



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



ANTONIO TADEU PELLISON

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE
DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR MEIO DE
MICROCONTROLADORES DE CÓDIGO ABERTO E DE BAIXO CUSTO**

BOTUCATU - SP

2018

ANTONIO TADEU PELLISON

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE
DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR MEIO DE
MICROCONTROLADORES DE CÓDIGO ABERTO E DE BAIXO CUSTO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Co-Orientador: Prof. Dr. Enzo Dal Pai

BOTUCATU

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

P391d Pellison, Antonio Tadeu, 1967-
Desenvolvimento de um sistema automático de aquisição de dados de evapotranspiração de referência por meio de microcontroladores de código aberto e de baixo custo / Antonio Tadeu Pellison. - Botucatu: [s.n.], 2018
84 p.: fots. color., grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Alexandre Dal Pai
Coorientador: Enzo Dal Pai
Inclui bibliografia

1. Evapotranspiração. 2. Lisímetro. 3. Irrigação. 4. Automação. I. Dal Pai, Alexandre. II. Dal Pai, Enzo. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA POR MEIO DE MICROCONTROLADORES DE CÓDIGO ABERTO E DE BAIXO CUSTO.”

AUTOR: ANTONIO TADEU PELLISON

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

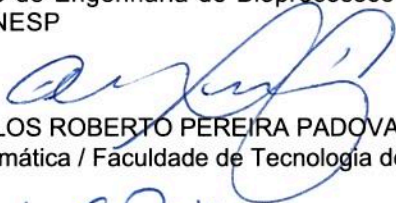
COORIENTADOR: ENZO DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI

Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO PEREIRA PADOVANI

Depto de Informática / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof. Dr. FERNANDO FERRARI PUTTI

Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã



Profa. Dra. VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN

Depto de Bioprocessos e Biotecnologia / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. EDUARDO NARDINI GOMES

Depto. de Engenharia Agrônômica / UNESP - Campus Experimental de Registro

Botucatu, 11 de maio de 2018.

AGRADECIMENTOS

A Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu/UNESP, Campus de Botucatu-SP, pela recepção.

Ao Professor Dr. Alexandre Dal Pai e ao Professor Dr. Enzo Dal Pai pelo orientação, paciência e amizade.

Aos funcionários e professores do Departamento de Engenharia Rural, pelo companheirismo.

Aos alunos da pós-graduação em Irrigação e Drenagem, Tiago, Daniel e Marquinhos, meu muito obrigado.

A minha esposa Adriana e aos meus filhos Rodrigo e Isabella,
dedico.

RESUMO

Este trabalho visa o desenvolvimento de um sistema automatizado utilizando a plataforma Arduino, para a medição da evapotranspiração de referência utilizando um lisímetro de lençol freático constante com 25 cm de nível. Faz-se necessária a construção, instalação e calibração do lisímetro de lençol freático constante e conseqüentemente a utilização da eletrônica embarcada. A criação do sistema automatizado, teve como base a utilização da plataforma Arduino, para a coleta dos dados no lisímetro. Utilizou um sensor de ultrassom para a medição da evapotranspiração de referência no lisímetro de lençol freático constante. As medidas obtidas com o lisímetro de lençol freático constante foram realizadas no segundo semestre de 2017, oram correlacionadas com as medidas da estação automatizada do Lageado, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, no campus de Botucatu – SP, do Departamento de Engenharia Rural, que se utiliza o método de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração e, com o lisímetro de pesagem instalado próximo de onde foi construído o lisímetro de lençol freático constante. Os resultados obtidos demonstram que o sistema construído utilizando a plataforma Arduino mostrou-se confiável para a medição no lisímetro de lençol freático constante.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Lisímetro. Irrigação. Automação.

ABSTRACT

This work aims at the development of an automated system using the Arduino platform for the measurement of reference evapotranspiration using a constant water table lysimeter with 25 cm level. It is necessary to construct, install and calibrate the constant water table lysimeter and consequently the use of the embedded electronics. The creation of the automated system was based on the use of the Arduino platform, for the data collection in the lysimeter. He used an ultrasound sensor to measure the reference evapotranspiration in the constant water table lysimeter. The measurements obtained with the constant water table lysimeter were performed in the second half of 2017, and correlated with the measurements of the Lageado automated station, at Rural Engineering, which uses the Penman-Monteith method for the calculation of evapotranspiration and, with the installed lithometric meter near where the constant water table lysimeter was constructed. The results obtained show that the system constructed using the Arduino platform proved to be reliable for the measurement in the constant water table lysimeter.

Keywords: Evapotranspiration. Lysimeter. Irrigation. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Lisímetro de pesagem mecânica.	28
Figura 2 - Lisímetro de pesagem - Departamento de climatologia UNESP- Botucatu	29
Figura 3 - Esquema de um lisímetro de drenagem.	30
Figura 4 - Lisímetro de lençol freático constante – representação.	32
Figura 5 - Um sistema de microcontrolador com entradas e saídas típicas.....	34
Figura 6 - Arduino UNO	36
Figura 7 - Diagrama esquemático do Arduino UNO	36
Figura 8 Esquema de processamento com a aplicação do Arduino.	37
Figura 9 - Software Arduino.	37
Figura 10 - Sistema de Instrumentação.	39
Figura 11 - Sistema de Controle.	40
Figura 12 - Séries Climáticas (período: 1970-2008): (a) Temperatura e Umidade Relativa; (b) Precipitação.....	41
Figura 13 - Imagem da Estação Agrometeorológica	42
Figura 14 - Componentes de um Arduino.	43
Figura 15 - Pinagem Arduino ATmega328.	44
Figura 16 - Sensor Ultrassônica HC-SR04.....	45
Figura 17 - Sensor ultrassônico – princípio de funcionamento.	46
Figura 18 - Módulo NRF24L01.....	46
Figura 19 - Módulo NRF24L01 – pinagem.	47
Figura 20 - Shield RTC	48
Figura 21 - Shield SD-Card.....	49
Figura 22 - Antena Omnidirecional.....	49
Figura 23 - Bomba d'água Modelo B650.....	50
Figura 24 - Shield Ethernet	51
Figura 25 - Fluxograma para o desenvolvimento da metodologia	52
Figura 26 - Medidas do buraco aberto	54
Figura 27 - a) Preenchimento da caixa d'água com brita nº 1; b) manta bidim cobrindo a brita; c) ligação do tanque intermediário com a caixa d'água.	55
Figura 28 - a) preenchimento da caixa d'água com a terra retirada do local; b) preenchimento total de terra; c) plantio de grama.	56
Figura 29 - Montagem do quadro.....	57
Figura 30 - Instrumentação do tanque intermediário	59
Figura 31 - Esquema de ligação do Sensor de Nível de Líquidos	60
Figura 32 - Disposição dos equipamentos	61
Figura 33 - Fluxograma do programa bomba.....	62
Figura 34 - Fluxograma do programa que envia e grava dados	63
Figura 35 - Fluxograma do programa que recebe dados	64
Figura 36 - Estrutura do banco de dados local.....	65
Figura 37 - Ligação do sensor ultrassônico.....	66
Figura 38 - Estrutura básica de comunicação do hardware.....	66
Figura 39 - Ligação do nRF24I01	67
Figura 40 - Pinagem utilizada para a ligação do nRF24I01	67
Figura 41 - Estação Meteorológica Automatizado do Lageado (período 2015-2016): (a) ET0 (b) Precipitação acumulada	71
Figura 42 - Dados Médios mensais de temperatura e radiação solar global no ano de 2017, Botucatu - SP	72
Figura 43 - Dados Médios mensais de Umidade Relativa e Velocidade do Vento no ano de 2017, Botucatu - SP.....	72

