

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO, BASEADO  
NA APLICAÇÃO DE ÁGUA EM TURNOS DE REGA E  
LÂMINAS VARIÁVEIS**

**Ruy de Aguiar Araújo Júnior**  
Engenheiro Eletricista/Docente

2017

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO, BASEADO  
NA APLICAÇÃO DE ÁGUA EM TURNOS DE REGA E  
LÂMINAS VARIÁVEIS**

**Ruy de Aguiar Araújo Júnior**

**Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco**

**Coorientador: Prof. Dr. Luis César Dias Drumond**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo)

**2017**

A663c Araújo Júnior, Ruy de Aguiar  
Controlador automático de irrigação, baseado na aplicação de  
água em turnos de rega e lâminas variáveis / Ruy de Aguiar Araújo  
Júnior. -- Jaboticabal, 2017  
x, 82 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Orientador: José Eduardo Pitelli Turco

Coorientador: Luis César Dias Drumond

Banca examinadora: Antonio Carlos Barreto, David Luciano  
Rosalen, José Luiz Rodrigues Torres, Nivaldo Carleto

Bibliografia

1. Automação. 2. Comunicação sem fio. 3. Irrigação. 4.  
Sustentabilidade. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências  
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.67:005.591.6

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –  
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


**TÍTULO DA TESE: CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO, BASEADO NA APLICAÇÃO DE ÁGUA EM TURNOS DE REGA E LÂMINAS VARIÁVEIS**

**AUTOR: RUY DE AGUIAR ARAUJO JUNIOR**

**ORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO**

**COORIENTADOR: LUÍS CESAR DIAS DRUMOND**


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. JOSÉ LUIZ RODRIGUES TORRES  
Ciência do Solo / IFTM / Uberaba/MG

  
Prof. Dr. NIVALDO CARLETO  
Centro Est. de Educação Tecnológica Paula Souza / FATEC - Taquaritinga/SP

  
Prof. Dr. DAVID LUCIANO ROSALEN  
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BARRETO  
Departamento de irrigação e drenagem / IFTM - Uberaba, MG

Jaboticabal, 01 de dezembro de 2017

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Ruy de Aguiar Araújo Júnior, filho de Ruy de Aguiar Araújo e Sebastiana Pereira Araújo, nascido no dia 15 de maio de 1972, em Ilhéus/BA. Graduiu-se em Engenharia Elétrica em 1996 pela Universidade Vale do Rio Doce (UNIVALE), mesmo ano em que ingressou no Programa de Pós-Graduação (mestrado) em Engenharia Elétrica, na área de concentração de Sistemas de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), onde obteve o título de mestre em 1999. Entre 1999 e 2002 foi professor e supervisor dos cursos técnicos em Eletrônica e Telecomunicações do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial). Entre 2002 e 2005 foi professor e coordenador dos cursos de Sistemas de Informação e Tecnologia em Telecomunicações e Presidente da COPEVE (Comissão Permanente de Vestibular) da UNIPAC (Universidade Presidente Antônio Carlos - Campus Araguari). Entre 2002 e 2003 cursou especialização em Pedagogia pela UNITRI (Centro Universitário do Triângulo Mineiro). Entre 2005 e 2007 morou em Londres/Inglaterra. Em 2008 foi professor e coordenador do curso de Engenharia Elétrica e professor do curso de Licenciatura em Matemática da FINOM (Faculdade do Noroeste de Minas – Campus Paracatu/MG). Em 2009 ingressou no serviço público federal, como professor do IFBA (Instituto Federal da Bahia – Campus Vitória da Conquista) e em 2010 foi redistribuído ao IFTM (Instituto Federal do Triângulo Mineiro – Campus Patos de Minas), onde está lotado atualmente.

É impossível falarmos em ecologia, engenharia verde, eficiência energética e sustentabilidade, sem falarmos em coletividade. Nossa independência é ilusória, a roupa que uso, não fui eu quem a fez, o trabalho que realizo não depende apenas de mim, pois existe uma cultura de cooperação que organiza nossos esforços para o bem coletivo.

Nascemos todos muito frágeis e dependentes e ao crescermos aprendemos a contribuir de alguma forma com a coletividade que nos acolheu, gerando benefícios para nós e também para outros. O engenheiro, por exemplo, utiliza sua força de trabalho para suprir as necessidades de outras pessoas, buscando atender os fins sociais. Da mesma forma que muitos trabalham para que ele utilize seu veículo, seu celular, sua internet etc. Ou seja, é certo que não sobreviveríamos sem o amparo da coletividade.

Portanto, graças à coletividade é que foi possível o desenvolvimento deste projeto de doutorado. No entanto, estou ciente de que o projeto em si não se trata de um grande feito, pois creio que na vida não podemos realizar grandes coisas, mas tão somente pequenas coisas com um grande afinco.

Nesse sentido, desejo profundamente que esqueçamos o paradigma de “deixarmos um mundo melhor para as próximas gerações” e passemos a viver definitivamente em coletividade, pois a reforma do mundo começa agora, no coração e nas ações do homem.

Ruy de Aguiar Araújo Júnior

À minha família: Fernanda, parceira de todos os momentos, pelo carinho e compreensão nesta caminhada e meus filhos Lorenzo e Valentina cujos sorrisos serviram de esteio para o meu intento.

Aos meus pais Ruy e Sebastiana pela importância, dedicação e esforços que sempre dispuseram em prol da minha formação educacional.

Aos meus irmãos Cacinha, Nito, Suêde e Yêda pelo apoio incondicional à minha trajetória acadêmica.

A vocês, dedico este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por se fazer presente em todos os momentos, principalmente naqueles incompreendidos e pela conquista de mais uma etapa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco, pela inestimável confiança e cuja sabedoria em orientar-me foi imprescindível tanto para o desenvolvimento deste trabalho quanto na formação da nossa amizade.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Luis César Dias Drumond, pela atenção e ensinamentos na área de irrigação de pastagem.

Ao Engenheiro Metrologista do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Márcio Antônio Aparecido Santana, pela predisposição no processo de calibração dos sensores.

Ao amigo Lucas Hordones Chaves, pelas incansáveis movimentações dos equipamentos durante a realização dos testes à campo.

Aos amigos Hygor Syqueira e Tássio Ormond, pelas generosas hospedagens e pelos momentos revigorantes.

À Tamares Faria Freitas, pelo carinho dedicado a minha família, em especial aos meus filhos, devido às minhas ausências nesse período.

À Profa. de Letras, Dra. Lucivânia Marques Pacheco, amiga de longos e inesquecíveis momentos, pela leitura corretiva do texto aqui redigido.

Ao Diretor da GAPPI (Gestão e Assessoria em Pastagem e Pecuária Intensiva), Maicon Fábio Appelt, pelas inúmeras contribuições na área de irrigação de pastagem.

Aos servidores da Seção Técnica da Pós-Graduação, em especial Branca Rochidali José, pela gentileza e celeridade no repasse das informações solicitadas.

Por fim, mas não menos importante, à Fernanda Faria que acumulou nesta fase da minha vida, as funções de esposa e bibliotecária. Nesse sentido lhe agradeço pelo carinho e compreensão que jamais faltaram e pela normatização das citações e das referências bibliográficas.

Meus sinceros agradecimentos!

<b>SUMÁRIO</b>	<b>Página</b>
RESUMO .....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1. Justificativa .....	03
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	04
2.1. Irrigação e manejo .....	04
2.2. Automação na irrigação.....	06
2.3. Irrigação por aspersão em pastagens .....	07
2.4. Disponibilidade da água no solo .....	12
2.5. Automação e controle.....	15
2.6. Rede de sensores sem fio (RSSF) .....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
3.1. Partes integrantes do controlador.....	22
3.2. Calibração dos sensores .....	28
3.3. Fluxogramas e modelo matemático das tarefas executadas pelo controlador.....	33
3.3.1 Temperatura e precipitação .....	39
3.3.2 Evapotranspiração de referência e da cultura .....	40
3.3.3 Intensidade de aplicação do aspersor .....	43
3.3.4 Lâmina de reposição e tempo de irrigação (TI) .....	45
4. RESULTADOS .....	48
4.1. Avaliação do modelo matemático e eficiência de controle.....	48
4.1.1. Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina (Teste 1).....	51
4.1.2. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia (Teste 2).....	54
4.1.3. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia (Teste 3).....	57

4.1.4. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 1 (Teste 4).....	59
4.1.5. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 2 (Teste 5).....	60
4.1.6. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 3 (Teste 6).....	61
4.1.7. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 4 (Teste 7).....	62
4.2. Avaliação do alcance entre os módulos de comunicação (Teste 8) ....	62
5. CONCLUSÕES.....	67
6. TRABALHOS FUTUROS.....	68
REFERÊNCIAS .....	69
APÊNDICES .....	73
ANEXOS.....	77

## **CONTROLADOR AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO, BASEADO NA APLICAÇÃO DE ÁGUA EM TURNOS DE REGA E LÂMINAS VARIÁVEIS**

**RESUMO** – A agricultura de precisão vem sendo utilizada para melhorar os níveis de produtividade e reduzir os impactos ambientais. Sendo um processo que leva em conta a coleta e análise de dados, bem como a gestão da variabilidade espacial e temporal (manejo localizado), no intuito de implementarmos respostas em escala e tempo adequados, objetivou-se neste trabalho corroborar no sentido de aumentar a melhoria da eficiência de utilização da água na gestão da irrigação, por meio de um controlador (hardware e software) automático, com tecnologia de comunicação sem fio. A proposta foi desenvolver um equipamento de precisão para possibilitar que a irrigação fosse estabelecida a partir da aplicação da água em turnos de rega e lâminas variáveis, ao invés de critérios fixos de forma arbitrária, caracterizando o controlador como um sistema automático de irrigação com aplicação em taxa variável. A eficiência do equipamento foi validada em um sistema de irrigação por aspersão para pastagem, embora possa ser utilizado para controlar a irrigação de qualquer cultura, bastando para isso conhecermos o tipo de sistema de irrigação, o(s) coeficiente(s) da cultura ( $K_c$ ) e os limites de capacidade de campo e de ponto de murcha permanente do solo (análise da retenção da água no solo), no intuito de estabelecermos um parâmetro de disponibilidade hídrica a ser utilizada pela cultura. Com os resultados concluiu-se que o controlador proposto mostrou-se original e eficiente no controle da irrigação para enlaces de até 212 metros entre seus módulos de comunicação.

**Palavras-chave:** Automação, Comunicação sem fio, Irrigação, Sustentabilidade

## **AUTOMATIC IRRIGATION CONTROLLER, BASED ON WATER APPLICATION IN WATERING SHIFTS AND VARIABLE LEVELS**

**ABSTRACT** – The precision agriculture has been used to improve productivity levels and reduce environmental impacts. As a process that takes into account the collection and analysis of data, as well as the management of spatial and temporal variability (localized management), in order to implement responses on an adequate scale and time, this study aimed to corroborate in order to increase the improvement of the efficiency of water use in irrigation management, by means of an automatic controller (hardware and software) with wireless communication technology. The proposal was to create a precision equipment to enable that the irrigation was established from the application of water in watering shifts and variable levels, instead of arbitrarily fixed criteria, characterizing the controller as an automatic irrigation system with the application at a variable rate. The efficiency of the equipment was validated in a pasture irrigation system, although it can be used to control the irrigation of any crop, just by knowing the type of irrigation system, the crop coefficient(s) ( $K_c$ ) and the limits of field capacity and the soil permanent wilting point (analysis of water retention in the soil), in order to establish a parameter of water availability to be used by the crop. With the results, we concluded that the proposed controller proved to be original and efficient in irrigation control for links up to 212 meters among its communication modules.

**Keywords:** Automation, Wireless Communication, Irrigation, Sustainability

**LISTA DE TABELAS****Página**

Tabela 1: Características do aspersor utilizado neste estudo.....	44
---	----

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>Página</b>
Figura 1: Irrigação de pastagem por pivô central .....	09
Figura 2: Irrigação de pastagem por aspersão convencional.....	10
Figura 3: Layout de um projeto de sistema de irrigação por aspersão convencional .....	11
Figura 4: Representação do solo como um reservatório ativo de água .....	13
Figura 5: Exemplo do cálculo da capacidade de disponibilidade de água (CAD) .....	14
Figura 6: Sistema de controle de irrigação em malha aberta.....	16
Figura 7: Sistema de controle de irrigação em malha fechada .....	17
Figura 8: Composição básica da RSSF criada para um sistema de irrigação ...	19
Figura 9: Rede de sensores sem fio desenvolvida baseada na plataforma radiuino (BE900) .....	22
Figura 10a: Nó Sensor inoperante .....	23
Figura 10b: Nó Sensor em operação .....	23
Figura 10c: Nó Sensor – vista interna .....	23
Figura 11a: Estação Base – Display visualizador das principais variáveis e software de controle .....	24
Figura 11b: Estação Base – Visulização das variáveis do grupo 1 .....	25
Figura 11c: Estação Base – Visulização das variáveis do grupo 2 .....	25
Figura 11d: Estação Base – Vista interna .....	25
Figura 11e: Estação Base – Python – Software utilizado no controle dos dados .....	26
Figura 12a: Nó Atuador – Vista externa .....	27
Figura 12b: Nó Atuador – Vista interna .....	28
Figura 13a: Vista lateral da câmara climática utilizada na calibração do sensor de temperatura .....	29
Figura 13b: Sensor de temperatura padrão e sensor de temperatura do projeto .....	30
Figura 13c: Equação de regressão linear, obtida a partir da comparação entre o sensor padrão e o sensor do projeto de pesquisa .....	31

Figura 14: Aplicação das intensidades de precipitação .....	32
Figura 15: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador no intuito de calcular a lâmina de reposição de água e o tempo de irrigação .....	34
Figura 16: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 1 .....	35
Figura 17: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 2 .....	36
Figura 18: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 3 .....	37
Figura 19: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 4 .....	38
Figura 20: Estrutura metálica de sustentação do Nó Sensor .....	39
Figura 21: Correlação entre os valores diários da $ET_0$ obtidos pelo método de Hargreaves em relação ao método Penman-Monteith para o município de Jaboticabal/SP .....	42
Figura 22: Aspersor modelo 5035 SD .....	43
Figura 23: Acionamento automático do setor 1 – Teste em laboratório .....	49
Figura 24: Acionamento automático do setor 2 – Teste em laboratório .....	49
Figura 25: Acionamento automático do setor 3 – Teste em laboratório .....	50
Figura 26: Acionamento automático do setor 4 – Teste em laboratório .....	50
Figura 27: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 1º dia.....	51
Figura 28: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 2º dia.....	51
Figura 29: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 3º dia.....	52
Figura 30: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 4º dia.....	52
Figura 31: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 5º dia.....	53
Figura 32: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 6º dia.....	53

Figura 33: Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina – Teste 1: variáveis do 7º dia.....	54
Figura 34: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia – Teste 2: variáveis do 1º dia .....	54
Figura 35: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia – Teste 2: variáveis do 2º dia .....	55
Figura 36: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia – Teste 2: variáveis do 3º dia .....	55
Figura 37: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia – Teste 2: variáveis do 4º dia .....	56
Figura 38: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia – Teste 2: variáveis do 5º dia .....	56
Figura 39: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia – Teste 3: variáveis do 1º dia.....	57
Figura 40: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia – Teste 3: variáveis do 2º dia.....	57
Figura 41: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia – Teste 3: variáveis do 3º dia.....	58
Figura 42: Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia – Teste 3: variáveis do 4º dia .....	58
Figura 43a: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 1 – Teste 4: Lâmina a ser aplicada antes da ocorrência da precipitação.....	59
Figura 43b: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 1 – Teste 4: Variáveis utilizadas para o cálculo da lâmina do dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	59
Figura 43c: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 1 – Teste 4: Lâmina a ser aplicada no dia seguinte após a ocorrência da precipitação .....	59
Figura 44a: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 2 – Teste 5: Lâmina a ser aplicada antes da ocorrência da precipitação.....	60

Figura 44b: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 2 – Teste 5: Variáveis utilizadas para o cálculo da lâmina do dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	60
Figura 44c: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 2 – Teste 5: Lâmina a ser aplicada no dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	60
Figura 45a: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 3 – Teste 6: Lâmina a ser aplicada antes da ocorrência da precipitação.....	61
Figura 45b: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 3 – Teste 6: Variáveis utilizadas para o cálculo da lâmina do dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	61
Figura 45c: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 3 – Teste 6: Lâmina a ser aplicada no dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	61
Figura 46a: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 4 – Teste 7: Lâmina a ser aplicada antes da ocorrência da precipitação.....	62
Figura 46b: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 4 – Teste 7: Variáveis utilizadas para o cálculo da lâmina do dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	62
Figura 46c: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 4 – Teste 7: Lâmina a ser aplicada no dia seguinte após a ocorrência da precipitação.....	62
Figura 47a: Avaliação de alcance – Teste 8: Nó Atuador.....	63
Figura 47b: Avaliação de alcance – Teste 8: Reservatório e conjunto moto-bomba.....	63
Figura 48a: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 1.....	64
Figura 48b: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 2.....	64

Figura 48c: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 3 .....	65
Figura 48d: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 4 .....	65
Figura 49: Avaliação de alcance – Teste 8: Representação geográfica dos pontos experimentais da avaliação de alcance entre os módulos .....	66

## 1. INTRODUÇÃO

Embora saibamos da importância da irrigação para a produção e produtividade da agricultura, de nada adiantará a sua utilização se os produtores continuarem a aplicar a água sem nenhum tipo de controle, ou seja, a forma como os produtores executam seus sistemas de irrigação, reflete diretamente nos lençóis freáticos. Portanto, é extremamente urgente e necessário que técnicas de manejo sejam implementadas, no sentido de obtermos uma melhor eficiência de utilização da água. Caso contrário, chegará o tempo em que escolheremos o que irrigar devido não somente ao elevado preço da energia elétrica, mas principalmente à escassez da água.

Costa e Guilhoto (2013), questionam se o benefício da agricultura de precisão seria mais uma questão ambiental do que econômica. Nesse sentido é importante questionarmos também se o uso consciente da água na agricultura é visto tão somente como uma “questão ambiental”. Será que o aumento da eficiência de utilização da água na agricultura, direitos aos serviços públicos como saúde, transporte e educação, não estarão sendo garantidos?

Para assegurar o real valor da água e reconhecê-la como bem econômico, a Política Nacional de Recursos Hídricos, conhecida como Lei das Águas, instituiu a outorga e a cobrança pelo seu uso. Será esta uma medida indevida? Seria possível promovermos o crescimento econômico sem acesso à água?

Definitivamente é de se entender que ao aumentarmos a eficiência de utilização da água, estamos na realidade nos referindo ao aumento da infiltração de água no solo, proteção às nascentes e outras práticas conservacionistas, visando regularizar a entrada e saída da água nas microbacias, pois a água no solo representa o armazenamento que poderá ser utilizado pela planta ou recarregar o aquífero, tornando-se disponível para outros usos à jusante (WARREN *et al.*, 2014).

No entanto, a questão vai além da prática conservacionista, pois embora o planejamento estratégico da utilização dos recursos hídricos seja dito como inovação, o que se pretende é atender o tripé do desenvolvimento rural sustentável: aspectos econômicos, ambientais e sociais.

Hamdy, Ragab e Scarascia-Mugnozza (2003), apontam que a eficiência de utilização da água na agricultura é baixa, não excedendo 45%, além do mais, o conceito de irrigação não é mais como uma simples aplicação de água, mas sim como uma importante estratégia visando aumento da produtividade e da rentabilidade (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2013). Porém, o maior problema da irrigação está em sua aplicação, pois se for deficitária afeta diretamente a produção e em excesso lixivia nutrientes acarretando o desenvolvimento de doenças à cultura (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008).

Drumond e Aguiar (2005), afirmam que a pastagem é a principal fonte de alimentos dos bovinos, mas que nem sempre é manejada de forma adequada e com o advento da irrigação, o produtor passa a ter uma maior flexibilidade em termos de mercado, devido a otimização do uso da terra (DRUMOND *et al.*, 2016).

Outro aspecto relevante é a utilização dos dutos dos sistemas de irrigação por aspersão para fins de fertirrigação, que, segundo Drumond *et al.* (2006), trata-se de uma técnica que vem crescendo constantemente no Brasil, favorecendo um manejo racional do sistema de produção animal. Nesse sentido a automação dos sistemas de irrigação, tem se tornado uma importante ferramenta no controle da aplicação tanto da água quanto dos fertilizantes, segundo as necessidades hídricas da cultura.

No entanto, para fornecer a quantidade de água necessária para reabastecer o respectivo déficit, os sistemas de irrigação tornam-se dependentes de informações meteorológicas, sem as quais a adoção de um manejo eficiente torna-se impossível. Por sua vez, para tratarmos essas informações, no que se refere ao processamento e tomada de decisões, faz-se necessário a utilização de sistemas automáticos de precisão, denominando a atividade como irrigação de precisão (IP).

Trata-se de uma forma de gerenciarmos a atividade agropecuária, como um processo de gestão relacionado à redução otimizada das perdas, de importância estratégica e operacional e que pode ser utilizada em qualquer cultura no intuito de minimizar o efeito ao meio ambiente e maximizar o retorno econômico para o produtor.

Dentre as técnicas de precisão, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), vem sendo cada vez mais utilizada, devido a possibilidade de descentralizarmos as informações, pois cada nó (sensor e atuador) tem capacidade de realizar o

roteamento dos dados, a partir das solicitações dos outros nós. Assim, o monitoramento das variáveis meteorológicas realizado a partir da coleta das informações pelos sensores, fez com que as RSSF se tornassem uma importante ferramenta na busca de um manejo mais eficiente na agricultura.

Portanto, com este estudo o objetivo foi desenvolver um controlador automático de irrigação, baseado em comunicação em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), que pudesse aplicar a água em turnos de rega e lâminas variáveis, no intuito de possibilitar uma melhoria na eficiência de utilização da água na gestão da irrigação.

### **1.1. Justificativa**

A proposta desse estudo é evidenciar a importância do uso da automação rural no manejo de sistemas de irrigação de pastagens, principalmente quanto à exploração mais racional dos recursos hídricos e da energia elétrica e justifica-se por disponibilizar um sistema de supervisão em malha fechada, diferentemente da grande parte dos controladores comercializados atualmente, que atuam sob malha aberta, onde o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema de irrigação, pois a bomba e as válvulas são acionadas em datas e períodos pré-programados.

A ideia é corrigir o erro de avaliação tanto no que se refere ao valor da lâmina de reposição de água, quanto ao momento de se irrigar, pois o manejo será supervisionado automaticamente, a partir de um sinal de saída que exerce ação de controle sob o sistema de irrigação. Desta forma, cada entrada de referência corresponderá a uma condição variável de operação, propiciando que a irrigação seja acionada em função das variações climáticas e da capacidade de água disponível no solo (CAD). Na prática isto significa que o sistema automático deverá saber exatamente quando e quanto irrigar, caracterizando-se como um equipamento com turno de rega e lâmina variáveis para cada setor.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Irrigação e manejo

Irrigar nada mais é do que saber “como”, “quando” e “quanto” a cultura necessita receber de água em seu sistema radicular, para repor o déficit hídrico da umidade do solo, devido às perdas por evapotranspiração (água perdida por evaporação a partir do solo e pela transpiração da planta). Sem esta reposição da água, o desenvolvimento da cultura estaria afetado.

“Como” irrigar é a escolha do sistema de irrigação a ser utilizado (pivô central, aspersão convencional, localizada etc.), enquanto que “quando” trata-se de uma decisão do momento certo para se aplicar a água, a partir das características do solo e da cultura e “quanto” é a quantificação da água (lâmina de reposição) que deve ser aplicada para que a umidade retorne à sua capacidade de campo (capacidade máxima do solo reter água).

Um exemplo típico da possibilidade e oportunidade para expansão da agricultura irrigada no país é o estado de Mato Grosso. De acordo com Assunção *et al.* (2016), o estado tem capacidade para expandir sua área irrigada em até 10 vezes mais, cerca de 61 milhões de hectares e segundo Guimarães *et al.*, (2016) essa expansão justifica-se devido a uma perfeita combinação entre oferta hídrica, condições climáticas favoráveis e baixa ocupação populacional, que o estado possui.

Souza *et al.* (2012), avaliaram o desempenho de um abacaxizeiro quanto a produção e qualidade física dos frutos, a partir de diferentes lâminas e frequências de reposição de água e constataram que a eficiência de utilização da água foi influenciada significativamente pela lâmina de irrigação. Portanto, muito embora sejam notórios os benefícios da utilização da irrigação na agricultura, tais como proporcionar umidade ao solo, aumentar a produtividade da cultura, bem como a eficiência na aplicação de fertilizantes e acabar com as sazonalidades dos períodos de deficiência hídrica, o grande desafio que cabe à inovação tecnológica é disponibilizar meios para controlar a relação existente entre a aplicação da água e o

desperdício (aplicações excessivas e deficitárias): uso racional da água, pois ao suprir a demanda hídrica de uma cultura, a irrigação faz com que o sistema produtivo seja garantido e o risco do investimento seja reduzido. No entanto, manejar corretamente a ponto de saber o momento certo e a quantidade adequada da aplicação de água, não é tão simples assim. De forma inapropriada, a irrigação pode acarretar impactos expressivos em seu primeiro insumo, a água, bem como nas ações diretas de geração de emprego e no desenvolvimento econômico da região/país.

