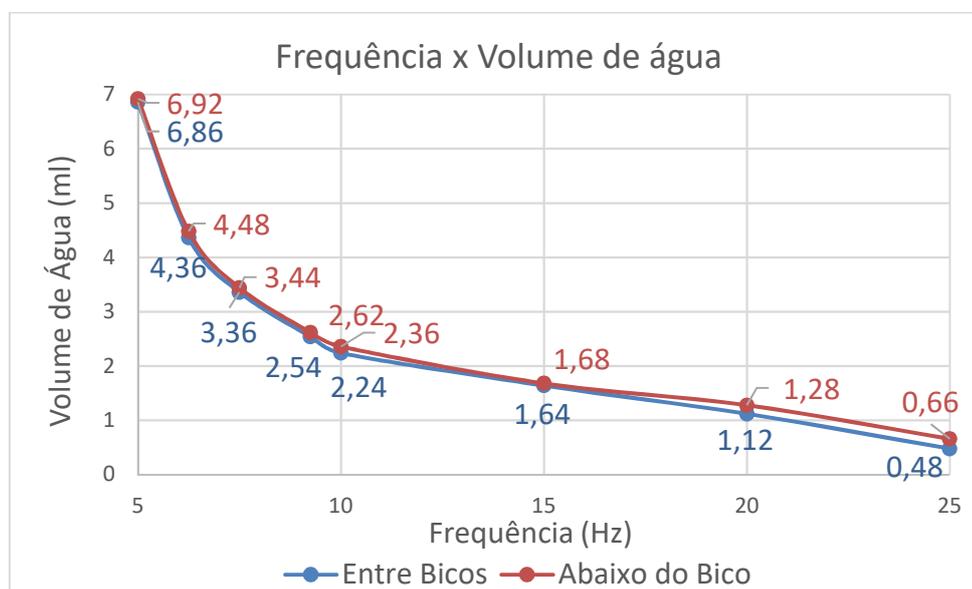
Afim de realizar uma aproximação do volume de água inserido pela barra irrigadora em diferentes frequências (velocidade), deixou-se uma célula da bandeja vazia, e se inseriu um recipiente (seringa vedada internamente) para coletar a água. Esse recipiente foi instalado primeiramente em uma célula posicionada entre dois bicos pulverizadores, realizando-se 5 medições para cada velocidade, e posteriormente abaixo do bico pulverizador, realizando-se novamente 5 medições. A frequência máxima adotada foi de 25 Hz devido à grande instabilidade da estrutura mecânica após esse valor. Para a coleta de água do recipiente, utilizou-se uma seringa com resolução de 0,01 ml, realizando o arredondamento quando entre escalas. A figura 69 ilustra o procedimento adotado, e o gráfico 4 demonstra o resultado do experimento.

Figura 69 - Procedimento para coleta do volume de água: a) Célula vazia; b) Recipiente de coleta.



Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 4 - Relação entre frequência da barra e volume de água para pontos de coleta distintos



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível perceber que o volume de água sofreu pouca influência da posição do ponto de coleta, visto que o “leque” produzido pelos bicos pulverizadores é sobreposto um ao outro diagonalmente. Como não foi possível medir a pressão da saída da motobomba, considerou-se essa constante. A não linearidade até a frequência de 10 Hz deve-se em função do escorregamento do motor se apresentar superior em baixas frequências.

A tabela 1 ilustra a média dos volumes coletados e o seu desvio padrão.

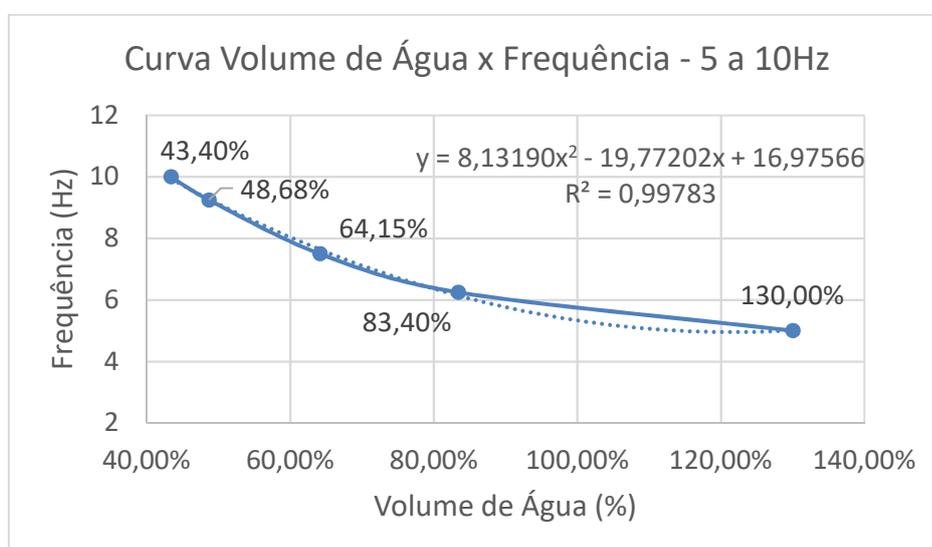
Tabela 1 - Média e desvio padrão dos volumes coletados

Frequência (Hz)	Média entre bicos (ml)	Desvio Padrão (ml)	Média abaixo bico (ml)	Desvio Padrão (ml)
5	6,86	0,15166	6,92	0,21679
6,25	4,36	0,35777	4,48	0,39623
7,5	3,36	0,11402	3,44	0,18166
9,25	2,54	0,11402	2,62	0,13038
10	2,24	0,13416	2,36	0,15166
15	1,64	0,11402	1,68	0,17889
20	1,12	0,13038	1,28	0,17889
25	0,48	0,16432	0,64	0,15166

Fonte: Elaborado pelo autor

Para definir a equação que define a relação entre frequência e volume, realizou-se a média entre os resultados das medições de volume entre e abaixo dos bicos e separou-se a equação em duas partes, de 5 Hz a 10 Hz e de 10 Hz a 25 Hz. Inverteu-se os eixos do gráfico para que a entrada seja o volume desejado em porcentagem (considerando 5,0 ml como 100%) e a saída como a frequência necessária, obtendo-se assim as linhas de tendência demonstradas nos gráficos 5 e 6.

Gráfico 5 - Linha de tendência para relação entre volume de água e frequência da barra para frequências de 5 a 10 Hz



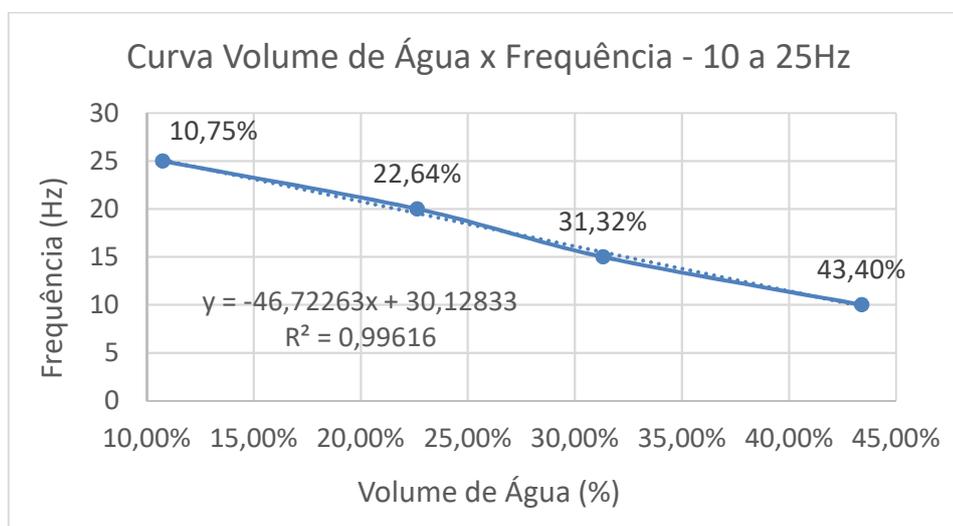
Fonte: Elaborado pelo autor

Do gráfico 5 extrai-se a equação 8:

$$Freq = 8,13190 \frac{Vol^2}{100} - 19,77202 \frac{Vol}{100} + 16,97566 \quad (8)$$

onde *Freq* é a frequência calculada, em Hz, e *Vol* o volume desejado, em porcentagem.

Gráfico 6 - Linha de tendência para relação entre volume de água e frequência da barra para frequências de 10 a 25 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Do gráfico 6 extrai-se a equação 9:

$$Freq = 8,13190 \frac{Vol^2}{100} - 19,77202 \frac{Vol}{100} + 16,97566 \quad (9)$$

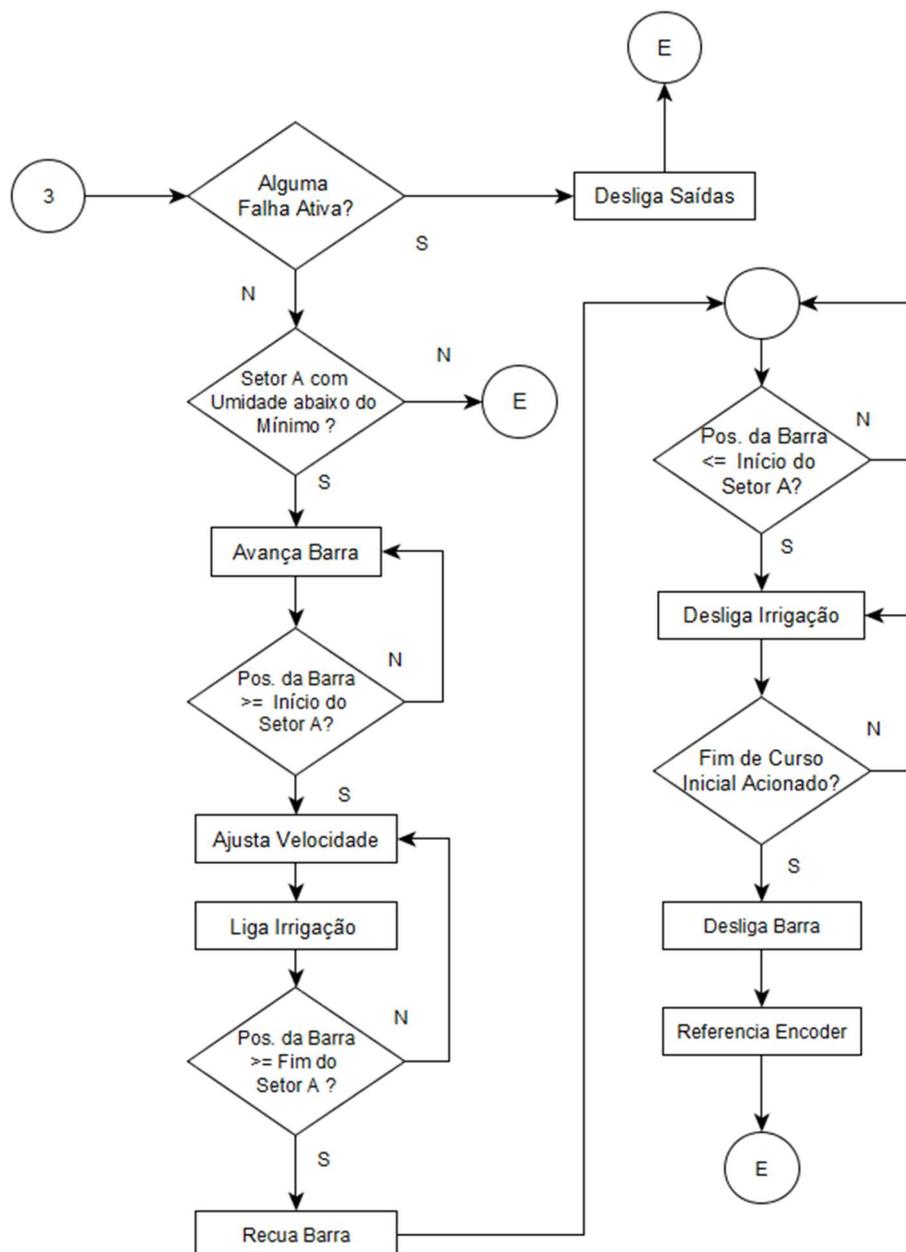
onde *Freq* é a frequência calculada, em Hz, e *Vol* o volume desejado, em porcentagem.

Para o cálculo da velocidade da barra, o controlador executa o seguinte procedimento, denominado no fluxograma ilustrado pela figura 70 como "Ajusta Velocidade":

- No momento do disparo da irrigação verifica a diferença entre a umidade atual e a umidade desejada, e a divide por 2 afim de inserir o volume desejado em dois ciclos.
- Caso o volume necessário seja maior ou igual a 43,40%, utiliza a equação 8, caso seja menor, a 9. Desta forma, para a grande maioria dos valores de umidade possíveis de escolha, a equação mais utilizada será a 9 que apresenta maior linearidade.

A figura 70 ilustra o fluxograma de funcionamento do controle por velocidade.

Figura 70 - Fluxograma do controle por velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.4 Comunicação com a *Interface* de Operação e Programação

O controlador, através de um *shield* Ethernet W5100, e a *interface* de operação e programação, através da porta Ethernet do *Notebook*, estão conectados a um Roteador *Wireless* de 4 portas da marca TP-LINK.

A biblioteca utilizada para a configuração desse *shield* foi a “*Ethernet.h*”. Através dela, configura-se o IP, MAC, *Gateway* e *Subnet Mask* a serem utilizados. O quadro 15 demonstra as configurações de rede realizadas.

Quadro 15 - Parâmetros de rede do controlador

Parâmetro	Valor
IP	192.168.0.101
MAC	0x90, 0xA2, 0xDA, 0x00, 0x51, 0x06
<i>Gateway</i>	192.168.0.161
<i>Subnet Mask</i>	255.255.255.0

Fonte: Elaborado pelo autor

O *Gateway* é o IP do Roteador *Wireless*. O IP do *Notebook* foi configurado como fixo com o valor de 192.168.0.100 e com mesmo *Gateway* e *Subnet Mask* que o controlador.

O protocolo de comunicação utilizado foi o Modbus IP, que é a implementação do protocolo Modbus baseado em TCP/IP. Foi implementado através da biblioteca “*Mudbus.h*”, disponível para Arduino. Essa biblioteca disponibiliza apenas dois tipos de registradores: *Holding Register*, que permite leitura e escrita de inteiros de 2 bytes, e *Coil*, que permite leitura e escrita de um bit (booleano).

Por padrão, essa biblioteca utiliza a porta 502 para comunicação, e limita o uso a 125 *Holding Register*, denominados no código C como “Mb.R [i]”, onde *i* é o registrador a ser utilizado, e a 128 *Coil*, denominados como “Mb.C [i]”. A atualização dos registradores se dá pela função “Mb.Run” da biblioteca.

No ScadaBR, foi criado um *Data Source* para a comunicação Modbus com o controlador, conforme ilustra a figura 71. *Data Source* é a denominação dada pelo ScadaBr aos objetos de comunicação criados, dentro dos quais criam-se os *Data Points*, que são as *tags* desses objetos, conforme ilustra a figura 72.

Figura 71 - *Data Source* Modbus IP no ScadaBR


Nome	Tipo	Conexão	Status	
Arduino_TCP	Modbus IP	192.168.0.101:502		
Auxiliares	Data Source Virtual	1 segundo(s)		

Fonte: Elaborado pelo autor

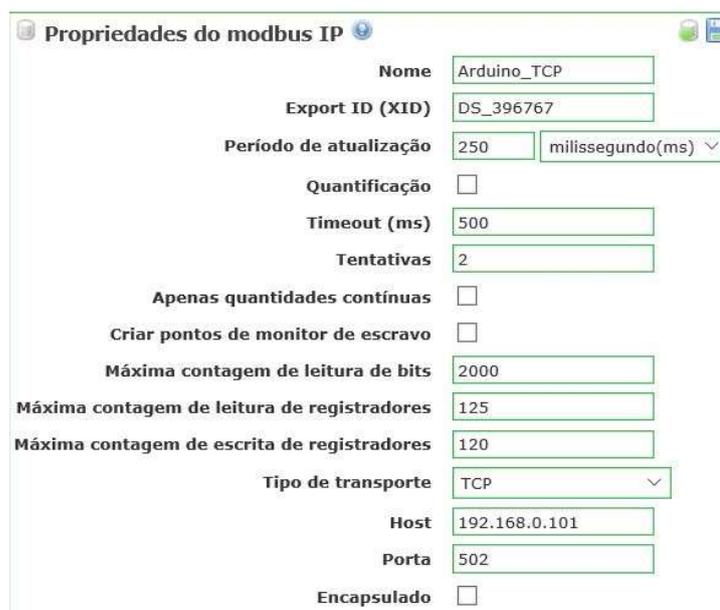
Figura 72 - *Data Points* do Modbus IP no ScadaBR


Nome	Tipo de dado	Status	Escravo	Faixa	Offset (baseado em 0)
adj_button	Binário		1	Status do coil	79
enc_end_A	Numérico		1	Registrador holding	110
enc_end_B	Numérico		1	Registrador holding	111

Fonte: Elaborado pelo autor

A configuração da comunicação se dá na configuração do *Data Source*. A figura 73 representa a configuração realizada para a comunicação Modbus, estabelecendo a comunicação entre o controlador e o ScadaBR, instalado no *Notebook*.