Figura 44 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de Junho.....	73
Figura 45 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de Julho.....	74
Figura 46 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de agosto.....	75
Figura 47 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de setembro.....	75
Figura 48 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de outubro	76
Figura 49 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de novembro.....	77
Figura 50 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de dezembro.....	77
Figura 51 - Diferenças percentuais entre os valores estimados com os métodos de P-M, Lisímetro de Pesagem e Thornthwaite em relação às leituras obtidas pelo Lisímetro de Lençol Freático Constante.....	78
Figura 52 - Evolução horária do dia 19/09/2017.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - (Cor) Fator de Correção da evapotranspiração em função do fotoperíodo.	23
Tabela 2 - Radiação solar diária no topo da atmosfera, expressa em mm de evaporação equivalente no 15º dia do mês correspondente, para o hemisfério Sul.....	24
Tabela 3 - Características da plataforma UNO.....	44
Tabela 4 - Pinagem para ligação do módulo NRF24L01	47
Tabela 5 - Funções dos Equipamentos	60
Tabela 6 - Levantamento de custo	70
Tabela 7 - Dados da Estação Automatizada do Lageado - período 2015 -2016	71
Tabela 8 - Diferenças percentuais.....	78

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	âmpere
A/D	Analógico digital
AC	Corrente Alternada
BD	Banco de dados
bps	bits por segundo
Bps	Bytes por segundo
CI	Circuito Integrado
DC	Corrente Contínua
Gnd	Terra
Hz	hertz
I/O	Entrada / saída
I ² C	Circuito Inter-integrado
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado
KB	Kylo byte
LAN	Rede Local
LCD	Visor de Cristal Líquido
PC	Computador Pessoal
PDIP	Pacote de dupla linha de plástico
PVC	Policloreto de vinila
RAM	Memória de Acesso Aleatório
RF	Rádio Frequência
RISC	<i>Computador de conjunto de instruções reduzidas</i>
RTC	Relógio de tempo real
SD	Secure Digital
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Memória de acesso aleatório estático
V	volt
W	watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	20
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	Evapotranspiração	21
3.2	Evapotranspiração: modelos	22
3.2.1	Método de Thornthwaite	22
3.2.2	Método de Camargo	23
3.2.3	Método do Tanque Classe A	24
3.2.4	Método de Hargreaves e Samani	25
3.2.5	Método de Priestley-Taylor	25
3.2.6	Método de Penman-Monteith	26
3.3	Lisímetro	27
3.3.1	Lisímetro de Pesagem	28
3.3.2	Lisímetro de Drenagem	29
3.3.3	Lisímetro de Lençol Freático Constante	31
3.4	Fatores que afetam a evapotranspiração	32
3.5	Automação na agricultura	33
3.6	Microcontroladores e Sistemas Embarcados	33
3.7	Sistemas Embarcados	35
3.8	O projeto Arduino	35
3.8.1	Hardware e Software do Arduino	36
3.8.2	Ethernet para Arduino	38
3.8.3	Shields Arduino	38
3.9	Sistemas de instrumentação e controle	39
3.9.1	Sensores e Transdutores	40

4	MATERIAL E MÉTODOS.....	41
4.1	Material.....	41
4.1.1	Caracterização da área.....	41
4.1.2	Dimensões e padronização da área.....	42
4.1.3	Sistema de Controle.....	42
4.2	Métodos.....	52
4.2.1	Construção e Instalação do lisímetro.....	53
4.2.2	Controle da Altura do Nível Freático.....	56
4.2.3	Instalação da Rede Elétrica.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
5.1	Sistema de coleta de dados.....	58
5.1.1	Instrumentação.....	58
5.1.2	Instrumentação do Tanque Intermediário.....	58
5.1.3	Instalação da Bomba d'água.....	59
5.1.4	Instalação do Sensor de Nível de Líquidos.....	59
5.1.5	Disposição dos equipamentos.....	60
5.1.6	Programas para Arduino.....	62
5.1.7	Banco de dados local.....	65
5.1.8	Conexões dos sensores no Lisímetro de Lençol Freático Constante.....	65
5.1.9	Estrutura básica da comunicação do arduino.....	66
5.1.10	Transmissão e recepção dos dados.....	67
5.1.11	Determinação da Evapotranspiração de Referência (Eto).....	68
5.1.12	Dados coletados pelo sistema.....	69
5.1.13	Custo dos equipamentos.....	69
5.2	Medidas e Modelos de Evapotranspiração.....	70
5.2.1	Condições Climáticas.....	70
5.2.2	Medidas de Evapotranspiração.....	72
6	CONCLUSÕES.....	80
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

A água tem importância ecológica, econômica e social. A escassez de recursos hídricos, o elevado custo de energia e devido ao uso múltiplo da água, faz-se importante a utilização de metodologias apropriadas ao manejo racional do uso da água. O setor agrícola é responsável por boa parte do consumo de água disponível em rios, lagos e aquíferos subterrâneos, por meio da irrigação. A utilização da água na produção agrícola através de um planejamento eficiente, tornou-se necessário, bem como o controle do momento da irrigação.

A perda conjunta de água do solo pela evaporação e da planta pela transpiração é a evapotranspiração, que é um dos componentes do ciclo hidrológico, de grande utilidade em climatologia e irrigação, para a quantificação das disponibilidades hídricas regionais.

Um dos métodos para determinar a evapotranspiração é o lisímetro de lençol freático constante. Para tornar este método mais eficiente pode-se empregar sensor de nível de água. Este tem a função de quantificar a evaporação diária com o armazenamento das informações diretamente em um banco de dados e acionar o sistema de recarga de água do tanque, podendo ser operado remotamente.

Sendo assim, para gerenciar a coleta e transmitir os dados via redes sem fios, pode ser utilizado o Arduino que inclui uma gama de placas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores AVR da Atmel. A plataforma é composta de uma placa simples de entrada e saída (I/O), com entradas e saídas analógicas e digitais que possibilitam que este dispositivo seja utilizado como interface entre o computador e outros dispositivos. O armazenamento e envio dos dados é gerenciado por programas de computador, que armazenam e disponibilizam os dados na Internet, onde esses dados serão atualizados online.

O acesso às informações na *Internet* pode ocorrer a qualquer momento, em quase todo lugar, por qualquer pessoa que disponha de um computador conectado, sendo que essas informações transitam com grande rapidez. Será uma importante ferramenta para o planejamento e a gestão da irrigação.

2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi a construção, a instalação e operação de um lisímetro de lençol freático constante, utilizado em conjunto com a plataforma Arduino para coleta de dados e transmissão em tempo real (*online*). Os dados transmitidos podem ser acessados remotamente e, em uma segunda etapa, foi elaborada uma página na *Internet* com disponibilização destes dados online. A priori, este sistema de controle de irrigação automatizado irá medir a evapotranspiração.

São objetivos específicos deste projeto:

- a) monitorar as medidas de um lisímetro de lençol freático constante;
- b) construir e automatizar a leitura das informações obtidas no lisímetro de lençol freático constante;
- c) enviar para o microcontrolador, conectado a uma rede ethernet, que disponibilizará as informações num formato de banco de dados;

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um dos componentes do ciclo hidrológico, faz combinação concomitante com a transpiração. Sendo a transpiração a vaporização da água contida nos vegetais. Os dados de evapotranspiração são importantes para o uso da água em irrigação, uso de abastecimento de cidades, uso industrial, dimensionamento de sistemas que utilização águas residuais, etc (JENSEN et al., 1990; SEDIYAMA, 1998; ALLEN et al., 1998)

A utilização dos dados da evapotranspiração resultam em uma redução do consumo de água e recursos financeiros. Esses dados são importantes no manejo da água. Englobando construção e operação de reservatórios (LECINA et al., 2003).

A mudança de fase da água, do estado físico para o vapor, é um fenômeno relacionado a evaporação e a evapotranspiração. A perda de água em superfícies de água livre, refere-se ao estudo da evaporação, mas a perda conjunta de água da planta e do solo, se refere a evapotranspiração (PEREIRA et al., 1997).