Basicamente existem três maneiras de gerenciarmos a irrigação:

1) Manejo a partir das condições climáticas: as informações climáticas são de relevada importância no manejo da irrigação, pois é a partir delas que é possível estimarmos a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), a evapotranspiração da cultura ( $ET_C$ ), a demanda hídrica, de acordo com Garzella (2011) e conseqüentemente reabastecer o déficit de água (FRANCO; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2014).

2) Manejo a partir das condições da umidade do solo: o solo é um reservatório ativo de água e na medida em que esta é aplicada, seja de maneira natural via precipitação ou artificial via irrigação, consegue-se regularizar a capacidade de água disponível para as plantas. Independentemente das características do solo, onde a capacidade de retenção de água, os tornam diferentes, o importante neste tipo de manejo é determinar sua umidade nos seus pontos máximo de retenção (CC - capacidade de campo) e mínimo (PMP – ponto de murcha permanente), pois será a partir da diferença entre esses pontos, denominada de capacidade de água disponível (CAD), que a irrigação será identificada como necessária (ou não). Como as medidas das umidades realizadas por sensores são pontuais, a desuniformidade do solo e a uniformidade de distribuição da água passam a serem fatores que muito influenciam na quantidade de sensores a serem instalados na área irrigada.

3) Manejo a partir das condições hídricas da planta: nesse tipo de manejo, o indicador hídrico é determinado pela temperatura do seu dossel, potencial hídrico das folhas e outras formas. Neste caso, a coleta dos dados poderia ser realizada a partir de sensores de infravermelhos instalados nos mourões das cercas.

Na busca de uma melhor eficiência, geralmente são utilizadas as condições combinadas dos três manejos, clima, solo e planta, pois desta forma é possível

reduzir os erros e identificar de forma mais acertada, o momento e a quantidade de água a ser aplicada. Porém, há de se ressaltar que não existe uma melhor metodologia, pois optar entre medir a água no solo ou estimar a evapotranspiração dependerá exclusivamente das condições locais da propriedade. O que não se pode mais aceitar, é abrir mão do controle da água aplicada. Portanto, há de se falar em uma conscientização da sua real importância, fazendo com que a implantação do manejo de irrigação seja dito como o maior desafio da agricultura irrigada.

## **2.2. Automação na irrigação**

A agricultura irrigada usa água de superfície, portanto, deve-se adotar pesquisas sobre planejamento e o uso eficiente da água nos sistemas de produção, (FRANCO; HERNANDEZ; TEIXEIRA, 2014). Esse planejamento quando aliado à ocupação populacional tornam-se uma necessidade para a sociedade, haja vista o crescente aumento do uso da água (HERNANDEZ *et al.*, 2014). Neste cenário, surge então a técnica de precisão como o maior advento da agricultura contemporânea, cuja difusão em maior escala deve ser realizada pelas universidades que por meio das atividades científicas, assume seu importante papel de principal centro de conhecimento e transformador da sociedade, que muito contribui para o desenvolvimento do país.

No entanto, segundo Borghi *et al.* (2016), a agricultura de precisão ainda é pouco explorada aqui no Brasil e tem sua expansão limitada devido à dificuldade do uso de softwares e dos equipamentos pelos produtores, e embora seja uma realidade, há muito o que se fazer para que de fato essa técnica seja amplamente difundida e utilizada em nosso país.

Na irrigação clássica, a área é tratada de maneira uniforme, ou seja, todos os setores recebem igualmente a mesma quantidade de água a ser aplicada, enquanto que na irrigação de precisão, devido às análises de variabilidade, os setores recebem a quantidade de água de acordo com a sua real necessidade. Trata-se de uma técnica de manejo eficiente e diferenciado, que por meio da análise da variabilidade espacial e temporal do sistema produtivo, consegue-se aplicar os

insumos no momento certo e na quantidade necessária, evidenciando a importância da tecnologia na tomada de decisão no processo de gestão. Desta forma, reconhecemos em definitivo que o sistema produtivo não é uniforme.

Com a inserção da automação, sensores e metodologias de análise, torna possível que em áreas menores a produtividade seja melhorada e os impactos ambientais sejam minimizados, pois o que se busca é a otimização das áreas produtivas (SILVA *et al.*, 2017).

Após realizar comparações na rentabilidade econômica entre agricultura convencional e a implementada por meio de práticas de precisão, Silva *et al.* (2007), identificou que os melhores resultados foram apresentados no sistema de precisão.

Embora a automação visando o manejo localizado frequentemente seja bastante utilizada nas culturas de grãos e cana-de-açúcar, apresenta-se como potencial vasto para ser utilizada em outras áreas, como por exemplo, em sistemas de produção animal baseados em pastagens (BERNARDI; PEREZ, 2014).

Rocha Neto *et al.* (2015) estabeleceram o manejo localizado (irrigação de precisão), como sendo uma estratégia para alcançar uma relação eficiente entre o volume de água utilizado e a produtividade obtida.

Quanto às forrageiras, Drumond *et al.* (2016) sinaliza que embora elas respondam de forma satisfatória à irrigação, é extremamente necessário identificar o manejo correto das pastagens como sendo uma importante ação para o bom uso da forragem e para garantir o desempenho do animal. Assim, o planejamento da ocupação das áreas, bem como o monitoramento das necessidades hídricas, tornam-se ferramentas essenciais na busca de uma maior produtividade.

### **2.3. Irrigação por aspersão em pastagens**

As pastagens representam a forma mais prática e econômica de alimentação de bovinos, pois as forrageiras não necessitam de transporte, armazenamento e distribuição. Esta alternativa está relacionada diretamente com o potencial da forrageira, sua adaptabilidade ao ecossistema e principalmente com o manejo adotado. No entanto, as variações climáticas são fatores determinantes em sua

produção, tornando a irrigação uma excelente estratégia gerencial que por meio da água, ao contrário da temperatura e da luz/radiação, pode sofrer interferência humana no intuito de suprir as necessidades hídricas das forrageiras e elevar os níveis de produtividade, possibilitando que a atividade seja mais competitiva e lucrativa.

Um correto planejamento do sistema de produção à pasto deve basear-se não somente na identificação das etapas do desenvolvimento da forrageira, estabelecendo níveis de produtividade da pastagem, mas também na possibilidade de crescimento do rebanho. É importante que esta hipótese seja considerada, caso contrário, embora o processo de produção da forrageira seja altamente dinâmico com curtos períodos entre seus ciclos, poderão ocorrer condições danosas à pastagem, fazendo com que seja utilizada além do que ela suporta (superpastejo).

Em se tratando de irrigação em pastagens, Drumond *et al.* (2016) indicam que a maioria dos projetos de irrigação são realizados por aspersão (pivô e aspersão convencional em malha), mas pelo fato da irrigação ser apenas um fator na produção vegetal, para que a avaliação da viabilidade de implantação seja mais ampla, torna-se imprescindível considerar outros fatores, tais como:

- a) Espécie de forrageira;
- b) Adubação;
- c) Tipo de solo;
- d) Topografia;
- e) Distância e disponibilidade de água e de energia elétrica e
- f) Custo de alimentação suplementar.

Pinto *et al.* (2016) após avaliarem a produtividade de arroz irrigado, identificaram que o gasto com água na irrigação por aspersão representou 48% do gasto com a irrigação por inundação. No entanto, há de se entender que um determinado sistema de irrigação não é melhor do que outro, mas o que melhor se adapta aos fatores do local de irrigação e ao manejo a ser utilizado. Portanto, independente da finalidade de utilização da pastagem, alimentação dos animais ou produção de feno, é extremamente necessário identificar seu manejo correto, pois somente com o planejamento da ocupação e o monitoramento das necessidades

hídricas das forrageiras, que será possível alcançarmos maiores índices de produção em uma menor área.

Os sistemas de aspersão por pivô central (Figura 1) são bastante utilizados na irrigação de pastagem, principalmente para médias e grandes propriedades e foram os que mais contribuíram para a expansão da irrigação no país (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2013). Suas principais características são essencialmente irrigação em padrões circulares (aspersores de forma suspensa) e a necessidade de topografia plana.



Figura 1: Irrigação de pastagem por pivô central

Fonte: Gestão e Assessoria em Pastagem e Pecuária Intensiva – GAPPI

Já os sistemas de aspersão convencional são muito utilizados em pequenas e médias propriedades e caracteriza-se pelo fato de possibilitar a mudança tanto dos aspersores quanto das tubulações de acordo com a área a ser irrigada. Nesse caso, há uma redução do valor de implantação do projeto. Porém, como a mobilidade é realizada manualmente, torna-se impossível a implantação da automação.

O sistema de aspersão utilizado neste estudo foi fixo e suas principais características são: adaptação a qualquer tipo de terreno, tubulações de PVC (Policloreto de Polivinila) enterradas e possibilidade de automação. Em decorrência dessa última característica, a mão de obra é reduzida significativamente, principalmente se a irrigação for realizada no período noturno, quando a incidência de vento é menor e os descontos com energia elétrica podem chegar até 70%.

Na figura 2 é observada a irrigação de pastagem por aspersão convencional fixo e na figura 3 o *layout* de um projeto, com dois setores sendo irrigados automaticamente, nesse caso específico, os setores 1 e 5, 2 e 6, 3 e 7 e por último os setores 4 e 8.



Figura 2: Irrigação de pastagem por aspersão convencional

Fonte: Gestão e Assessoria em Pastagem e Pecuária Intensiva – GAPPI

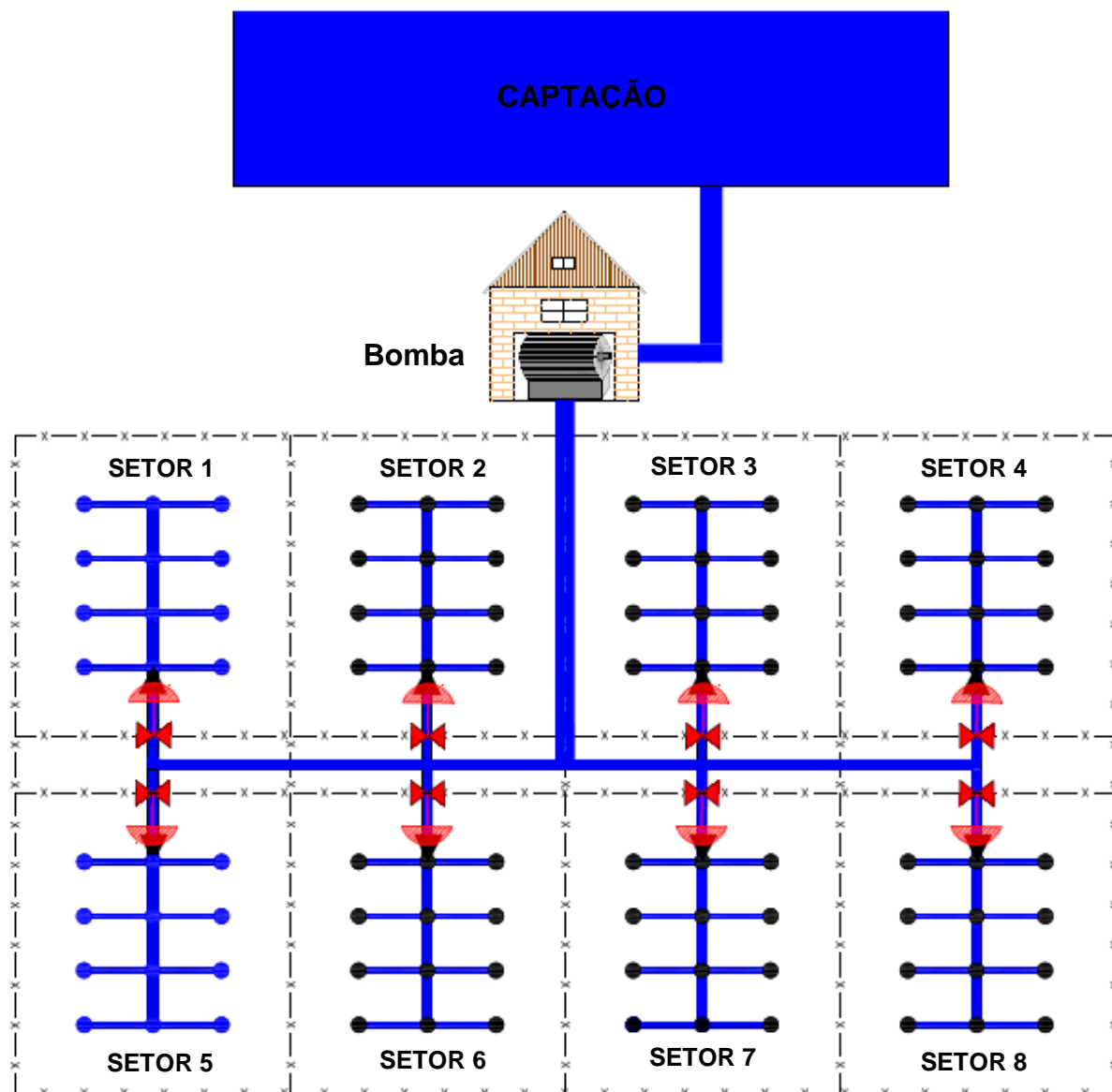


Figura 3: Layout de um projeto de sistema de irrigação por aspersão convencional

Visando o correto dimensionamento do projeto, é fundamental que as etapas listadas abaixo sejam seguidas, tanto na implantação dos sistemas de irrigação de pastagem que utilizam pivô central quanto nos que utilizam aspersão convencional:

- a) Reconhecimento da área, especificando as fontes de captação de água, nível da água, afloramento de rochas, estradas e os pontos de energia elétrica;
- b) Levantamento das plani-altimétrico da área, preferencialmente georreferenciado;
- c) Desenho da planta, geralmente elaborado em CAD.

Por fim, outra característica dos sistemas de irrigação por aspersão, é a possibilidade de utilizar as tubulações existentes para fertirrigar as pastagens. Trata-se de uma forma mais eficiente de aplicar os fertilizantes, reduzir os custos com mão de obra e máquinas, bem como menos compactação do solo.

A fertirrigação pode ser realizada basicamente de duas maneiras: dissolvendo a adubação na água e injetando o composto no sistema de irrigação ou aplicando água residuária proveniente de resíduos sólidos de bovinos/suínos da propriedade.

De forma adequada, a água residuária altera positivamente as características do solo, melhorando sua capacidade de retenção de água.

Drumond *et al.* (2006), avaliaram a produção de matéria seca em pastagem de Tifton 85 irrigada, com diferentes doses de dejetos líquidos de suíno e observaram um crescimento duas vezes maior na produção quando comparada à pastagem irrigada somente com água.

#### **2.4. Disponibilidade de água no solo**

Embora os solos sejam ditos como reservatórios ativos de água (Figura 4), cada um possui a sua capacidade específica de retenção. Sendo assim, a disponibilidade representa a variação do conteúdo hídrico e seu potencial, em função do tipo de solo, textura e outros fatores. Portanto, é extremamente necessário conhecermos os limites máximo (capacidade de campo - CC) e mínimo (ponto de murcha permanente - PMP), no intuito de estabelecermos um parâmetro de disponibilidade hídrica a ser utilizada, para que a planta absorva água sem dificuldade alguma. Ressalta-se que embora exista água abaixo do ponto de murcha permanente (PMP), esta porção não está disponível para as plantas, pois a umidade nesse ponto é tão reduzida e distante da zona radicular da planta que não lhe é permitida a absorção suficiente para suprir suas necessidades fisiológicas.

Os pontos de CC e PMP são obtidos a partir da análise da retenção da água no solo (curva de retenção ou curva característica), ou seja, está relacionada ao teor de água presente no solo. A referida análise pode ser realizada em um laboratório de análise física do solo a partir de uma amostra específica, sendo que os valores

da capacidade de campo e do ponto de murcha permanente são em determinados em porcentagem de água no solo.

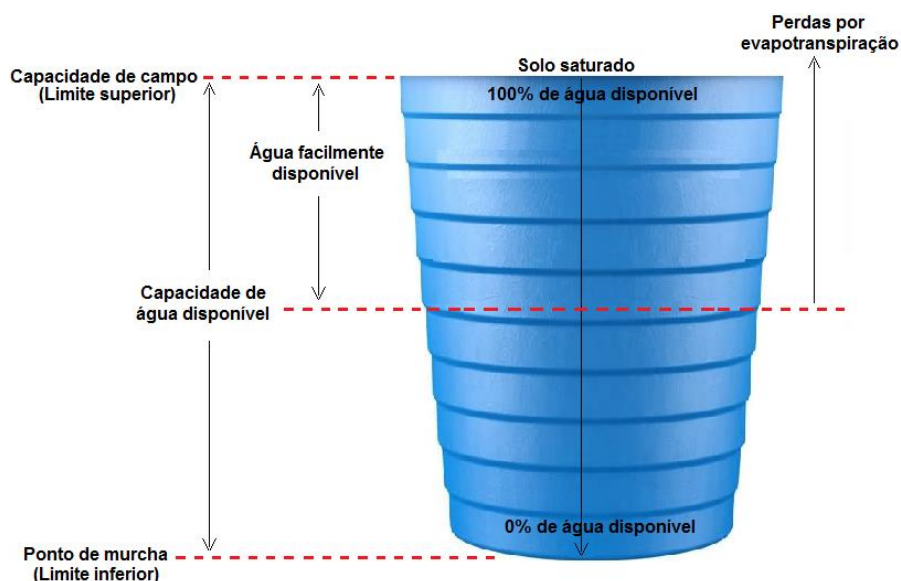


Figura 4: Representação do solo como um reservatório ativo de água

De modo simplificado, uma vez conhecido a textura do solo, a profundidade do sistema radicular da cultura e determinados os pontos de CC e PMP, torna-se possível calcularmos a capacidade de água disponível no solo (CAD), conforme é visualizado o exemplo na figura 5.

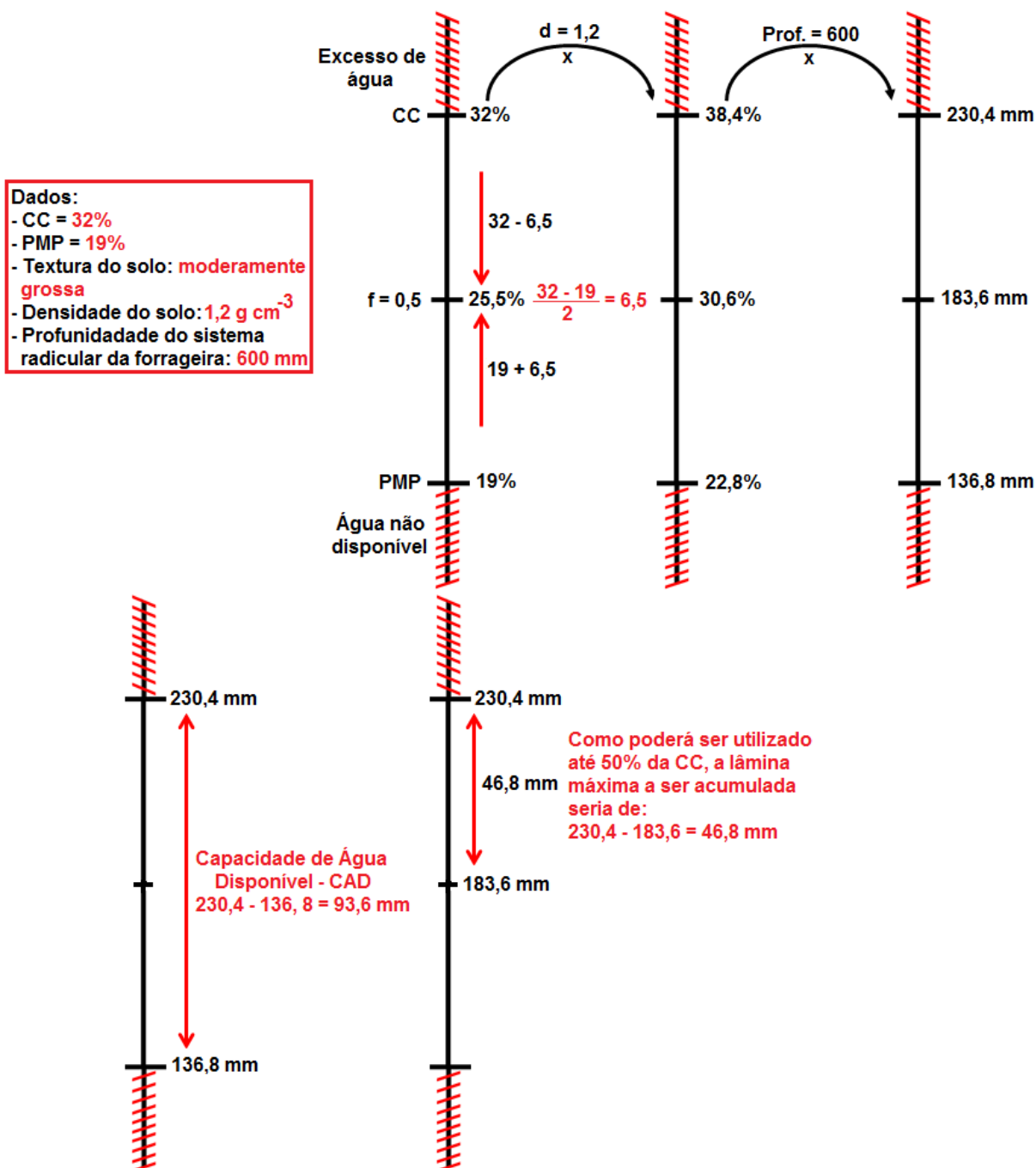


Figura 5: Exemplo do cálculo da Capacidade de Disponibilidade de Água (CAD)

Neste estudo foi estabelecido um acúmulo máximo de 20 mm, para ser iniciada a irrigação, correspondendo a 42,74% da lâmina máxima a ser acumulada no exemplo específico acima, portanto, dentro do intervalo de água facilmente disponível. Sendo assim, mesmo ainda restando 26,8 mm de água (resultado da subtração entre o valor máximo a ser acumulado, “46,8 mm” e o valor referencial

proposto, “20 mm”), o controlador acionará o sistema de irrigação, no intuito de que o solo retorne à sua capacidade de campo.

Nascimento *et al.* (2014) após avaliarem a variabilidade dos atributos físicos do solo, observaram que a umidade e a capacidade de água disponível evidenciaram a delimitação das zonas de manejo de irrigação. Portanto, contabilizar sistematicamente o fluxo de entrada e saída de água no solo, ação denominada balanço hídrico, é essencial para repor o déficit transitório e evitar situações de estresse hídrico, assim a planta será capaz de utilizar a água sempre dentro do fator de disponibilidade próximo ao seu sistema radicular, visando não dificultar o processo de absorção de água pela planta. Dessa forma, a análise da curva de retenção de água, torna-se uma importante ferramenta para conhecermos a capacidade de água disponível no solo e que muito contribui na adoção de um manejo mais adequado da irrigação.

## **2.5. Automação e controle**

Há tempos que a automação vem sendo utilizada como estratégia eficiente de manejo, visando reduzir os custos de produção e minimizar os impactos ambientais e nas últimas décadas tem se tornado cada vez mais uma ferramenta essencial na busca do aumento da rentabilidade da atividade agropecuária. Sua adoção nos sistemas de irrigação tem proporcionado uma otimização do uso racional da água, segundo Carvalho *et al.* (2015), evitando com isso a aplicação de lâminas excessivas (SANTOS *et al.*, 2015).

A partir dessas evidências podemos constatar a importância do uso da tecnologia e suas vantagens na tomada de decisão no processo de gestão. É o que chamamos de pensamento global com ação local. Portanto, é a aplicação de tecnologias da informação com a finalidade de estabelecer estratégias administrativas e econômicas no sistema produtivo (RIA *et al.*, 2015).

Mas, o que é automação? Trata-se de uma ação controlada e automática, cujo processo decisório independe da interferência humana. Para que essa ação de controle seja realizada, é necessária a existência de quatro componentes:

- 1) Variável de controle: componente que será controlado (medido) durante a ação de controle. Exemplos: temperatura, humidade, precipitação etc.
- 2) Sensor: dispositivo responsável pela detecção (medição) da variável de controle.
- 3) Controlador: equipamento responsável pelo tratamento e supervisão da variável de controle, no intuito de utilizá-la como base na tomada de decisão.
- 4) Atuador: dispositivo responsável pela execução da ação de controle. Exemplos: conjunto bomba-bomba, válvulas de irrigação, dosagem da fertirrigação, etc.

Não somente na agricultura irrigada, mas em todo e qualquer processo que se deseja controlar, a supervisão pode ser realizada de duas maneiras:

- 1) Em malha aberta (Figura 6): tipo de supervisão utilizada pela maioria dos controladores comercializados no Brasil, em que o sinal de saída não possui efeito direto na ação do controle da irrigação, pois cada entrada de referência corresponde a uma condição fixa de operação. Como essa supervisão não possui análise da aplicação da água (verificação da necessidade), o acionamento da irrigação não apresenta variação alguma em função das condições climáticas, ou seja, a bomba e as válvulas são acionadas tão somente em função de datas e períodos pré-programados.