Figura 73 - Configuração do protocolo Modbus IP



Propriedades do modbus IP

Nome: Arduino_TCP

Export ID (XID): DS_396767

Período de atualização: 250 milissegundo(ms)

Quantificação:

Timeout (ms): 500

Tentativas: 2

Apenas quantidades contínuas:

Criar pontos de monitor de escravo:

Máxima contagem de leitura de bits: 2000

Máxima contagem de leitura de registradores: 125

Máxima contagem de escrita de registradores: 120

Tipo de transporte: TCP

Host: 192.168.0.101

Porta: 502

Encapsulado:

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Interface de Operação e Programação

Este capítulo aborda a criação das telas da interface de operação e programação, bem como as configurações necessárias para suas funcionalidades.

O *software* ScadaBR, embora possua muitos recursos, não possui uma gama diversificada de botões, campos de dados e outros objetos básicos de um sistema supervisorio. Desta forma, alguns objetos, bem com o título das telas e as tabelas tiveram que ser criadas utilizando os recursos de HTML e JavaScript do *software*.

4.4.1 Tela Inicial

Esta tela apresenta o título do projeto, o horário atual do RTC, e os menus de acesso para as demais telas, conforme ilustra a figura 74.

Figura 74 - Tela inicial



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.2 Tela de Programação de Receitas

Nesta tela, criam-se as receitas para o controle via programação horária. O *layout* adotado tem o objetivo de concentrar todas as receitas em uma única tela, facilitando assim o controle por parte do operador.

Para habilitar o setor a se irrigar, basta acionar o botão ON/OFF na coluna referente ao setor, e na coluna ao lado definir o número de ciclos, limitados a 3.

A figura 75 ilustra a tela de receitas, na qual há uma programação exemplo para as 14:00 horas, onde os setores A e D devem irrigar, com 2 e 3 ciclos, respectivamente.

Figura 75 - Tela de programação de receitas

Tela de Receitas										
Horário RTC Arduino 22h 44min										
Horários	Setor A	Nº ciclos	Setor B	Nº ciclos	Setor C	Nº ciclos	Setor D	Nº ciclos	Setor E	Nº ciclos
06:00	OFF	0								
07:00	OFF	0								
08:00	OFF	0								
09:00	OFF	0								
10:00	OFF	0								
11:00	OFF	0								
12:00	OFF	0								
13:00	OFF	0								
14:00	ON	2	OFF	0	OFF	0	ON	3	OFF	0
15:00	OFF	0								
16:00	OFF	0								
17:00	OFF	0								
18:00	OFF	0								
19:00	OFF	0								
20:00	OFF	0								

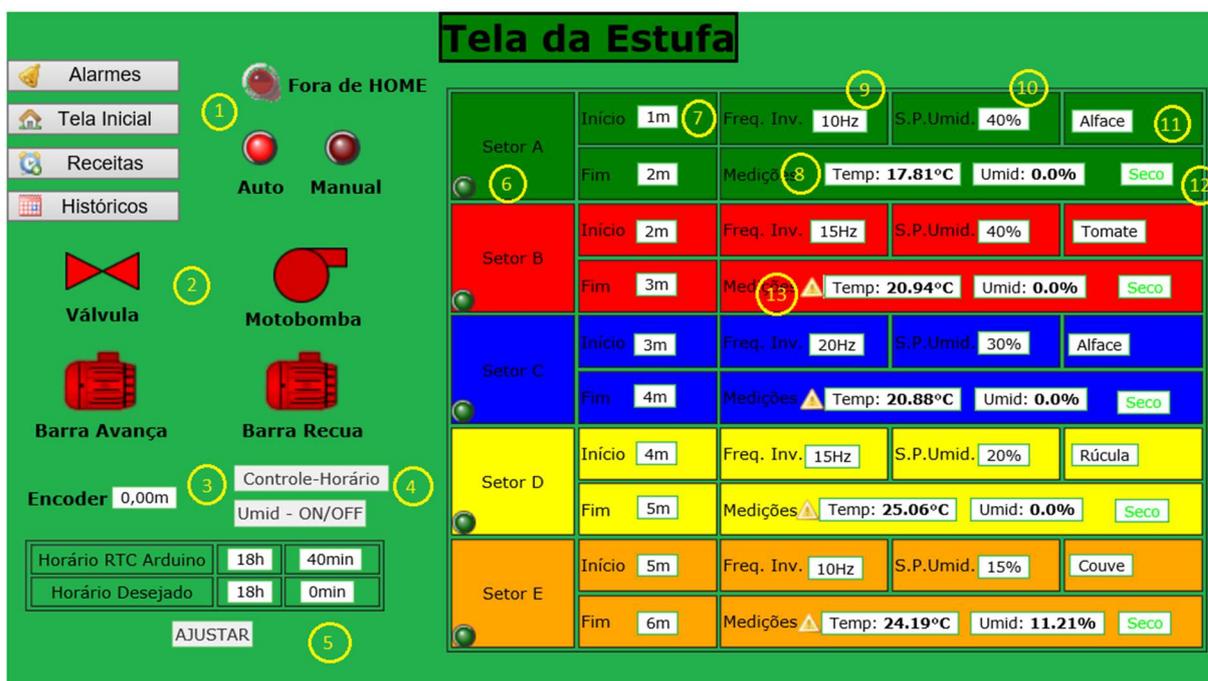
Alarmes | Tela Inicial | Históricos | Estufa

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.3 Tela de Operação da Estufa

Esta tela é destinada à criação dos setores, a definição da velocidade de irrigação (frequência do inversor), bem como acompanhar o *status* de operação, umidade e temperatura de cada setor. A figura 76 ilustra a tela criada.

Figura 76 - Tela de operação da estufa



Fonte: Elaborado pelo autor

Os pontos em destaque na figura 76 tem a seguinte descrição:

1. LEDs indicativos de operação automático, manual ou barra fora da posição HOME;
2. Indicativo de *status*. Quando desligados, apresentam-se em vermelho e, quando ligados, em verde, condicionados ao *feedback* do inversor e da motobomba;
3. Posição da barra indicada pelo *encoder*;
4. Botões de seleção de controle. O botão superior seleciona entre Horário ou Umidade e o inferior, quando selecionado Umidade, seleciona entre ON/OFF e Velocidade.
5. Ajuste do RTC do Arduino para o horário desejado;
6. LED indicativo de que o referido setor está sendo irrigado;
7. Configura-se o início e fim de cada setor;
8. Indicação de temperatura e umidade através do sensor sem fio.
9. Define-se a velocidade de irrigação (frequência do inversor), válidas para o controle por programação horária e ON/OFF;
10. Define-se o *SetPoint* (umidade desejada) para o controle ON/OFF e por Velocidade;

11. Campo de livre preenchimento para o produtor informar o que está sendo produzido no referido setor;
12. Indicação da condição do setor conforme nível de umidade: seco (0 a 35%), úmido (36% a 85%) ou saturado (86% a 100%);
13. O triângulo amarelo ao lado da indicação sinaliza falha na leitura do sensor;

4.4.4 Tela de Históricos

Nesta tela é possível acompanhar um histórico das últimas 24 horas de medição de temperatura e umidade de cada sensor. A figura 77 ilustra a tela de seleção do sensor do qual se deseja visualizar o histórico, e a figura 78 demonstra um histórico de pouco mais de 2 horas de operação do Sensor A.

Figura 77 - Tela de históricos



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 78 - Tela de histórico do sensor A



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4.5 Tela de Alarmes

Nesta tela, visualizam-se os alarmes não reconhecidos. O ScadaBR não possibilita, através do objeto de alarmes para as telas de visualização, o reconhecimento de todos os alarmes simultaneamente, nem a visualização dos alarmes já reconhecidos. Para tais operações, é necessário sair das telas de visualização e acessar o menu de alarmes diretamente no menu do ScadaBR.

Todos os alarmes foram criados utilizando recursos do ScadaBR, sendo estes:

- Falha da Motobomba: quando não houver *feedback* do contato auxiliar do seu contator decorridos 2s após comando de partida. Esta falha para o processo de irrigação.
- Falha do Inversor: quando não houver *feedback* do relé auxiliar do inversor decorridos 2s após comando de partida. Esta falha para o processo de irrigação.
- Falha dos Sensores A a E: quando o horário da última atualização (*timestamp*) ultrapassar 120s. Isso ocorrerá quando o sensor não enviar

efetivamente a leitura de umidade e temperatura por uma falha de conexão, ocasionada, por exemplo, por falta de bateria.

- Umidade abaixo do Limite: quando a umidade apresentar valores abaixo de 5%. Esse limite é configurado diretamente no ScadaBR, e não permite configuração pelas telas de visualização.
- Temperatura acima do Limite: quando a temperatura apresentar valores acima de 40°C. Esse limite é configurado diretamente no ScadaBR, e não permite configuração pelas telas de visualização.
- Temperatura abaixo do Limite: quando a temperatura apresentar valores abaixo de 10°C. Esse limite é configurado diretamente no ScadaBR, e não permite configuração pelas telas de visualização.
- Barra fora da posição HOME: quando o sistema não estiver em operação e a posição indicada pelo *encoder* apresentar valor diferente de 0. Esta falha impede o início das operações em qualquer tipo de controle.

A figura 79 ilustra a tela de alarmes, exemplificando alguns alarmes, em nível de informação, nativos do ScadaBR. A seta verde localizada na coluna do extremo direito tem a função de realizar o reconhecimento do referido alarme.

Figura 79 - Tela de alarmes

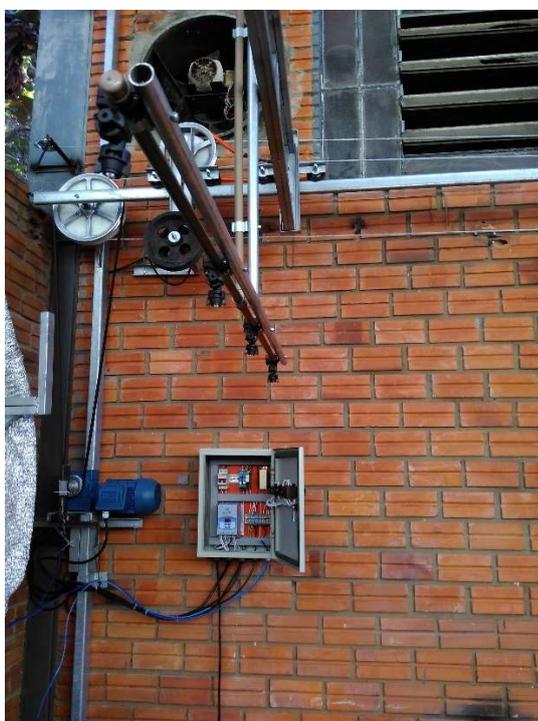
Nível de alarme	Tempo	Mensagens	Tempo de inatividade
	00:39:20	Usuário admin entrou no sistema	Ativo 

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Montagem da Estrutura da Barra

Afim de realizar testes mais fidedignos, optou-se por construir uma Barra Irrigadora em escala reduzida. A barra possui apenas 4 bicos pulverizadores, cujo feixes se sobrepõem. Os bicos pulverizadores laterais, com objetivo de sobreposição aos bicos pulverizadores dos extremos, não foram instalados devido ao custo e não serem estritamente necessários para os testes a serem realizados. A figura 80 ilustra a estrutura dos bicos pulverizadores da Barra Irrigadora e parte da sua estrutura de sustentação.

Figura 80 - Estrutura da barra irrigadora



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 Quadro de Comando

Para acomodar o inversor de frequência do motorreductor, os relés de *interface* e as chaves de comando manual, realizou-se a montagem de um quadro de comando, ilustrado pela figura 81.

Figura 81 - Porta do quadro de comando com chaves para acionamento manual



Fonte: Elaborado pelo autor

Na porta do Quadro de Comando há quatro chaves com retenção, cujas funções são, respectivamente, da esquerda para direita:

- **Chave S1 - Man/Auto:** Chave de 2 posições que seleciona entre operação Manual ou Automática. Quando em Manual, as funções das demais chaves são habilitadas e o inversor entra no *setup* Local; quando em Automático os acionamentos são realizados pelo Controlador e o inversor entra no *setup* Remoto.
- **Chave S2 - Recua / 0 / Avança:** Chave de 3 posições, que recua, para ou avança a Barra Irrigadora.
- **Chave S3 - Válvula:** Chave de 2 posições que liga e desliga a Válvula de Irrigação.
- **Chave S4 - Motobomba:** Chave de 2 posições que liga e desliga a Motobomba.

A montagem interna do Quadro de Comando está ilustrada na figura 82.

Figura 82 - Montagem interna do quadro de comando

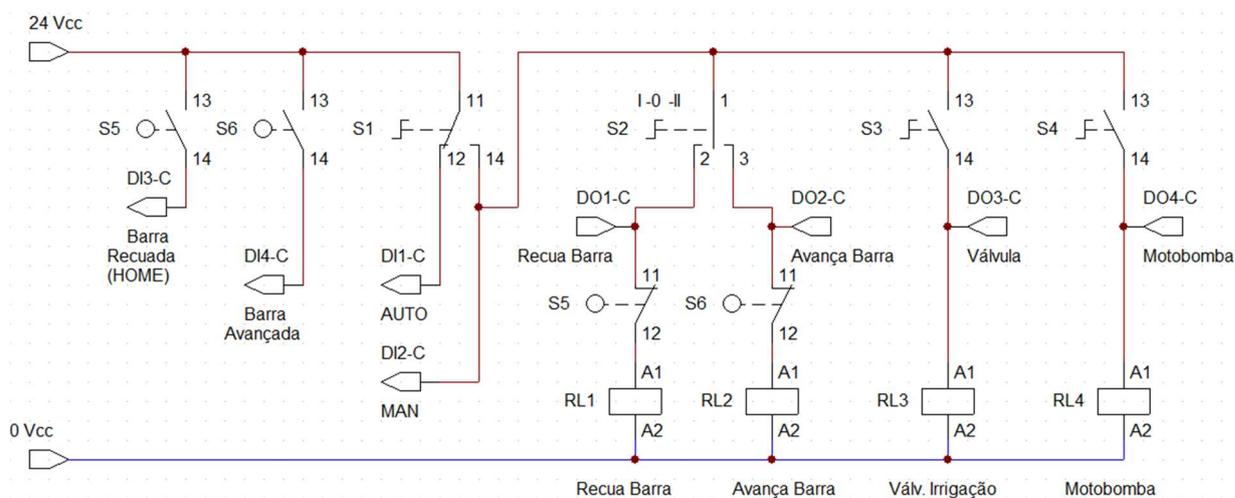


Fonte: Elaborado pelo autor

Para delimitar a movimentação da Barra, foram utilizadas as seguintes chaves fim de curso:

- **Fim de curso S5:** instalado na posição inicial da Barra (*HOME*).
- **Fim de curso S6:** instalado na posição final da Barra.

Foram utilizados quatro relés de *interface*, representados na figura 83 como RL1, RL2, RL3 e RL4, para isolar os comandos Automático e Manual do Inversor, da Válvula e do contator da Motobomba. Desta forma, tanto o acionamento provindo dos relés do Controlador, quanto o acionamento provindo das chaves do comando Manual acionam esses relés, que, por sua vez, realizam os respectivos acionamentos. Afim de garantir segurança na operação, realizou-se um intertravamento elétrico dos relés de *interface* de avança e recua Barra com os sensores fim de curso da posição inicial S5 e S6. Desta forma, mesmo que seja dado um comando via Controlador ou chaves, a Barra não irá recuar nem avançar caso tenha atingido seu limite. As identificações DI e DO referem-se, respectivamente, a entradas e saídas digitais, e o sufixo I e C, a Inversor e Controlador, respectivamente.

Figura 83 - Diagrama elétrico dos relés de *interface* do quadro de comando

Fonte: Elaborado pelo autor

A motobomba já possui um painel dedicado, para o qual foi enviado apenas o sinal do relé de interface para acionamento do contator e recebido o *feedback* do contato auxiliar deste mesmo contator (k1). O diagrama elétrico de comando encontra-se no Apêndice D - Diagrama de Comando Completo do Quadro de Comando, e o diagrama elétrico de força no Apêndice E - Diagrama de Força Completo do Quadro de Comando.

Parametrizou-se as entradas e saídas digitais do inversor, bem como sua entrada analógica, para que o mesmo responda aos comandos recebidos. Criou-se duas programações, as quais são chamadas de *setup* Local e Remoto, permitindo assim que ele tenha parametrizações distintas quando o sistema estiver em Automático ou Manual. Desta forma, em Automático o inversor recebe a referência de velocidade do Conversor de 0 a 10 V do Controlador, e em Manual essa referência pode ser ajustada pelas teclas frontais do próprio inversor. Assim, em modo manual o controle da barra irrigadora se torna totalmente independente do controlador e da *interface* de operação e programação. A figura 84 ilustra do diagrama elétrico dos bornes de comando do inversor.

5 RESULTADOS

Este capítulo visa descrever os resultados obtidos com os testes realizados em laboratório e na barra irrigadora construída. Para obtenção dos dados referentes a movimentação da barra irrigadora, do acionamento das saídas e entradas do controlador e das medições de temperatura e umidade, utilizou-se o recurso chamado Relatórios, disponível no ScadaBR.

O recurso relatórios permite a exportação dos dados de todas as variáveis do ScadaBR, armazenadas em seu banco de dados interno. Esses dados podem ser exportados para gráficos e para Excel no formato “.csv”, conforme ilustra a figura 85.