A medição da evapotranspiração denominada ET_0 , será utilizada para a determinação da evapotranspiração de outras culturas. Sendo assim, a denominação de ET_0 , refere-se a uma área com vegetação rasteira (grama), crescimento ativo e mantida a uma altura uniforme (DOORENBOS & PRUITT, 1977).

Os fatores que influenciam a evapotranspiração, são divididos em três categorias (ALLEN et al., 1998):

- fatores climáticos: radiação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento;
- fatores da cultura: tipo, variedade e estágio de desenvolvimento, além de altura, rugosidade, capacidade de reflexão, capacidade de cobertura do solo e características das raízes;
- fatores ambientais e de manejo: nível de salinidade no solo, fertilidade, presença de camadas impermeáveis no perfil, incidência de pragas e doenças, além de cobertura, densidade de plantio e conteúdo de água no solo.

3.2 Evapotranspiração: modelos

3.2.1 Método de Thornthwaite

O método de Thornthwaite estima a evapotranspiração potencial mensal, considerando como padrão 30 dias em um mês e doze horas de insolação diária.

Estimar a Evapotranspiração Potencial (ETP) em regiões de clima úmido, requer como dados de entrada a temperatura média de cada mês, onde: $T_n < 26,5 \text{ °C}$ e $T_n \geq 0$, conforme a Equação 1:

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_n}{I} \right)^a \quad (1)$$

sendo: ETP é a evapotranspiração potencial (mm/mês); T_n é a temperatura média mensal do mês n (°C); I é o índice de calor da região; a é o coeficiente, também relacionado à temperatura.

No caso de $T_n \geq 26,5 \text{ °C}$ a ETP é dada pela Equação 2.

$$ETP = -415,85 + 32,24 \cdot T_n - 0,43 \cdot T_n^2 \quad (2)$$

O valor de I é calculado pela fórmula:

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_n)^{1,514} \quad (3)$$

sendo que: I é o índice de calor da região e T_n é a temperatura média mensal do mês i (°C).

O expoente a , sendo uma função de I , é um índice térmico regional, e é calculado pela Equação 4:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (4)$$

A ETP deve ser corrigido para se obter a ETP do mês (Equação 5), caso o mês não tenha um padrão de 30 dias e cada dia com 12 horas de fotoperíodo.

$$ETP_{\text{corrigido}} = ETP \cdot Cor \quad (5)$$

sendo que: ETP corrigido é a evapotranspiração potencial ajustada (mm.mês^{-1}); ETP é a evapotranspiração potencial calculada previamente (mm/mês); ND o número de dias do mês em questão, N é o fotoperíodo médio daquele mês. Os valores de Cor encontram-se tabelados na Tabela 1, em função de diferentes latitudes para todos os meses do ano e calculado pela Equação 6.

$$Cor = \frac{ND \cdot N}{30 \cdot 12} \quad (6)$$

Tabela 1 - (Cor) Fator de Correção da evapotranspiração em função do fotoperíodo.

LAT (S)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	1,04	0,94	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04	1,04	1,01	1,04	1,01	1,04
5	1,06	0,95	1,04	1,00	1,02	0,99	1,02	1,03	1,00	1,05	1,03	1,06
10	1,08	0,97	1,05	0,99	1,01	0,96	1,00	1,01	1,00	1,06	1,05	1,10
15	1,12	0,98	1,05	0,98	0,98	0,94	0,97	1,00	1,00	1,07	1,07	1,12
20	1,14	1,00	1,05	0,97	0,96	0,90	0,95	0,99	1,00	1,08	1,09	1,15
22	1,14	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,99	1,00	1,09	1,10	1,16
23	1,15	1,00	1,05	0,97	0,95	0,89	0,94	0,98	1,00	1,09	1,10	1,17
24	1,16	1,01	1,05	0,96	0,94	0,88	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,17
25	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,93	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
26	1,17	1,01	1,05	0,96	0,94	0,87	0,92	0,98	1,00	1,10	1,11	1,18
27	1,18	1,02	1,06	0,96	0,93	0,86	0,92	0,97	1,00	1,11	1,12	1,19
28	1,19	1,02	1,06	0,95	0,93	0,86	0,91	0,97	1,00	1,11	1,13	1,20
29	1,19	1,03	1,06	0,95	0,92	0,85	0,90	0,96	1,00	1,12	1,13	1,20
30	1,20	1,03	1,06	0,95	0,92	0,84	0,90	0,96	1,00	1,12	1,14	1,21
31	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,96	1,00	1,12	1,14	1,22
32	1,20	1,03	1,06	0,95	0,91	0,84	0,89	0,95	1,00	1,12	1,15	1,23

Fonte: Adaptado (CAMARGO ,1962)

3.2.2 Método de Camargo

Para simplificar a estimativa de ETP pelo método de Thornthwaite, Camargo (1971) propôs a Equação 7.

$$ETP = 0,01 \cdot Q_0 \cdot T \cdot ND \quad (7)$$

sendo que: Q_0 - irradiância solar no topo da atmosfera (mm) de evaporação equivalente (Tabela 2); T - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), no período considerado; ND - número de dias do período considerado.

Tabela 2 - Radiação solar diária no topo da atmosfera, expressa em mm de evaporação equivalente no 15º dia do mês correspondente, para o hemisfério Sul

LAT (S)	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0	14,5	15,0	15,2	14,7	13,9	13,4	13,5	14,2	14,9	14,9	14,6	14,3
2	14,8	15,2	15,2	14,5	13,6	13,0	13,2	14,0	14,8	15,0	14,8	14,6
4	15,0	15,3	15,1	14,3	13,3	12,7	12,8	13,7	14,7	15,1	15,0	14,9
6	15,3	15,4	15,1	14,1	13,0	12,6	12,5	13,5	14,6	15,1	15,2	15,1
8	15,6	15,6	15,0	14,0	12,7	12,0	12,2	13,2	14,5	15,2	15,4	15,4
10	15,9	15,7	15,0	13,8	12,4	11,6	11,9	13,0	14,4	15,3	15,7	15,7
12	16,1	15,8	14,9	13,5	12,0	11,2	11,5	12,7	14,2	15,3	15,8	16,0
14	16,3	15,8	14,9	13,2	11,6	10,8	11,1	12,4	14,0	15,3	15,9	16,2
16	16,5	15,9	14,8	13,0	11,3	10,4	10,8	12,1	13,8	15,3	16,1	16,4
18	16,7	15,9	14,7	12,7	10,9	10,0	10,4	11,8	13,7	15,3	16,2	16,7
20	16,7	16,0	14,5	12,4	10,6	9,6	10,0	11,5	13,5	15,3	16,2	16,8
22	16,9	16,0	14,3	12,0	10,2	9,1	9,6	11,1	13,1	15,2	16,4	17,0
24	16,9	15,9	14,1	11,7	9,8	8,6	9,1	10,7	13,1	15,1	16,5	17,1
26	17,0	15,9	13,9	11,4	9,4	8,1	8,7	10,4	12,8	15,0	16,5	17,3
28	17,1	15,8	13,7	11,1	9,0	7,8	8,3	10,0	12,6	14,9	16,6	17,5
30	17,2	15,7	13,5	10,8	8,5	7,4	7,8	9,6	12,2	14,7	16,7	17,6

FONTE: Camargo e Camargo (1983)

3.2.3 Método do Tanque Classe A

O método do Tanque Classe A, a estimativa da evapotranspiração de referência (Equação 8), sendo que a água contida num tanque pode evaporar sem nenhum impedimento (SENTELHAS, 2003).

$$ETP = ECA \cdot K_p \quad (8)$$

sendo: ETP é a evapotranspiração de referência em mm/dia; ECA é a evaporação medida no Tanque Classe A, em mm/dia; K_p o coeficiente de ajuste do tanque.