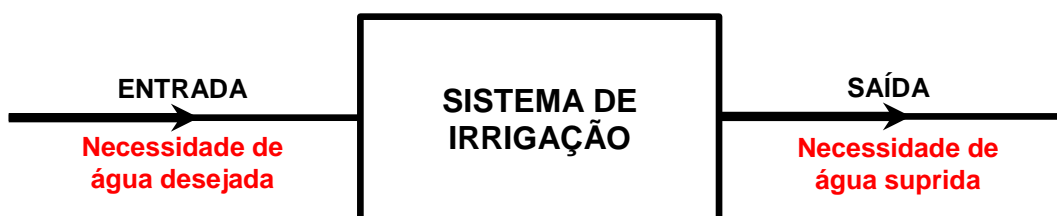


Figura 6: Sistema de controle de irrigação em malha aberta

- 2) Em malha fechada (Figura 7): tipo de supervisão que o sinal de saída possui um efeito direto na ação do controle da irrigação, ou seja, cada entrada de referência, de forma dinâmica, corresponde a uma condição variável de operação. Portanto, como há uma análise da aplicação da água (verificação da necessidade), o acionamento da irrigação sofre variações em função das condições climáticas.

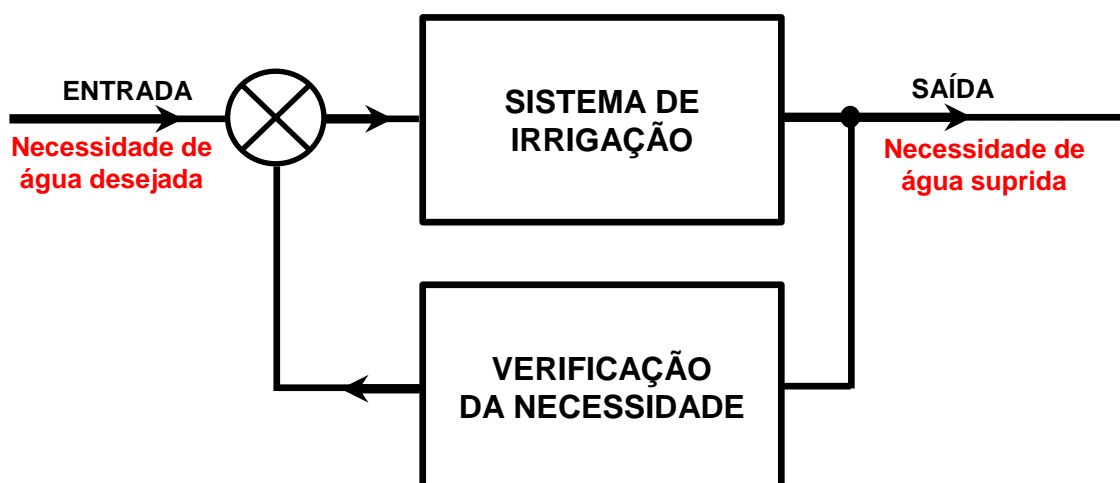


Figura 7: Sistema de controle de irrigação em malha fechada

Os avanços científicos associados à utilização da tecnologia da informação nos processos decisórios das necessidades hídricas de uma cultura e na racionalização da água nos levam a crer que os sistemas de controle de irrigação em malha fechada são muito mais eficientes que os sistemas em malha aberta, tornando-os essenciais não só para a evolução, competitividade e sustentabilidade da atividade, mas principalmente para a garantia da segurança alimentar.

## 2.6. Rede de sensores sem fio (RSSF)

O principal objetivo de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), é realizar monitoramento distribuído em uma determinada área, portanto trata-se de uma rede composta de sensores autônomos com aplicações específicas e cuja comunicação entre seus Nós (Sensores, Base e Atuadores) é realizada por rádio frequência (RF) baseada em alguma plataforma de comunicação.

Neste estudo, a RSSF desenvolvida utilizou uma plataforma de comunicação nacional denominada “Radiuino”, que possui a mesma IDE (*Integrated Development Environment* - Ambiente de Desenvolvimento Integrado) do arduino e cujo protocolo de acesso é aberto (*open source* – código aberto), possibilitando que seja aprimorado por qualquer pessoa a qualquer tempo.

Quando comparadas às redes convencionais cabeadas, as RSSF apresentam os seguintes benefícios:

- a) Facilidade de expansão: as RSSF são altamente flexíveis quanto à sua expansão, devido à facilidade da inserção de novos sensores na rede existente;
- b) Menor custo: tanto na instalação quanto na expansão de uma RSSF, o custo é bem menor, pois não há necessidade de obras civis, dutos e cabeamento, responsáveis por grande parte do investimento nas redes cabeadas.

As RSSF são compostas por elementos denominados de Nó Sensor, Estação Base e Nó Atuador, conforme a Figura 8, sendo que o número de Nós Sensores e Atuadores será determinado pelo tamanho da área e pelo que se deseja controlar.

Basicamente, a descrição do funcionamento se dá a partir das seguintes etapas:

**a) NÓ SENSOR:**

- 1) Coleta as variáveis de temperatura e precipitação;
- 2) Converte os dados coletados em sinal elétrico;
- 3) Processa os dados;
- 4) Transmite os dados para a Estação Base;

**b) ESTAÇÃO BASE:**

- 5) Recebe os dados do NÓ SENSOR;
- 6) Aplica a metodologia de controle, calculando a lâmina diária de reposição até que o valor seja  $\geq 20$  mm;
- 7) Transmite uma solicitação ao NÓ ATUADOR, para que o sistema de irrigação seja acionado ou desligado (no caso de ocorrência de precipitação);

**c) ESTAÇÃO BASE:**

- 8) Recebe a solicitação da ESTAÇÃO BASE e executa, acionando ou desligando o sistema de irrigação.

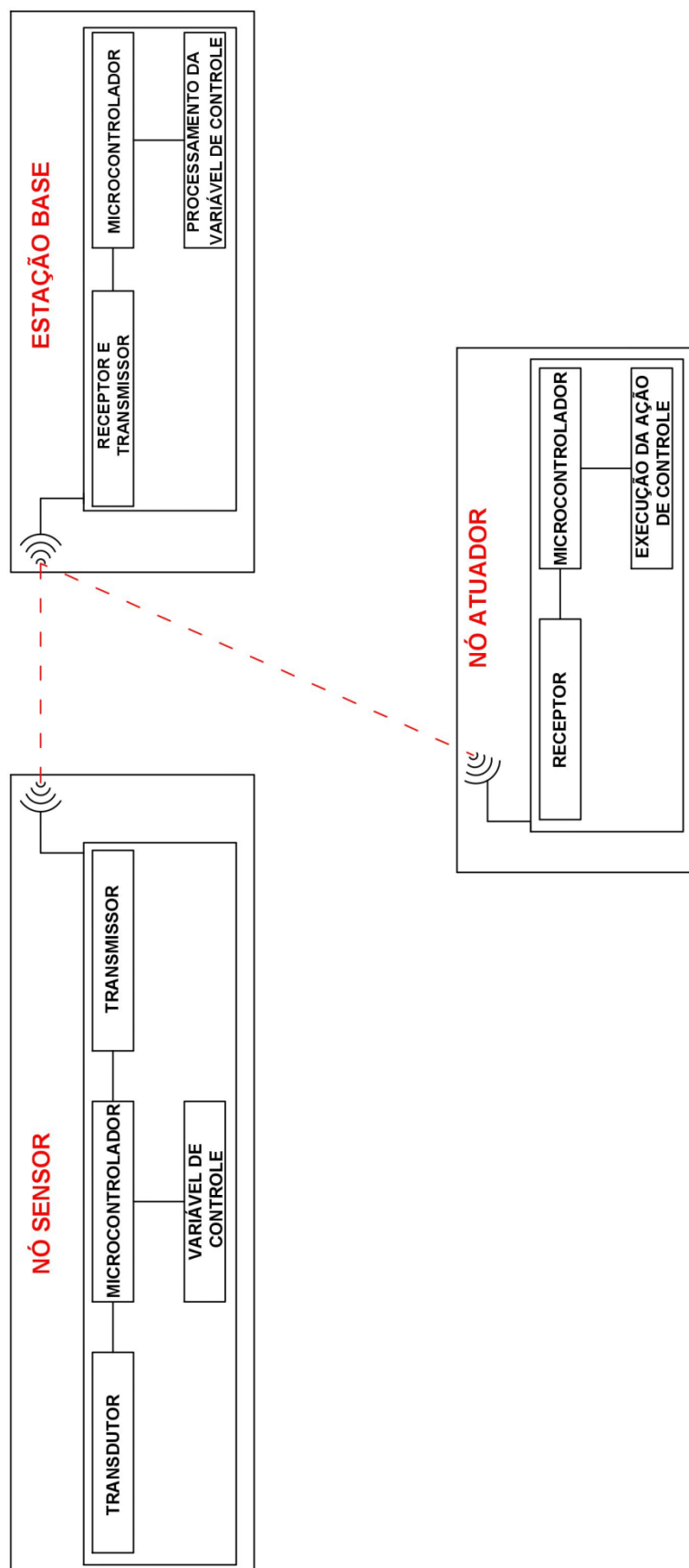


Figura 8: Composição básica da RSSF criada para um sistema de irrigação

Quando utilizadas em sistemas de irrigação, as RSSF podem oferecer dois importantes benefícios: racionalização da água e identificação das condições ideais para o desenvolvimento das culturas (MARTINS *et al.*, 2016).

Sudha, Valarmathi e Babu (2011) conseguiram uma significativa redução no consumo de energia elétrica, ao utilizarem comunicação sem fio em um sistema de irrigação.

Em um controle automático de irrigação em pivô central a partir da umidade do solo, Queiroz, Botrel e Frizzone (2008) desenvolveram um sistema de rádio frequência com alcance máximo de 50 metros, entre os módulos de comunicação, enquanto que Pfitscher *et al.* (2011) desenvolveram um sistema supervisorio de comunicação sem fio para controle de irrigação da lavoura de arroz e obtiveram uma redução de 85% de água e 81% na energia elétrica.

Portanto, sendo a água um recurso essencial para a vida e ao desenvolvimento socioeconômico, ações urgentes como a desenvolvida neste estudo, devem ser implementadas para melhorar a eficiência de utilização do recurso hídrico.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O projeto de pesquisa foi dividido em duas etapas, ambas realizadas no Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP. A primeira etapa constou do desenvolvimento do controlador, realizado no Laboratório de Instrumentação, Aquisição e Processamento (LIAP), enquanto que a segunda etapa, constou da avaliação de transmissão e alcance entre os módulos de comunicação, realizada na área experimental do Departamento de Engenharia Rural (S 21° 14' 29,5"; W 48° 17' 11,9"; Altitude 571m).

Neste projeto de pesquisa, a eficiência do controlador foi validada em um sistema de irrigação por aspersão para pastagem, embora pudesse ser utilizado para controlar a irrigação de qualquer cultura, bastando para isso conhecermos o tipo de sistema de irrigação, o(s) coeficiente(s) da cultura ( $K_c$ ) e os limites de capacidade de campo e de ponto de murcha permanente do solo (análise da retenção da água no solo), no intuito de estabelecermos um parâmetro de disponibilidade hídrica a ser utilizada pela cultura.

As características metodológicas consideradas para o desenvolvimento do controlador foram:

- 1) O manejo da irrigação foi estabelecido via monitoramento da temperatura e da precipitação sob controle em malha fechada, a partir de um valor referencial de 20 mm, dentro da Capacidade de Água Disponível (CAD);
- 2) O parâmetro para a reposição de água no solo foi baseado na estimativa da evapotranspiração pelo método de Hargreaves e corrigida em relação à evapotranspiração estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO 56);
- 3) A lâmina de reposição de água foi estabelecida a partir do acúmulo diário entre a evapotranspiração da cultura e a precipitação, para os quatro setores avaliados. No entanto, caso seja necessário, o controlador pode aplicar taxas variadas para os setores, independentemente um do outro, tanto no que se refere ao valor da lâmina quanto à frequência de aplicação;
- 4) Sua constituição foi dividida em três módulos: Estação Base, Nó sensor e Nó Atuador.

Ressalta-se que foi estabelecido neste estudo, um valor máximo de 20 mm para o acúmulo da lâmina de reposição. No entanto, pode-se alterá-lo para qualquer outro, a partir da análise da curva de retenção do solo que se deseja irrigar, sendo que o importante é que o valor escolhido esteja dentro da área onde a água encontra-se facilmente disponível para o sistema radicular da planta.

### 3.1. Partes integrantes do controlador

Conforme descrito no item 2.6, o controlador possui três módulos (Nós) de comunicação por rádio frequência, constituindo uma pequena Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) baseada na plataforma Rádino (Figura 9) e foram desenvolvidos para atuar em um sistema de irrigação por aspersão convencional:

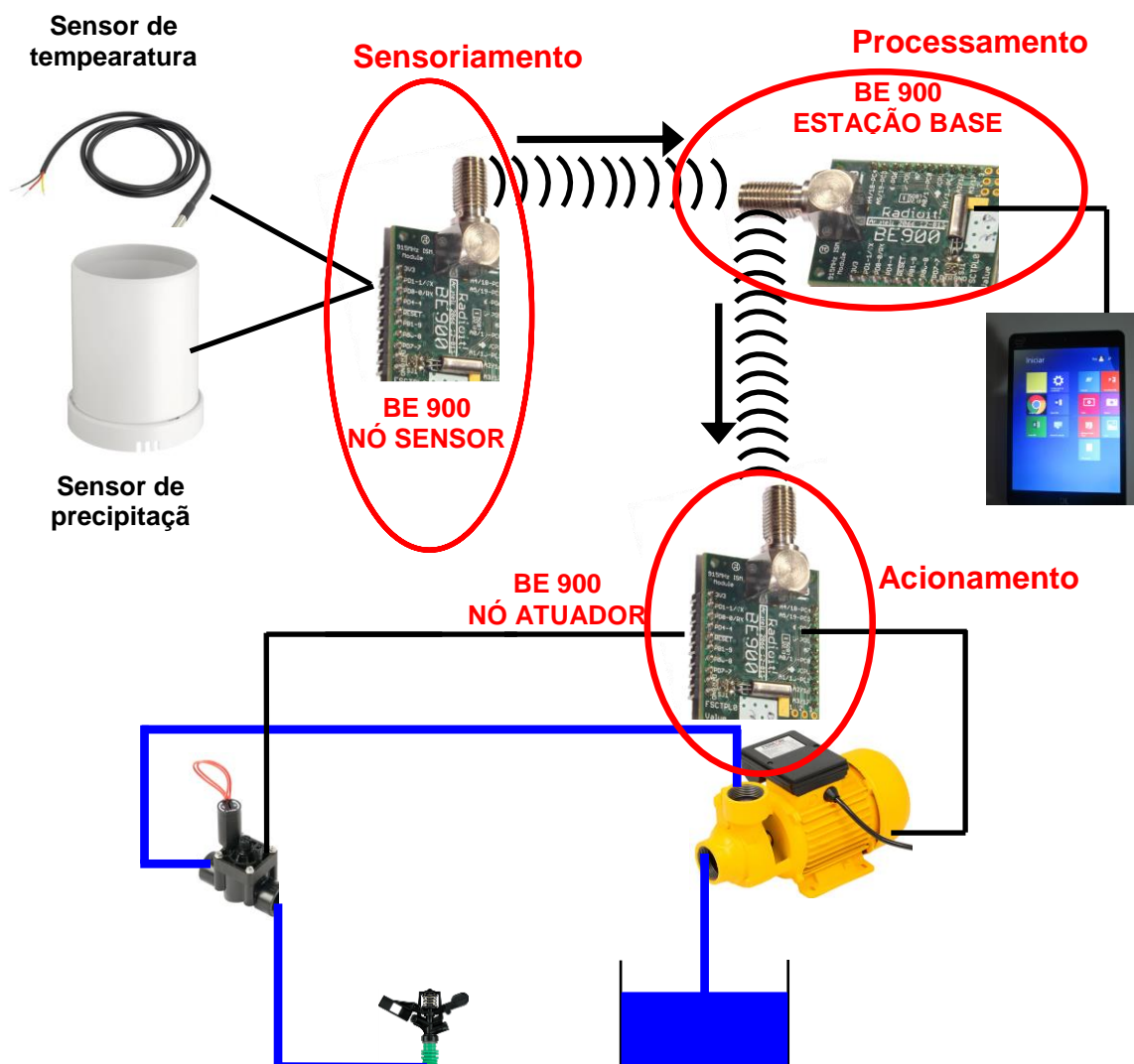


Figura 9: Rede de Sensores Sem Fio desenvolvida baseada na plataforma Rádino (BE 900)

– Nó Sensor (Figuras 10a, 10b e 10c): responsável pela aquisição das informações relativas às variáveis de controle, nesse caso específico, temperatura e precipitação e conseqüentemente envio à Estação Base, no intuito de que a ação de controle seja supervisionada;

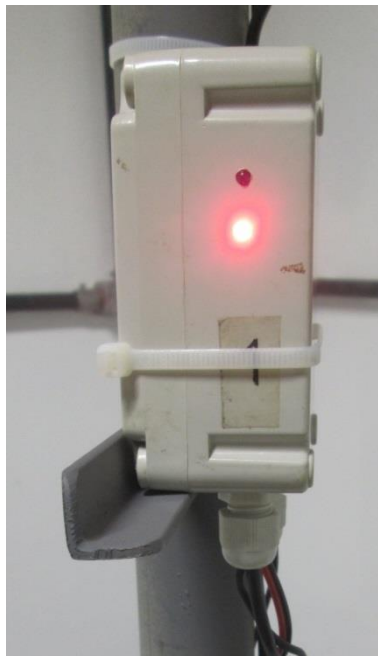


Figura 10a: Nó Sensor – Inoperante



Figura 10b: Nó Sensor – Em operação

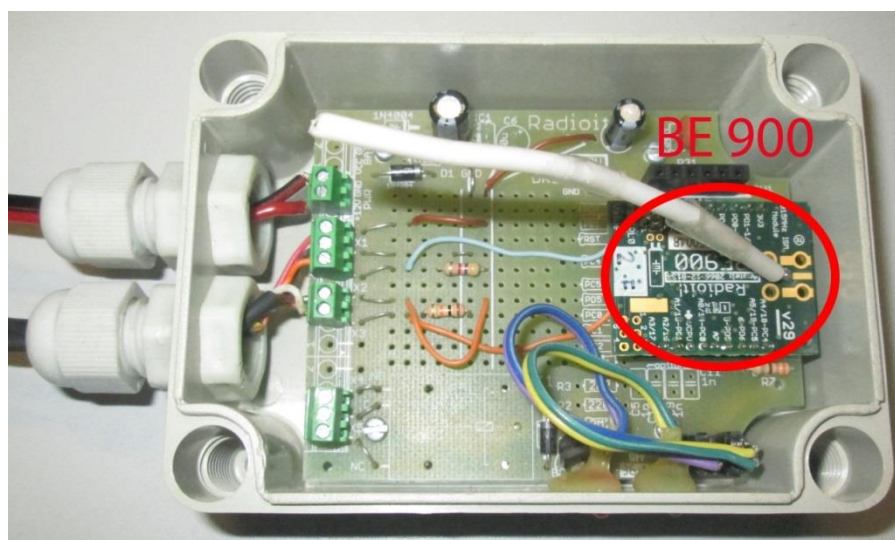


Figura 10c: Nó Sensor – vista interna

– Estação Base (Figuras 11a, 11b, 11c, 11d e 11e): responsável pelo processamento dos dados (visualização em tempo real das informações enviadas pelo Nó Sensor), tomada de decisão e conseqüentemente envio ao Nó Atuador;



Figura 11a: Estação Base – Display visualizador das principais variáveis e software de controle

Os resultados dos testes foram visualizados em uma tela de *LCD (liquid crystal display)*, que alternava dois grupos de variáveis, a cada 10 segundos, conforme Figuras 11b e 11c:

- **GRUPO 1:**

- Temperatura Mínima ( $T_{\text{Min}}$ );
- Temperatura Máxima ( $T_{\text{Máx}}$ );
- Precipitação (P) e
- Evapotranspiração de Hargreaves ( $ET_{0h}$ ).

- **GRUPO 2:**

- Lâmina de irrigação do setor 1 ( $L_1$ ),
- Lâmina de irrigação do setor 2 ( $L_2$ ),
- Lâmina de irrigação do setor 3 ( $L_3$ ) e
- Lâmina de irrigação do setor 4 ( $L_4$ ).



Figura 11b: Estação Base – visualização das variáveis do grupo 1



Figura 11c: Estação Base – visualização das variáveis do grupo 2

A Figura 11d abaixo, trata-se da vista interna da Estação Base, onde podemos observar ao centro a BE 900 na função de receptor (recebe os dados do NÓ SENSOR) e transmissor (transmite solicitação para que o NÓ ATUADOR acione ou desligue o sistema de irrigação) simultaneamente e do lado direito, o gravador de firmware, popularmente conhecido como gravador de instruções, responsável por gravar nas três BE 900, suas respectivas funções (NÓ SENSOR - sensoriamento, ESTAÇÃO BASE - processamento e NÓ ATUADOR – acionamento/desligamento).

Ressaltando que Firmware é um programa computacional armazenado na memória de um circuito integrado, cuja função é controlar o hardware (BE 900) por meio de uma sequência de instruções.

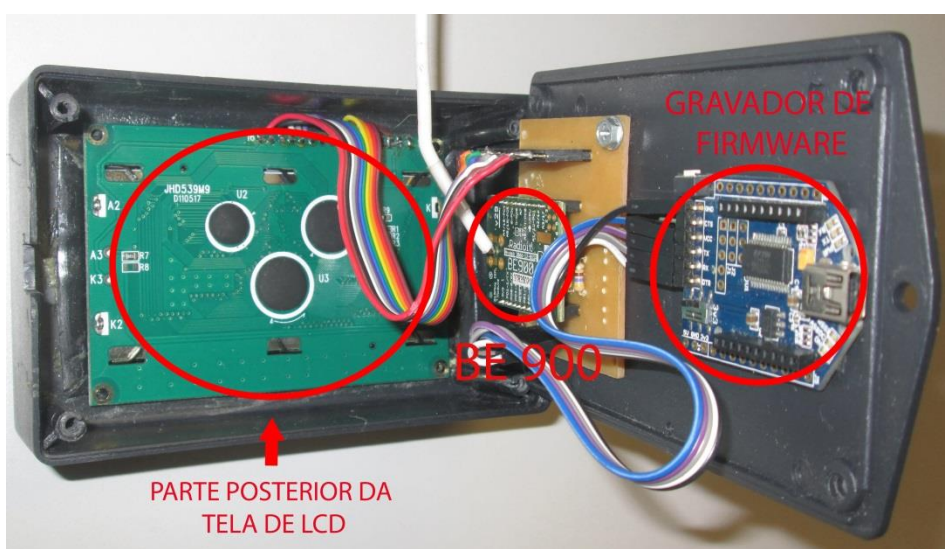
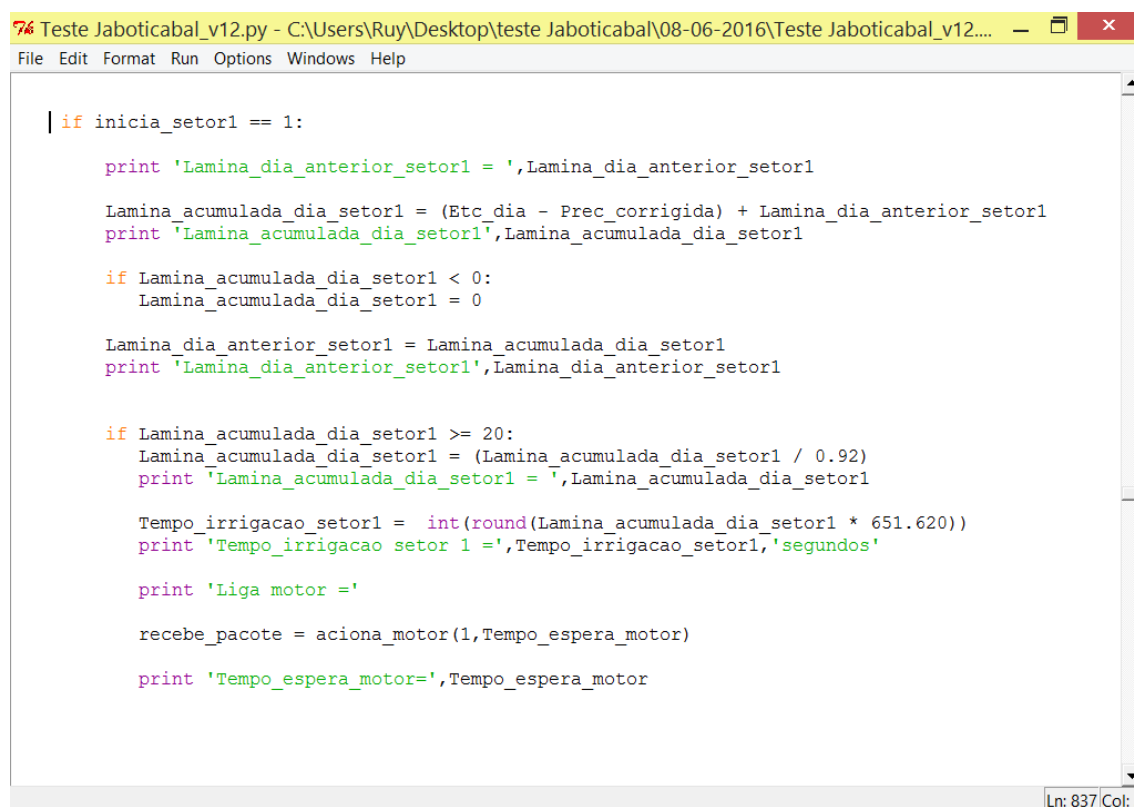


Figura 11d: Estação Base – vista interna

Na Figura 11e, podemos observar parte do programa computacional desenvolvido para gerenciar todo o sistema de controle. Neste estudo, foi utilizado o software *Python* e por meio dele que o controle do roteamento de dados foi realizado: o Nó Sensor envia um pacote de dados para a Estação Base, a Estação Base trata as informações, imprime na tela do tablet e se for o caso, envia um pacote de dados para o Nó Atuador para acionar ou desligar a bomba/válvula.



```

| if inicia_setor1 == 1:
    print 'Lamina_dia_anterior_setor1 = ',Lamina_dia_anterior_setor1
    Lamina_acumulada_dia_setor1 = (Etc_dia - Prec_corrigida) + Lamina_dia_anterior_setor1
    print 'Lamina_acumulada_dia_setor1',Lamina_acumulada_dia_setor1
    if Lamina_acumulada_dia_setor1 < 0:
        Lamina_acumulada_dia_setor1 = 0
    Lamina_dia_anterior_setor1 = Lamina_acumulada_dia_setor1
    print 'Lamina_dia_anterior_setor1',Lamina_dia_anterior_setor1
    if Lamina_acumulada_dia_setor1 >= 20:
        Lamina_acumulada_dia_setor1 = (Lamina_acumulada_dia_setor1 / 0.92)
        print 'Lamina_acumulada_dia_setor1 = ',Lamina_acumulada_dia_setor1
        Tempo_irrigacao_setor1 = int(round(Lamina_acumulada_dia_setor1 * 651.620))
        print 'Tempo_irrigacao setor 1 =',Tempo_irrigacao_setor1,'segundos'
        print 'Liga motor ='
        recebe_pacote = aciona_motor(1,Tempo_espera_motor)
        print 'Tempo_espera_motor=',Tempo_espera_motor

```

Figura 11e: Python – Software utilizado no controle dos dados

– Nó Atuador (Figuras 12a e 12b): responsável pelo acionamento da bomba e das válvulas.