Figura 85 - Recurso Relatórios do ScadaBR



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1 Estrutura Completa Interligada

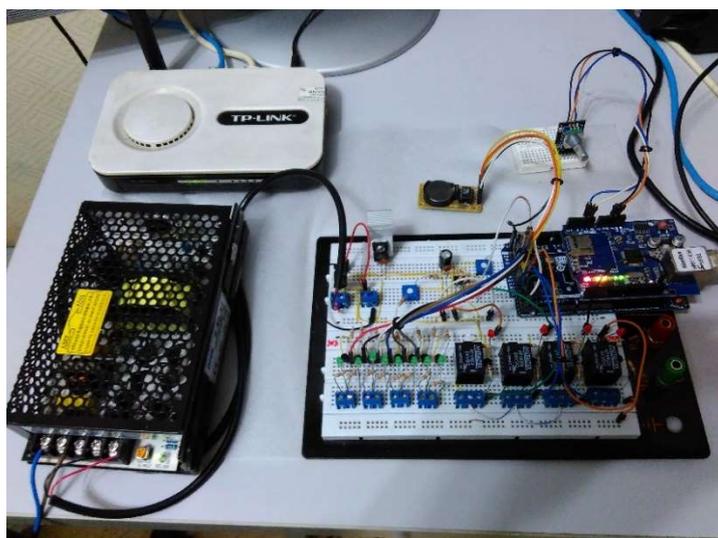
A figura 86 demonstra o controlador, a *interface* de operação e programação e o quadro de comando interligados. A figura 87 demonstra o protótipo do controlador desenvolvido.

Figura 86 - Dispositivos interligados junto à estrutura da barra irrigadora



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 87 - Protótipo desenvolvido

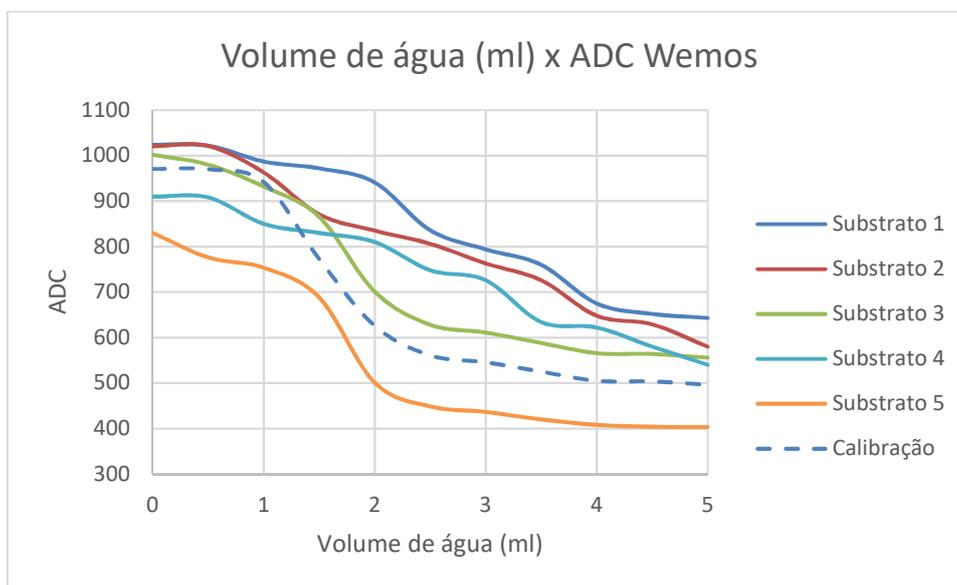


Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 Resposta do Sensor de Umidade

A verificação da leitura do sensor de umidade foi realizada em 5 células distintas da bandeja. Como percebeu-se uma irregularidade das repostas, fez-se o gráfico do volume em relação ao ADC para analisar o comportamento do sensor. Em cada uma das células, foi inserido o volume de 5,0 ml de água, em passos de 0,5 ml com intervalos de 10 min. O gráfico 7 demonstra os resultados obtidos.

Gráfico 7 - Teste de repetibilidade do sensor



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível perceber analisando as 5 respostas que a repetibilidade do sensor adotado é baixíssima.

Isso deve-se ao fato deste sensor adotar exclusivamente a condutividade elétrica como princípio de medição. Desta forma, qualquer variação na condutividade do substrato ou no posicionamento do próprio sensor, independente da inserção ou não de água, faz com que haja alterações significativas em sua resposta.

Durante os testes, foi possível perceber também que devido à pressão da água dos bicos pulverizados, eventualmente criavam-se “buracos” no substrato, por onde a água ia diretamente até os eletrodos, influenciando nas medições. Outro detalhe percebido, foi que quando o substrato estava demasiadamente seco, seus componentes criavam uma “capa” que acumulava uma parcela da água e a impedia de ser drenada pelo substrato.

5.3 Resposta do Sensor de Temperatura

Para validar a resposta do sensor de temperatura, realizou-se sua verificação utilizando um forno de bloco seco, no qual estava conectado um sensor padrão, cujo certificado de calibração encontra-se no Anexo D - Certificado de Calibração. Entretanto, como esse bloco não faz resfriamento, foi realizado a verificação somente

a partir da temperatura ambiente. Os resultados da verificação encontram-se na tabela 2.

Tabela 2 - Resultado da verificação do sensor de temperatura

Valor de Referência (°C)	Média das leituras do sensor (°C)	Desvio Padrão (°C)
20,00	19,75	0,028
25,00	24,81	0,020
30,00	29,61	0,066
35,00	35,34	0,036
40,00	40,36	0,049

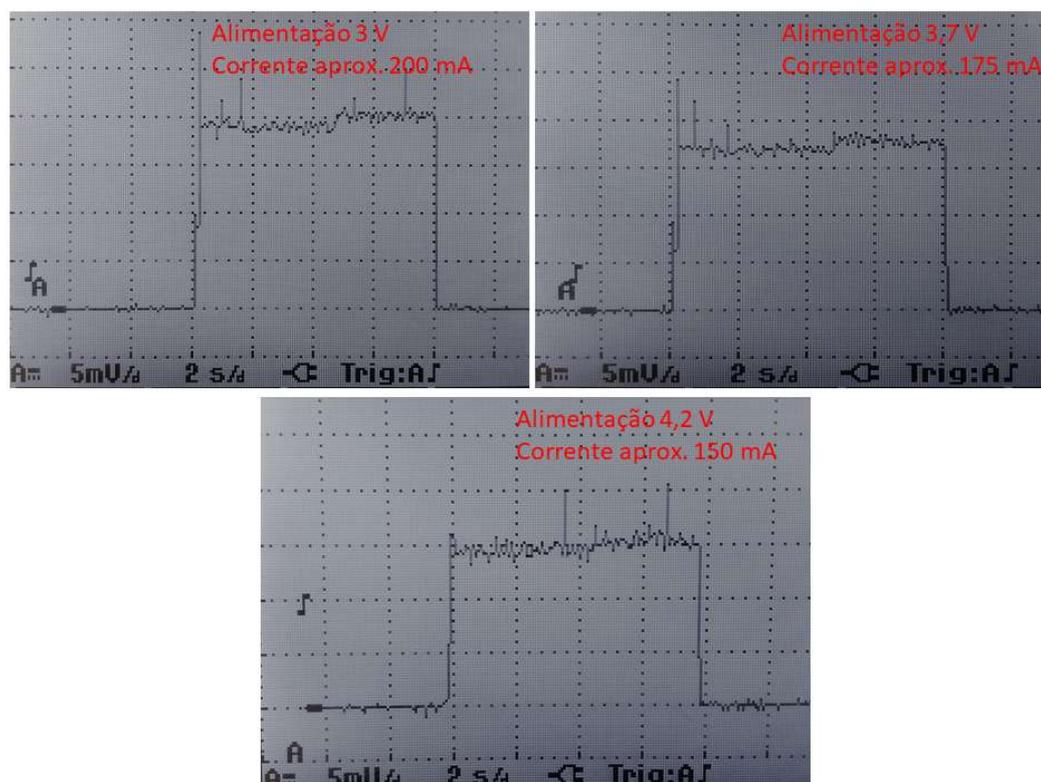
Fonte: Elaborado pelo autor

Foram consideradas 5 leituras do sensor para cada ponto de referência.

5.4 Verificação do Consumo de Corrente do Conjunto Sensor

Afim de verificar a corrente de consumo do conjunto sensor, e assim obter uma estimativa da duração da bateria, utilizou-se um resistor de shunt de 0,1R 1% em série com a bateria adquirida de LiPo 2500 mAh, e mediu-se indiretamente a corrente no osciloscópio. Foi alimentado o sensor por meio de uma fonte ajustável e realizada a medição para 3 casos: bateria carregada (4,2 V), bateria na tensão nominal (3,7 V) e bateria na tensão de joelho (3,0 V). Os resultados são apresentados na figura 88.

Figura 88 - Corrente do conjunto sensor para 3 situações de carga da bateria



Fonte: Elaborado pelo autor

Para obter a corrente em cada caso, basta multiplicar o valor de tensão lido no osciloscópio por 10. Percebe-se que a duração do ciclo de leitura dos sensores, de conexão ao *Wi-Fi* e de envio da mensagem HTTP é de aproximadamente 8 segundos. A média da corrente em *sleep* é 0,78 mA.

Considerando a corrente da tensão nominal e uma auto descarga da bateria de 20%, chegou-se a seguinte estimativa ilustrada no quadro 16. A planilha utilizada para os cálculos encontra-se no Apêndice H - Planilha de Cálculo de Duração da Bateria.

Quadro 16 - Estimativa da duração da bateria do conjunto sensor

Situação	Tempo em <i>sleep</i> (s)	Duração em horas	Duração em dias	
			Uso de 8h	Uso de 24h
1	15	32,4	4,07	1,35
2	60	94,00	11,75	3,91
3	300	376,98	47,12	15,70
4	600	650,96	81,37	27,12

Fonte: Elaborado pelo autor

5.5 Verificação do Conversor de 0 a 10 V

Com o Conversor de 0 a 10 V conectado ao inversor de frequência, iniciou-se uma programação horária aleatória para o setor A, permitindo assim que o inversor entrasse em funcionamento e o campo de frequência deste setor pudesse “escrever” a frequência no inversor. Desta forma, é possível verificar simultaneamente toda a malha: *interface* de operação e programação, conversor de 0 a 10 V e entrada analógica do inversor.

Em um primeiro momento, percebeu-se que havia uma desproporção dos valores indicados no display do inversor, com os valores solicitados. Para corrigir essa diferença, visto que a tensão de saída do conversor apresentava os valores corretos, realizou-se o ajuste no ganho da entrada analógica do inversor, parâmetro P234, para o valor de 97,0, refletindo em uma melhora expressiva dos resultados, demonstrados no quadro 17. Não se realizou testes para frequências até o limite de 50 Hz, pois a estrutura da barra apresentava excessiva vibração a partir de 25 Hz.

Quadro 17 - Resultados do conversor de 0 a 10 V

Frequência (Hz)	Valor Esperado (V)	Saída Conversor (V)	Frequência do Inversor (Hz)	
			Antes do Ajuste	Após o Ajuste
5	1,0	1,023	5,1	4,9
10	2,0	1,998	10,2	10
15	3,0	3,017	15,6	15,1
20	4,0	4,003	20,9	20,2
25	5,0	5,017	26,1	25,4

Fonte: Elaborado pelo autor

5.6 Testes do Controlador

Nesta etapa estão descritos os testes realizados para os 3 métodos de controle propostos.

5.6.1 Teste do Controle por Programação Horária

Afim de validar o funcionamento do controle por programação horária, criaram-se as seguintes receitas, demonstradas no quadro 18. Para que ocorresse o início da operação, alterou-se o RTC do Arduino para os horários programados. O inversor

assumiu a frequência de 10 Hz quando a barra percorresse um setor não habilitado ou uma zona vazia.

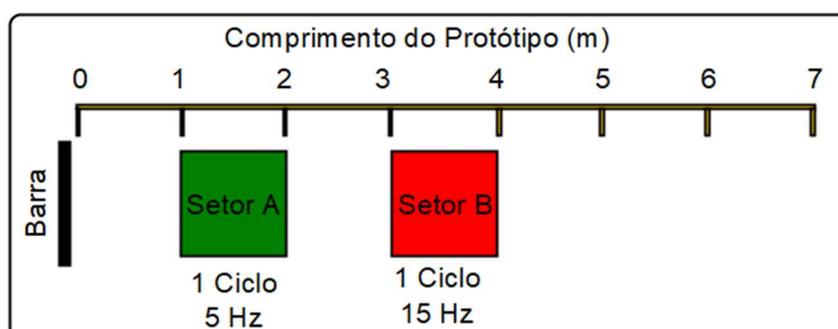
Quadro 18 - Receitas utilizadas nos testes

Receita	Horário
1	12:00
2	18:00
3	14:00

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 89 ilustra a configuração dos setores para a receita 1.

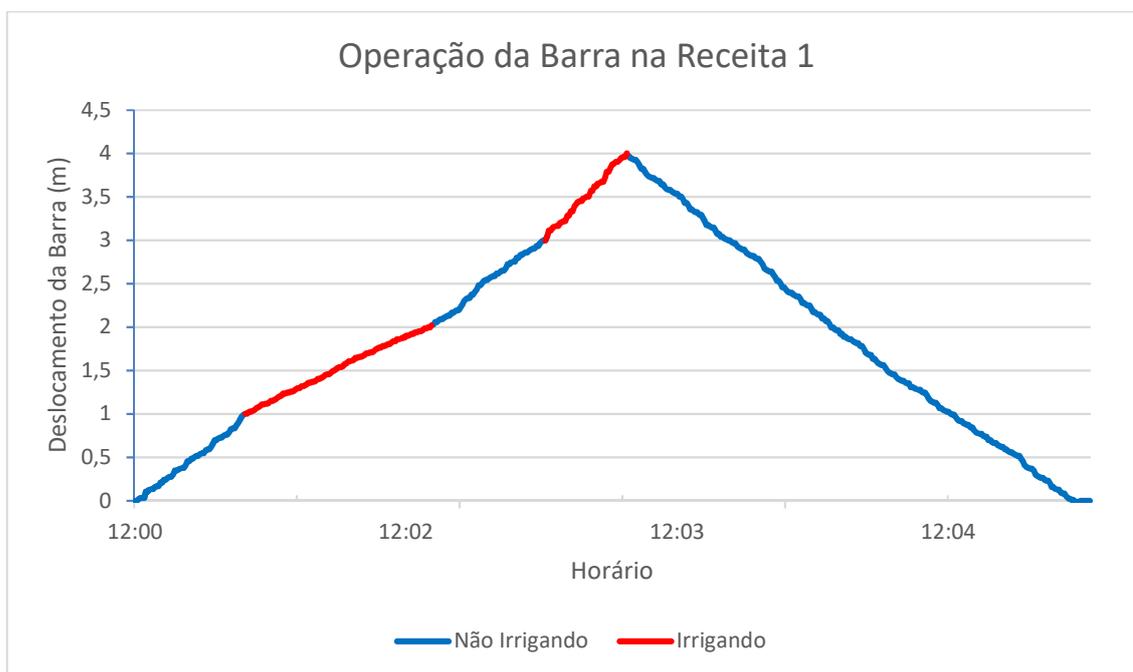
Figura 89 - Configuração dos setores para a receita 1 – programação horária



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 8 ilustra a operação da barra ocorrendo exatamente como o programado na receita 1. Percebe-se que houve uma diminuição no coeficiente angular da reta quando se iniciou a irrigação do setor A. Isso deve-se ao fato da frequência selecionada ter sido de 5 Hz. O mesmo ocorre com a irrigação do setor B, onde a frequência selecionada era de 15Hz, havendo assim um aumento no coeficiente.

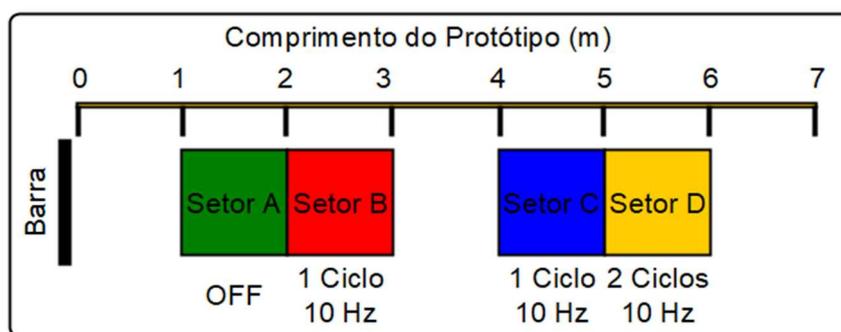
Gráfico 8 - Resultados da receita 1 - programação horária



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 90 ilustra a configuração dos setores para a receita 2.

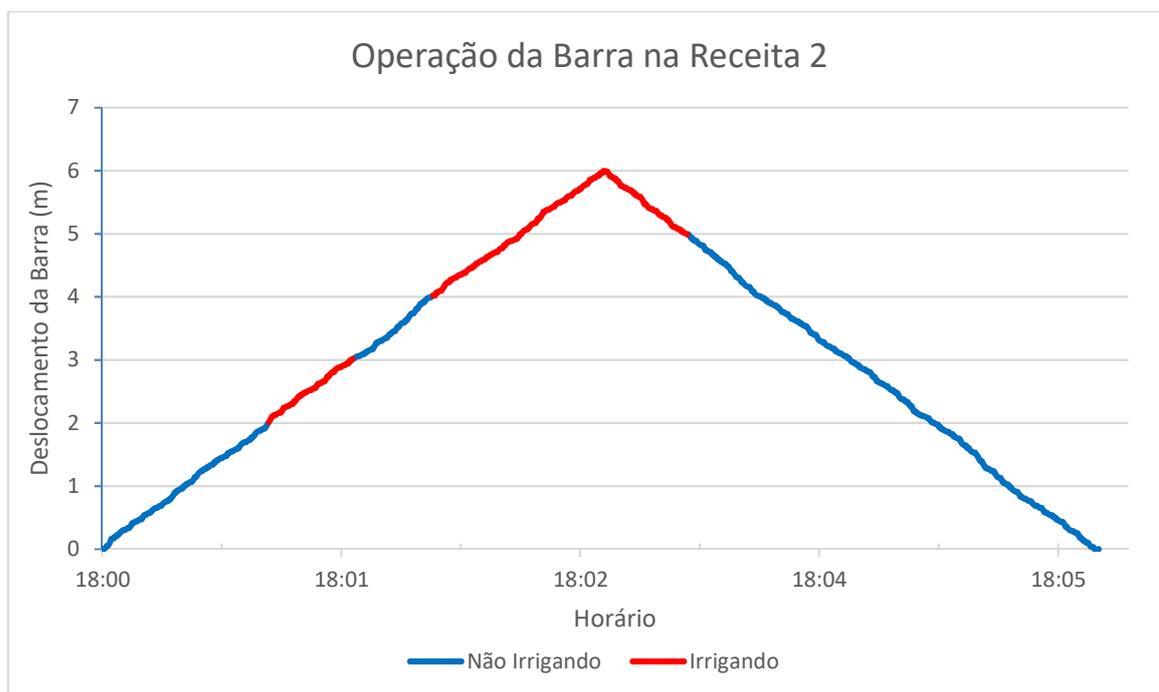
Figura 90 - Configuração dos setores para a receita 2 – programação horária



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 9 ilustra a operação da barra ocorrendo exatamente como o programado na receita 2. Percebe-se que quando a barra chegou no limite do setor D, como este necessitava de 2 ciclos de irrigação, a barra retornou irrigando.