Para facilitar a interpolação dos dados e a determinação da ETP, pode ser obtido através da Equação 9:

$$K_p = 0,482 + 0,024 \cdot \ln(B) - 0,000376 \cdot U + 0,0045 \cdot UR \quad (9)$$

em que: B é a bordadura, em metros; U a velocidade do vento (km.d⁻¹); e UR a umidade relativa média diária, em %.

É comum a adoção de um valor fixo de K_p quando dados de umidade relativa e umidade do vento não estão disponíveis. Dados experimentais mostraram que o K_p=0,72 tem sido o valor que proporciona os menores erros para condições de clima úmido. Instalado sobre um estrado de madeira, sobre uma superfície gramada e com área de aproximadamente 1,15 m² (SENTELHAS, 2003).

3.2.4 Método de Hargreaves e Samani

Este método foi desenvolvido por Hargreaves e Samani (1985) para condições semi-áridas, sendo a ETP expressa pela Equação 10.

$$ETP = 0,0023 \cdot Q_0 \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \cdot (T_{\text{med}} + 17,8) \quad (10)$$

onde: Q₀ é a irradiância solar no topo da atmosfera, expressa em mm de evaporação (Tabela 2); T_{max} a temperatura máxima do ar (°C); T_{min} a temperatura mínima do ar (°C); e T_{med} a temperatura média do ar (°C), no período considerado.

3.2.5 Método de Priestley-Taylor

Se no local houver medida do Saldo de Radiação (R_n), a fórmula de Priestley e Taylor (1972) para estimar a ETP (mm.d⁻¹), pela Equação 11, poderá ser utilizada.

$$ETP = \frac{1,26 \cdot W \cdot (R_n - G)}{2,45} \quad (11)$$

onde: R_n é a radiação líquida total diária (MJ.m⁻².d⁻¹); G é o fluxo total diário de calor no solo (MJ.m⁻².d⁻¹); W é um fator de ponderação dependente da temperatura e do coeficiente psicrométrico, sendo calculado pelas Equações 12 e 13.

$$W=0,407+0,0145.T \text{ para } (0^{\circ}\text{C}<T<16^{\circ}\text{C}) \quad (12)$$

$$W=0,483+0,01.T \text{ para } (16,1^{\circ}\text{C}<T<32^{\circ}\text{C}) \quad (13)$$

3.2.6 Método de Penman-Monteith

O método Penman-Monteith – FAO é considerado o mais adequado para as estimativas da evapotranspiração de referência porque se baseia em princípios físicos e considera todos os fatores climáticos que afetam a evapotranspiração de referência (LEE et al.,2004), podendo ser obtida pela Equação 14.

$$ETP = \frac{0,408.s.(R_n-G) + \frac{\gamma.900.U_2.(e_s-e_a)}{T+273}}{s+\gamma.(1+0,34.U_2)} \quad (14)$$

em que: R_n - é a radiação líquida total diária ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); G - é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), as mesmas considerações feitas sobre G no método anterior são válidas aqui); γ - $0,063 \text{ Kpa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ é a constante psicrométrica; T - é a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); U_2 - é a velocidade do vento a 2 m (m.s^{-1}); e_s - é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a - é a pressão parcial de vapor (kPa); s - é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar (kPa).

A declividade da curva de pressão de vapor (s) pode ser determinada pela Equação 15.

$$s = \frac{4098.e_s}{(T+237,3)^2} \quad (15)$$

em que: e_s – pressão de saturação à temperatura de bulbo seco (kPa); T – temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$).

A pressão de saturação à temperatura de bulbo seco (e_s) e a pressão atual (e_a) de vapor d'água, podem ser determinadas pela Equação 16 e Equação 17:

$$e_s = 0,6108.10^{\left(\frac{7,5.T}{237,5+T}\right)} \quad (16)$$

$$e_a = \frac{(e_s.UR)}{100} \quad (17)$$

sendo: T – temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$); e_a – pressão atual de vapor d'água (kPa); e_s - pressão de vapor de saturação à temperatura de bulbo seco (kPa); UR – umidade relativa do ar (%).

3.3 Lisímetro

A lisimetria vem sendo desenvolvida e melhorada constantemente, em função de que os dados obtidos a partir desta são úteis para um melhor conhecimento do requerimento hídrico das culturas agrícolas ao longo de seu ciclo produtivo. Inclusive auxiliando em estudos de ajuste da estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) de uma dada localidade, pois, com estes equipamentos torna-se possível obter-se sua medida.

Diversos são os autores que se aprofundaram nesses estudos e auxiliaram no desenvolvimento de equipamentos denominados de lisímetros recebendo maior destaque autores como Doorenbos e Pruitt (1977), Doorenbos e Kassam (1979) e Allen et al. (1998).

A evapotranspiração (ET) envolve simultaneamente fluxos de massa e energia na forma de calor latente. Sendo assim, métodos de balanço de massa tal como nos lisímetros e métodos de balanço de energia como o encontrado na razão de Bowen, podem vir a ser utilizados para quantificar a ET e ET_o em campos cultivados com culturas agrícolas e/ou vegetação natural (FLUMIGNAN & FARIA, 2009; CAMPECHE et al., 2011; SOUZA et al., 2011; SCHMIDT et al., 2013).

Os lisímetros são dispositivos que contém um volume de solo, isolado hidrológicamente do solo circundante, que torna possível controlar e medir diferentes fatores influentes no balanço de energia em relação à massa de água presente neste sistema (PUPPO, GARCÍA-PETILLO, 2010).

O efeito “oásis” sobre as plantas, será minimizada através da vegetação circundante do equipamento.

Outras variáveis como o espaçamento das paredes externas e internas, a área que a vegetação ocupa dentro do lisímetro, a radiação e a advecção térmica oriundas das paredes e a bordadura do mesmo, o regime da umidade do solo no seu interior, a espessura das paredes, a altura de suas bordas e diferenças de altura e densidade

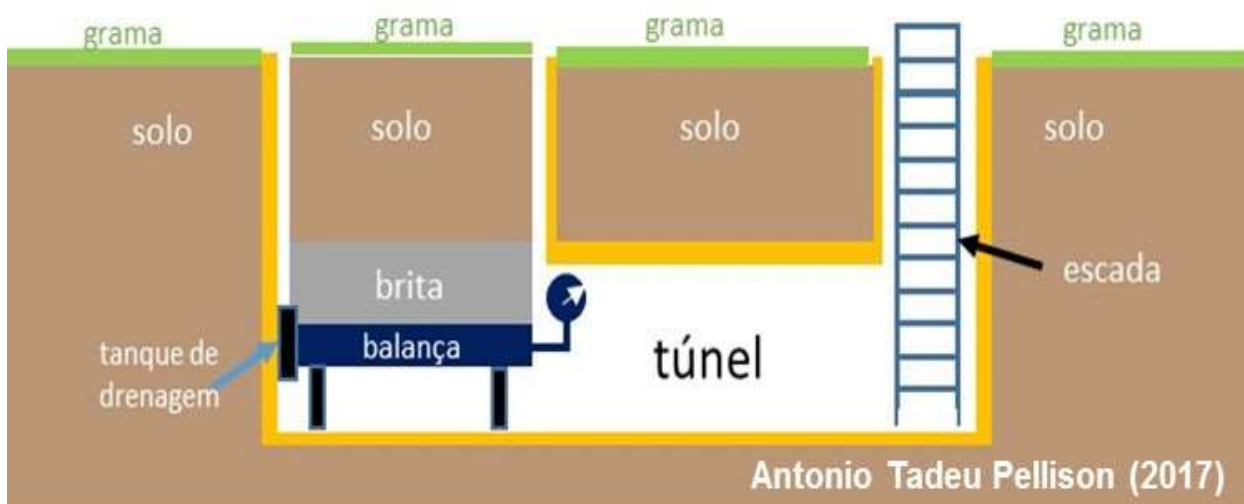
da vegetação dentro e fora do equipamento sem dúvida são as maiores fontes de erros de interpretações de medidas lisimétricas (CAMPECHE et al., 2011; CARVALHO et al., 2013).