Na Figura 12a podemos observar a vista externa do Nó atuador, contendo cinco sinalizadores, onde cada um corresponde a uma variável de controle:

- Sinalizador vermelho: setor 1
- Sinalizador azul: setor 2
- Sinalizador verde: setor 3
- Sinalizador branco: setor 4
- Sinalizador amarelo: bomba



Figura 12a: Nó Atuador – vista externa

Na Figura 12b, podemos visualizar a vista interna do Nó atuador, contendo dentre outros componentes, a BE 900 com a função de receptor (recebe as solicitações da Estação Base para acionar ou desligar a bomba e as válvulas), seis relés e dois transformadores. Os relés são os dispositivos responsáveis por disponibilizar as tensões de alimentação para cada uma das cinco saídas de controle (quatro válvulas e uma bomba), sendo que o sexto relé é tão somente para ser utilizado no caso da queima de algum dos outros cinco, sem a necessidade de uma nova soldagem na placa eletrônica. Como os relés disponibilizam 127 Vca ou 220 Vca, foi necessário inserirmos transformadores para reduzirem a tensão, haja vista que as válvulas somente são acionadas em 24 Vca. Bastaria apenas um para atender as quatro válvulas, mas desta forma, caso ocorresse algum problema com este único transformador, todo o sistema de irrigação estaria comprometido. Sendo assim, foi inserido um segundo, dividindo as quatro válvulas em dois grupos, ou seja, cada transformador aciona duas válvulas.



Figura 12b: Nó Atuador – vista interna

### 3.2. Calibração dos sensores

Importantes decisões são tomadas a partir de informações coletadas por meio de instrumentos de medida, das quais muitas das vezes são questionáveis devido à inexistência de rastreabilidade metrológica e confiabilidade, induzindo o usuário a uma falsa sensação de segurança nos dados coletados (BENTLEY, 1998). Portanto, ao analisarmos as incertezas das medições no processo de controle, na realidade estamos abordando a instrumentação com a mesma importância que a automação propriamente dita, conseqüentemente garantindo a confiabilidade dos dados da pesquisa. Partindo desse pressuposto, surgiu a necessidade da calibração dos sensores de temperatura e de precipitação utilizados no controlador automático de irrigação de pastagem.

O processo de calibração é caracterizado pela relação existente entre os valores medidos e as incertezas de medição, as quais caracterizam a dispersão dos

valores atribuídos a um mensurando (VOCABULÁRIO..., 2012). Sendo assim, são fornecidas as correções dos erros sistemáticos no intuito de se corrigir os dados medidos e evidenciar a confiabilidade das informações, assegurando que os sensores utilizados no sistema de irrigação estejam dentro de um critério aceitável.

O processo de calibração dos sensores de temperatura e de precipitação do controlador automático de irrigação de pastagem foi realizado nos laboratórios da área de metrologia ambiental do LIM (Laboratório de Instrumentação Meteorológica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC – Cachoeira Paulista/SP), buscando atender o padrão que possui rastreabilidade ao NVLAP - *National Voluntary Laboratory Accreditation Program*, dos EUA e um sistema que tem rastreabilidade à Rede Brasileira de Calibração, RBC, do INMETRO (ANEXO A e B).

A metodologia utilizada na calibração do sensor de temperatura foi baseada na comparação direta com um valor padrão de referência, por meio de uma câmara climática do fabricante Cincinnati Sub Zero, modelo ZPH-16-1.5HAC, conforme figuras 13a e 13b.



Figura 13a: Vista lateral da câmara climática utilizada na calibração do sensor de temperatura

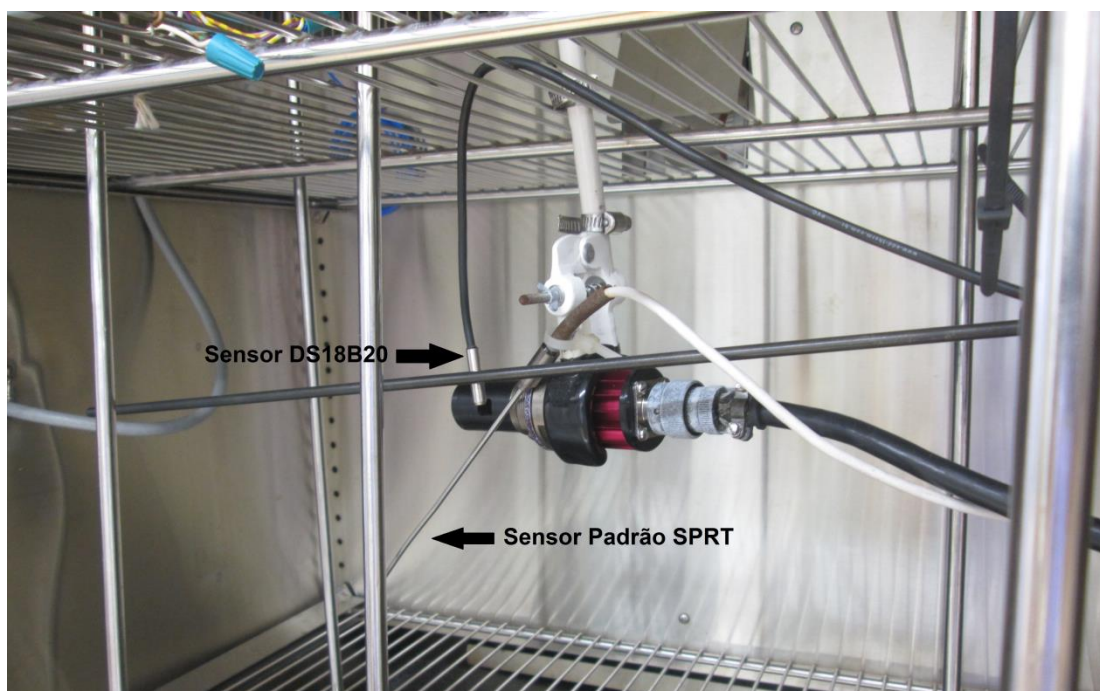


Figura 13b:      Sensor de Temperatura Padrão:      Sensor de Temperatura do  
                          SPRT (Standard Platinum Resistance      projeto de pesquisa:  
                          Thermometer)      Maxim Integrated  
                          Fabricante: Fluke      Modelo: DS18B20  
                          Modelo: 34420A / 5699

Foram analisados quatro valores de temperatura na sequência 20°C, 30°C, 40°C e 10°C, sendo que a justificativa do teste de 10°C ter sido realizado logo após o de 40°C, foi no intuito de se analisar a histerese entre os limites mínimo e máximo de temperatura.

Após 15 observações para cada valor analisado (20°C, 30°C, 40°C e 10°C), obteve-se o gráfico e equação de regressão linear, conforme é visualizado na figura 13c.

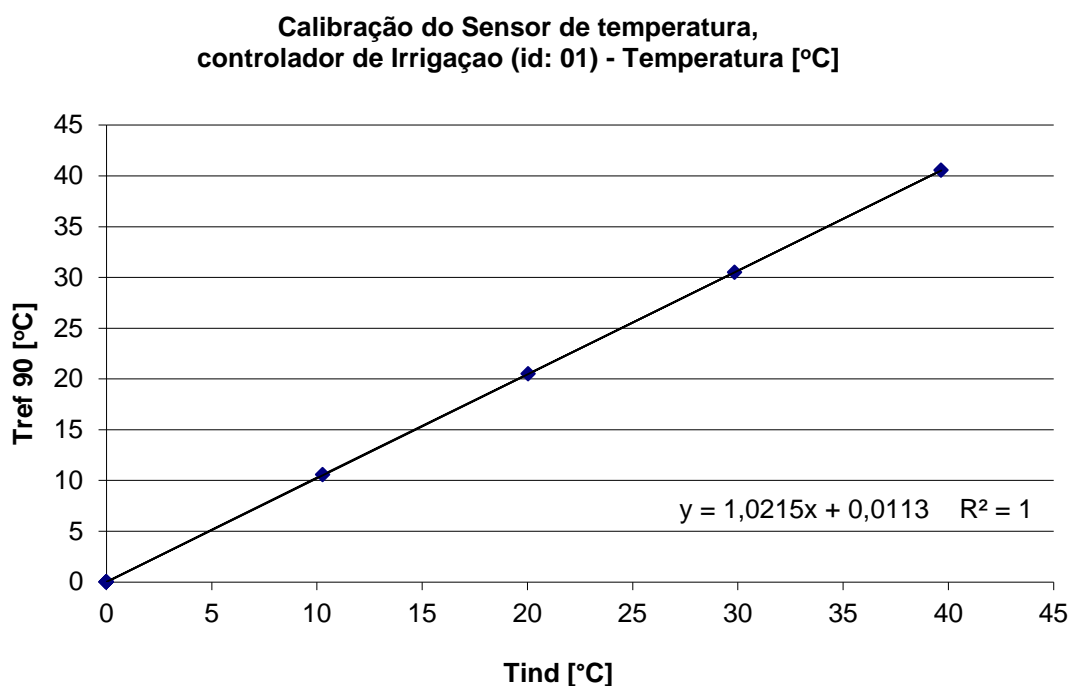


Figura 13c: Equação de regressão linear, obtida a partir da comparação entre o sensor padrão e o sensor do projeto de pesquisa

Já a metodologia utilizada na calibração do sensor de precipitação (Figura 14), foi baseada na simulação de um mesmo valor de precipitação, 227 ml, porém com intensidades diferentes: 2 RPM, 5 RPM e 15 RPM, com quatro repetições cada uma delas. Ressalta-se que nesse caso específico, a preocupação foi com precipitações abaixo de 20 mm, pois acima desse valor, a chuva supriria a necessidade de irrigação. Após os testes a resolução encontrada para cada basculada do pluviômetro foi de 0,49 mm.

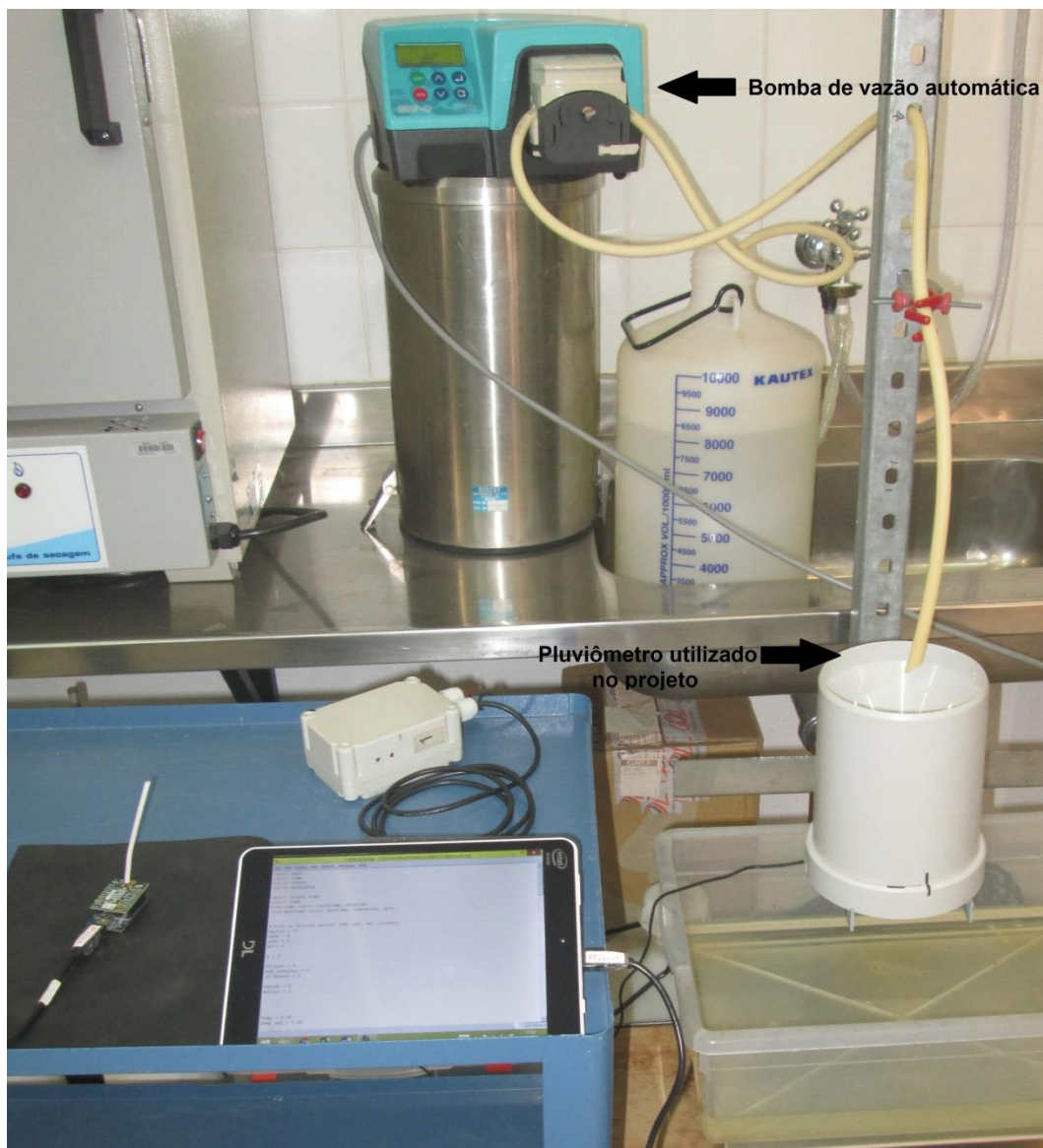


Figura 14: Aplicação das intensidades de precipitação

Portanto, sendo a metrologia uma ciência utilizada em qualquer área do conhecimento humano, de acordo com Kimothi (2002) e considerando que a base do controlador automático de irrigação são as medidas, concluímos que a calibração dos instrumentos exerce um papel fundamental para assegurar a confiabilidade das medidas realizadas. Sem a sua utilização, nesse caso específico, certamente os processos decisórios seriam induzidos ao erro, aplicando uma lâmina de água maior ou menor do que a necessária. Com isso podemos ressaltar a importância do estudo dos medidores, das variáveis meteorológicas (mensuradas) e os métodos aplicados para a observação da confiabilidade das medições dos sensores envolvidos.

### **3.3. Fluxogramas e modelo matemático das tarefas executadas pelo controlador**

O controlador proposto neste projeto de pesquisa utiliza tecnologia nacional de comunicação sem fio (BE 900) e supervisiona toda a área a ser irrigada com dois sensores (temperatura e precipitação). Sua característica inovadora é que caso seja detectada alguma precipitação durante o acionamento de um dos setores, além de desligar o sistema de irrigação (bomba e válvulas), no dia seguinte ele desconta da evapotranspiração da cultura, a quantidade de água precipitada, bem como desconta a quantidade de água que foi aplicada no dia anterior até o momento que antecedeu à precipitação. Caracterizando-o como sendo um controlador automático de irrigação com aplicação em taxa variável.

As tarefas realizadas pelo controlador podem ser visualizadas nos fluxogramas visualizados nas Figuras 15, 16, 17, 18 e 19.

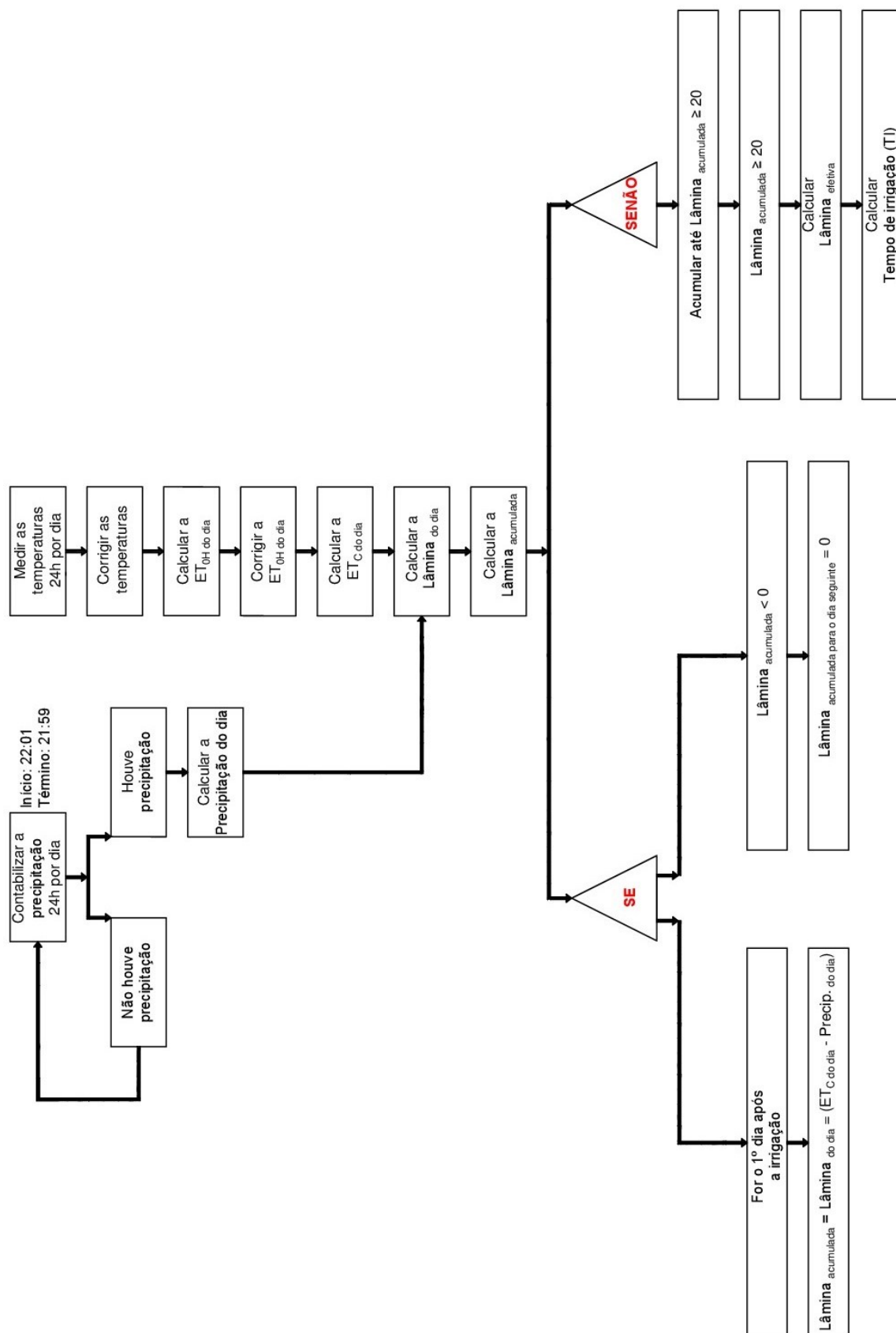


Figura 15: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador no intuito de calcular a lâmina de reposição de água e o tempo de irrigação