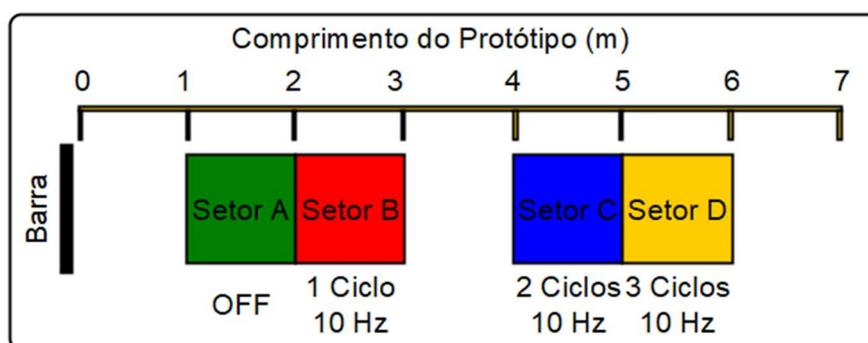
Gráfico 9 - Resultados da receita 2 - programação horária



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 91 ilustra a configuração dos setores para a receita 3.

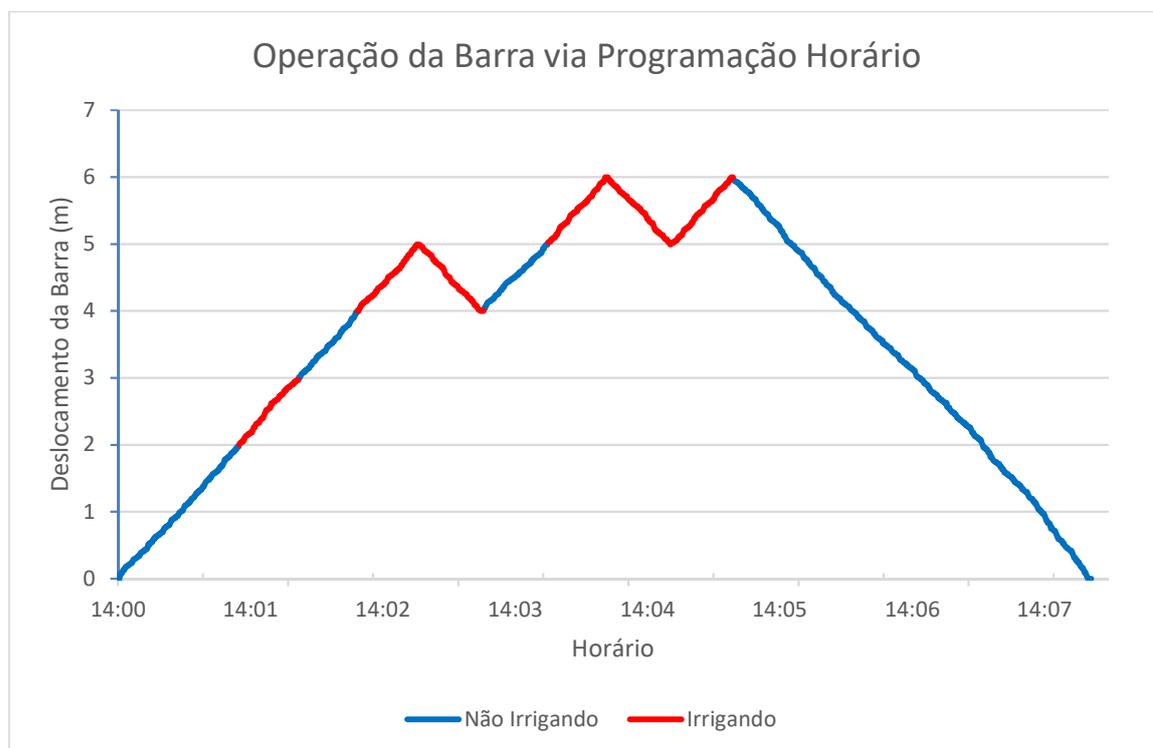
Figura 91 - Configuração dos setores para a receita 3 – programação horária



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 10 ilustra a operação da barra ocorrendo exatamente como o programado na receita 3. Percebe-se que a barra executa primeiramente a quantidade de ciclos determinada para o setor C (do metro 4 ao 5) para então prosseguir para o setor D, onde executa os 3 ciclos determinados.

Gráfico 10 - Resultados da receita 3 - programação horária



Fonte: Elaborado pelo autor

5.6.2 Testes do Controle por Umidade – Controle ON/OFF

Os testes a seguir, demonstrados no quadro 19, foram realizados a fim de validar o funcionamento do Controle ON-OFF. As velocidades (frequências) foram propositalmente escolhidas com tais valores em função do incremento de volume de água desejado. Caso os dois controles, ON-OFF e velocidade, estivessem interligados como era a proposta inicial, essa velocidade seria definida em função da diferença entre a umidade atual e a desejada (*SetPoint*).

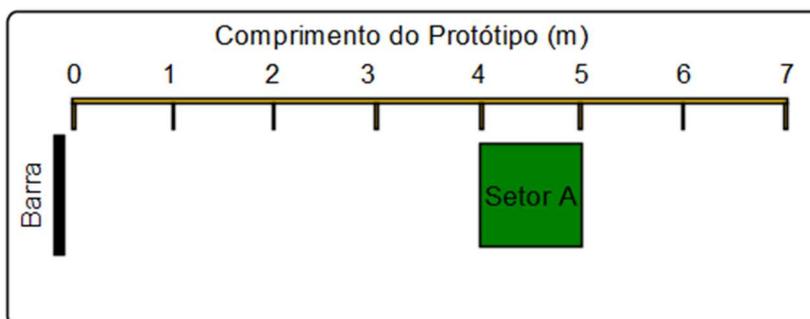
Quadro 19 - Testes para do controle ON-OFF

Teste (Setor A)	Disparo da Barra	Frequência	SetPoint
1	Umidade < 10%	15 Hz	40%
2	Umidade < 35%	10Hz	100%

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 92 ilustra a configuração do setor A para os 2 testes realizados.

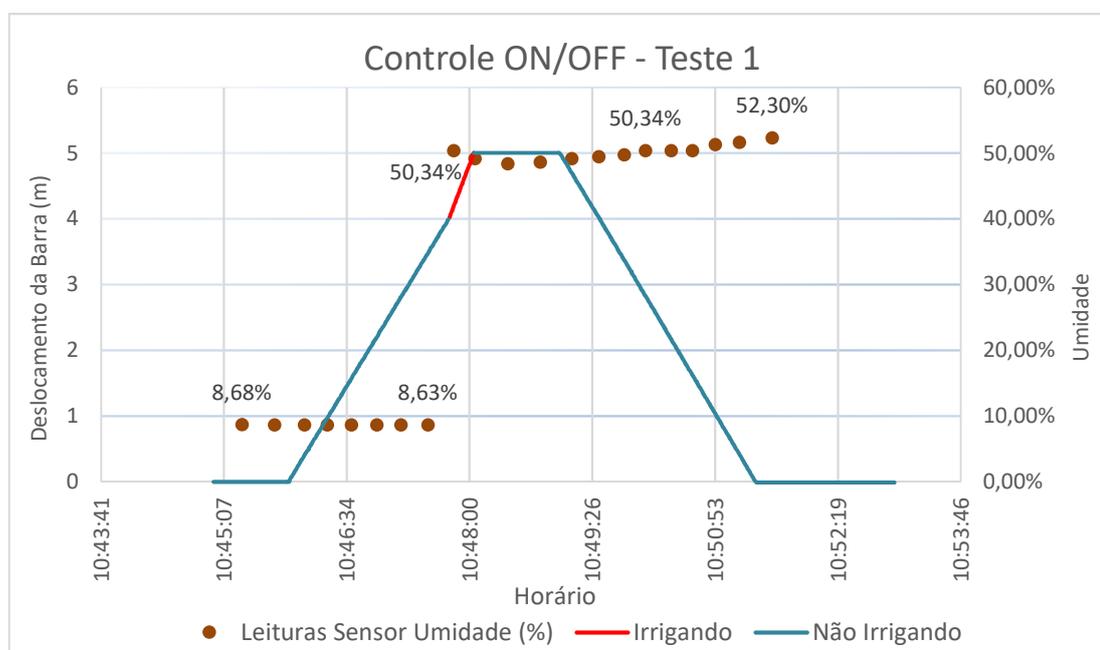
Figura 92 - Configuração do setor A - controle ON/OFF



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta do gráfico 11 demonstra o aumento da umidade instantes após a irrigação ser acionada. No intervalo de irrigação, a reta vermelha encontra-se mais acentuada devido a nesse intervalo a frequência estar ajustada para 15Hz. Como a umidade ficou acima do *SetPoint*, após o intervalo de espera, a barra retornou sem irrigar. Pode-se perceber também que a leitura do sensor continuou aumentando, em função de sua lenta estabilização.

Gráfico 11 - Resultados do teste 1 – controle ON/OFF

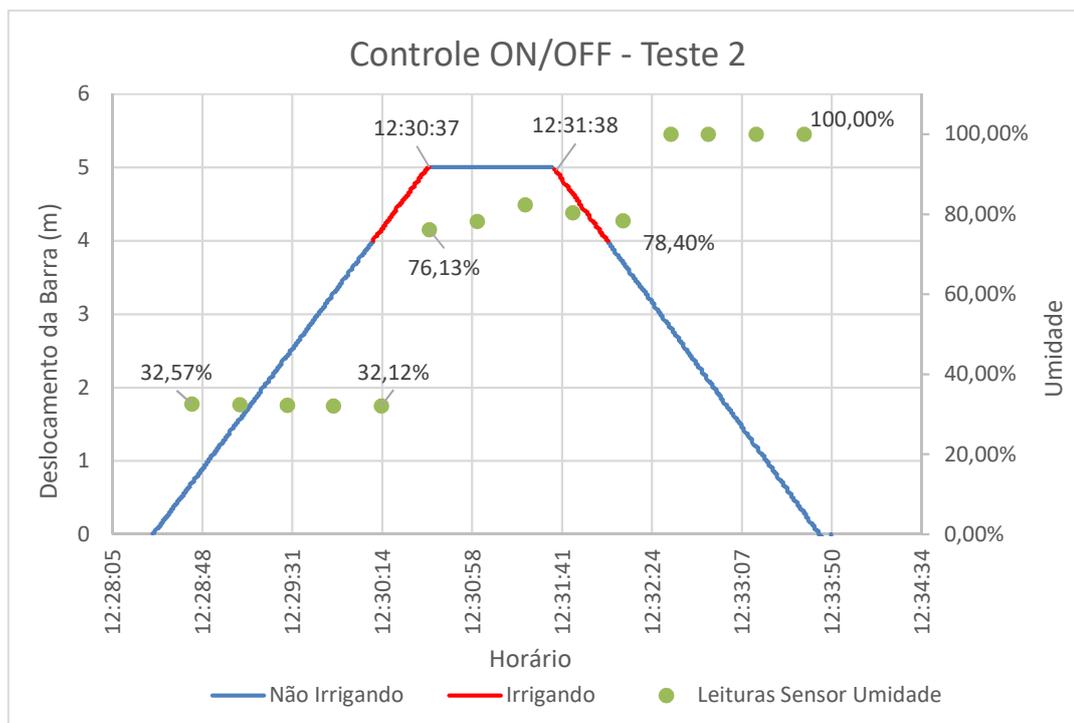


Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta do gráfico 12 demonstra que no primeiro ciclo de irrigação, a umidade não atingiu o *SetPoint*, e desta forma, após o intervalo de espera, a barra

retornou irrigando, saturando a leitura do sensor. Nessa configuração, a frequência da barra irrigando ou não irrigando era a mesma.

Gráfico 12 - Resultados do teste 2 – controle ON/OFF



Fonte: Elaborado pelo autor

5.6.3 Testes do Controle por Umidade – Controle por Velocidade

Os testes a seguir, demonstrados no quadro 20, foram realizados a fim de validar o funcionamento do Controle de Umidade por Velocidade. O disparo da barra ocorre para umidade abaixo de 10%.

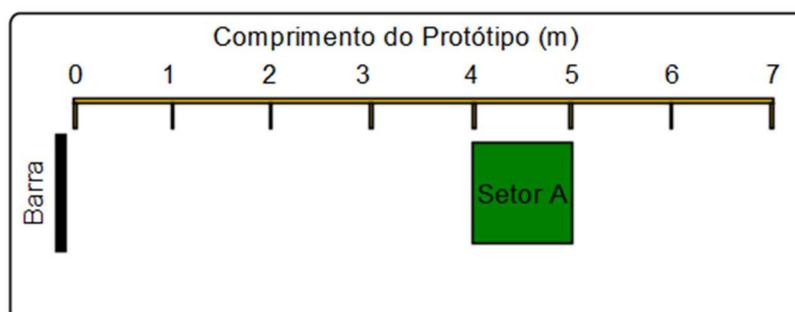
Quadro 20 - Testes para o controle de velocidade

Teste (Setor A)	SetPoint (%)
1	40%
2	60%

Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 93 ilustra a configuração do setor A para o controle por velocidade.

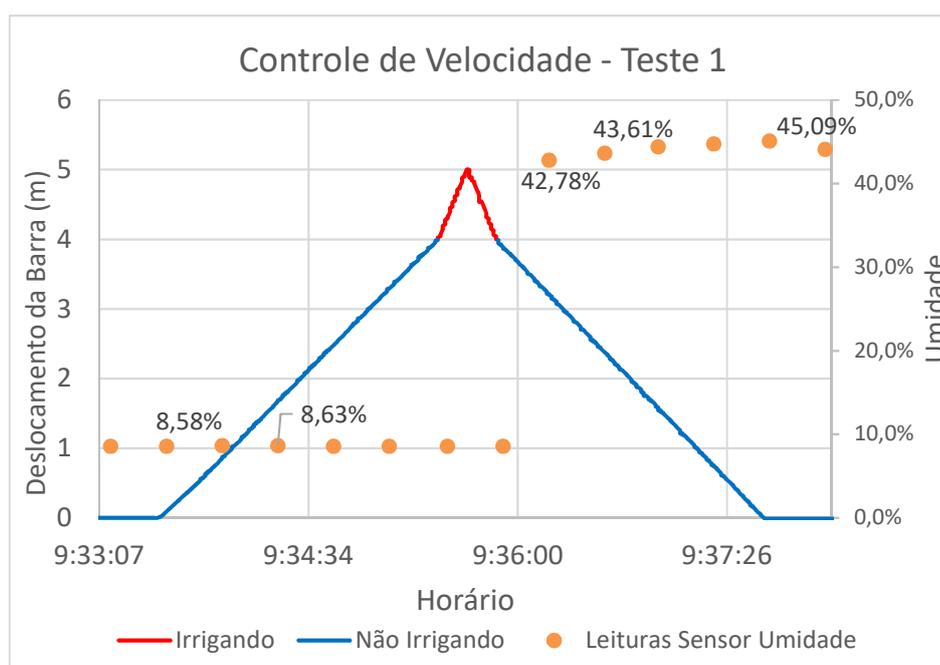
Figura 93 - Configuração do setor A - controle por velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 13 demonstra que foram realizados dois ciclos de irrigação no setor A, e que a velocidade foi alterada, neste caso para 22,31 Hz, para que nesses dois ciclos fosse inserido o volume correspondente a diferença entre a umidade no momento do disparo da barra (8,58%) e o *SetPoint* (40%). Percebe-se também que houve um atraso na resposta do sensor, pois somente no final do segundo ciclo de irrigação que o valor de umidade foi alterado. Houve uma significativa diferença entre o valor obtido e o desejado. O desvio padrão para esse faixa de frequência é elevado, conforme ilustrado na tabela 1.