Existem, basicamente, três tipos de lisímetro para a determinação da ET, denominados de drenagem, de lençol freático constante e de pesagem.

3.3.1 Lisímetro de Pesagem

A ET determinada num lisímetro de pesagem, pela variação do peso num bloco de solo (nu ou cultivado), devido a variação de entrada e saída de água, é uma medida direta (CAMPECHE et al., 2011).

Figura 1- Lisímetro de pesagem mecânica.



Irrigação e precipitação são considerados como forma de entrada de água no sistema o que garante o aumento de massa para um dado volume de solo, drenagem e ET são considerados como fatores de subtração de água dentro do sistema o que indica redução de massa no bloco de solo presente no lisímetro. Essa variação de massa é usualmente medidas pelo uso de células de carga cujos sinais são registrados e mantidos em sistemas eletrônicos de levantamento de dados (datalogger) (SCHMIDT et al., 2013).

Geralmente apresentam elevada precisão quando utilizados na medição em curtos períodos de tempo (partição horária e diária) da ETo e coeficiente de cultivo

(Kc) das culturas sendo considerado como procedimento padrão para a determinação desses coeficientes. (SOUZA et al., 2011; SCHMIDT et al., 2013).

Schmidt et al.(2013) menciona que, no caso de lisímetros de pesagem, ajustes devem ser feitos na calibração do intervalo de sensibilidade das células de carga, para que seja obtida uma correta variação de massa do sistema, antes que a ET (mm) seja realmente computada. Esse mesmo autor menciona que após um determinado intervalo de tempo a quantidade de água coletada (em massa) pelo sistema de drenagem deve ser subtraída da variação total de massa. Eventos de precipitação intensa, especialmente em regiões tropicais, aliados a vendavais devem ser considerados quando se estiver procedendo com uma análise lisimétrica.

Figura 2 - Lisímetro de pesagem - Departamento de climatologia UNESP- Botucatu



3.3.2 Lisímetro de Drenagem

Lafond et al. (2014) desenvolveram um lisímetro de drenagem para solos turfosos. Apesar de também possuir um monólito, neste estudo, este equipamento,

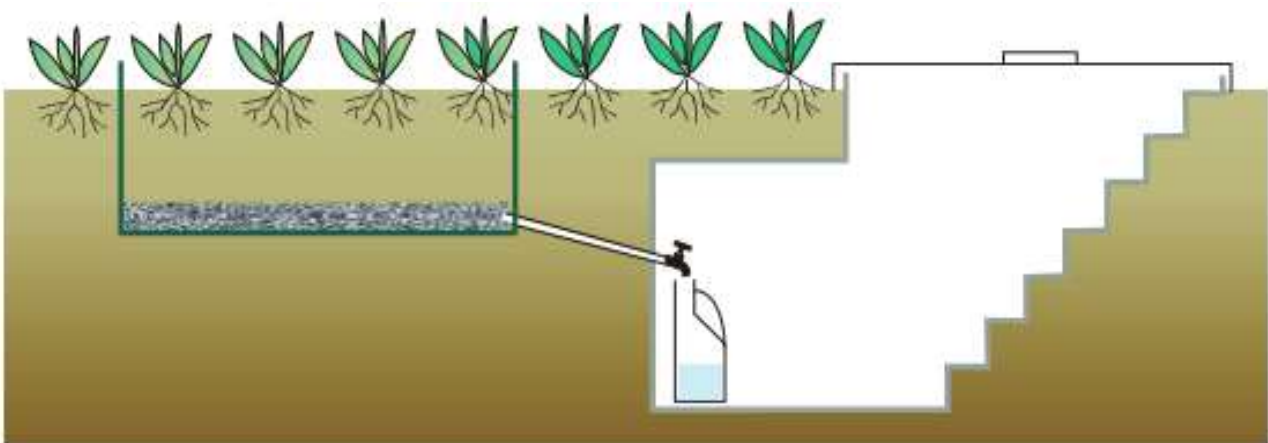
diferentemente dos outros casos apresentados, não foi reestruturado dentro de um container. Suas laterais foram escavadas de forma sistematizada.

Com medidas de 0,9 m de comprimento x 0,5 m de largura e 0,6 a 1,0 m de profundidade um trator com retro-escavadeira foi utilizado para abrir a primeira trincheira que foi considerada como um dos lados externos do monólito. Uma chapa de metal (0,9 m x 0,5 m) foi inserida verticalmente em uma pequena angulação entre 1 a 5° a uma profundidade entre 0,6 a 1,0 m.

Uma segunda trincheira foi feita em ângulo com a primeira, fazendo o que deveria ser a segunda lateral do monólito. A primeira lateral foi recoberta com filme plástico sendo este colado à chapa de metal e na superfície do monólito um molde plástico (0,9 m x 0,5 m x 0,2 em altura) interligado ao filme que foi ajustado/enterrado de tal forma que viesse a prevenir escoamento superficial (run-off) e transbordamento de água. Bentonita foi adicionada entre o filme plástico e o solo para vedar a superfície e evitar fluxos preferenciais de água. Um dreno superficial foi conectado à chapa de metal no fundo do lisímetro para coletar a água drenada.

Esse procedimento de escavação e vedação foi procedido nas quatro laterais do monólito, tornando-o um bloco de solo completamente isolado e que também pode ser visto como uma amostra indeformada.

Figura 3 - Esquema de um lisímetro de drenagem.



Fonte: VAREJÃO (2006).

Diferentemente dos outros lisímetros descritos o lisímetro de drenagem pode ter outros tipos de usos além da obtenção da medida da ETo.

Segundo Lafond et al. (2014), o lisímetro de drenagem é um método que garante medições diretas e precisas de fluxo de água no perfil do solo em uma aproximação integrada no tempo e espaço. Em períodos de drenagem no sentido vertical descendente -baixa ET e muita precipitação- o volume diário de água drenada dividido pela área específica do equipamento que pode ser considerado como uma estimativa do fluxo real de água (q ; $\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$).

3.3.3 Lisímetro de Lençol Freático Constante

Puppo e García-Petillo (2010) desenvolveram um trabalho com o uso de um lisímetro de lençol freático constante, de baixo custo e para culturas hortícolas. Da mesma forma que um lisímetro de pesagem, este equipamento também é possuidor de um monólito representativo de um perfil de solo individualizado do restante ao seu redor. Esse perfil de solo é reestruturado dentro um container com medidas específicas para a cultura avaliada em questão.

O monólito deve ser perfeitamente nivelado e em seu fundo se mantém uma lâmina livre de água de altura conhecida e que permanece constante e alimenta o consumo de água da cultura ali presente. Essa água é disponibilizada por capilaridade tendo em vista que o solo se apresenta na capacidade de campo. Esta lâmina de água mantém-se desta forma graças a um sistema de alimentação que está ligado a um tubo que garante a quantidade de água utilizada para alimentar o sistema, do qual possui uma válvula que cessa o sistema de alimentação todas as vezes que se alcançar a altura conhecida da lâmina referida.

Para que o sistema de alimentação funcione adequadamente é necessária uma carga hidráulica no sistema que é obtida graças a um tanque alimentador.

Por fim há um sistema para evacuar o excedente hídrico que pode ocorrer na superfície do monólito devido às chuvas que consiste em um tubo aberto que funcionando como uma calha e permitindo o escoamento do excedente de água.