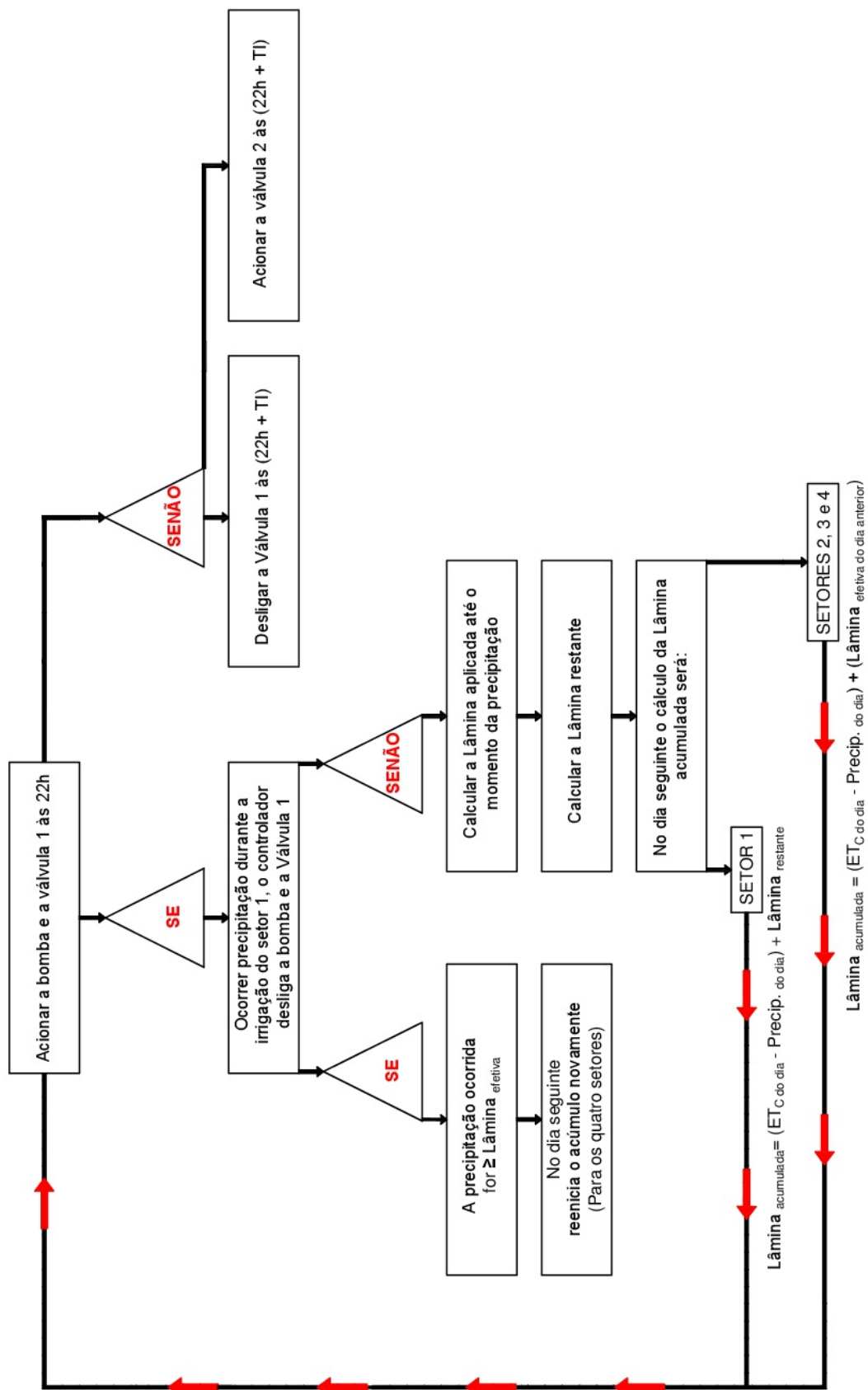


Figura 16: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 1

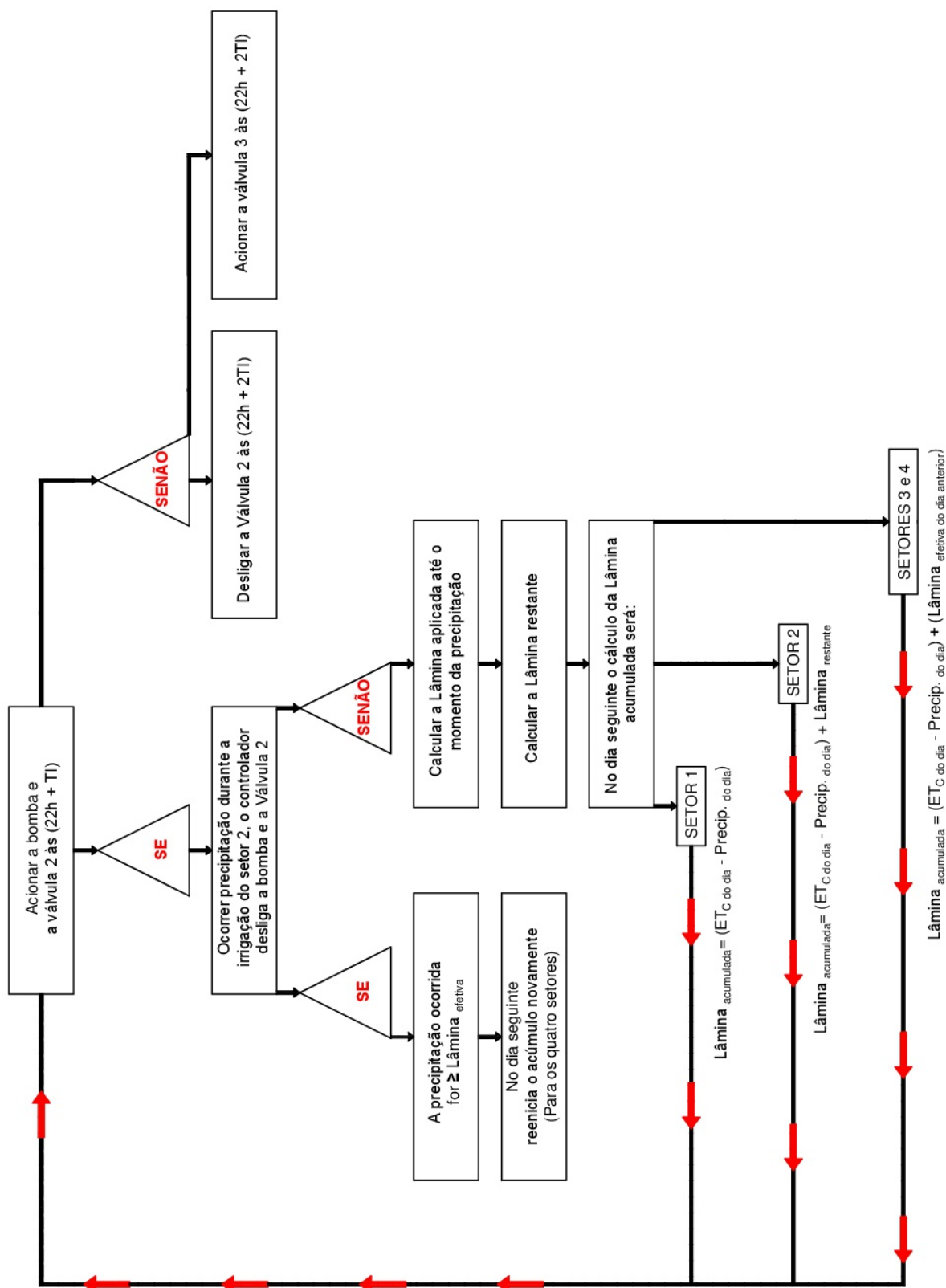


Figura 17: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 2

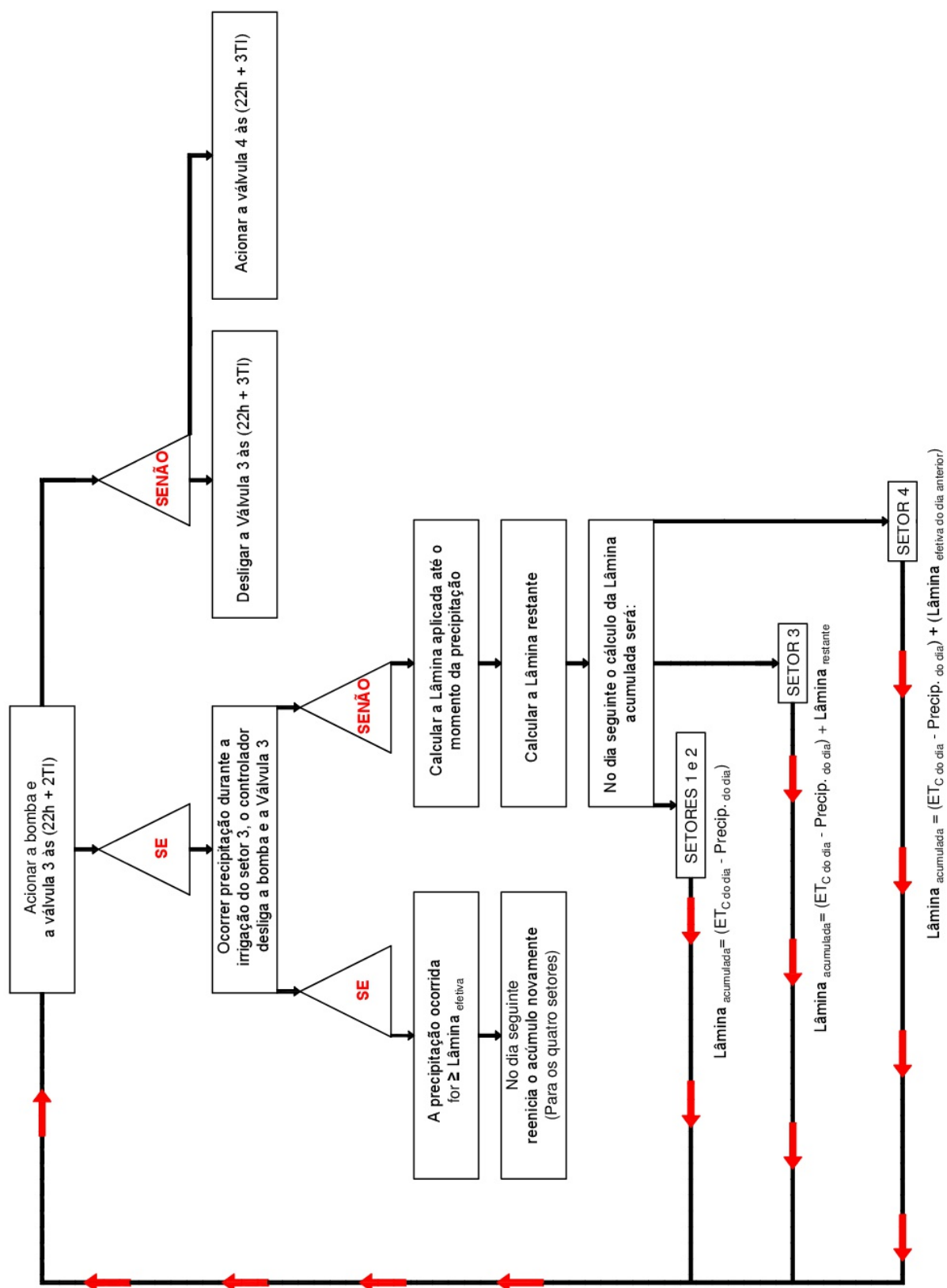


Figura 18: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 3

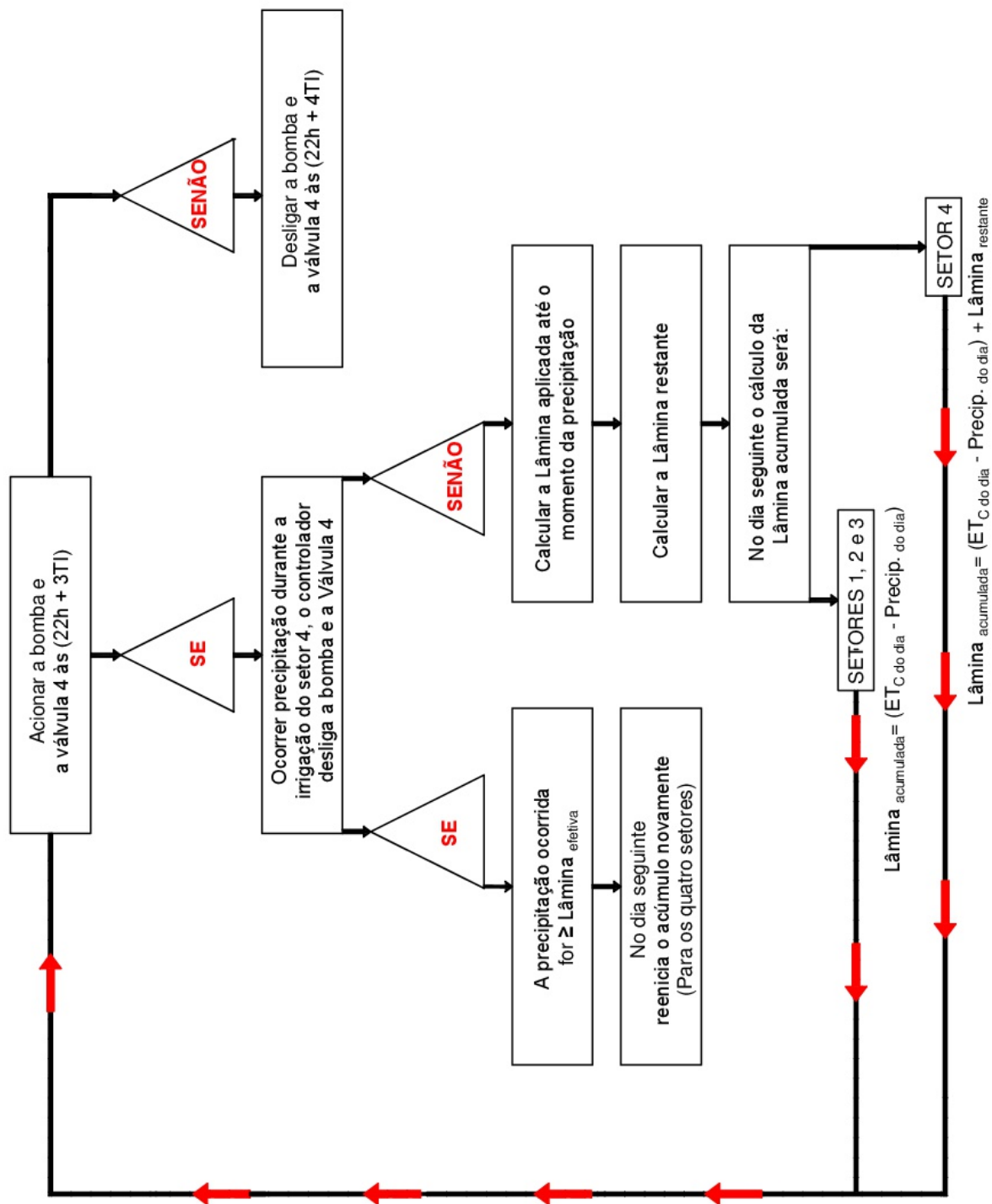


Figura 19: Fluxograma das rotinas executadas pelo controlador, no caso de ocorrência de precipitação, durante a irrigação do setor 4

### 3.3.1. Temperatura e precipitação

A temperatura foi medida por um sensor com sonda de aço inoxidável e à prova d'água, fabricado pela Maxim Integrated e foi instalado em uma estrutura metálica conforme figura 20. Esta estrutura contém um suporte de sustentação para o pluviômetro e um abrigo para o sensor de temperatura no intuito de impedir que os raios solares e às precipitações incidissem diretamente sobre ele, caso contrário os valores de temperatura não seriam condizentes com a realidade local.



Figura 20: Estrutura metálica de sustentação do Nó Sensor

Uma vez detectados os valores da temperatura, o Nó Sensor os envia para a Estação Base corrigi-los de acordo a equação de calibração obtida no processo de calibração realizada no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), conforme equações 1 e 2, para posterior utilização nos cálculos da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves.

$$T_{\text{Min corrigida}} = (T_{\text{Min}} \times 1,0215) + 0,0113 = \text{°C} \quad \text{Eq.01}$$

$$T_{\text{Máx corrigida}} = (T_{\text{Máx}} \times 1,0215) + 0,0113 = \text{°C} \quad \text{Eq.02}$$

Quanto às precipitações, após o processo de calibração, a resolução encontrada para cada basculada do pluviômetro foi de 0,49 mm, conforme equação 3:

$$\text{Precipitação}_{\text{do dia}} = \text{N}^{\circ} \text{ de basculadas} \times 0,49 = \text{mm} \quad \text{Eq.03}$$

Ressalta-se que para fins de cálculo, a precipitação é quantificada sempre de um dia para o outro, especificamente entre às 22h01 e 21h59. Portanto, uma ocorrência até às 21h59 é contabilizada nos cálculos do mesmo dia, enquanto que uma precipitação às 22h01 é contabilizada nos cálculos do dia seguinte.

### 3.3.2. Evapotranspiração de referência e da cultura

Embora seja consenso que a irrigação é uma prática favorável à produtividade das culturas, grande parte dos seus sistemas são manejados de forma inadequada. Nesse sentido, projetos de pesquisa que contemplem análise da quantificação do uso da água, tornam-se importantes para assegurar o abastecimento futuro (HERNANDEZ *et al.*, 2014).

Sendo a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), uma contabilização da perda da água evaporada pelo solo e a transpirada pela cultura, podemos concluir que trata-se de um importante agente regulador da disponibilidade de água no solo. Portanto, quantificarmos a água que deve ser repostada, no intuito de atender as necessidades das culturas irrigadas, é um dos principais parâmetros na relação hídrica do sistema solo-planta-atmosfera e conseqüentemente no gerenciamento dos sistemas de irrigação visando o uso sustentável dos recursos hídricos na agricultura.

Quanto ao processo de estimativa da evapotranspiração de referência, existem diversos métodos e a partir de estudos comparativos realizados entre eles, a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) parametrizou o

método de Penman-Monteith como sendo o método padrão para estimarmos a evapotranspiração de referência. Isso significa que independentemente do método escolhido, para obtermos valores estimados mais confiáveis, é necessário que façamos uma correlação com os valores obtidos pelo método de Penman-Monteith.

Turco, Perecin e Pinto Junior (2008) avaliaram quatro métodos de estimativa de evapotranspiração de referência e correlacionaram com o método Penman-Monteith, para o município de Jaboticabal/SP e o método de Hargreaves foi o que apresentou o melhor ajuste para a estimativa da  $ET_0$ , utilizando as metodologias de Vuolo (1996).

No entanto, o método de Penman-Monteith necessita de um conjunto de variáveis meteorológicas que nem sempre estão disponíveis para os produtores rurais (TURCO *et al.*, 2017). Por esse motivo, métodos mais simples que utilizam um número reduzido de variáveis, são muito utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência, proporcionando que não sejam investidos elevados valores na aquisição de estações meteorológicas.

Neste estudo foi utilizado o método de Hargreaves, conforme equação 04, por necessitar tão somente das variáveis temperatura atmosférica e radiação solar, sendo que esta última foi obtida em função da latitude local, a partir dos dados interpolados de Napier Shaw, citado por Ramos *et al.* (1989), tendo como parâmetro máximo da atmosfera, o 15º dia de cada mês entre as latitudes 10ºN e 40ºS. Portanto, na prática foi necessário apenas o monitoramento da temperatura atmosférica.

$$ET_{0H} = 0,0023 \times \frac{R_a}{59} \times (T_{Máx} - T_{Min})^{0,5} \times \left( \frac{T_{Máx} + T_{Min}}{2} + 17,8 \right) \quad \text{Eq.04}$$

Sendo:

$ET_{0H}$  = Evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$R_a$  = Radiação extraterrestre ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$T_{Máx}$  = Temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{Min}$  = Temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ )

O valor estimado da evapotranspiração de referência, foi ajustado (calibrado) em função da equação do modelo linear proposto por Turco *et al.* (2014), após análise de correlação dos valores diários de  $ET_0$  entre os métodos de Hargreaves e Penman-Monteith para o município de Jaboticabal/SP, conforme figura 21.

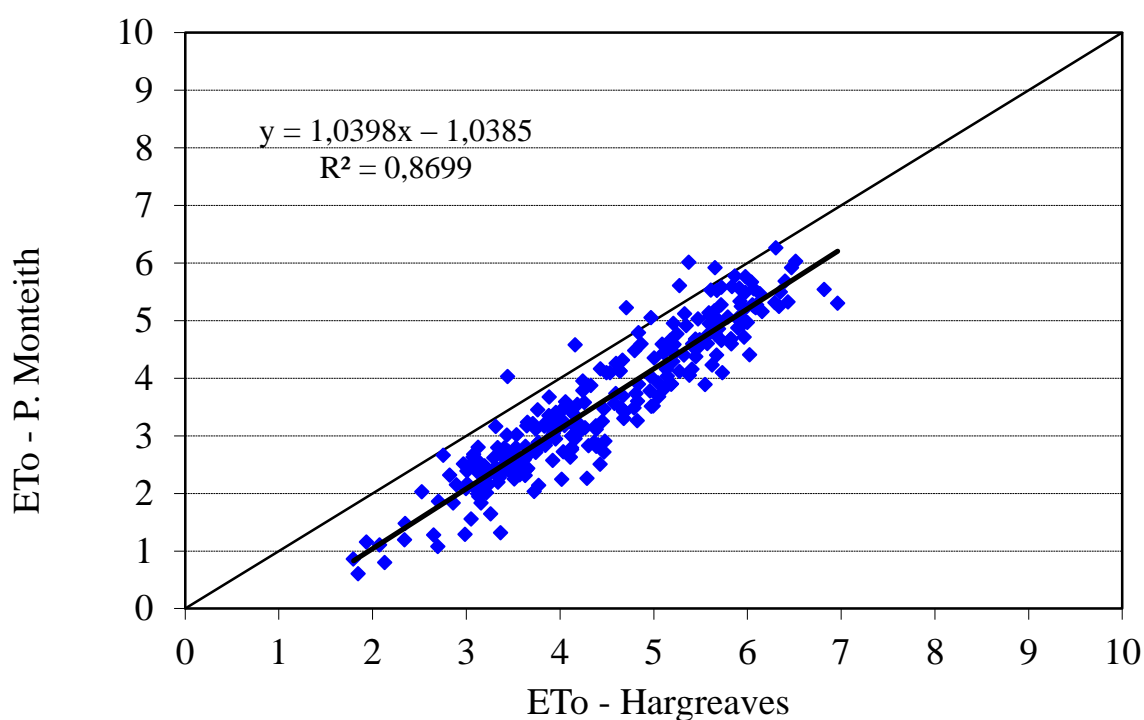


Figura 21: Correlação entre os valores diários da  $ET_0$  obtidos pelo método de Hargreaves em relação ao método de Penman-Monteith para o município de Jaboticabal/SP

Fonte: Turco *et al.* (2014)

Estimada a evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves e correlacionando-a com o método de Penman-Monteith, calculou-se a evapotranspiração da cultura pela equação 5:

$$ET_C = ET_{0H} \times K_C \quad \text{Eq.05}$$

Sendo:

$ET_C$  = Evapotranspiração da forrageira ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$ET_{0H}$  = Evaporanspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$K_C$  = Coeficiente da forrageira (adimensional)

O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) da forrageira foi fixado em 0.8 conforme proposto por Allen *et al.* (1998) e Drumond e Aguiar (2005), pois foi considerado que o sistema seria de pastejo rotacionado.

### 3.3.3. Intensidade de aplicação do aspersor

Nos sistemas de irrigação por aspersão, a lâmina de reposição é aplicada ao solo por meio de aspersores, cujas características de aplicação são alteradas a partir da pressão de serviço, vazão, diâmetro, distância entre os aspersores e distância entre as linhas laterais de irrigação.

Neste estudo, utilizou-se um aspersor do fabricante Naandanjain modelo 5035, conforme Figura 22, cujas características retiradas da tabela 1, são as seguintes:

- a) Uniformidade de distribuição entre 88 e 92%;
- b) Dimensões do bocal: 4,5 x 2,5 mm;
- c) Espaçamento entre os aspersores: 18m;
- d) Espaçamento entre linhas laterais: 18m;
- e) Pressão máxima admitida:  $3,0 \text{ kgfcm}^{-2} = 30 \text{ mca}$ ;
- f) Vazão proporcionada:  $1,790 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ .



Figura 22: Aspersor modelo 5035 SD (imagem meramente ilustrativa)

Tabela 1: Características do aspersor utilizado neste estudo  
 Fonte: Naandanjain

Luva de proteção	Bocal (mm)	P (bar)	Q (m <sup>3</sup> /h)	D (m)	Espaçamento (m)						
					12x15	12x18	15x15	15x18	18x18	20x20	
Vermelho	3,5x2,5 Azul	3	1,240	27,2	6,9	5,7	5,5	4,6	3,8	3,1	
		4	1,430	27,2	7,9	6,6	6,4	5,3	4,4	3,6	
		5	1,620	27,2	9,0	7,5	7,2	6,0	5,0	4,1	
	4,0x2,5 Azul	3	1,490	28,0	8,3	6,9	6,6	5,5	4,6	3,7	
		4	1,740	29,0	9,7	8,1	7,7	6,4	5,4	4,4	
		5	1,950	29,2	10,8	9,0	8,7	7,2	6,0	4,9	
Preto	4,5x2,5 Marron	3	1,790	29,7	9,9	8,3	8,0	6,6	5,5	4,5	
		4	2,070	30,2	11,5	9,6	9,2	7,7	6,4	5,2	
		5	2,320	32,2	12,9	10,7	10,3	8,6	7,2	5,8	
	5,0x2,5 Roxo	3	2,110	31,5	11,7	9,8	9,4	7,8	6,5	5,3	
		4	2,400	33,2	13,3	11,1	10,7	8,9	7,4	6,0	
		5	2,690	35,2	14,9	12,5	12,0	10,0	8,3	6,7	
	5,5x2,5 Laranja	3	2,390	32,2	13,3	11,1	10,6	8,9	7,4	6,0	
		4	2,760	34,2	15,3	12,8	12,3	10,2	8,5	6,9	
		5	3,090	35,0	17,2	14,3	13,7	11,4	9,5	7,7	
	6,0x2,5 Vermelho	3	2,700	34,2	15,0	12,5	12,0	10,0	8,3	6,8	
		4	3,160	36,0	17,6	14,6	14,0	11,7	9,8	7,9	
		5	3,540	34,0	19,7	16,4	15,7	13,1	10,9	8,9	
	Código de cores – Uniformidade de distribuição			CU > 92%	CU 88 - 92%	CU 85 - 88%	CU < 85%				

Intensidade de aplicação

Uma vez definido o aspersor e de posse das suas características, foi calculada a intensidade de aplicação:

$$\text{Intensidade de Aplicação} = \frac{\text{Vazão}}{\text{Espaçamento}_{\text{Entre aspersores}} \times \text{Espaçamento}_{\text{Entre linhas}}} \quad \text{Eq.06}$$

$$\text{Intensidade de Aplicação} = \frac{1,79 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}\text{)}}{18\text{(m)} \times 18\text{(m)}} = \frac{1,79 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1}\text{)}}{324\text{(m}^2\text{)}} = \frac{1,79 \text{ (m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}\text{)}}{324}$$

$$\text{Intensidade de Aplicação} = \frac{1,79 \text{ (m h}^{-1}\text{)}}{324}$$

Considerando que 1 metro é igual a 1000 mm, temos que:

$$\text{Intensidade de Aplicação} = \frac{1,79 \text{ (m)} \frac{1000\text{(mm)}\text{(h}^{-1}\text{)}}{1\text{(m)}}}{324} = \frac{1,79 \times 1000\text{(mmh}^{-1}\text{)}}{324}$$

$$\text{Intensidade de Aplicação} = \frac{1790 \text{ (mmh}^{-1}\text{)}}{324}$$

Considerando que o tempo do acionamento da bomba foi contabilizado em segundos e não em horas, temos:

$$\text{Intensidade de Aplicação} = \frac{1790}{324} \left( \frac{\text{mm}}{\text{h}} \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right) = \frac{1790}{324 \times 3600} \left( \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right)$$

$$\text{Intensidade de Aplicação} = 0,001535 \text{ (mms}^{-1}\text{)}$$

Portanto, para sabermos o valor de uma lâmina de água aplicada por esse aspersor especificamente, basta multiplicarmos o tempo em que a irrigação permaneceu acionada pela intensidade de aplicação do aspersor:

$$\text{Lâmina aplicada} = \text{Tempo}_{\text{Irrigação}} \times \text{Intensidade de Aplicação}_{\text{Aspersor}} = \text{mm} \quad \text{Eq.07}$$

$$\text{Lâmina aplicada} = \text{Tempo}_{\text{Irrigação}} \text{ (s)} \times \frac{1790}{324 \times 3600} \left( \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) = \text{mm}$$

ou

$$\text{Lâmina aplicada} = \text{Tempo}_{\text{Irrigação}} \text{ (s)} \times 0,001535 \left( \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) = \text{mm}$$

### 3.3.4. Lâmina de reposição e tempo de irrigação (TI)

A agricultura irrigada somente será praticada de forma correta, se forem adotados critérios de manejo, visando possibilitar a aplicação da água somente no momento certo e na quantidade necessária. Portanto, sendo a agricultura uma grande consumidora de água, o ideal é que o manejo da irrigação seja alterado conforme a necessidade hídrica da cultura.