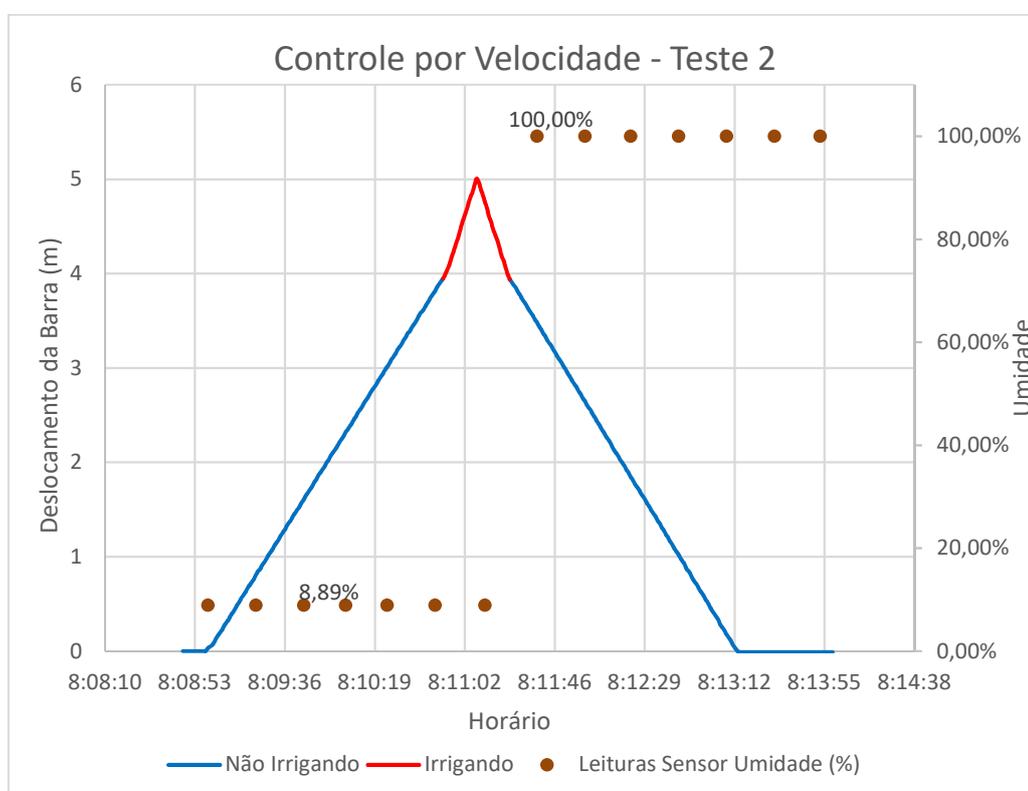
Gráfico 13 - Resultados do teste 1 – controle por velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico 14 demonstra que foram realizados dois ciclos de irrigação no setor A, e que a velocidade foi alterada, neste caso para 18,3 Hz, para que nesses dois ciclos fosse inserido o volume correspondente a diferença entre a umidade no momento do disparo da barra (8,89%) e o *SetPoint* (60%). Percebe-se também que houve uma rápida saturação da leitura do sensor de umidade e que a resposta está mais próxima da desejada que no teste anterior.

Gráfico 14 - Resultados do teste 2 – controle por velocidade



Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 21 - Comparação dos resultados do teste de controle por velocidade

Teste	Volume Desejado (ml)	Volume Obtido (ml)	Frequência Calculada (Hz)	Frequência Inversor (Hz)	Diferença (ml)	Diferença (%)
1	1,57	2,36	22,78	22,3	0,79	50,3
2	2,55	2,99	18,19	18,3	0,44	17,2

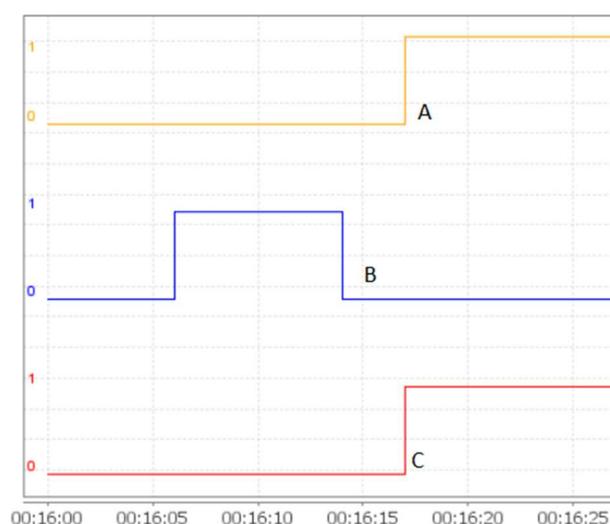
Fonte: Elaborado pelo autor

5.7 Testes dos Alarmes

As figuras 94 e 95 a seguir demonstram os resultados obtidos com a simulação das falhas de inversor e motobomba, removendo seus *feedbacks* durante operação da barra irrigadora.

Na figura 94 é possível perceber que após o *feedback* do inversor (B) ser removido, a falha do inversor (C) entra em nível alto. A falha fora de *HOME* também entra em nível alto, pois devido a falha, a barra irrigadora ficou parada em algum ponto do percurso.

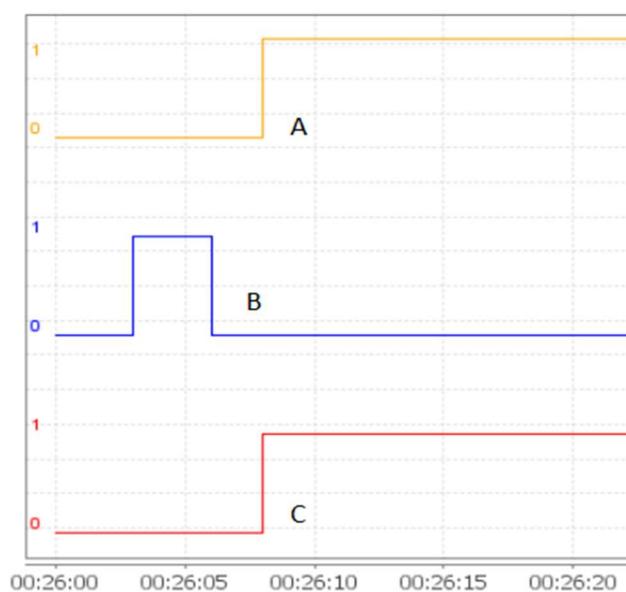
Figura 94 - Falha do feedback do inversor de frequência: a) Falha fora de *HOME*, b) *FeedBack* do inversor, c) Falha do inversor



Fonte: Elaborado pelo autor

Na figura 95 é possível perceber que após o status do *feedback* da motobomba (B) ser removido, a falha da motobomba (C) entra em nível alto. A falha fora de *HOME* também entra em nível alto, pois devido a falha, a barra irrigadora ficou parada em algum ponto do percurso.

Figura 95 - Falha do *feedback* da motobomba: a) Falha fora de *HOME*, b) *FeedBack* da motobomba, c) Falha da motobomba



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 96 ilustra a indicação das falhas na Tela de Alarmes, perante suas simulações.

Figura 96 - Tela de registro de alarmes

Nível de alarme	Tempo	Mensagens	Tempo de inatividade	
	22:24:47	Falha Inversor !	Ativo 	
	22:24:47	Falha Motobomba !	Ativo 	
	22:22:58	Barra fora da posição HOME	22:24:44 - Retornou ao normal	
	mai 06 21:17	Falha Sensor A	Ativo 	
	mai 06 21:13	Falha Sensor B	Ativo 	

Fonte: Elaborado pelo autor

5.8 Comparativo entre Protótipo e Controlador CI3

O quadro 22 demonstra um comparativo entre os recursos disponíveis entre o sistema CI3, do qual foi obtido orçamento presente no Anexo C - Orçamento Controlador CI3, com o protótipo desenvolvido. A lista de materiais do protótipo encontra-se no Apêndice F - Lista de Materiais do Protótipo.

Quadro 22 - Comparativo entre protótipo desenvolvido e controlador CI3

Características	CI3	Protótipo
Programação horária	8	14
Programação semanal	Sim	Não
Número máx. de setores	20	5
Velocidade ajustável por setor	Sim	Sim
Controle manual e automático	Sim	Sim
Nº máx. de ciclos ajustável por setor	Não informado	3
Disparo da irrigação em função da umidade	Não	Sim
Custo do controlador	R\$4763,00	R\$1868,75
Custo do acionamento (motorreductor, inversor, etc..).	R\$5412,50	R\$2492,35

Fonte: Elaborado pelo autor

Considerou-se o Euro como R\$ 4,33 para efetuar a conversão do orçamento recebido. Deve-se levar em conta que esse valor não inclui taxas de transporte nem importação, o que certamente elevará o custo do produto. No orçamento do controlador do protótipo, incluiu-se um computador básico para a instalação do ScadaBR e 5 conjuntos sensores (transmissor e circuito auxiliar).

6 CONCLUSÃO

A barra irrigadora quando utilizada em conjunto com um sistema de automação adequado pode prover um melhor manejo da irrigação associado a uma melhor uniformidade da irrigação e menor consumo de água.

Através dos testes realizados na barra irrigadora construída, ficou evidenciado que a setorização da irrigação proposta no objetivo geral foi concluída com êxito. Em todos os testes realizados, a barra iniciou ou finalizou a irrigação nos pontos demarcados com erros de posição que podem ser considerados desprezíveis perante a extensão do protótipo.

A programação horária também foi executada com êxito, pois em todos os testes realizados a velocidade e o número de ciclos desejados foram obedecidos pelo controle, permitindo assim que o produtor possa definir a característica de irrigação que deseja para cada setor criado.

O transmissor sem fio também apresentou resposta adequada, enviando ciclicamente as leituras de umidade e temperatura. Entretanto, seu consumo de bateria é elevado, pois o módulo utilizado (Wemos D1 Mini) é construído para fins de prototipagem. Esse é um ponto que pode ser melhorado, realizando testes diretamente com o ESP8266, fora do módulo, ou realizando a troca de tecnologia.

O sensor de temperatura apresentou uma boa repetibilidade. A incerteza de leitura apresentada não o inviabiliza para o que foi proposto, visto que, além de pouco expressiva, o sensor não realizar controle.

O sensor de umidade não apresentou boa repetibilidade, limitando parcialmente a análise dos testes com controle de umidade. Como seu princípio de medição é baseado apenas na condutividade elétrica, qualquer variação do meio, mesmo que não causada pela adição de água, interfere em sua resposta. Esse é um ponto que pode ser melhorado, realizando a troca do princípio do sensor, desde que atenda as dimensões das células das bandejas. A relação custo-benefício deve também ser avaliada afim de não comprometer a premissa de baixo custo do projeto.

O controle ON/OFF apresentou resposta adequada ao que foi proposto, desde que seja ajustada uma frequência de operação condizente ao percentual de umidade desejado.

O controle por velocidade apresentou respostas aproximadas ao valor solicitado. A falta de exatidão deve-se à inúmeros fatores como vibrações na estrutura,

devendo ser considerado que toda estrutura mecânica foi construída manualmente, sem recursos de usinagem de precisão, a falta de *feedback* de velocidade, e assim não haver um controle em malha fechada que garantisse a velocidade (frequência) no eixo do motor e por consequência não garantir uma melhor linearidade, o que é demonstrado pelos desvios padrões ilustrados na tabela 1. Entretanto, mesmo com uma relativa falta de exatidão, esse controle demonstrou-se mais viável que um controle em malha aberta, pois pode inferir um volume de água mais próximo ao desejado do que este último.

Como proposta de melhoria, sugere-se unir o controle ON/OFF e o controle de velocidade, realizando um controle em cascata. O controle ON/OFF sendo realimentado por um sensor de umidade com melhor resposta, e o controle por velocidade também sendo realimentado. A realimentação do controle por velocidade pode ser realizada pela própria leitura de posição, realizando sua derivação. Entretanto, acredita-se que para isso um *encoder* com melhor resolução seja necessário. Dessa forma, o controle pode definir para cada ciclo a frequência que deve inferir para corrigir o erro encontrado em relação ao *SetPoint* de umidade. Para uma melhor resposta, realizar novamente o levantamento da curva de volume e frequência com a medição de mais pontos.

Os alarmes/falhas também apresentaram adequado funcionamento, interrompendo o funcionamento da barra irrigadora e apresentando a respectiva mensagem na tela de alarmes. Um ponto que pode ser melhorado é a verificação se houve ou não acionamento da válvula de irrigação através da instalação de um fluxostato na tubulação de água.

Em relação a premissa de baixo custo, este item também foi atendido, pois permitiu realizar a setorização da barra irrigadora, com um controle de irrigação individual por setor através da programação horária, com valor significativamente inferior ao praticado pelo concorrente avaliado. Como proposta, acredita-se que afim de diminuir o custo com o computador básico, este possa ser substituído por tablet, ou outro dispositivo de menor custo.

Este trabalho proporcionou um conhecimento mais aprofundado do sistema de irrigação de barra irrigadora móvel e permitiu a análise de seu funcionamento de maneira mais fidedigna perante diferentes métodos de controle através da construção de um protótipo em escala reduzida, o que também possibilitará simulações e análises em projetos futuros.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Segue um resumo das propostas para trabalhos futuros discutidas na conclusão:

- identificar ou desenvolver um sensor de umidade de baixo custo e com dimensões adequadas para as bandejas que apresente melhor repetibilidade das medições;
- realizar testes com o ESP8266 fora do módulo Wemos, ou com outra tecnologia, afim de reduzir o consumo de bateria do transmissor sem fio;
- realizar um controle em cascata do controle ON/OFF e do controle por velocidade, afim de potencializar o controle da umidade percentual sobre as bandejas;
- realizar melhorias na estrutura mecânica, deixando-a mais estável, e realizar novo levantamento da curva de volume e frequência utilizando mais pontos de medição;
- instalação de um fluxostato para verificação do acionamento da válvula de irrigação;
- substituição do computador por um dispositivo de menor custo, como um tablet.

REFERÊNCIAS

- 14CORE. **Wiring the Soil MOisture with Arduino**. Disponível em: < <https://www.14core.com/wiring-the-soil-moisture-with-arduino/>>. Acesso em 17 mar. 2018.
- AGRIESTUFA. **Sistema de barra móvel**. Disponível em: <<http://www.agriestufa.com.br/site/produtos/sistema-de-barra-movel/>>. Acesso em 17 mar. 2017.
- ALBERTIN, A. L. e ALBERTIN, R. M. M. **A Internet das coisas irá muito além das coisas**. GVEXECUTIVO Mar/Abr 2017.
- ARDUINO E CIA. **Como utilizar um encoder rotativo com Arduino**. Disponível em: < <https://www.arduinoecia.com.br/2015/08/como-usar-encoder-rotativo-ky-040-arduino.html> >. Acesso em: 29 abr. 2018.
- ARDUINO. **Arduino Board Due**. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDue>>. Acesso em: 12 mar. 2017.
- AZEVEDO, J. A. de; SILVA, E. M. da. **Tensiômetro: Dispositivo prático para controle de irrigação**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. 33 p. (Embrapa Cerrados. Circular técnica, 001).
- BATTERY UNIVERSITY. **BU-808: How to Prolong Lithium-based Batteries**. Disponível em: < http://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries >. Acesso em: 25 abr. 2017.
- BECHARA, Evanildo Cavalcante. **Dicionário Escolar da Academia Brasileira de Letras**. 3. Ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2011. p. 855.
- BEGA, E.A.; DELMÉE, G.J.; COHN, P.E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V.S. **Instrumentação Industrial**. 2ª Ed., Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2006. 583 p.
- BEZERRA, F.C. **Produção de mudas de hortaliças em ambiente protegido**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2003.
- BLECHER, B. A tecnologia que domou os desertos. **Revista Globo Rural**. [2012]. Disponível em: < <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT292798-18281,00.html>> Acesso em: 15 abr. 2017.
- BOYLESTAD, R.L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 8ª Ed., Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1998. 781 p.
- BRANDÃO, M. B.; MAROUELLI, W. A. Irrigação na produção de mudas de hortaliças. **Revista Campo & Negócios**: anuário 2016, Uberlândia, MG, p.44-47, 2016.

BRANDERALI, M. Ferramentas Gerenciais: A importância do monitoramento da umidade do solo na agricultura. **Jornal Dia de Campo**. [2010]. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=21142&secao=Ferramentas%20Gerenciais>> Acesso em: 15 abr. 2017.

CÂMARA JÚNIOR, A.; MOREIRA, J.L. O uso de uma Rede de Sensores Sem Fio para o monitoramento de dados ambientais. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 17, 2011, Guarapari. **Anais Eletrônicos...**São Paulo: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2011. Disponível em: <http://www.sbagro.org.br/anais_congresso_2011/cba2011/trabalhos/05/cba05_36_80.pdf>. Acesso em: 19 abr.2017.

CARISSIMI, A.; NETTO, J. C.; CARRO, L. **Sistemas Embarcados**. Porto Alegre: UFRGS - Instituto de informática, [2010]. (Notas de aula). Disponível em: <<http://www.inf.ufrgs.br/~asc/embarcados/pdf/aula01.pdf> >. Acesso em: 12 abr. 2017.

CHRISTIN, G.C. **Watering Booms Quotation** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <diegolotr@hotmail.com> em 8 jun. 2018.

CICLOVIVO. Fazenda urbana em prédio do Japão será operada por robôs. **Ciclovivo**, São Paulo, 9 de fevereiro de 2017. Disponível em: <<http://ciclovivo.com.br/noticia/fazenda-em-predio-no-japao-produzira-30-mil-pes-de-alface-por-dia/>> Acesso em: 12 abr. 2017.

CORTEX BINÁRIO. **LEDs**. Disponível em: <<http://cortexbinario.blogspot.com.br/2016/03/leds-aquelas-lampadinhas-pequenas-que.html>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

COSTA JUNIOR, A.D. **Produção de mudas de hortaliças**. Brasília: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal (EMATER-DF), [2011]. Disponível em: <<http://www.emater.go.gov.br/intra/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Produ%C3%A7%C3%A3o-de-mudas-de-hortali%C3%A7as.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

COSTA, R.A.A.; MENDES, L.A.M. **Evolução das Redes Sem Fio: Um Estudo Comparativo Entre Bluetooth e Zigbee**. Universidade Presidente Antônio Carlos – UNIPAC, Barbacena, [2013]. Disponível em: <<http://www.unipac.br/site/bb/tcc/tcc-a010b188f93af4c28ca9af23b9e3c476.pdf>>. Acesso em: 18 abr.2017.