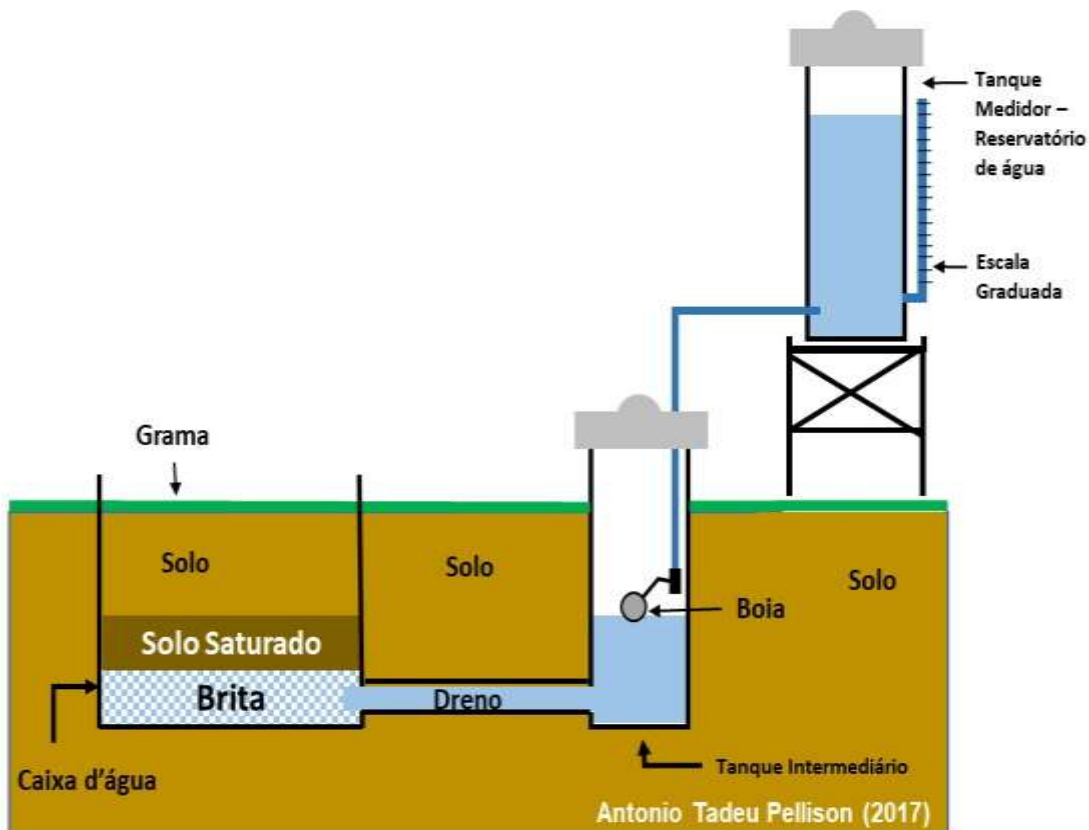
A água é coletada em um tanque que se encontra a 1m abaixo do fundo do monólito, individualizado da lâmina de água de alimentação do sistema, do qual é esvaziado todas as vezes após sua medida.

Segundo os mesmos autores mencionados anteriormente, este tipo de lisímetro pode medir com confiança a ETo de uma dada região e o consumo de água de culturas que não estejam submetidas em condições de stress hídrico. Diariamente

foram registrados: o volume de água de entrada no sistema com o uso de um medidor volumétrico, volume de drenagem com escala calibrada e volume de entrada de água no tanque de alimentação também em escala calibrada.

Cada lisímetro de lençol freático constante é composto de uma caixa d'água, tanque intermediário e tanque medidor como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Lisímetro de lençol freático constante – representação.



3.4 Fatores que afetam a evapotranspiração

A ordem de importância entre os fatores meteorológicos e físicos que afetam a evapotranspiração, as complicações entre eles tornam-se difíceis a separação por ordem de importância (KLAR, 1984).

- Radiação solar;
- Temperatura do ar;
- Umidade do ar;
- Velocidade do vento;

3.5 Automação na agricultura

O cotidiano do produtor rural, vem sendo alterado devido a automatização de operações e da gestão da atividade. Isso se deve a automação agrícola, que utiliza cada vez mais máquinas e ferramentas. As tecnologias de aquisição de dados, irrigação de precisão, entre outras, auxiliam o gerenciamento da água utilizada na irrigação, e conseqüentemente proporcionando economia no consumo de água. (CLEAVER et al., 2005; WEBSTER,1999).

A utilização da automação em sistemas irrigados, com a possibilidade de medição de fatores climatológicos, tais como: umidade relativa do ar, temperatura, direção e velocidade do vento, dentre outras, contribui para a melhoria da produção agrícola (TAIZ & ZEIGER, 2006).

O conceito da Indústria 4.0, que conquistou fábricas de vários segmentos onde temos à completa automatização dos processos produtivos. Esse conceito é referenciado e presente na agricultura através do conceito da Agricultura 4.0, baseada na produção digital, onde a tecnologia aplicada no campo é determinante para o aumento da produtividade e para que a agricultura alcance um novo patamar (CULTIVA, 2018; EMBRAPA, 2018).

O uso de rede de sensores, computação nas nuvens, utilização de sistemas que auxiliem à tomada de decisão na agricultura irrigada, entre outras tecnologias, são evidências do emprego da Agricultura 4.0. A Internet das Coisas, ou seja, as "coisas" (máquinas, infraestrutura, sensores, etc) se conectam à Internet ou alguma outra forma de comunicação, para informar a sua situação, receber instruções e tomar decisões à distância devido as informações recebidas. O emprego a Agricultura 4.0 permitirá disponibilizar dados com nível de detalhamento mais apurados e de forma segura e rápida (GAUCHAZH, 2018; UNICAMP, 2018).

3.6 Microcontroladores e Sistemas Embarcados

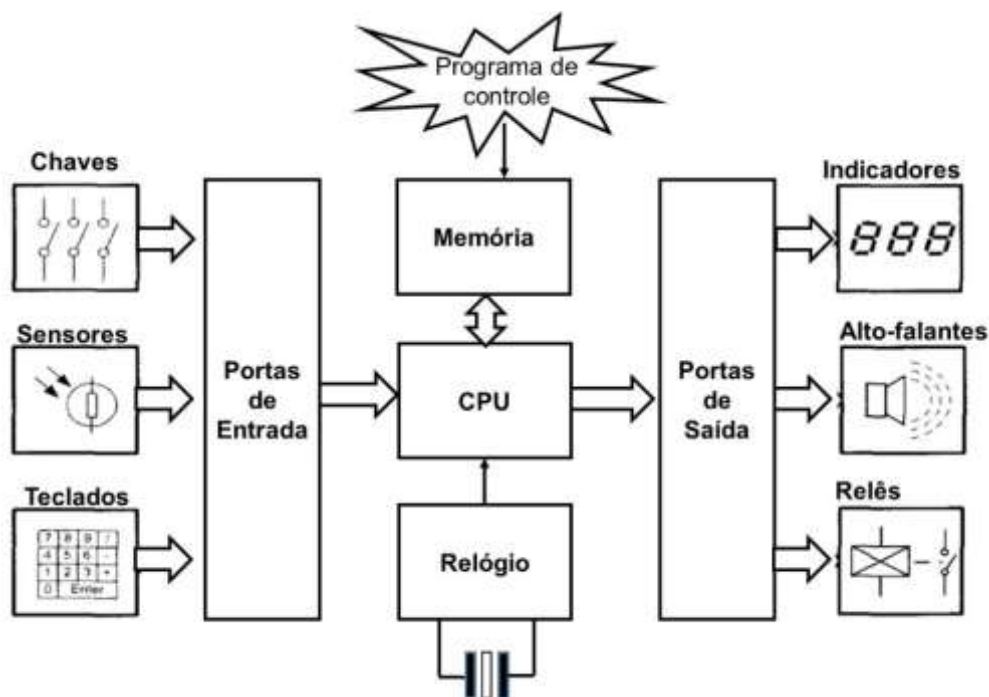
Os microcontroladores utilizados para o tratamento de sinais digitais e destacam-se por possuírem várias funcionalidades. Mostrada na Figura 5.