Neste projeto de pesquisa, a metodologia utilizada no manejo da irrigação foi estabelecida a partir do acúmulo diário entre a evapotranspiração da cultura e a precipitação, conforme equação 08:

$$\text{Lâmina}_{\text{do dia}} = \text{ET}_{\text{C do dia}} - \text{Precipitação}_{\text{do dia}} = \text{mm} \quad \text{Eq.08}$$

Ressaltando que todas as vezes em que a lâmina do dia resultou em um valor negativo, ou seja, quando o valor da precipitação foi maior do que a evapotranspiração diária da cultura, a lâmina do dia foi considerada como “zero”. A justificativa é por entendermos que nestes casos, o excesso de água seria drenado pelo solo ou escoado em sua superfície.

Estabelecida a lâmina de reposição diária, popularmente conhecida como lâmina líquida, ao invés do acionamento ser realizado diariamente, foi considerado um acúmulo máximo de 20 mm para iniciar a irrigação. No entanto, vale ressaltar que trata-se apenas de um valor referencial no intuito do controlador acionar a irrigação, portanto pode ser alterado para cada tipo de solo, a partir da análise da curva de retenção. Sendo assim, o acúmulo da lâmina de reposição foi estabelecido pela equação 09:

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada}} = \sum \text{Lâmina}_{\text{dos dias}} = \text{mm} \quad \text{Eq.09}$$

Na mesma lógica do cálculo da lâmina diária, todas as vezes em que a lâmina acumulada resultou em um valor negativo, foi considerada como “zero” a lâmina acumulada para o dia seguinte, ou seja, sendo necessário reiniciar o acúmulo.

Outro aspecto a ser ressaltado é que esse valor acumulado trata-se de uma lâmina de reposição necessária para suprir a evapotranspiração da forrageira, mas sem considerar algumas perdas como, por exemplo, o arraste pelo vento (arrastamento das gotas pelo vento) e a desuniformidade de distribuição (falta de uniformidade na aplicação da água). Portanto, ao considerarmos tais perdas na lâmina de reposição acumulada, um novo valor será calculado e denominado de lâmina efetiva aplicada, popularmente conhecida como lâmina bruta, conforme equação 10:

$$\text{Lâmina}_{\text{efetiva aplicada}} = \frac{\text{Lâmina}_{\text{acumulada}}}{\text{Eficiência de aplicação}} = \text{mm} \quad \text{Eq.10}$$

Foi considerada para este estudo, uma eficiência de aplicação de 92% conforme tabela 1, mas que obviamente pode ser alterado para outro valor, de acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante do aspersor a ser utilizado.

Este valor para a eficiência de aplicação justifica-se, pois foi considerado que o sistema de irrigação seria acionado somente no período noturno, devido a uma menor incidência de ventos. Desta forma, conseqüentemente alcançaríamos menores tarifações de energia elétrica.

Por fim, foi calculado o tempo de irrigação (TI) necessário para que o sistema de irrigação permanecesse acionado e fornecesse a quantidade de água o suficiente para suprir a demanda da forrageira, o qual foi estabelecido a partir da equação 07, resultando na equação 11:

$$\text{Lâmina aplicada} = \text{Tempo}_{\text{irrigação}}(\text{s}) \times \frac{1790}{324 \times 3600} \left( \frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) = \text{mm}$$

$$\text{Tempo}_{\text{irrigação}} = \text{Lâmina aplicada} \times \frac{324 \times 3600}{1790}$$

$$\text{Tempo}_{\text{irrigação}} = \text{Lâmina aplicada} \times 651,620 = \text{s}$$

**Eq.11**

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Avaliação do modelo matemático e eficiência de controle

Uma vez definida as equações a serem executadas pelas rotinas do controlador em cada firmware dos módulos de comunicação (Nó Sensor, Nó Atuador e Estação Base), foram realizados 8 (oito) testes, dos quais 7 (sete) para avaliar o modelo matemático e a eficiência de controle e 1 (um) para avaliar o alcance de comunicação entre os Nós:

- a) Teste 1: sistema de irrigação sem ocorrência de precipitação;
- b) Teste 2: sistema de irrigação com precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia;
- c) Teste 3: sistema de irrigação com precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia;
- d) Teste 4: sistema de irrigação com precipitação durante o acionamento do setor 1;
- e) Teste 5: sistema de irrigação com precipitação durante o acionamento do setor 2;
- f) Teste 6: sistema de irrigação com precipitação durante o acionamento do setor 3;
- g) Teste 7: sistema de irrigação com precipitação durante o acionamento do setor 4;
- h) Teste 8: avaliação de alcance entre os módulos de comunicação.

Os testes de avaliação do modelo matemático e da eficiência de controle foram realizados dentro do Laboratório de Instrumentação, Aquisição e Processamento (LIAP) do Departamento de Engenharia Rural, conforme figuras 23, 24, 25 e 26. No intuito de se obter a ambiência externa no sensor de temperatura, foi utilizado o equipamento de Banho Maria para elevar a temperatura da água e posteriormente água fria para reduzir.

Ressalta-se que o quadro de partida da figura 23, foi desenvolvido para retratar a realidade de uma propriedade rural, pois no caso de falha no acionamento automático, o sistema de irrigação deve ser garantido pelo acionamento manual.

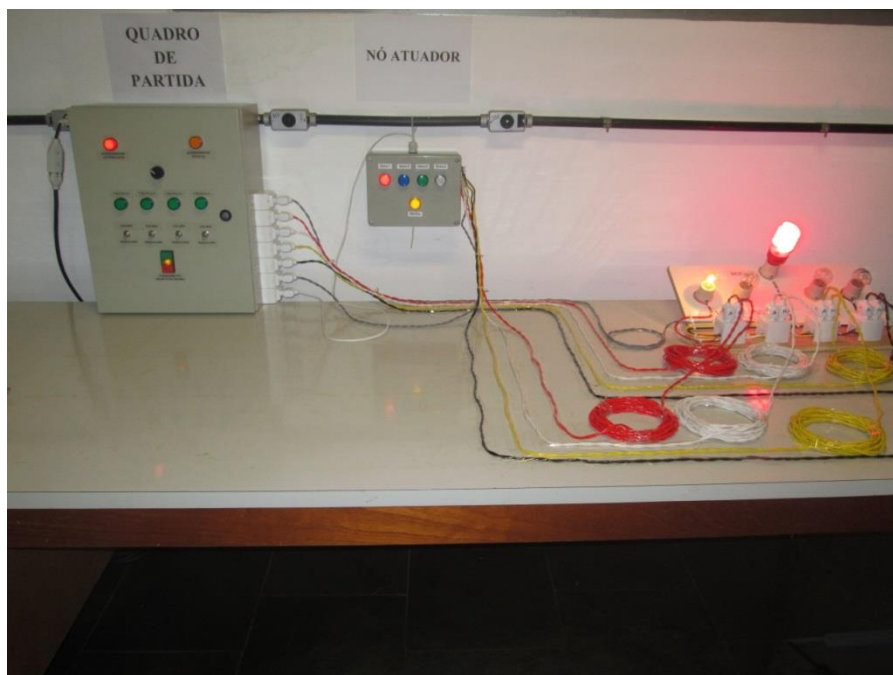


Figura 23: Acionamento automático do Setor 1 – Teste em Laboratório

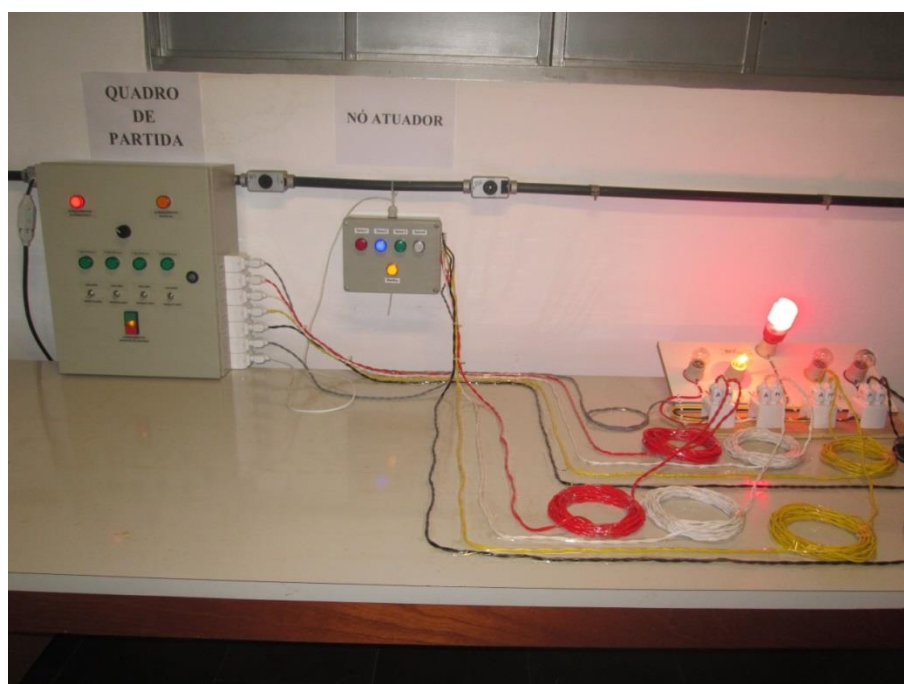


Figura 24: Acionamento automático do Setor 2 – Teste em Laboratório

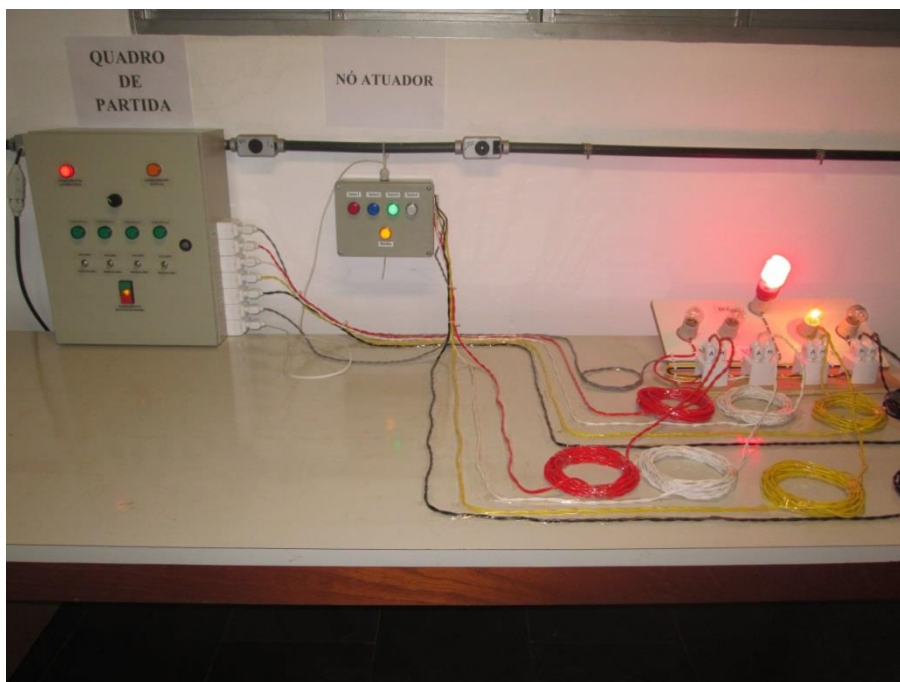


Figura 25: Acionamento automático do Setor 3 – Teste em Laboratório

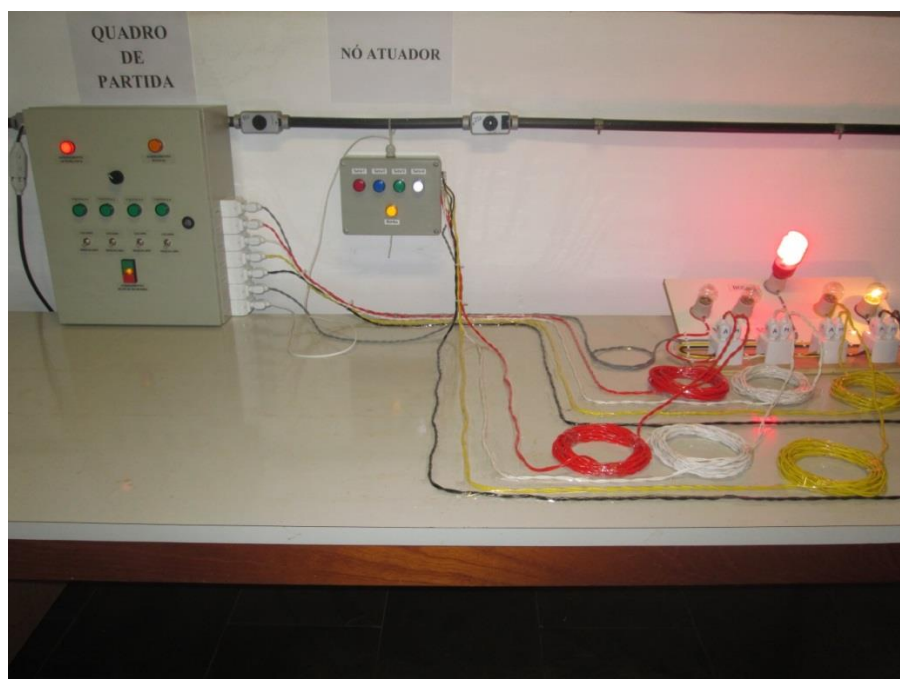
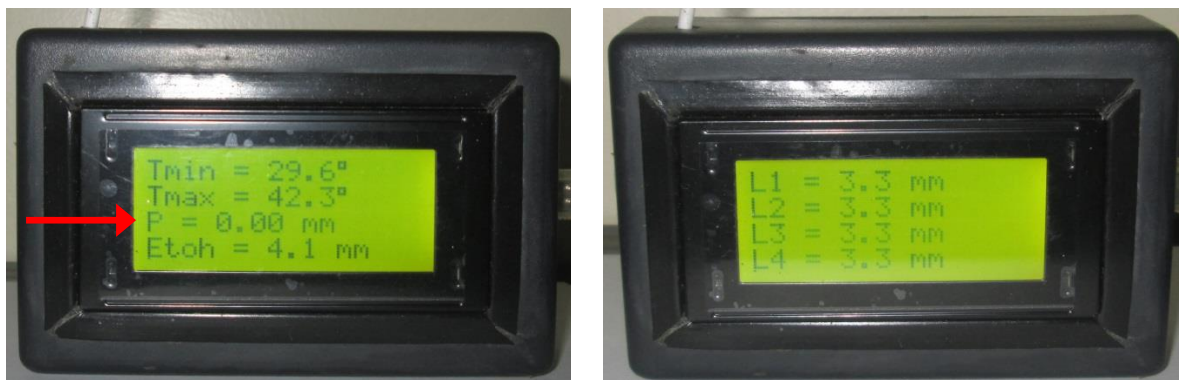


Figura 26: Acionamento automático do Setor 4 – Teste em Laboratório

A seguir estão disponíveis as imagens e comprovações da eficiência matemática e de controle de todos os 8 (oito) testes realizados:

#### 4.1.1. Atuação do controlador de irrigação, sem ocorrência de precipitação durante o acúmulo da lâmina (Teste 1):



Grupo 1

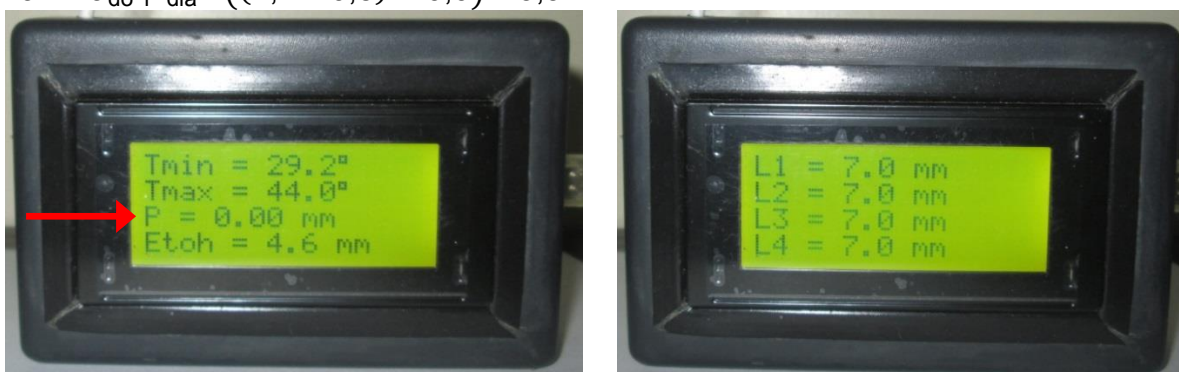
Grupo 2

Figura 27: Variáveis do 1º dia

#### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{do 1º dia}} = ((\text{ET}_{\text{OH do 1º dia}} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 1º dia}})$$

$$\text{Lâmina}_{\text{do 1º dia}} = ((4,1 \times 0,8) - 0,0) = 3,3 \text{ mm}$$



Grupo 1

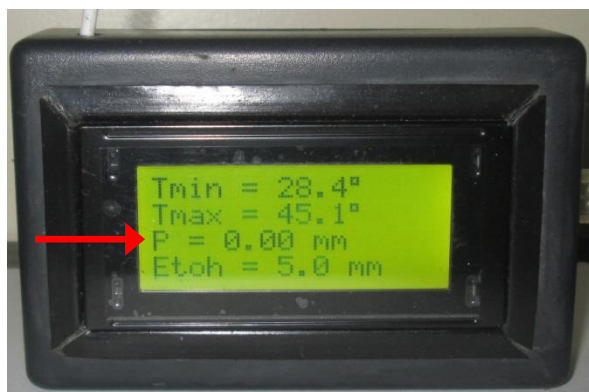
Grupo 2

Figura 28: Variáveis do 2º dia

#### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 2º dia}} = ((\text{ET}_{\text{OH do 2º dia}} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 2º dia}}) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 1º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 2º dia}} = ((4,6 \times 0,8) - 0,0) + 3,3 = 7,0 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 29: Variáveis do 3º dia

### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 3º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 3º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 3º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 2º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 3º dia}} = \left( (5,0 \times 0,8) - 0,0 \right) + 7,0 = 11,0 \text{ mm}$$



Grupo 1



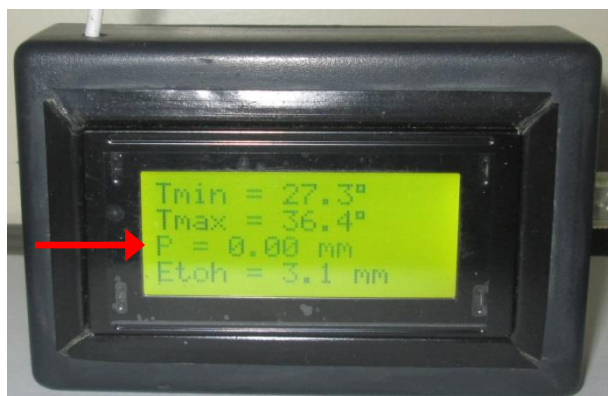
Grupo 2

Figura 30: Variáveis do 4º dia

### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 4º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 4º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 4º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 3º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 4º dia}} = \left( (4,1 \times 0,8) - 0,0 \right) + 11,0 = 14,3 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 31: Variáveis do 5º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 5º dia}} = ((ET_{0H} \text{ do 5º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 5º dia}}) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 4º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 5º dia}} = ((3,1 \times 0,8) - 0,0) + 14,3 = 16,7 \text{ mm}$$



Grupo 1



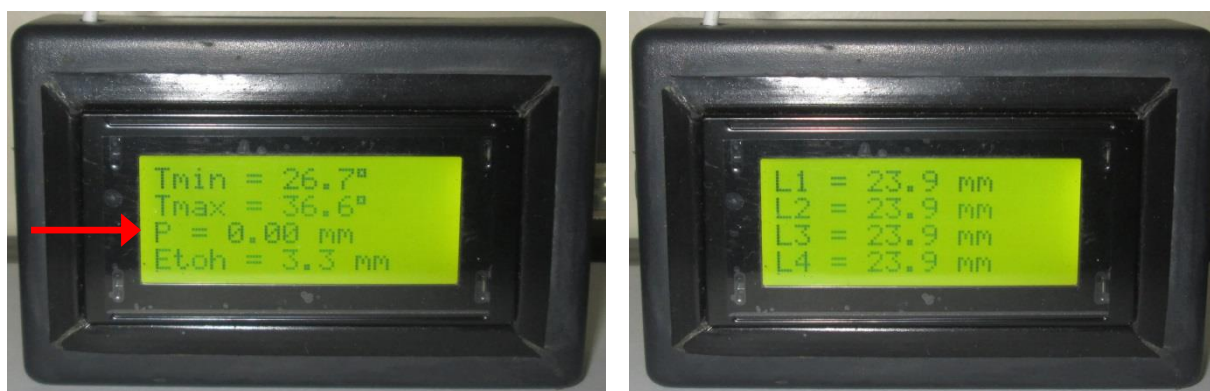
Grupo 2

Figura 32: Variáveis do 6º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 6º dia}} = ((ET_{0H} \text{ do 6º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 6º dia}}) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 5º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 6º dia}} = ((3,3 \times 0,8) - 0,0) + 16,7 = 19,3 \text{ mm}$$



Grupo 1

Grupo 2

Figura 33: Variáveis do 7º dia

### Comprovação dos resultados:

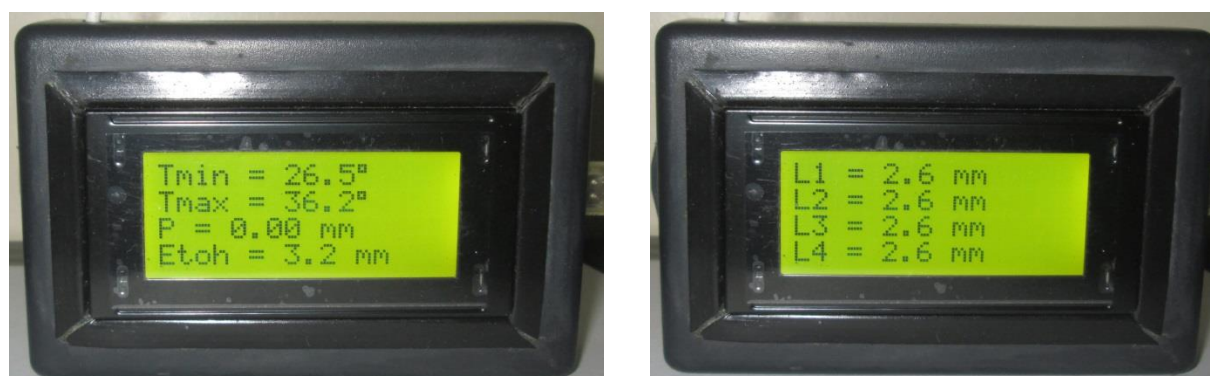
$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 7º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 7º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 7º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 6º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 7º dia}} = \left( (3,3 \times 0,8) - 0,0 \right) + 19,3 = 21,9 \text{ mm}$$

Ao detectar que a lâmina acumulada foi maior do que o valor de referência de 20 mm, o controlador calcula um novo valor da lâmina acumulada, já considerando a eficiência de aplicação de 92%:

$$\text{Lâmina efetiva acumulada} = 21,9 / 0,92 = 23,9 \text{ mm}$$

#### 4.1.2. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação menor do que a lâmina acumulada do dia (Teste 2):



Grupo 1

Grupo 2

Figura 34: Variáveis do 1º dia

### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{do 1º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 1º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 1º dia}} \right)$$

$$\text{Lâmina}_{\text{do 1º dia}} = \left( (3,2 \times 0,8) - 0,0 \right) = 2,6 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 35: Variáveis do 2º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 2º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 2º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 2º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 1º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 2º dia}} = \left( (3,5 \times 0,8) - 0,0 \right) + 2,6 = 5,4 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 36: Variáveis do 3º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 3º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 3º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 3º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 2º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 3º dia}} = \left( (4,6 \times 0,8) - 0,0 \right) + 5,4 = 9,1 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 37: Variáveis do 4º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 4º dia}} = \left( (\text{ET}_{\text{OH do 4º dia}} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 4º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 3º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 4º dia}} = ((4,7 \times 0,8) - 0,0) + 9,1 = 12,8 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 38: Variáveis do 5º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 5º dia}} = \left( (\text{ET}_{\text{OH do 5º dia}} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 5º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 4º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 5º dia}} = ((4,7 \times 0,8) - 4,9) + 12,8 = 11,7 \text{ mm}$$

4.1.3. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação maior do que a lâmina acumulada do dia (Teste 3):