DALLAS. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer**. Disponível em: <<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf> >. Acesso em: 27 mar. 2018.

DA-ROS. **CI3 Watering Booms**. Disponível em: <<http://www.da-ros.com/images/PDF/CI3b.jpg>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

DECAGON. **EC-5 - Sensor de Umidade do Solo**. Disponível em: <<http://www.decagon.com.br/solos/sensores-umidade/ec-5/>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

DIGI. **Digi Xbee Zigbee**. Disponível em: <<https://www.digi.com/products/digi-xbee-rf-solutions/embedded-rf-modules-modems/digi-xbee-zigbee>>. Acesso em: 27 abr. 2017.

DOKNIĆ, V. Internet of things greenhouse monitoring and automation system. In: MALAYSIAN TECHNICAL UNIVERSITIES CONFERENCE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY, 1, 2015, Melaka. **Anais...Melaka**: UTeM, 2014.

ESPRESSIF. **ESP8266 Datasheet**. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/productfiles/2471/0A-ESP8266__Datasheet__EN_v4.3.pdf>. Acesso em: 24 abril. 2017.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em Ação**. Tradução: Camila Paduan. 1 ed. São Paulo: Novatec, 2013. 424p.

FARAHANI, Shahin et al. **ZigBee Wireless Networks and Tranceiver**. London:Newnes, 2008. 364 p.

FARIAS JÚNIOR, P. A. Sistemas de Produção de Mudas Hortícolas em Ambientes Protegidos. In: Encontro Nacional do Agronegócio Pimenta (*Capsicum spp.*), 1, 2004, Distrito Federal. **Anais Eletrônicos...** Distrito Federal: Embrapa Hortaliças, 2004. Disponível em: <<http://www.emater.go.gov.br/intra/wp-content/uploads/downloads/2011/07/Produ%C3%A7%C3%A3o-de-Mudas-de-hort%C3%ADcolas-.pdf>>. Acesso em: 18 abr.2017.

FERMINO, M.H.; KÄMPF, A.N. **Densidade de substratos dependendo dos métodos de análise e níveis de umidade**. Horticultura Brasileira 30: 75-79. 2012

FILIPEFLOP. **Monitore sua planta usando Arduino**. Disponível em:<<https://www.filipeflop.com/blog/monitore-sua-planta-usando-arduino/>>. Acesso em: 22 abr. 2018.

GARDENA. **Micro aspersor rotativo de 360° Gardena**. Disponível em: <<http://www.gardena.com/pt/water-management/micro-drip-irrigation-system/micro-aspersor-rotativo-de-360-gardena/>>. Acesso em 13 mar. 2017.

GERVÁSIO, E.S. **Efeito de lâminas de irrigação e doses de condicionador, associadas a diferentes tamanhos de tubetes, na produção de mudas de cafeeiro**. 2003. 105 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GODSON TECHNOLOGY. **Lithium Packs**. Disponível em: <<http://www.godsontechnology.com/lithium-packs/1603.html>>. Acesso em 17 abr. 2017.

GRUBER, Y.B.G. **Otimização de lâmina de irrigação na produção de mudas clonais de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* var. *plathphylla*)**. 2006. 145 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

HENRYSBENCH. **Keyes KY-040 Arduino Rotary Encoder User Manual.**

Disponível em: < <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-sensors-and-input/keyes-ky-040-arduino-rotary-encoder-user-manual/> >. Acesso em: 08 mai. 2017

HERNANDEZ, H.X.; KALIL, F. Viabilidade da plataforma Arduino e do protocolo ZigBee na elaboração de redes de sensores sem fio (RSSF). In: Mostra de iniciação científica e extensão comunitária, 7, 2013, Passo Fundo. **Anais Eletrônicos...Passo Fundo: IMED, 2013.** Disponível em: < [https://www.imed.edu.br/Uploads/fahadkali2l\(%C3%A1rea1\).pdf](https://www.imed.edu.br/Uploads/fahadkali2l(%C3%A1rea1).pdf)>. Acesso em: 18 abr.2017.

HIDROSENSE. **Manual de instalação e uso do modelo MRI v3.0.** Disponível em: < <https://drive.google.com/file/d/0B8LN2gOtS6luRk5WSkVZSjAwX1E/view>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

HIT TECNOLOGIA. **O que é Encoder? Para que serve? Como escolher? Como interfacear?.** Disponível em < <https://www.hitecnologia.com.br/blog/o-que-é-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/> > Acesso em 11 jan. 2018.

INFOWESTER. **O que é Wi-Fi (IEEE 802.1)?.** Disponível em: < <https://www.infowester.com/wifi.php>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

INTEL. **Running Arduino.** Disponível em: <<https://software.intel.com/en-us/get-started-arduino-blink>>. Acesso em: 27 mar. 2017.

LIGHTBULBE. **Understanding Beam Angle.** Disponível em: <<http://www.lightbulbmarket.com/Flood%20Light%20Bulb%20Beam%20Angle>>Acesso em: 20 mar. 2017.

LOPES FILHO, A.F. **Demanda hídrica e produtividade da cebola irrigada, cultivada em sistema convencional e orgânico no norte da Bahia.** 2013. 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Escola Superior de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Univasf. Universidade Federal do Vale do São Francisco, Petrolina, 2013.

MADALOSSO, E. **Sistema automatizado para irrigação de estufas.** 2014. 80 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia de Computação) – Universidade tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

MARQUELLI, W.A. et. al. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças.** Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

MARQUELLI, W.A.; FREITAS, V.M.T. de; COSTA JÚNIOR, A.D. **Guia Prático para uso do Irrigás® na produção de hortaliças.** Brasília: Embrapa Hortaliças, 2010.

MATHERTEL. **A Libray for the Arduino environment for using a Rotary encoder as an input.** Disponível em: < www.mathertel.de/Arduino/RotaryEncoderLibrary.aspx >. Acesso em 22 jan. 2018.

MAXIMOCON. **IoT e suas aplicações de sucesso - Agricultura**. Disponível em: <<https://maximocon.wordpress.com/2017/02/22/iot-e-suas-aplicacoes-de-sucesso-01-agricultura/>>. Acesso em 11 jun. 2017.

MENDES, P.C.S. **Caracterização de um sensor para medição de umidade do solo com termo-resistor a temperatura constante**. 2006. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

MICROCHIP. **PIC18(L)F2X/4XK22**. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001412G.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

MODOLO, V.A. **Produção de mudas de alta qualidade**. São Paulo: Coordenadoria de Desenvolvimento dos Agronegócios (Codeagro), 2015. Disponível em: <<http://www.codeagro.agricultura.sp.gov.br/arquivos/hortalimento/Producao-de-mudas-2015a1f38b23ea90370f264511ce03d78bf9.pdf>> p. 36 e 37. Acesso em: 10 mar. 2017.

MOHAN, N.; UNDELAND, T.; ROBBINS, W. **Power electronics: converters, applications and design**. 2ª Ed. John Wiley & Sons, 1995. 802 p.

MOTOROLA. **MOTOROLA Semiconductor Technical Data: Amplifier transistors NPN**. Disponível em: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2897/MOTOROLA/BC548C.html>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

NEXPERIA. **DISCRETE SEMICONDUCTORS: DATA SHEET 1N4148; 1N4448**. Disponível em: <https://assets.nexperia.com/documents/datasheet/1N4148_1N4448.pdf>. Acesso em 17 mar. 2018.

ON SEMICONDUCTOR. **BC327, BC327-16, BC327-25, BC327-40**. Disponível em: <<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC327-D.PDF>>. Acesso em 17 mar. 2018.

PTI CONEXÕES. **Micro aspersor estático**. Disponível em: <http://www.pticonexoes.com.br/Micro_Apersor.html>. Acesso em 17 mar. 2017.

ROBOCORE. Encoder Decoder KY-040 Rotacional. Disponível em: <<https://www.robocore.net/loja/produtos/encoder-decoder-ky-040-rotacional.html>>. Acesso em: 24 mai. 2017.

ROCKWELL. **Chaves fim de curso**. Disponível em: <<http://ab.rockwellautomation.com/pt/Sensors-Switches/Limit-Switches>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

RODRIGUES, P. Agricultura Protegida – Cooperação prevê avanços tecnológicos no cultivo protegido de hortaliças. **Hortaliças em Revista**: jul. – set. 2015, Embrapa Hortaliças, Brasília, DF, p1-7, 2015.

RTECH. **Chaves Fim de Curso**. Disponível em: <<http://www.rtechequipamentos.com.br/produto?id=154>>. Acesso em: 24 mar. 2017.

SEBRAE. SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICROS E PEQUENAS EMPRESAS. **Métodos de irrigação em hortaliças**. Brasília, [2015]. Disponível em:

<[http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8af4c78945062d5e1d6c4fa50885cc81/\\$File/7129.pdf](http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/8af4c78945062d5e1d6c4fa50885cc81/$File/7129.pdf)>. Acesso em: 08 abr. 2017.

SEFAZ. SECRETARIA DA FAZENDA. **Nomenclatura comum Mercosul (NCM)**. Disponível em: <https://www.sefaz.mt.gov.br/portal/download/arquivos/Tabela_NCM.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2017.

SEGUNDO, A. K. R. **Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso de irrigação**. Viçosa-MG: UFV, 2010. 65 p. Dissertação de Mestrado.

SILVEIRA, P. M. da; STONE, L. F. **Irrigação do feijoeiro por aspersão**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.17, n.178, p.28-34, 1994.

SPARKFUN. **Battery Technologies**. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/battery-technologies>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

TCS3. **Techniques For Digitizing Rotary And Linear Motion TCS3 Encoder Primer**. Disponível em: <<https://usermanual.wiki/Document/encoderprimer.582820777>>. Acesso em 21 abr. 2017.

TELLES, M. Mundo Irrigado: Diferentes técnicas de irrigação permitem uma maior produção em diversas regiões do planeta. **Revista Globo Rural**. 2010. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/GloboRural/0,6993,EEC1709584-2454,00.html>> Acesso em: 15 abr. 2017.

TERMOTÉCNICA. **Mudas**. Disponível em: <<http://www.termotecnica.ind.br/agrobusiness/mudas>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

TERRA MOLHADA. **Terra Molhada**. Disponível em: <<http://www.terramolhada.com>>. Acesso em 13 mar. 2017.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, sistemas e aplicações**. Campinas: UNICAMP, 2011. 204p.

TEXAS. **LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158-n.pdf>>. Acesso em 13 mar. 2018.

TWEAKING4ALL. **How to measure temperature with Arduino and a DS18B20**. Disponível em: <<https://www.tweaking4all.com/hardware/arduino/arduino-ds18b20-temperature-sensor/>>. Acesso em: 24 mai. 2017.

UCKELMANN, D.; HARRISON, M.; MICHAHELLES, F. (Org.) **Architecting the internet of things**. Springer: Nova Iorque, 2011. 353 p.

VIDA DE SILÍCIO. **Sensor de Umidade do Solo – Higrômetro**. Disponível em: <<https://www.vidadesilicio.com.br/sensor-umidade-solo-higrometro>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

VISHAY. **4N25, 4N26, 4N27, 4N28**. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/83725/4n25.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2018.

WEG, **Módulo 2: Variação de Velocidade**. [2017?]. Disponível em: < <https://patricialins.files.wordpress.com/2012/08/weg-mc3b3dulo-2-variacao3a7c3a3o-de-velocidade.pdf>> Acesso em: 24 abr. 2017.

WEG. **Manual do inversor de frequência CFW08**. 2006. Disponível em: < <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/1-577.pdf> >. Acesso em: 25 abr. 2017.

WEMOS. D1 Mini: A mini board with 4MB flash based on ESP-8266EX. Disponível em: < https://wiki.wemos.cc/products:d1:d1_mini >. Acesso em: 12 abr. 2018.

WENDLING, I.; FERRARI, M. P.; GROSSI, F. **Curso Intensivo de Viveiros e Produção de Mudanças**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. Disponível em: <<http://files.engflorestal.webnode.com.br/200000024-e58f4e6892/Curso%20Intensivo%20de%20Viveiros%20e%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20Mudas.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

WENDLING, M. **Amplificadores Operacionais V 2.0**. Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá. UNESP – Campus de Guaratinguetá. 44p. 2010

ZWART SYSTEMS. **Boom irrigation**. Disponível em: < <http://www.zwartsystems.ca/systems/irrigation/boom-irrigation>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

APÊNCIDE A – LISTA DE PARÂMETROS INVERSOR

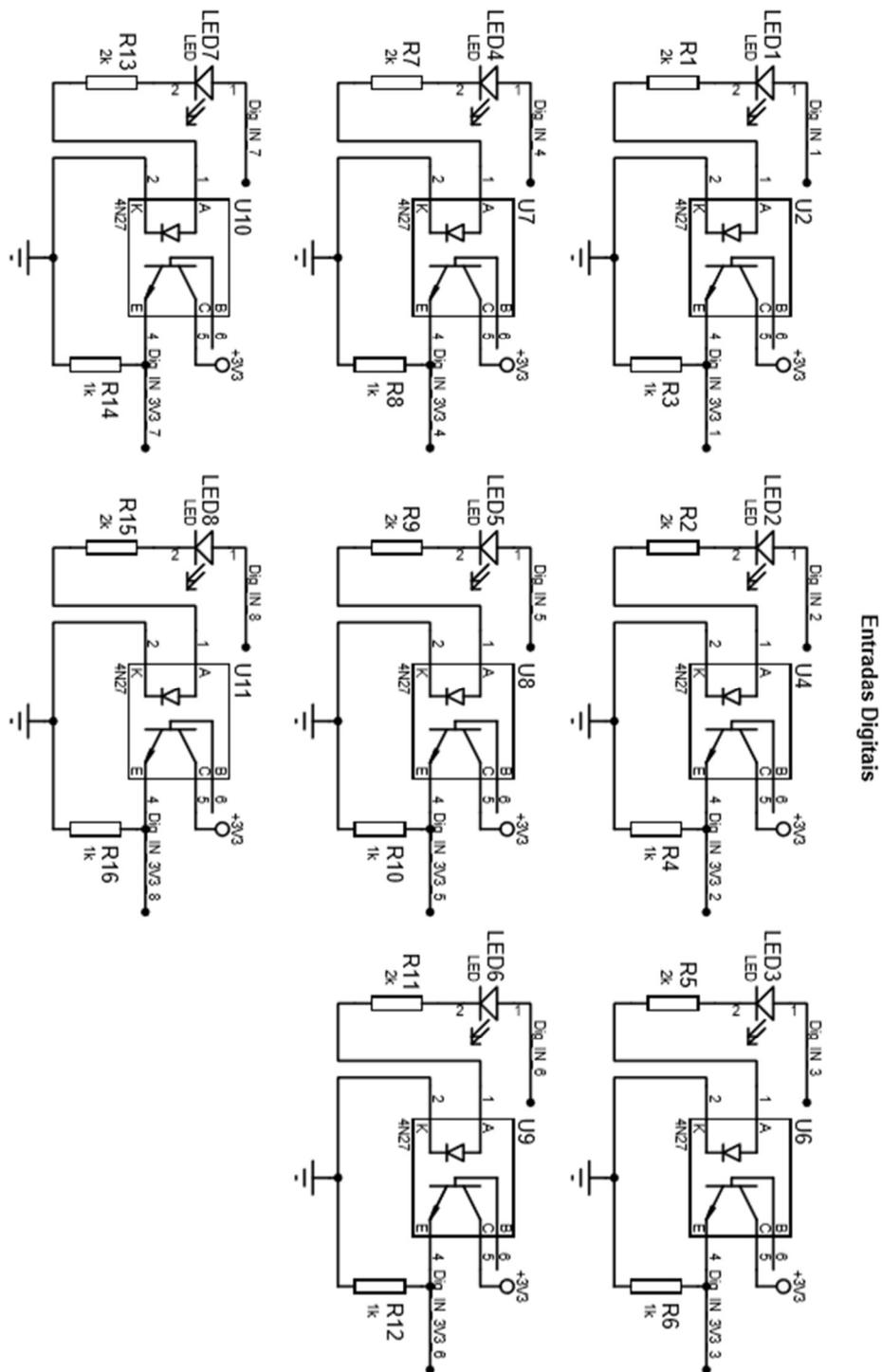
Quadro 23 - Parâmetros do inversor de frequência CFW-10

Parâmetro	Função	Valor Adotado
P100	Tempo de Aceleração	0,5 s
P101	Tempo de Desaceleração	0,5 s
P133	Frequência Mínima	0 Hz
P134	Frequência Máxima	50 Hz
P156	Corrente de Sobrecarga	1,38
P221	Seleção da Referência - Local	0 -Teclas
P222	Seleção da Referência – Remoto	1- Entrada Analógica A1
P229	Seleção de Comandos – Local	1 - Bornes
P230	Seleção de Comandos – Remoto	1 - Bornes
P231	Seleção do Sentido de Giro	2 - Conforme 229 e 230
P234	Ganho da Entrada Analógica	97,0
P263	Função da Entrada Digital D1	9 - Avanço
P264	Função da Entrada Digital D2	10 - Retorno
P265	Função da Entrada Digital D3	6 - Local/Remoto
P277	Função da Saída a Relé	5 - Run