Dispositivos capazes de efetuar o controle de equipamentos eletrônicos ou mesmo de máquinas de pequeno e grande porte, por meio de programação realizada

em diferentes tipos de linguagem, são os microcontroladores. É um componente muito versátil, pois ele é programável e pode ser empregado em diversas aplicações.

Várias empresas como Atmel, Microchip, Intel, Motorola, Texas, entre outros fabricantes possuem microcontroladores cada vez mais velozes, robustos, com maior capacidade de processamento, baixo consumo de energia, entre outras vantagens que foram atingidas devido ao alto investimento nas áreas de pesquisa e desenvolvimento.

Figura 5 - Um sistema de microcontrolador com entradas e saídas típicas.



Fonte: TOOLEY (2007).

O desenvolvimento dos microcontroladores deve-se ao grande número de funcionalidades disponíveis em um único circuito integrado. Como o seu funcionamento é ditado por um programa, a flexibilidade de projeto e de formas de trabalho com um hardware específico são inúmeras, permitindo aplicação nas mais diversas áreas (LIMA,2010).

Os microcontroladores caracterizam-se pelo seu baixo consumo de energia, tamanho reduzido e são uma alternativa eficiente para controlar muitos processos e aplicações.

3.7 Sistemas Embarcados

A sociedade está cercada por incontáveis sistemas embarcados, encontrados em diversos equipamentos dentre os quais destacamos: aparelhos de comunicação móvel, TV digital, som, modems, brinquedos, câmeras digitais, fornos de micro-ondas e outros aparelhos eletrodomésticos, inclusive com controle remoto. Até mesmo em alguns carros são usados vários deles, em diferentes partes como, por exemplo, no sistema de injeção eletrônica, freio ABS, airbag, computador de bordo, etc.

O computador pode executar os mais diversos programas simultaneamente e com diferentes funções, os sistemas embarcados são dispositivos "invisíveis", que estão cada vez mais presentes em nosso cotidiano, de forma que muitas vezes sequer percebemos que eles estão lá (MORIMOTO, 2007).

Sistemas embarcados são geralmente desenvolvidos para uma tarefa específica. Por questões de segurança e aplicabilidade alguns ainda possuem restrições para computação em tempo real. O software desenvolvido para sistemas embarcados é armazenado em uma memória ROM ou memória flash. Por vezes o sistema também é executado com recursos computacionais limitados: sem teclado, sem tela e com pouca memória, como os utilizados com o Arduino.

3.8 O projeto Arduino

O projeto Arduino permite a conexão com diversos circuitos eletrônicos externos, que podem ser energizados através de um conector USB a partir de um computador ou de uma bateria de 9V. Eles podem ser controlados diretamente por um computador e, a seguir, desconectados para trabalharem de forma autônoma (MONK, 2014).

A plataforma eletrônica Arduino possui uma série de dispositivos eletrônicos agregados a um microcontrolador em uma placa de circuito integrado. Projeto aberto de uma placa de interface baseada em microcontrolador; ele é mais do que isso porque, além da própria placa, inclui também as ferramentas de desenvolvimento de software necessárias para programar as placas de Arduino.

Figura 6 - Arduino UNO

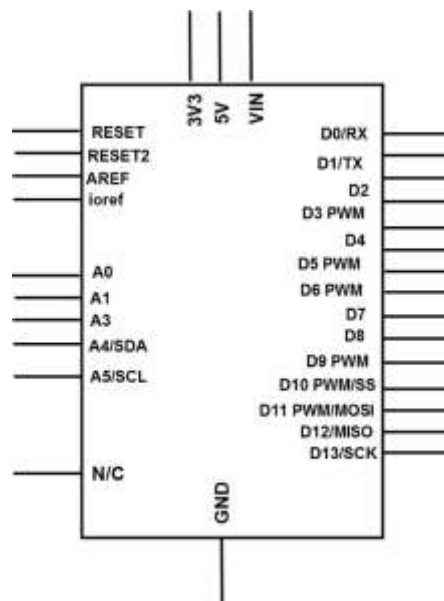


Fonte: ARDUINO (2014).

3.8.1 Hardware e Software do Arduino

Até o momento temos uma série de versões de Arduino, todas baseadas em um microcontrolador de 8 bits Atmel AVR RISC. As versões do Arduino são: Duemilanove e Uno (Figura 7), usam o ATmega328 com memória flash de 32 KB e podem comutar automaticamente entre USB e corrente contínua. Para projetos que exigem mais Entrada/Saída e memória há o Arduino Mega 1280, com memória de 128KB, ou o mais recente Arduino Mega 2560, com memória de 256KB (EVANS et al., 2013).

Figura 7 - Diagrama esquemático do Arduino UNO

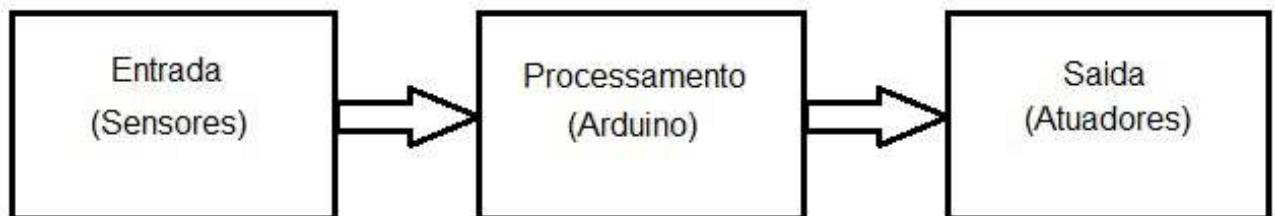


Fonte: ARDUINO (2014).

A disposição dos conectores permite que placas, denominadas *Shields*, possam ser encaixadas por cima da placa principal. É possível comprar *Shields* já montadas para serem utilizados com os mais diversos propósitos, incluindo: conexão com redes Ethernet, Wifi, controle de motores, display de LCD, etc (MONK, 2014).

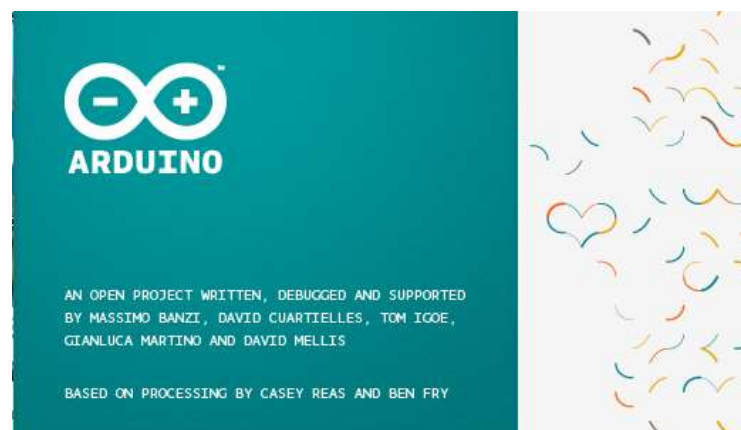
Os desenvolvedores do projeto Arduino disponibilizam todos os códigos e diagramas de montagem para qualquer usuário interessado em confeccionar o seu próprio protótipo, da mesma forma que vendem as placas montadas para todo o mundo. A Figura 8, mostra um diagrama de blocos de processamento com a aplicação com Arduino.

Figura 8 - Esquema de processamento com a aplicação do Arduino.



A IDE do Arduino (Figura 9), possui exemplos de programas e tudo que é necessário para o desenvolvimento de uma aplicação (EVANS et al., 2013).

Figura 9 - Software Arduino.



Fonte: ARDUINO (2014).

A programação desenvolvida usando o editor de texto da IDE do Arduino são chamados de Sketches, e são salvos com a extensão de arquivo.ino.