Grupo 1



Grupo 2

Figura 39: Variáveis do 1º dia

### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{do 1º dia}} = ((\text{ET}_{\text{OH do 1º dia}} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 1º dia}})$$

$$\text{Lâmina}_{\text{do 1º dia}} = ((5,2 \times 0,8) - 0,0) = 4,1 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 40: Variáveis do 2º dia

### Comprovação dos resultados:

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 2º dia}} = ((\text{ET}_{\text{OH do 2º dia}} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 2º dia}}) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 1º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 2º dia}} = ((4,8 \times 0,8) - 0,0) + 4,1 = 7,9 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 41: Variáveis do 3º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 3º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 3º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 3º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 2º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 3º dia}} = \left( (4,6 \times 0,8) - 0,0 \right) + 7,9 = 11,6 \text{ mm}$$



Grupo 1



Grupo 2

Figura 42: Variáveis do 4º dia

**Comprovação dos resultados:**

$$\text{Lâmina}_{\text{acum. do 4º dia}} = \left( (ET_{0H} \text{ do 4º dia} \times K_C) - \text{Precipitação}_{\text{do 4º dia}} \right) + \text{Lâmina}_{\text{acum. do 3º dia}}$$

$$\text{Lâmina}_{\text{acumulada do 4º dia}} = \left( (4,7 \times 0,8) - 24,5 \right) + 11,6 = -9,1 = 0,0 \text{ mm}$$

#### 4.1.4. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 1 (Teste 4):

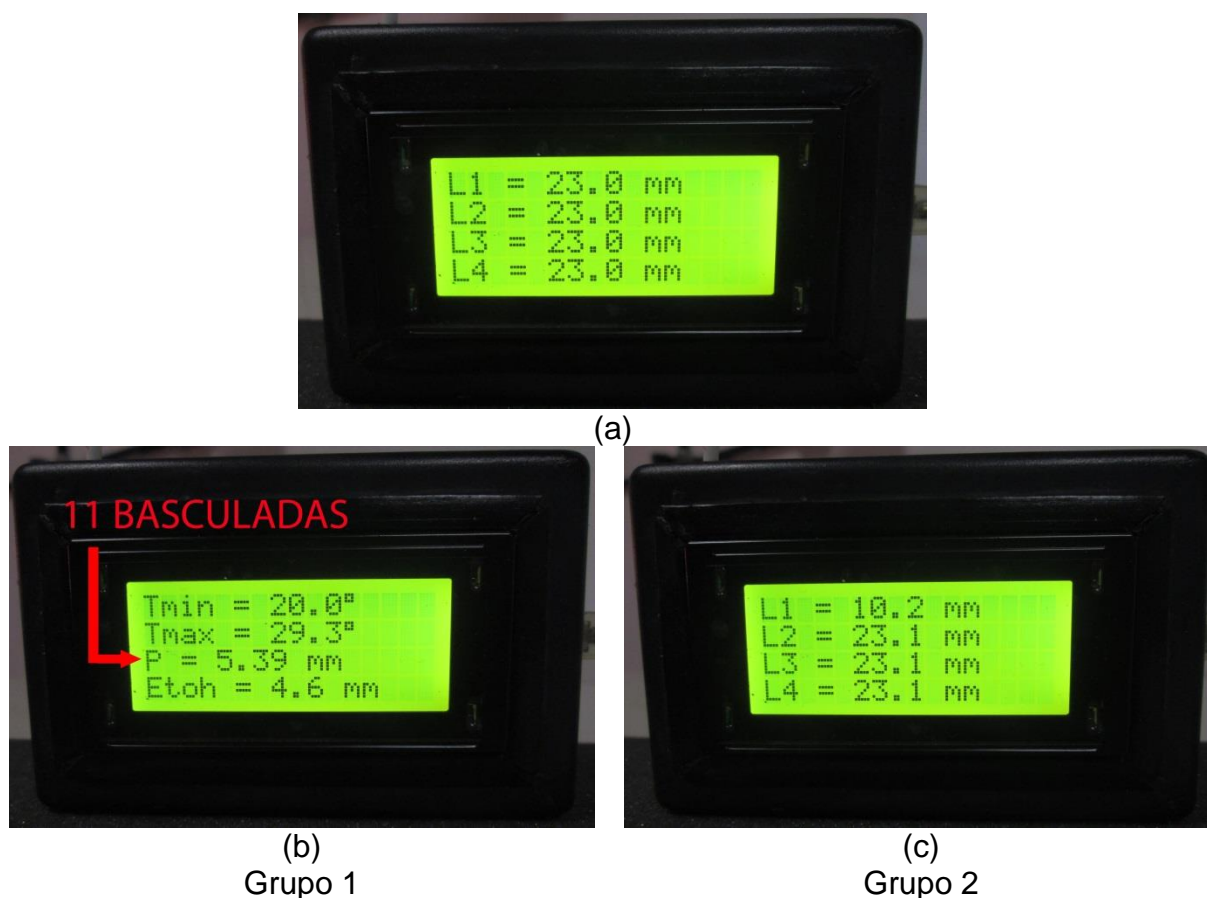


Figura 43: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 1

#### Comprovação dos resultados:

##### SETOR 1:

$$\text{Lâmina acum. do dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia}) + (\text{Lâmina acum. do dia anterior} - (\text{Lâmina aplicada até o momento da precipitação}))$$

$$\text{Lâmina acum. dia seguinte} = ((4,6 \times 0,8) - 5,39) + (23,0 - (7198 \times 0,001535)) = 10,2 \text{ mm}$$

##### SETORES 2, 3 e 4:

$$\text{Lâmina acumulada dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precip. do dia}) + (\text{Lâmina acum. do dia anterior})$$

$$\text{Lâmina acumulada dia seguinte} = ((4,6 \times 0,8) - 5,39) + (23,0) = 21,29 \text{ mm}$$

$$\text{Lâmina efetiva acumulada} = 21,29 / 0,92 = 23,1 \text{ mm}$$

Ressalta-se que para os testes 4, 5, 6 e 7, a lâmina aplicada até o momento que antecedeu a precipitação, foi calculada a partir da equação 07, constante na página 45.

#### 4.1.5. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 2 (Teste 5):

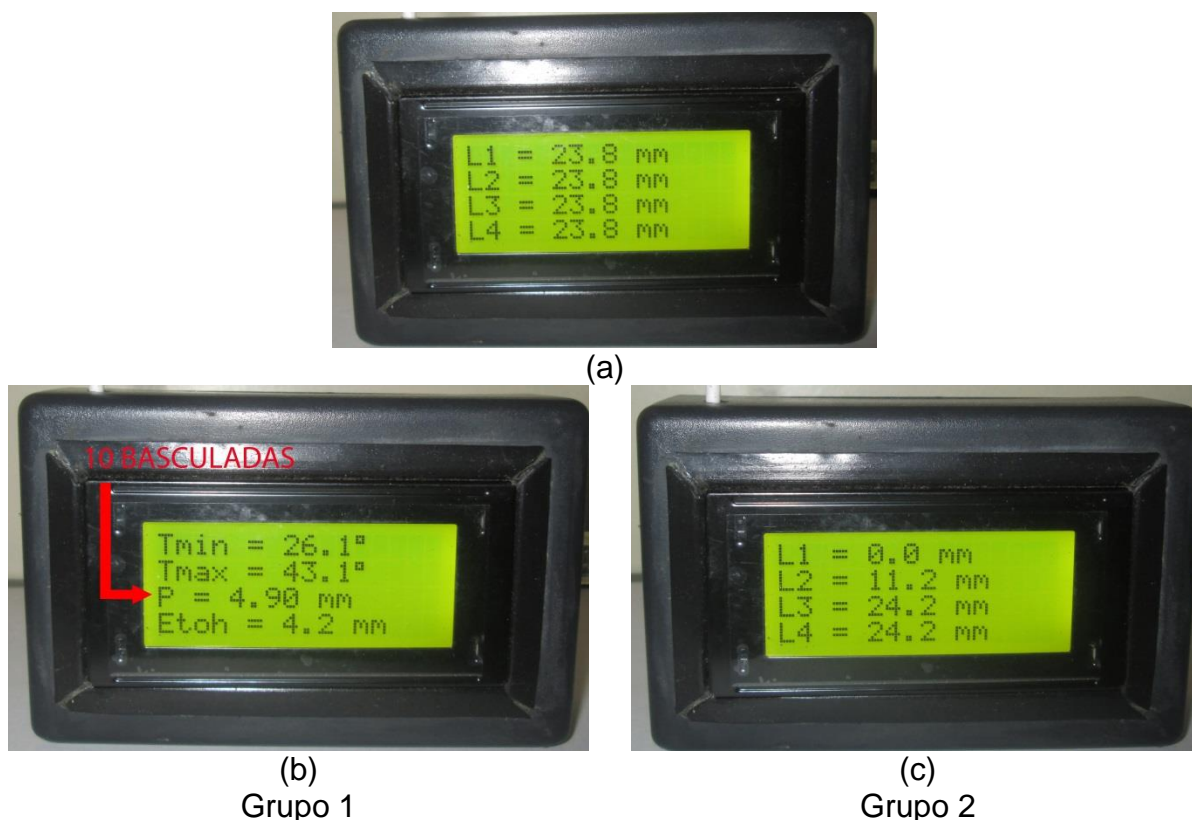


Figura 44: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 2

#### Comprovação dos resultados:

##### SETOR 1:

$$\text{Lâmina acumulada do dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia})$$

$$\text{Lâmina acumulada do dia seguinte} = ((4,2 \times 0,8) - 4,9) = -1,5 = 0,0 \text{ mm}$$

##### SETOR 2:

$$\text{Lâmina acum. do dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia})$$

$$+ (\text{Lâmina acum. do dia anterior} - (\text{Lâmina aplicada até o momento da precipitação}))$$

$$\text{Lâmina acum. dia seguinte} = ((4,2 \times 0,8) - 4,9) + (23,8 - (7202 \times 0,001535)) = 11,2 \text{ mm}$$

##### SETORES 3 e 4:

$$\text{Lâmina acumulada dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precip. do dia})$$

$$+ (\text{Lâmina acumulada do dia anterior})$$

$$\text{Lâmina acumulada dia seguinte} = ((4,2 \times 0,8) - 4,9) + (23,8) = 22,3 \text{ mm}$$

$$\text{Lâmina efetiva acumulada} = 22,3 / 0,92 = 24,2 \text{ mm}$$

#### 4.1.6. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 3 (Teste 6):

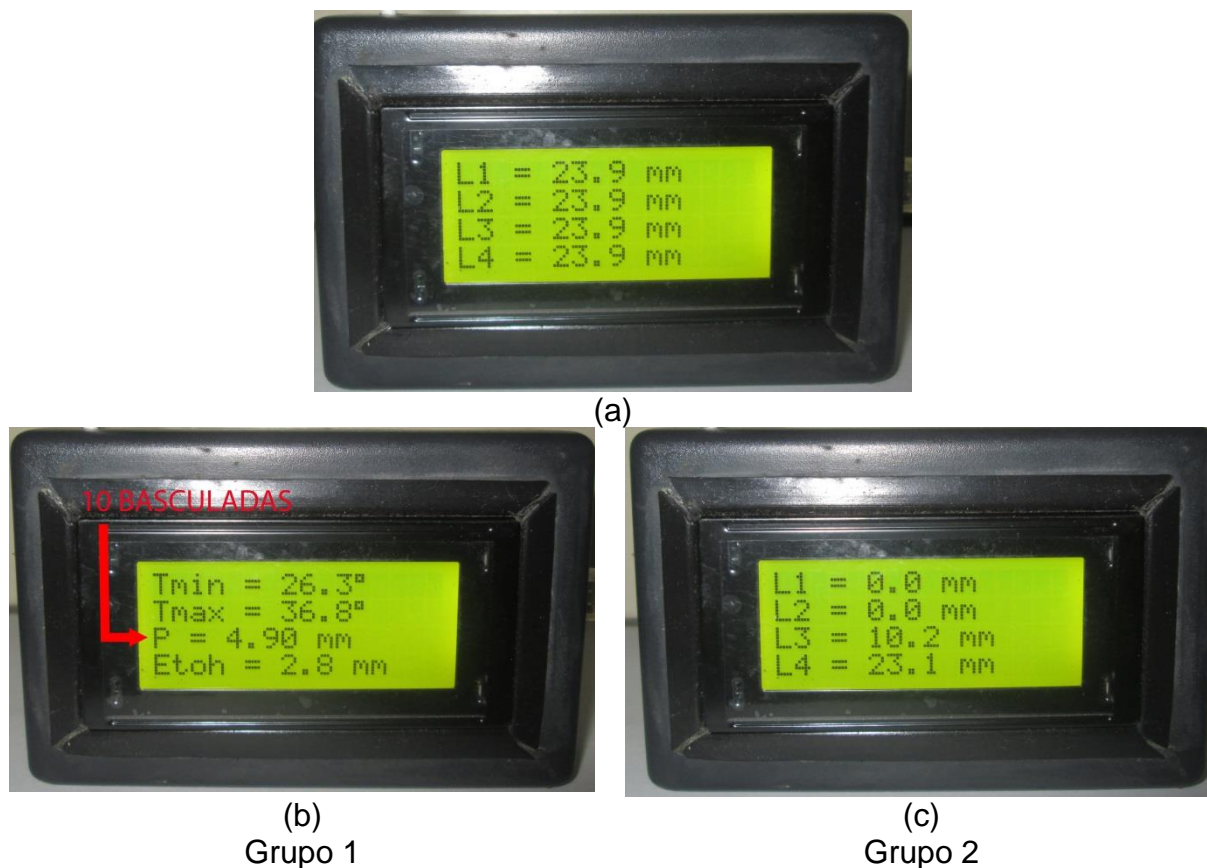


Figura 45: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 3

#### Comprovação dos resultados:

##### SETORES 1 e 2:

Lâmina acumulada do dia seguinte =  $((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia})$

Lâmina acumulada do dia seguinte =  $((2,8 \times 0,8) - 4,9) = -2,7 = 0,0 \text{ mm}$

##### SETOR 3:

Lâmina acum. do dia seguinte =  $((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia})$

+ (Lâmina acum. do dia anterior - (Lâmina aplicada até o momento da precipitação))

Lâmina acum. dia seguinte =  $((2,8 \times 0,8) - 4,9) + (23,9 - (7202 \times 0,001535)) = 10,2 \text{ mm}$

##### SETOR 4:

Lâmina acumulada dia seguinte =  $((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precip. do dia})$

+ (Lâmina acumulada do dia anterior)

Lâmina acumulada dia seguinte =  $((2,8 \times 0,8) - 4,9) + (23,9) = 21,2 \text{ mm}$

Lâmina efetiva acumulada =  $21,2 / 0,92 = 23,1 \text{ mm}$

#### 4.1.7. Atuação do controlador de irrigação, ao detectar precipitação durante o acionamento do setor 4 (Teste 7):

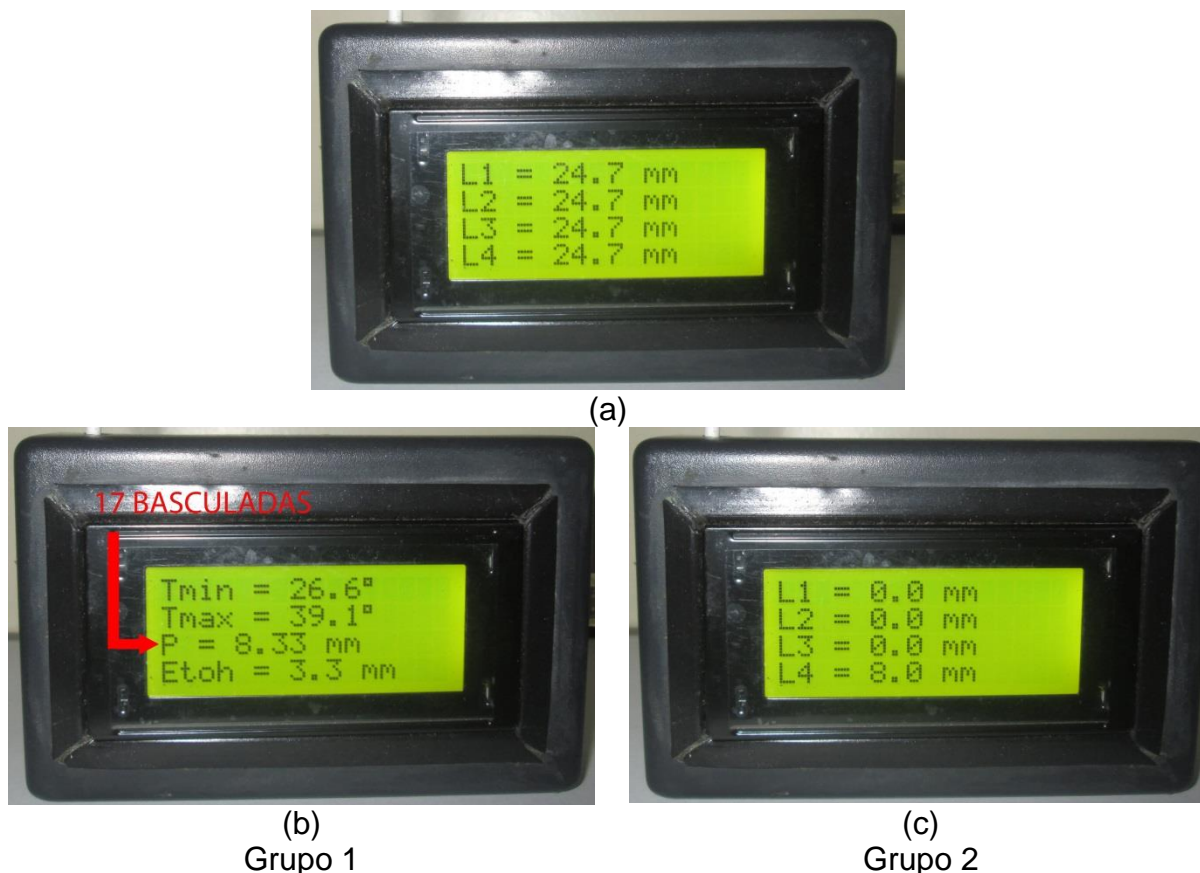


Figura 46: Ocorrência de precipitação durante o acionamento da irrigação do setor 4

#### Comprovação dos resultados:

##### SETORES 1, 2 e 3:

$$\text{Lâmina acumulada do dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia})$$

$$\text{Lâmina acumulada do dia seguinte} = ((3,3 \times 0,8) - 8,33) = -5,7 = 0,0 \text{ mm}$$

##### SETOR 4:

$$\text{Lâmina acum. do dia seguinte} = ((ET_{OH \text{ do dia}} \times K_C) - \text{Precipitação do dia})$$

$$+ (\text{Lâmina acum. do dia anterior} - (\text{Lâmina aplicada até o momento da precipitação}))$$

$$\text{Lâmina acum. dia seguinte} = ((3,3 \times 0,8) - 8,33) + (24,7 - (7202 \times 0,001535)) = 8,0 \text{ mm}$$

#### 4.2. Avaliação do alcance entre os módulos de comunicação (Teste 8)

Foram realizados testes de alcance entre os rádios (Nó Sensor → Estação Base e Estação Base → Nó Atuador) nas distâncias 50, 100, 150 e 200 metros, no intuito de avaliar o sistema de transmissão e recepção de dados.

O sistema de comunicação se mostrou eficiente, possibilitando o acionamento de todos os setores com confiabilidade e integridade dos dados, porém a partir de 212 metros não houve sincronismo entre os módulos de comunicação (perda de pacote de dados). A figura 47a, corresponde ao quadro de distribuição de energia (onde o controlador é acionado no modo manual ou automático) e o módulo de comunicação Nó Atuador. Já a figura 47b representa o reservatório, a bomba de sucção/recalque da água e os pontos de energia onde as válvulas são alimentadas em 24 volts (corrente alternada).



Figura 47a: Nó Atuador



Figura 47b: Reservatório e conjunto moto-bomba

Nas Figuras 48a, 48b, 48c e 48d, podemos visualizar as tubulações, válvulas e aspersores utilizados na simulação do experimento, bem como os quatro setores sendo acionados pelo controlador:



Figura 48a: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 1



Figura 48b: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 2



Figura 48c: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 3



Figura 48d: Avaliação de alcance – Teste 8: Acionamento automático do Setor 4

Na Figura 49 podemos observar as distâncias máximas entre os Nós, sem que haja perda da confiabilidade dos dados, ou seja, até estas distâncias o controle do sistema de irrigação foi assegurado. No entanto, para distâncias maiores do que 212m, perdeu-se a confiabilidade dos dados e o controlador não assegurou o acionamento do sistema de irrigação. Ressalta-se que foi utilizada uma estação total de precisão alta do fabricante Leica Geosystems, modelo TS06, para efetuar as medições entre os Nós.



Figura 49: Representação geográfica dos pontos experimentais da avaliação de alcance entre os módulos

Fonte: Google Earth

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados, conclui-se que o controlador automático de irrigação com aplicação em taxa variável, apresentou-se original no que se refere à variabilidade da aplicação das lâminas de irrigação em cada setor e eficiente no que se refere ao controle propriamente dito e à confiabilidade e integridade dos dados, concluindo que o equipamento tem possibilidade de utilização no controle da irrigação para enlaces de até 212 metros sem necessidade de utilização de repetidores entre seus módulos de comunicação, com total liberdade de aplicação da água em turnos de rega e lâminas variáveis, possibilitando uma melhoria da eficiência de utilização na gestão da irrigação.

## 6. TRABALHOS FUTUROS

- 1) Duplicar o sensor de temperatura, no intuito de aplicar uma metodologia para aumentar a integridade da variável, para fins do cálculo da estimativa da evapotranspiração pelo método de Hargreaves;
- 2) Inserir um sensor para medir a temperatura no dossel da forrageira e adotar uma nova metodologia de manejo, aplicando a lâmina de reposição acumulada quando a temperatura do dossel for maior do que a temperatura do ar;
- 3) Dimensionar um painel solar fotovoltaico para alimentar o conjunto moto-bomba e o Nó Sensor;
- 4) Possibilitar que o controlador disponibilize alimentação trifásica para o acionamento do conjunto moto-bomba, pois este protótipo foi desenvolvido para alimentar sistemas monofásico ou bifásico, maior parte dos sistemas de alimentação rural.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília: EMBRAPA, 2008. 528 p.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ASSUNÇÃO, A. L. C.; MAULE, R. F.; Dourado Neto, D.; BARRETO, A. G. O. P. Potencial de expansão da agricultura irrigada no Mato Grosso. **ITEM (Irrigação & Tecnologia Moderna)**, [S.l.], n. 108/109, p. 32-36, 2016.

BENTLEY, R. E. (Ed.). **Handbook of temperature measurement**. Singapore: Springer-Verlag, 1998. v. 1.

BERNARDI, A. C. de C.; PEREZ, N. B. Agricultura de precisão em pastagens. In: BERNARDI, A. C. de C. (Ed.) *et al.* **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 492-499.

BORGHI, E.; AVANZI JUNIOR, C.; BORTOLON, L.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BORTOLON, E. S. O. Adoption and use of precision agriculture in Brazil: perception of growers and service dealership. **Journal of Agricultural Science**, Toronto, Canada, v. 8, n. 11, p. 89-104, 2016.

CARVALHO, D. F.; GOMES, D. P.; GONÇALVES, F. V.; BATISTA, S. C. O.; MEDICI, L. O. Irrigação automatizada com um acionador de baixo custo. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 25., 2015, São Cristóvão. **Anais...**, São Cristóvão: ABID: Universidade Federal de Sergipe, 2015, p. 929-934.

COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M. Impactos potenciais da agricultura de precisão sobre a economia brasileira. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 10, p. 177-204, 2013.

DRUMOND, L. C. D.; APPELT, M. F.; ANDRADE, A. S.; RABELO, D. M. L.; FERNANDES, A. L. T. Irrigação de pastagens. **ITEM (Irrigação & Tecnologia Moderna)**, [S.l.], n. 108/109, p. 44-49, 2016.

DRUMOND, L. C. D.; ZANINI, J. R.; AGUIAR, A. P. A.; RODRIGUES, G. P.; FERNANDES, A. L. T. Produção de matéria seca em pastagem de Tifton 85 irrigada, com diferentes doses de dejetos líquidos de suíno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p.426-433, maio/ago. 2006.

DRUMOND, L. C. D.; AGUIAR, A. P. A. **Irrigação de pastagem**. Uberaba: Ed. L. C. D. DRUMOND, 2005.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. D. C. Water productivity of different land uses in watersheds assessed from satellite imagery Landsat 5 Thematic Mapper. **Proceedings of SPIE**, Bellingham, WA, USA, v. 9239, 92392E, 2014.

GARZELLA, T. C. **Automação da leitura do medidor Speedy e utilização em programa de manejo de irrigação**. 2011, 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Esalq, Piracicaba, 2011.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; SOUSA, D. L. de. Como o Mato Grosso pode contribuir para o crescimento da agricultura irrigada brasileira. **ITEM (Irrigação & Tecnologia Moderna)**, [S.l.], v. 108/109, p. 38-41, 2016.