Fonte: Elaborado pelo autor

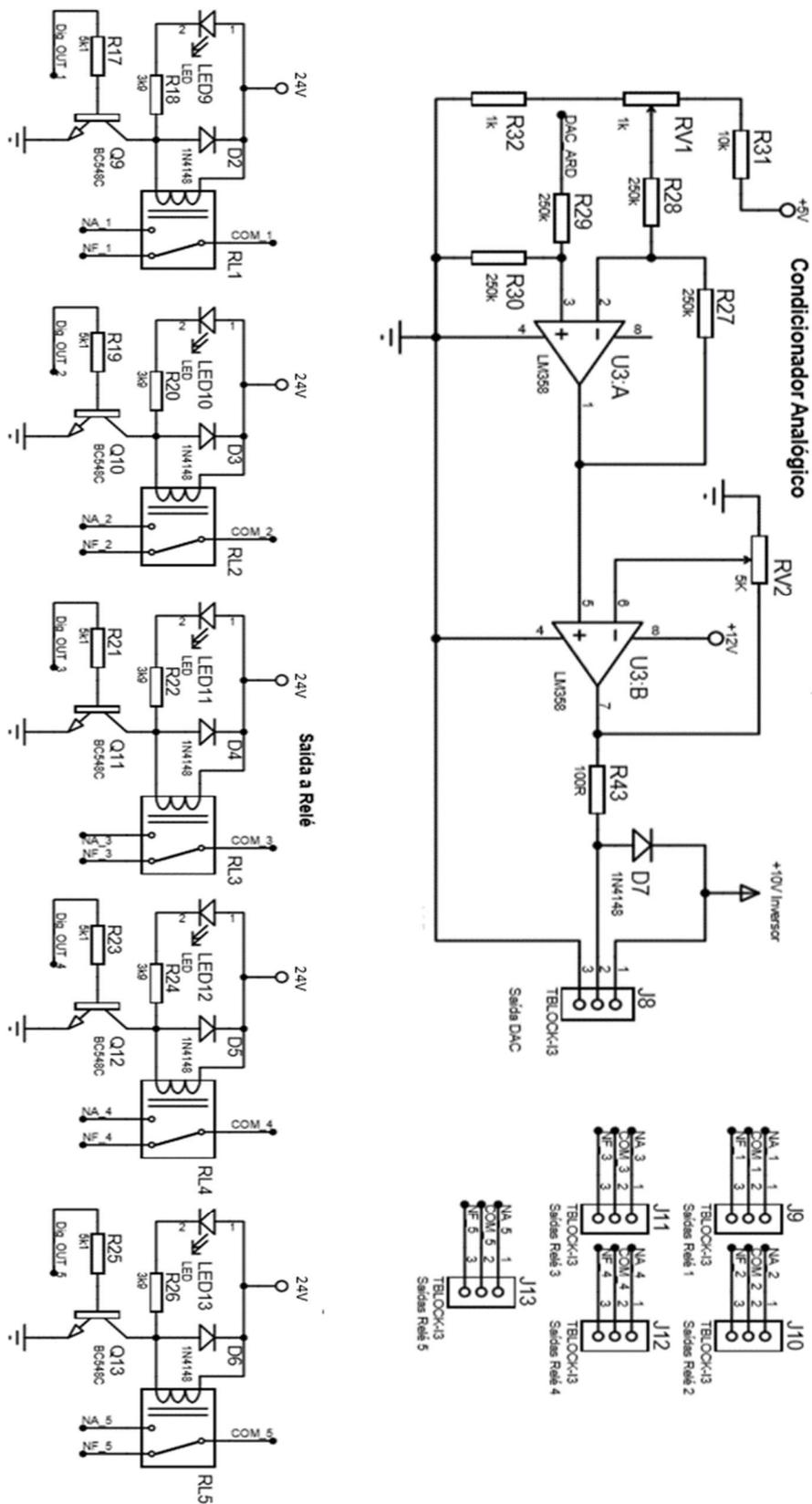
APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO DO CONTROLADOR

Figura 97 - Diagrama elétrico das entradas digitais do controlador



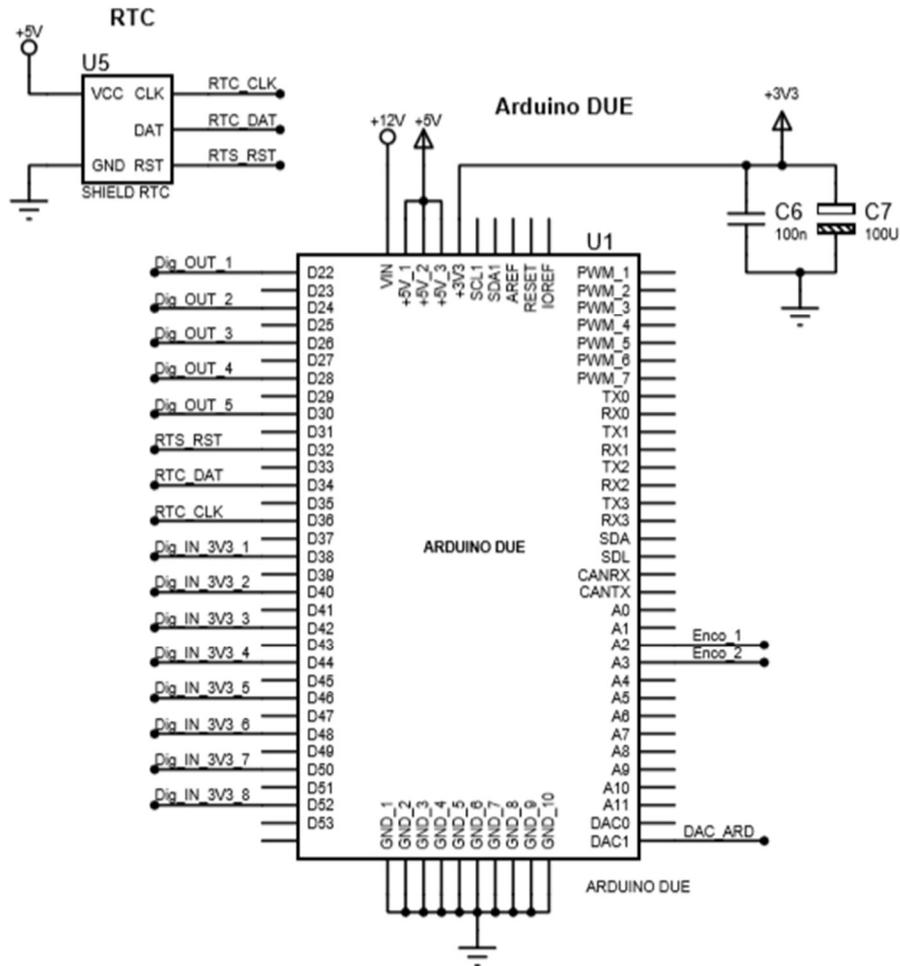
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 98 - Diagrama elétrico saídas digitais e conversor de 0 a 10 V



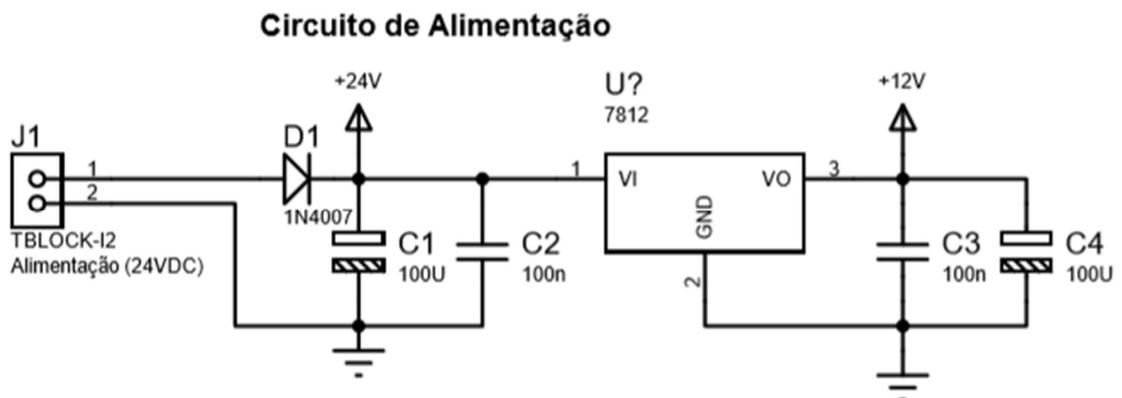
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 99 - Diagrama elétrico Arduino e RTC

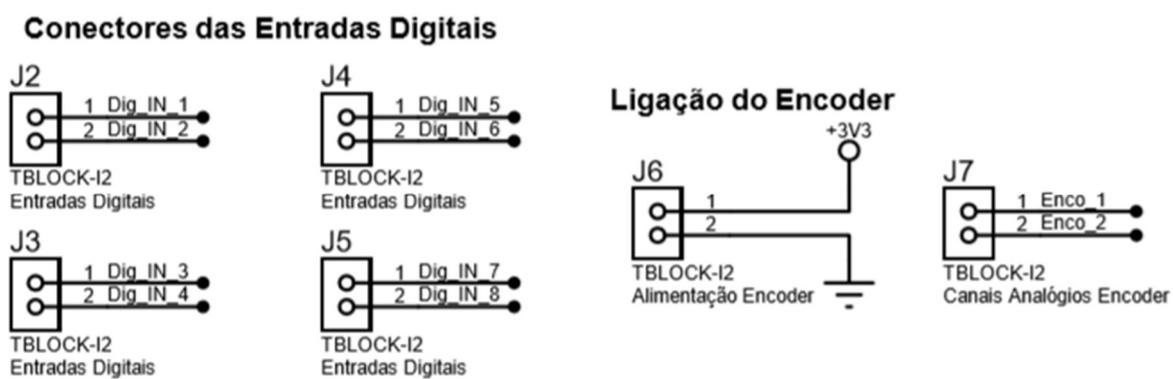


Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 100 - Diagrama elétrico do circuito de alimentação



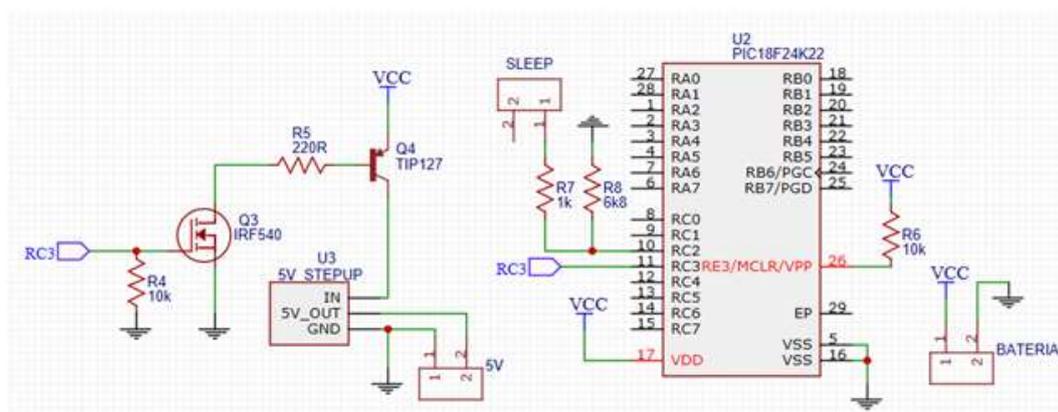
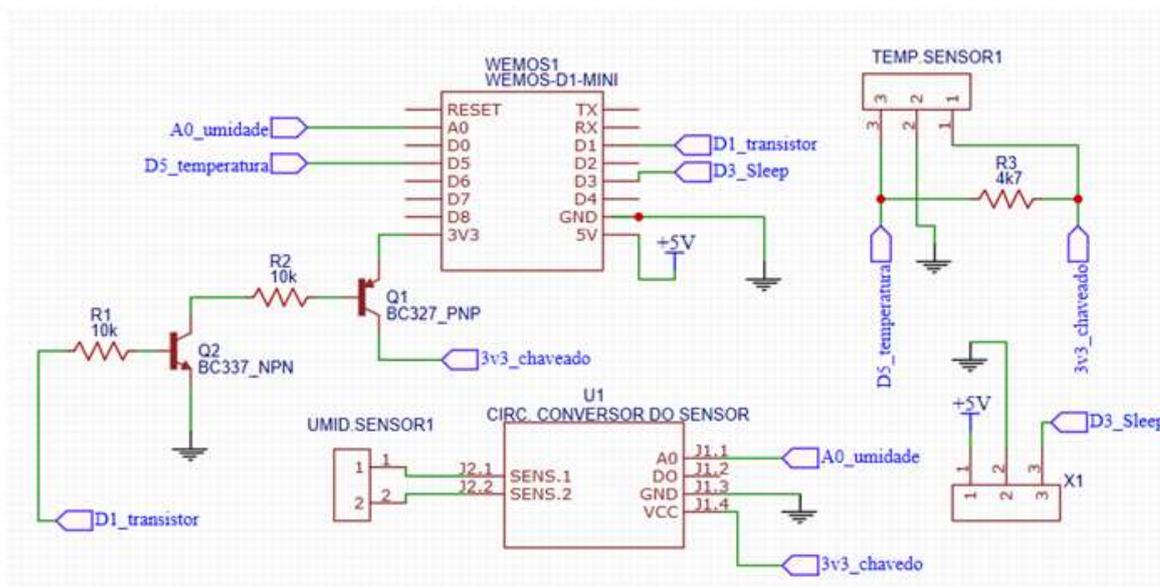
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 101 - Diagrama elétrico *encoder* e conectores de entrada

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO DO TRANSMISSOR SEM FIO

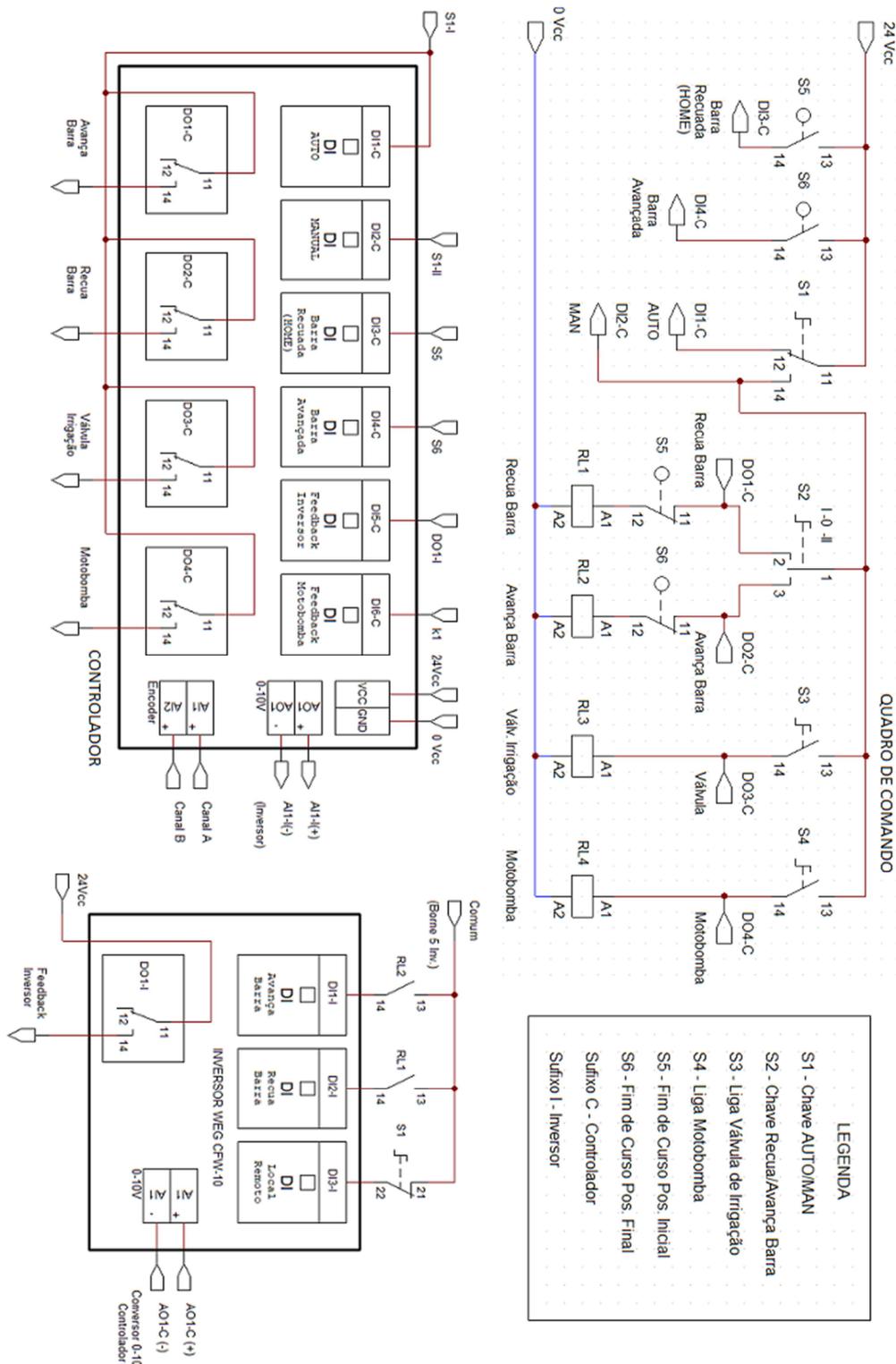
Figura 102 - Circuito completo transmissor sem fio