HAMDY, A., RAGAB, R.; SCARASCIA-MUGNOZZA, E. Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. **Irrigation and Drainage**, Medford, MA, USA, v. 52, p. 3-20, mar. 2003.

HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA A.H. de C.; NEALE, Christopher. M. U.; TAGHVAEIAN, Saleh. Determining large scale actual evapotranspiration using agrometeorological and remote sensing data in the Northwest of Sao Paulo state, Brazil. **Acta Horticulturae**, Belgium, v. 1038, p. 263-270, 2014.

KIMOTHI, S. K. **The uncertainty of measurements: physical and chemical metrology: impact and analysis**. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2002.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2013.

MARTINS, N. S.; CALADO, M. D. R. A.; POMBO, J. A. N.; MARIANO, S. J. P. S. Blueberries field irrigation management and monitoring system using PLC based control and wireless sensor network. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON

ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING (EEEIC), 16., 2016, Florence, **Anais eletrônicos**... Florence: IEEE, 2016. p. 1-6.

NASCIMENTO, P. dos S.; SILVA, J. A.; COSTA, B. R. S.; BASSOI, L. H. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1101-1113, jul./ago. 2014.

PFITSCHER, L. L.; BERNARDON, D. P.; KÖPP, L. M.; HECKLER, M. V. T.; THOMÉ, B. A.; FAGUNDES, D. R. Tecnologias de automação para eficiência energética na irrigação de lavouras de arroz. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 4., 2011, Juiz de Fora, **Anais**... Juiz de Fora: ABEE: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2011. p. 45-50.

PINTO, M. A. B.; PARFITT, J. M. B.; TIMM, L. C.; FARIA, L. C.; SCIVITTARO, W. B. Produtividade de arroz irrigado por aspersão em terras baixas em função da disponibilidade de água e de atributos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1584-1593, set. 2016.

QUEIROZ, T. M.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de *software* e *hardware* para irrigação de precisão usando pivô central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 1, p.44–54, jan./mar. 2008.

RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILA NOVA, N. A.; REICHART, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH, 1989.

RIA, W. O.; CRUZ, J. C. da; FASCINA, M. N.; KOVALESKI, J. L. Tecnologias aplicadas ao agronegócio agricultura de precisão. **Revista Gestão do Conhecimento**, [S.l.], v. 7, n. 7, p. 1-18, 2015.

ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; BRAGA, A. P. S.; SANTOS, C. C.; LEÃO, R. A. O. Aplicação de redes neurais artificiais como alternativa ao balanço hídrico volumétrico no manejo de irrigação por gotejamento em melancia. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 2, p. 266-279, 2015.

SANTOS, H. T. dos; CARVALHO, D. F. de; SOUZA, C. F.; MEDICI, L. O. Cultivo de alface em solos com hidrogel utilizando irrigação automatizada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 5, p. 852-862, 2015.

SILVA, C. B., VALE, S. M. L. R., PINTO, F. A. C., MÜLLER, C. A. S., MOURA, A. D. The economic feasibility on precision agriculture in Mato Grosso do Sul State, Brazil: a case study. **Precision Agriculture**, [S.l.], v. 8, n. 6, p. 255-265, dez. 2007.

SILVA, K. E.; BARRETO, T. S. C. P.; SHINOHARA, N. K. S.; ANDRADE, J. S. C. O.; COELHO-JUNIOR, J. M. Precision agriculture in the promotion of sustainable development. **Revista Geama**, Pernambuco, v. 3, n. 2, p. 42-46, 2017.

SOUZA, O. P.; ZANINI, J. R.; TORRES, J. L. R.; BARRETO, A. C.; SOUZA, E. L. C. Produção e qualidade física de dos frutos do abacaxi sob diferentes laminas e frequências de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 4, p. 534-546, out./dez. 2012.

SUDHA, M. N.; VALARMATHI, M. L.; BABU, A. S. Energy efficient data transmission in automatic irrigation system using wireless sensor networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, USA, v. 78, n. 2, p. 215-221, set. 2011.

TURCO, J. E. P.; GOES, M. J.; OLIVEIRA, P. J. D.; CARLETO, N. Avaliação de um método simples para determinação da evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 42., 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: SBEA, 2014.

TURCO, J. E. P.; CHAVES, L. H.; OLIVEIRA, P. J. D. de; ARAUJO JUNIOR, R. A. Método de Jensen-Haise para estimativa da evapotranspiração de referência. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 46., 2017, Maceió. **Anais...** Maceió: SBEA, 2017.

TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JÚNIOR, D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p.63-80, jan./mar. 2008.

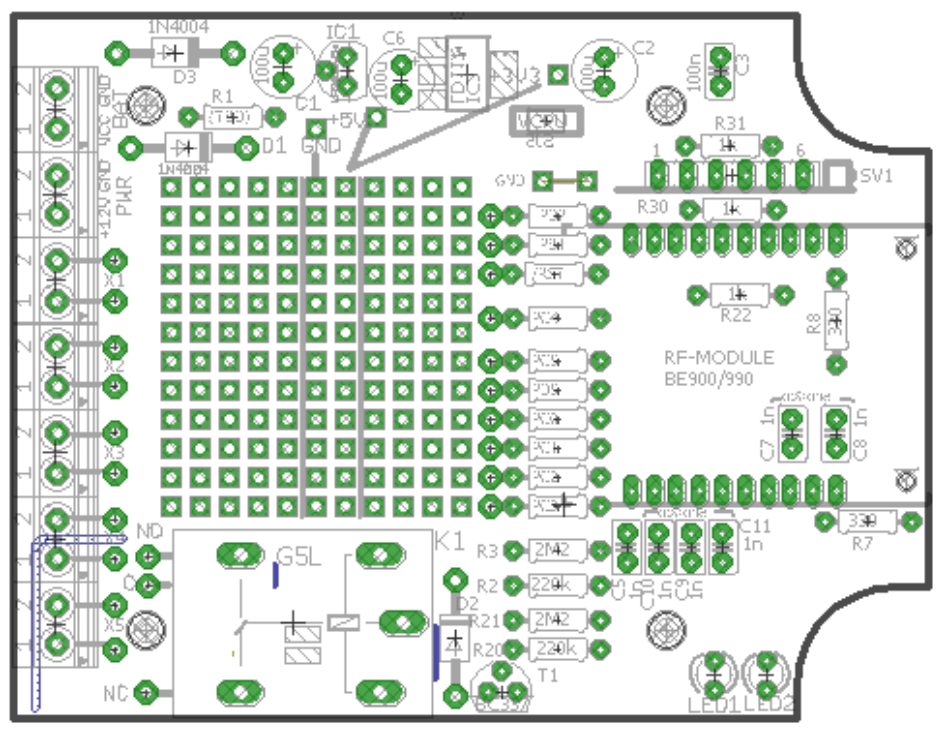
VOCABULÁRIO Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. 2. ed. São Paulo: E. Blücher, 1996. 249 p.

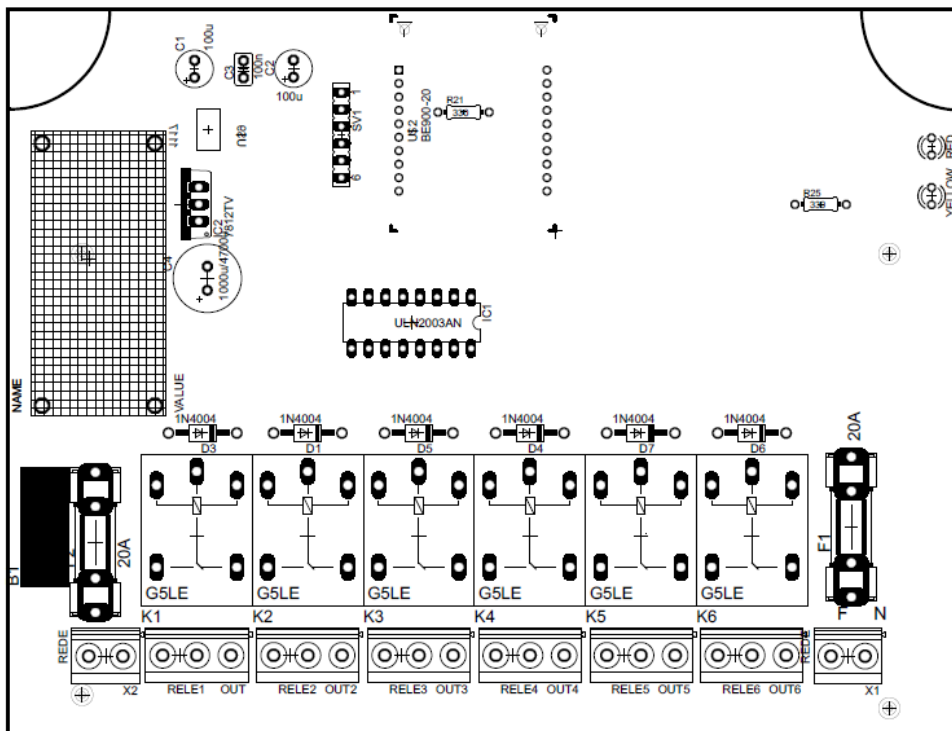
WARREN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. de C.; RODRIGUES L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 7, n. 1, p. 65-82, 2014.

## APÊNDICES

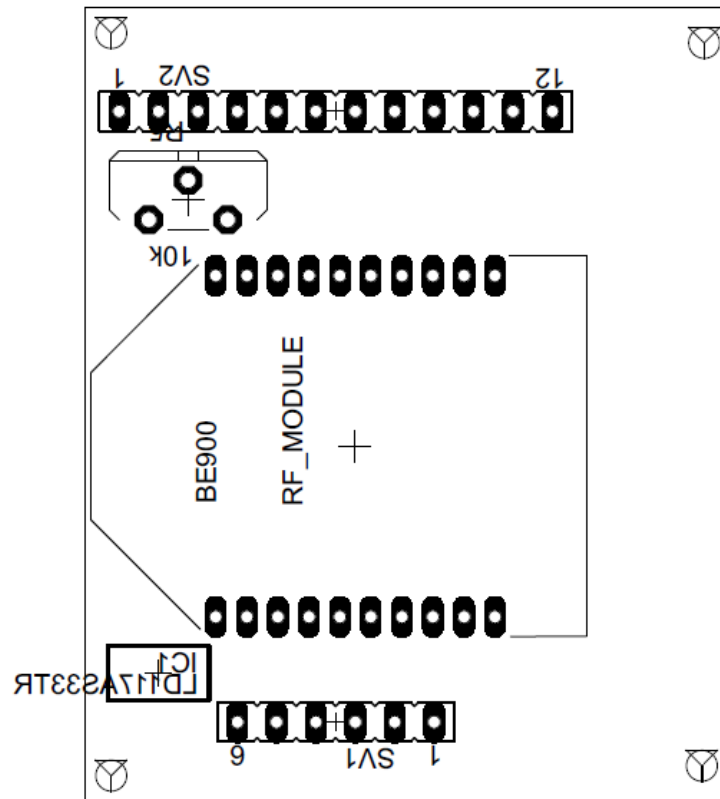
### Apêndice A - Esquemático da placa do Nó Sensor



Apêndice B - Esquemático da placa do Nó Atuador



## Apêndice C - Esquemático da placa da Estação Base



## ANEXOS

## Anexo A - Certificado de Calibração do Sensor de Temperatura

 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES <b>INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPaciaIS</b>		MINISTÉRIO DA <b>CIÊNCIA, TECNOLOGIA,          INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES</b>			
 CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS		<i>Certificado de Calibração</i>		IDENTIFICAÇÃO <b>028-16</b>	SUPLEMENTO -
PÁGINA: 1 de 2					
<b>Identificação do Item Calibrado</b> <b>Objeto:</b> Termômetro Digital <b>Fabricante:</b> Maxim Integrated/UNESP/DL <b>Modelo:</b> DS18B20/Nó Sensor/Tablet DL <b>Número de série:</b> id.: T015/99010805200933 <b>Data da Calibração:</b> 02/02/2016					
<b>Cliente/Solicitante</b> <b>Cliente:</b> LIM / UNESP – Jaboticabal – Artigo: Calibração Sist. Irrigação <b>Endereço:</b> Rodovia Presidente Dutra, km 40 – Cachoeira Paulista - SP CEP: 12630-000					
<b>Rastreabilidade Metrológica</b> <b>Standard Platinum Resistance Thermometer          Fluke-Hart Scientific 5699 / Nano volt-micro          ohm meter Agilent 3420A</b> Número de série: 0292 / MY42001676 Rastreabilidade: RBC- INPE-LIT Certificado: LIT09-CPT-CC-0017 Validade: mar-16			<b>Combined pressure, humidity and temperature          transmitter Vaisala PTU307</b> Números de série: F2510080 Rastreabilidade: RBC-INPE-LIT Certificados: LIT09-CPT-CC-0019 Validades: dez-16		
<b>Temperature/Humidity Chamber CSZ ZPH-16-          1.5H/AC</b> Número de Série: ZP0721254 Rastreabilidade: INMETRO – RBC-INPE-LIT Certificado: LIM 057/2014 Validade: jan-17			<b>Combined pressure, humidity and temperature          transmitter Vaisala PTU303</b> Números de série: F2910067 Rastreabilidade: INMETRO-LAPRE Certificados: DIMCI 1783-15 Validades: set-17		
<b>Procedimento de Calibração</b> O procedimento de calibração baseia-se na comparação direta aos padrões de referência de temperatura (Escala Internacional de Temperatura de 1990) e umidade relativa do ar do INPE/CPTEC, utilizando-se uma câmara climática como meio de calibração. Foram realizadas séries de 15 medidas a cada 60 segundos para cada ponto de calibração, sendo informados os valores médios. A incerteza expandida de medição (incerteza da calibração) relatada equivale à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência "K", para um nível de confiança de 95,45%, e foi determinada de acordo com os documentos EA-4/02, publicado pelo INMETRO e ISO/GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.					
<b>Condições Ambientais:</b> Temperatura do ar: (23 ± 2) °C Umidade relativa do ar: (50 ± 10) % ur Pressão atmosférica: (950 ± 5) hPa					
 Márcio A. A. Santana Tecnologista Metrolologista		01/08/2016 Data de emissão  José Celso Thomaz Jr. Responsável pelo grupo de atividades do LIM		 Antonio Ocimar Manzi Coordenador Geral do CPTEC	
Laboratório de Instrumentação Meteorológica Meteorologia Ambiental Rodovia Presidente Dutra, km 40 - SP/RJ Cachoeira Paulista-SP - CEP: 12.630-000 Tel.: (12) 3186-9477					



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



## Certificado de Calibração

IDENTIFICAÇÃO	SUPLEMENTO
028-16	-
PÁGINA: 2 de 2	

### CARACTERÍSTICAS DO OBJETO SOB CALIBRAÇÃO

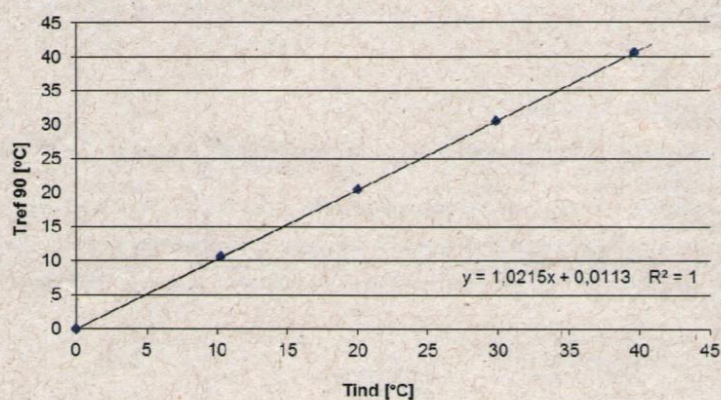
Precisão:  $\pm 0,5$  °C para medições entre - 10 e 85 °C.

### RESULTADO DA CALIBRAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR

Ponto (Valor Nominal)	Temperatura de Referência $T_{ref90}$ [°C]	Temperatura Medida $T_{med}$ [V]	Correção $T_{ref90} - T_{med}$ [°C]	Incerteza expandida da medição* $U$ [°C]	Fator de Abrangência $k$
10 °C	10,6	10,3	0,3	$\pm 0,3$	2,00
20 °C	20,5	20,1	0,4	$\pm 0,1$	2,00
30 °C	30,5	29,9	0,6	$\pm 0,1$	2,00
40 °C	40,5	39,7	0,8	$\pm 0,2$	2,00

A incerteza expandida de medição  $U$ , declarada neste Certificado **não** leva em consideração as incertezas relativas à equação de ajuste apresentada no gráfico.

Calibração do Sensor de temperatura,  
controlador de Irrigação (id: T015) - Temperatura [°C]



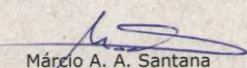
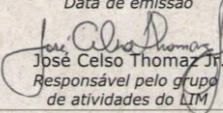
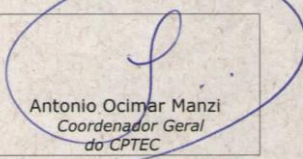


**Obs.:** O presente certificado de calibração é **válido apenas para o equipamento caracterizado na primeira página deste**, não sendo extensivo a quaisquer outros equipamentos ou lotes, ainda que similares. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido na sua totalidade, eventuais reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo LIM. Recomenda-se a verificação e recalibração periódicas deste equipamento. A calibração foi acompanhada por Ruy de Aguiar Araújo Júnior (doutorando em Agronomia - Ciências do Solo - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal), UNESP).

Recomenda-se a verificação e recalibração periódicas deste equipamento.

• LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM •

## Anexo B - Certificado de Calibração do Sensor de Precipitação

 MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES <b>INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS</b>		MINISTÉRIO DA <b>CIÊNCIA, TECNOLOGIA,          INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES</b>			
 CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS		<i>Certificado de Calibração</i>		IDENTIFICAÇÃO <b>029-16</b>	SUPLEMENTO -
PÁGINA: 1 de 3					
<b>Identificação do Item Calibrado</b> <b>Objeto:</b> Pluviômetro <b>Fabricante:</b> Incoterm/UNESP/Tablet DL <b>Modelo:</b> 4760/Nó Sensor/TP295 <b>Número de série:</b> id.:PL07/id.:DPL07/99010805200933 <b>Data da Calibração:</b> 02/02/2016					
<b>Cliente/Solicitante</b> <b>Cliente:</b> LIM / UNESP – Jaboticabal – Artigo: Calibração Sist. Irrigação <b>Endereço:</b> Rodovia Presidente Dutra, km 40 – Cachoeira Paulista - SP CEP: 12630-000					
<b>Rastreabilidade Metrológica</b>  <b>Balança Digimed DG-15W</b> Número de série: 10LB45 Rastreabilidade: RBC-DIGIMED Certificado: B03102261/15 Validade: abr-17  <b>Thermistor Campbell Scientific 108-L</b> Identificação: ID:T014 Rastreabilidade: RBC-INPE-LIT Certificado: LIM 006-15 Validade: fev-17  <b>Pesos padrão Quanto Brasil 1kg M1</b> Número de Série: 08112 Rastreabilidade: RBC-PADRÃO BALANÇAS Certificado: MA056-04-12 Validade: abr-17			<b>Contador numérico/event counter manual</b> Id: CM-01  <b>Peristaltic pump Watson-Marlow 323Dz</b> Número de série: L100311  <b>Paquímetro Digital Digimes 100.178 BL</b> Número de série: 140409 Rastreabilidade: RBC - PRESERTEC Certificado: 003177-15 Validade: abr-17  <b>Combined pressure, humidity and temperature transmitter Vaisala PTU307 / PTU303</b> Números de série: F2510080 / F2910067 Rastreabilidade: RBC-INPE-LIT INMETRO-LAPRE Certificados: LIT09-CPT-CC-0019 DIMCI 1783-15 Validades: dez-16 / set-17		
<b>Procedimento de Verificação</b> O procedimento de verificação baseia-se em séries de 4 (quatro) medidas do número de basculadas para um volume de água definido em diferentes vazões, utilizando-se uma bomba peristáltica. A determinação do volume de água para uma quantidade de chuva é realizada de acordo com a área de captação do coletor e a resolução do medidor. Foram realizadas 15 (quinze) medidas do diâmetro do coletor para a verificação da área de captação, sendo informado os valores médios. <b>Documentos de referência:</b> - World Meteorological Organization, "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", seventh edition, 2008. Updated in 2010, 2012. - ABNT, NBR ISO/IEC 17025:2005. Requisitos gerais para competência de laboratórios de calibração e ensaios, 2005. - ANEEL, ANA. Resolução conjunta nº 3, de 10 de agosto de 2010. <b>Condições Ambientais:</b> Temperatura do ar: (23 ± 2) °C Umidade relativa do ar: (50 ± 10) % ur Pressão atmosférica: (950 ± 5) hPa Temperatura da água: (22 ± 2) °C					
 Márcio A. A. Santana Tecnologista Metrologista		01/08/2016 Data de emissão  José Celso Thomaz Jr. Responsável pelo grupo de atividades do LIM		 Antonio Ocimar Manzi Coordenador Geral do CPTEC	
Laboratório de Instrumentação Meteorológica <i>Metrologia Ambiental</i> Rodovia Presidente Dutra, km 40 - SP/RJ Cachoeira Paulista-SP - CEP: 12.630-000 Tel.: (12) 3186-9477					



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,  
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



 CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS	<h2 style="font-family: cursive;">Certificado de Calibração</h2>	IDENTIFICAÇÃO	SUPLEMENTO
		029-16	-
		PÁGINA: 2 de 3	

### CARACTERÍSTICAS DO OBJETO SOB CALIBRAÇÃO

Especificação do fabricante:

Diâmetro da área de captação: 110 mm  
Resolução nominal: 0,45 mm

### RESULTADO DA VERIFICAÇÃO:

Diâmetro da área de captação = 111,13 mm (desvio padrão= 0,20 mm)

### VERIFICAÇÃO DA QUANTIDADE

Volume [ml]	Intensidade [mm/h]	PLUVIÔMETRO				PLUVIÔMETRO COM INDICADOR			
		Número de basculadas de referência $N_{REF}$	Número de basculadas medidas $N_{MED}$	Desvio Padrão	Erro* [%]	Quantidade Esperada [mm] $Q_E$	Quantidade Medida [mm] $Q_M$	Desvio Padrão [mm]	Erro** [%]
227 ± 1	21 a 22		48	1	-7,7		21,6	0,1	-7,7
	52 a 53	52	49	1	-6,3	23,4	22,1	0,2	-5,8
	152 a 153		47	1	-9,6		21,2	0,1	-9,6

\* O erro baseia-se na equação:  $Erro^* = - ((N_{REF} - N_{MED}) \times 100) / N_{REF} [\%]$ .  
\*\* O erro baseia-se na equação:  $Erro^{**} = - ((Q_E - Q_M) \times 100) / Q_E [\%]$ .

Resolução medida (média) = 0,49 [mm]



Pluviômetro Incoterm - Nó sensor/Tablet DL, Id.: PL07/DPL07



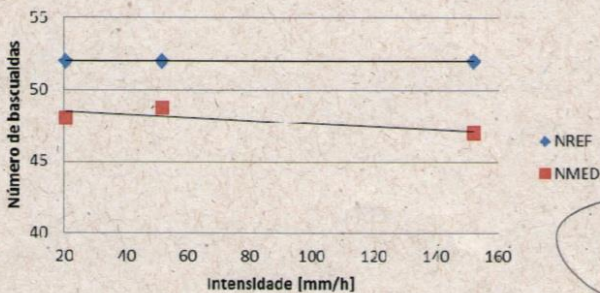
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



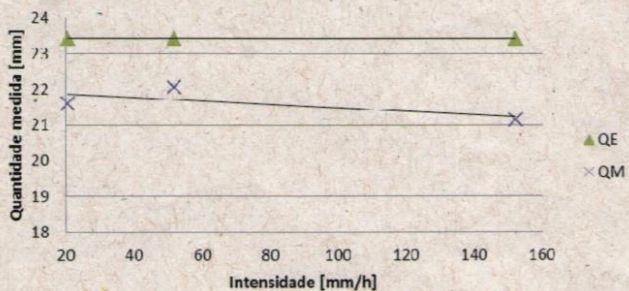
 CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS	<h2 style="font-family: cursive;">Certificado de Calibração</h2>	IDENTIFICAÇÃO	SUPLEMENTO
		029-16	-
PÁGINA: 3 de 3			

**Verificação do pluviômetro Incoterm, Id.: PL07 com dispositivo NÓ-SENSOR/TABLET, UNESP/DL, Id.:DPL07**



◆ NREF  
■ NMED

**Verificação do pluviômetro Incoterm, Id.: PL07 com dispositivo NÓ-SENSOR/TABLET, UNESP/DL, Id.: DPL07**



▲ QE  
× QM

**Obs.:** O presente certificado de calibração é **válido apenas para o equipamento caracterizado na primeira página deste**, não sendo extensivo a quaisquer outros equipamentos ou lotes, ainda que similares. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido na sua totalidade, eventuais reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo LIM. Recomenda-se a verificação e recalibração periódicas deste equipamento. A calibração foi acompanhada por Ruy de Aguiar Araújo Júnior (doutorando em Agronomia - Ciências do Solo - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, UNESP).

Recomenda-se a verificação e recalibração periódicas deste equipamento.

• LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM • LIM •