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE D – DIAGRAMA DE COMANDO DO QUADRO DE COMANDO

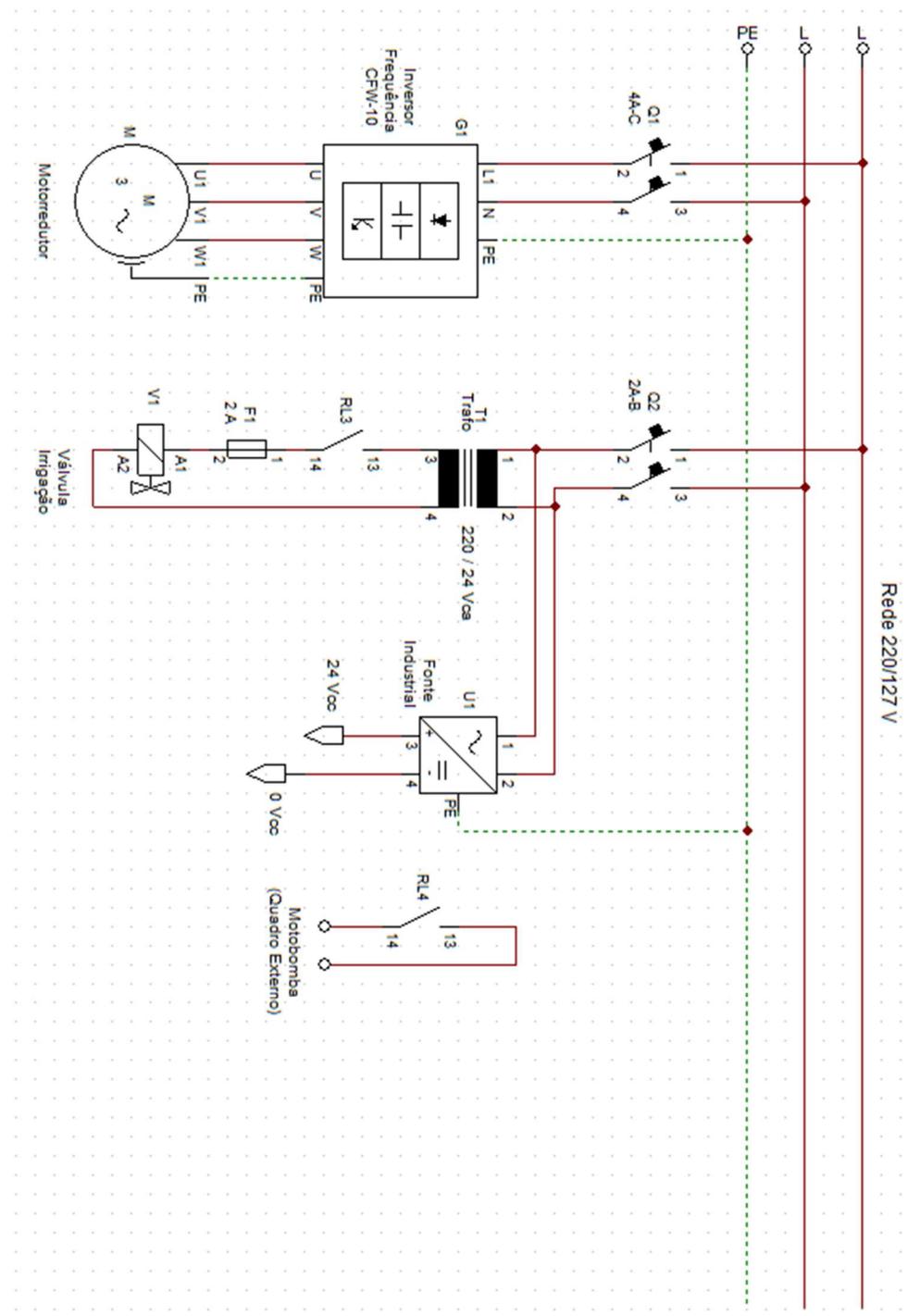
Figura 103 - Diagrama elétrico de comando do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE E – DIAGRAMA DE FORÇA DO QUADRO DE COMANDO

Figura 104 - Diagrama elétrico de força do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE F – LISTA DE MATERIAIS DO PROTÓTIPO

Quadro 24 - Lista de materiais do controlador

CONTROLADOR				
Componente	Valor/Referência	Qtd	Custo Unitário	Custo Total
resistor	2k 1/2W 5%	8	R\$0,15	R\$1,20
resistor	1k 1/8W 5%	9	R\$0,10	R\$0,90
resistor	5k1 1/8W 5%	5	R\$0,10	R\$0,50
resistor	3k9 1/4W 5%	5	R\$0,10	R\$0,50
resistor	250k 1/8W 5%	4	R\$0,10	R\$0,40
resistor	10k 1/8W 5%	1	R\$0,10	R\$0,10
trimpot multivoltas	1k	1	R\$2,00	R\$2,00
trimpot multivoltas	5k	1	R\$2,00	R\$2,00
optoacoplador	4N27	8	R\$2,30	R\$18,40
Relé	24V SPDT	5	R\$3,00	R\$15,00
Transistor	BC548C	5	R\$0,25	R\$1,25
LED	difuso 3mm VM	5	R\$0,20	R\$1,00
LED	difuso 3mm VD	8	R\$0,20	R\$1,60
diodo	1N4148	6	R\$0,19	R\$1,14
diodo	1N4007	1	R\$0,13	R\$0,13
CI	7812	1	R\$1,39	R\$1,39
capacitor	eletrolítico 100u 25V	3	R\$0,30	R\$0,90
capacitor	cerâmico 100n 50V	3	R\$0,05	R\$0,15
conector KRE	2 vias	7	R\$0,90	R\$6,30
conector KRE	3 vias	6	R\$1,40	R\$8,40
CI	LM358	1	R\$4,90	R\$4,90
microcontrolador	Arduino Due	1	R\$79,99	R\$79,99
<i>encoder</i>	KY-040	1	R\$9,40	R\$9,40
<i>Ethernet shield</i>	W5100	1	R\$39,90	R\$39,90
<i>RTC shield</i>	DS1302	1	R\$14,90	R\$14,90
			TOTAL	R\$212,35

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 25 - Lista de materiais da *interface* de operação e programação

INTERFACE DE OPERAÇÃO E PROGRAMAÇÃO				
Componente	Valor/Referência	Qtd	Custo Unitário	Custo Total
Software	ScadaBR	1	R\$0,00	R\$0,00
Computador Básico	CPU + Monitor	1	R\$1.000,00	R\$1.000,00
			TOTAL	R\$1.000,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 26 - Lista de materiais do transmissor sem fio (conjunto sensor)

TRANSMISSOR SEM FIO				
Componente	Valor/Referência	Qtd	Custo Unitário	Custo Total
resistor	10k 1/8W 5%	2	R\$0,10	R\$0,20
resistor	4k7 1/8w 5%	1	R\$0,10	R\$0,10
conector KRE	2 vias	1	R\$0,90	R\$0,90
conector KRE	3 vias	2	R\$1,40	R\$2,80
transistor	BC327	1	R\$0,30	R\$0,30
transistor	BC337	1	R\$0,30	R\$0,30
sensor umidade		1	R\$7,50	R\$7,50
sensor temperatura	DS18B20	1	R\$15,00	R\$15,00
módulo <i>Wi-Fi</i>	Wemos D1 Mini	1	R\$26,98	R\$26,98
			TOTAL	R\$54,08

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 27 - Lista de materiais do circuito auxiliar

CIRCUITO AUXILIAR - SLEEP				
Componente	Valor/Referência	Qtd	Custo Unitário	Custo Total
resistor	10k 1/8W 5%	2	R\$0,10	R\$0,20
resistor	1k 1/8W 5%	1	R\$0,10	R\$0,10
resistor	6k8 1/8W 5%	1	R\$0,10	R\$0,10
resistor	220R 1/8W 5%	1	R\$0,10	R\$0,10
conector KRE	2 vias	3	R\$0,90	R\$2,70
transistor	TIP127	1	R\$2,30	R\$2,30
MOSFET	IRF540	1	R\$3,80	R\$3,80
Fonte <i>Step Up</i>	Saída 5V, 600 mA	1	R\$15,00	R\$15,00
Bateria LiPo	2500 mAh	1	R\$20,00	R\$20,00
Caixa 15x15x10 cm	a prova d'água	1	R\$10,00	R\$10,00
Microcontrolador	PIC18F	1	R\$22,90	R\$22,90
			TOTAL	R\$77,20

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 28 - Lista de materiais do quadro de comando

QUADRO DE COMANDO				
Componente	Valor/Referência	Qtd	Custo Unitário	Custo Total
Cofre	400x300x200mm	1	R\$215,00	R\$215,00
Inversor	CFW10 1cv	1	R\$680,00	R\$680,00
Rele de Interface	24 V 1SPDT	4	R\$25,00	R\$100,00
Bornes	DIN 2,5mm2	15	R\$2,90	R\$43,50
Tampa final borne		1	R\$2,00	R\$2,00
Chave 2 posições	Ø 22 mm	3	R\$11,40	R\$34,20
Chave 3 posições	Ø 22 mm	1	R\$15,40	R\$15,40
Contatos NA		5	R\$4,50	R\$22,50
Contatos NF		1	R\$4,50	R\$4,50
Trafo	220/24 Vca 3A	1	R\$58,00	R\$58,00
Disjuntor Bipolar	4A curva C	1	R\$36,90	R\$36,90
Disjuntor Bipolar	2A curva B	1	R\$29,90	R\$29,90
Borne porta fusível	DIN 2,5mm2	1	R\$6,45	R\$6,45
fonte chaveada	220 Vca /24 Vcc 2,5 A	1	R\$43,50	R\$43,50
motorreductor	3/4 cv 220/380V 1:25	1	R\$1.200,00	R\$1.200,00
fusível de vidro	2 A rápido	1	R\$0,50	R\$0,50
			TOTAL	R\$2.492,35

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 29 - Custo do projeto completo

PROJETO - 5 TRANSMISSORES			
Componente	Qtd	Custo Unitário	Custo Total
Interface	1	R\$1.000,00	R\$1.000,00
Transmissor sem fio	5	R\$54,08	R\$270,40
Circuito auxiliar	5	R\$77,20	R\$386,00
Quadro de comando	1	R\$2.492,35	R\$2.492,35
Controlador	1	R\$212,35	R\$172,45
		TOTAL	R\$4.361,10

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE G – TELA DA ESTUFA DURANTE OPERAÇÃO

Figura 105 - Tela da estufa durante operação



Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES ARDUINO DUE

Figura 107 - Especificações do Arduino Due

Technical specs

AVR Arduino microcontroller

Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-16V
Digital I/O Pins	54 (of which 12 provide PWM output)
Analog Input Pins	12
Analog Output Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130 mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (two banks: 64KB and 32KB)
Clock Speed	84 MHz
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	36 g

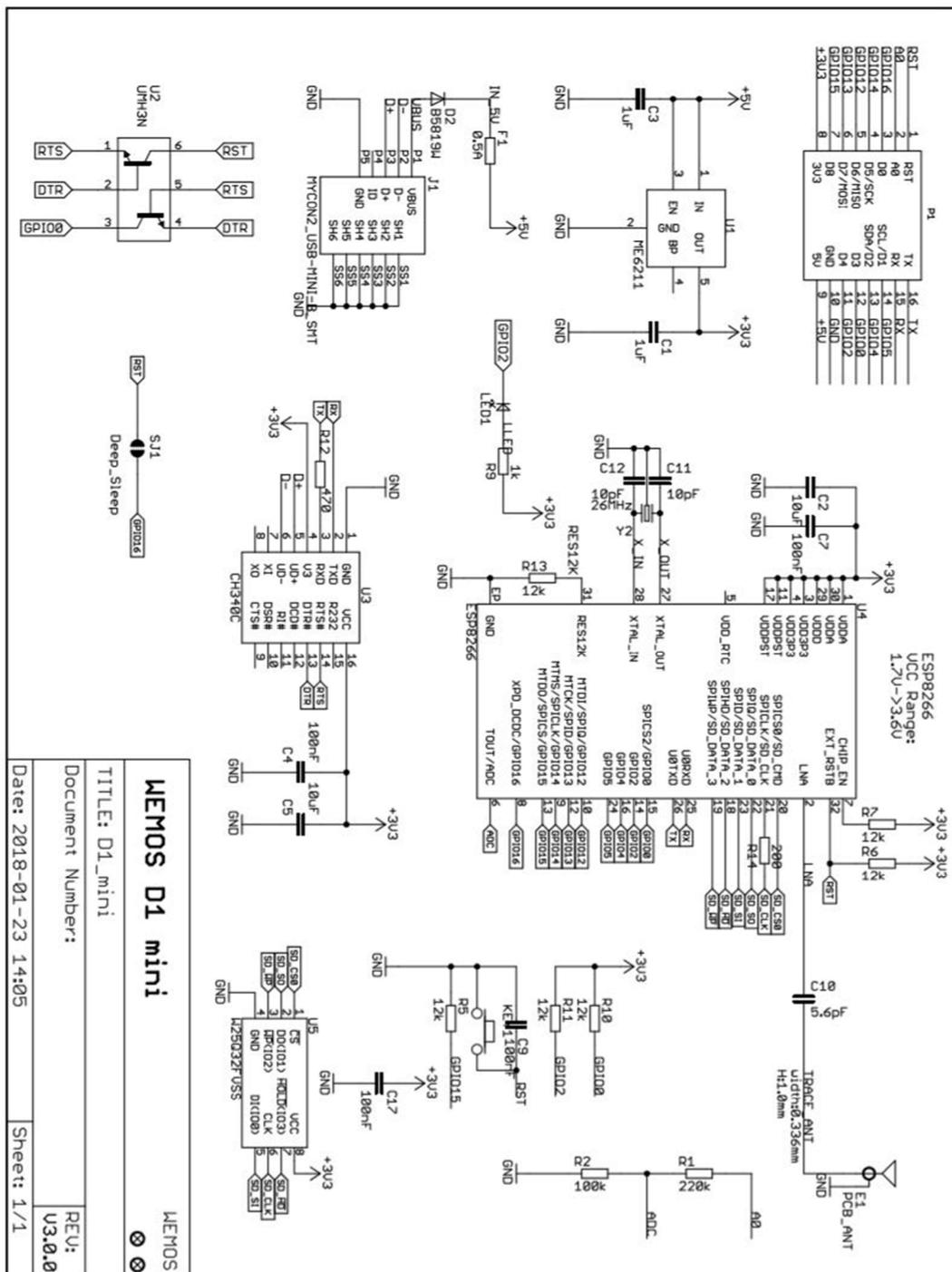
ARM Core Benefits

- A 32-bit core, that allows operations on 4 bytes wide data within a single CPU clock. (for more information go to [int type](#) page).
- CPU Clock at 84Mhz.
- 96 KBytes of SRAM.
- 512 KBytes of Flash memory for code.
- A DMA controller, that can relieve the CPU from doing memory intensive tasks.

Fonte: ARDUINO (2018)

ANEXO B – ESQUEMA ELÉTRICO DO WEMOS D1 MINI

Figura 108 - Diagrama elétrico Wemos D1 Mini



Fonte: Wemos (2018)

ANEXO C – ORÇAMENTO CONTROLADOR CI3

Figura 109 - Orçamento do sistema de irrigação da empresa Da-Ros



PRODUCT	QUANTITY	PRICE (EUR)	TOTAL
Kit of Trolleys	1	1.250	1.250
Doble Pipe Boom (wide)	15	80	1.200
Doble Rail System (long)	50	39	1.950
Control Board	1	1.100	1.100
Longer Supports for Hanging (long)	50	3	150
External Independent Noozles	2	60	120
Corridor Independent Noozles	2	60	120
TOTAL			5.890

kit de acionamento: inversor, motorreductor, etc.

Controlador

Notes:

All the prices are in Euro and EXW Da Ros.

Time for production is 2 to 3 months.

Payment conditions: 20% advance - 80% before delivery, bank transfer.

Transportation: Not Included

Instalation: Not Included

Exclusions: Everything not mentioned

The operation will be done directly with DA ROS ITALY.

Fonte: Adaptado de CHRISTIN (2018)

ANEXO D – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Figura 110 - Certificado de calibração do padrão de temperatura



Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBF ISO/IEC 17025, sob o número CAL0171.

Certificado de Calibração N°: 2017/015408

Data da Calibração: 19/04/2017

Resultados da Medição

Temperatura - canal IN (4 fios) VDD: 0,01 °C

Imersão (mm)	VR (°C)	VII (°C)	Tendência (°C)	U (°C)	k	veff
100	-10,00	-9,72	0,28	0,17	2,00	∞
100	0,00	0,30	0,30	0,17	2,00	∞
100	20,00	20,35	0,35	0,17	2,00	∞
100	30,00	30,36	0,36	0,17	2,00	∞
100	50,00	50,37	0,37	0,17	2,00	∞
100	100,00	100,36	0,36	0,18	2,00	∞
100	150,00	150,30	0,30	0,36	2,00	∞
100	200,00	200,34	0,34	0,40	2,00	∞

Temperatura - canal OP Plobe (4 fios) VDD: 0,01 °C

Imersão (mm)	VR (°C)	VII (°C)	Tendência (°C)	U (°C)	k	veff
100	-10,00	-10,00	0,00	0,17	2,00	∞
100	0,00	-0,02	-0,02	0,17	2,00	∞
100	20,00	19,98	-0,02	0,17	2,00	∞
100	30,00	29,97	-0,03	0,17	2,00	∞
100	50,00	49,95	-0,05	0,17	2,00	∞
100	100,00	99,86	-0,14	0,18	2,00	∞
100	150,00	149,80	-0,20	0,36	2,00	∞

U: Incerteza Expandida da Medição

VDD: Valor de uma Divisão

VII: Valor Indicado pelo Instrumento

VR: Valor de Referência

Tendência: VII - VR

Fonte: Elaborado pelo autor