3.8.2 Ethernet para Arduino

A interconexão de redes LAN, tendo como característica principal o seu funcionamento baseado na transmissão por pacotes. Ou seja, decompor um arquivo grande em pequenos pacotes, adicionar os devidos campos para identificação e controles e enviar os pacotes (OLIVEIRA et al.,2006).

A maneira mais simples do desenvolvimento de aplicações é a utilização de sistemas embarcados que já possuem em seu encapsulamento todo o hardware necessário para essa comunicação. Praticamente todos os fabricantes de componentes para sistemas embarcados têm linhas específicas com esses tipos de equipamentos que estão ficando muito difundidos atualmente e, conseqüentemente, baixando seu custo rapidamente.

Um dos canais de comunicação mais poderoso do Arduino é a Ethernet, o Arduino torna fácil a configuração de comunicação via internet usando o Shield Ethernet e a biblioteca Ethernet (EVANS et al., 2013).

3.8.3 Shields Arduino

Um dos grandes legados da plataforma Arduino é a padronização de características geométricas, posição de pinos de entradas e saídas e tensões e a possibilidade de conexões rápidas através de conectores de barras de pinos que permitem a conexão de periféricos sobre a plataforma Arduino utilizada. Esses periféricos são chamados de Shields, que são placas de circuito impresso que utiliza a padronização geométrica e de pinos para alimentar e se comunicar com os periféricos adicionados, aumentando as funcionalidades disponíveis (STEVAN, 2015).

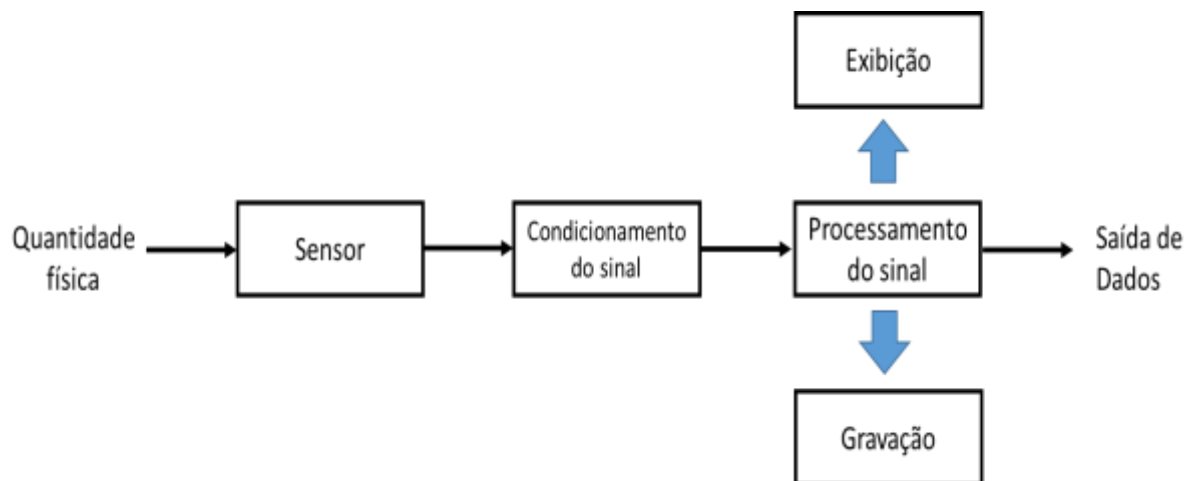
Os Shields são placas conectadas ao Arduino com o objetivo de expandir suas funcionalidades.

Acoplada uma Shield sobre uma plataforma Arduino, há a possibilidade de uma outra Shield ser acoplada à anterior, reduzindo a necessidade do uso de condutores de interligação, acelerando o processo de desenvolvimento de projeto em sua fase de concepção.

3.9 Sistemas de instrumentação e controle

Na Figura 10 está mostrado o arranjo de um sistema de instrumentação. A quantidade física a ser medida age em um sensor que produz um sinal elétrico de saída. O condicionamento subsequente do sinal será necessário antes que ele esteja em um nível e em uma forma aceitáveis para o processamento, exibição e gravação do sinal. Além disso, como o processamento do sinal pode usar sinais digitais em vez de analógicos, pode ser necessário um estágio adicional de conversão de analógico para digital.

Figura 10 - Sistema de Instrumentação.

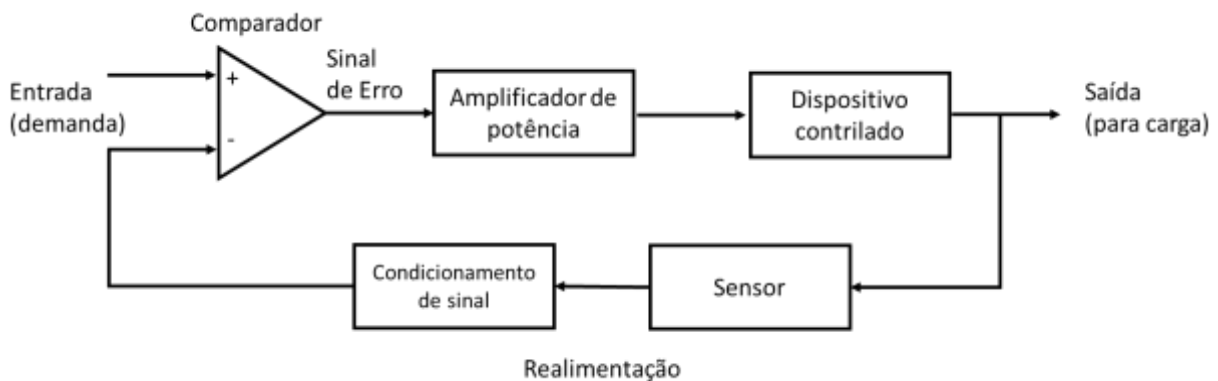


Fonte: TOOLEY (2007).

Na Figura 11 está apresentado o arranjo de um sistema de controle. Ele usa a realimentação negativa para regular e estabilizar a saída. Portanto, torna-se possível estabelecer a entrada ou demanda e deixar o sistema se auto regular comparando-o com um sinal derivado da saída.

Um comparador é utilizado para perceber a diferença entre os dois sinais e, quando é detectada qualquer discrepância, a entrada para o amplificador de potência é ajustada. Esse sinal é classificado como um sinal de erro. A entrada (demanda) é derivada quase sempre de um potenciômetro simples.

Figura 11 - Sistema de Controle.



Fonte: TOOLEY (2007).

3.9.1 Sensores e Transdutores

Os sensores e transdutores, possuem a capacidade de receber e responderem a estímulos, e também a sinais de um ambiente de aplicação. São responsáveis em um processo de controle por iniciarem o processo, através dos recebimentos dos sinais elétricos.

Os transdutores são dispositivos que convertem na forma de som, luz, calor, etc, em um sinal elétrico equivalente e vice-versa (TOOLEY, 2007). Os transdutores podem ser utilizados como entrada ou saída para os circuitos eletrônicos.

Um sensor é um tipo especial de transdutor utilizado para gerar um sinal de entrada para um sistema de medição, instrumentação ou controle. O sinal produzido por um sensor é uma analogia elétrica de uma quantidade física, tal como distância, velocidade, aceleração, temperatura, pressão, etc (TOOLEY, 2007).

Um transdutor pode ser classificado como analógico ou digital. Embora a maioria dos transdutores seja analógico por natureza, transdutores digitais estão se tornando populares devido a suas características e vantagens adicionais (BHUYAN, 2013).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Caracterização da área

O presente trabalho foi desenvolvido no campus de Botucatu – SP, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, no Campus de Botucatu – SP, no Laboratório de Radiometria Solar do Departamento de Engenharia Rural. Sendo a altitude de 786m, 22°51’S de latitude e 48°26’W de longitude.

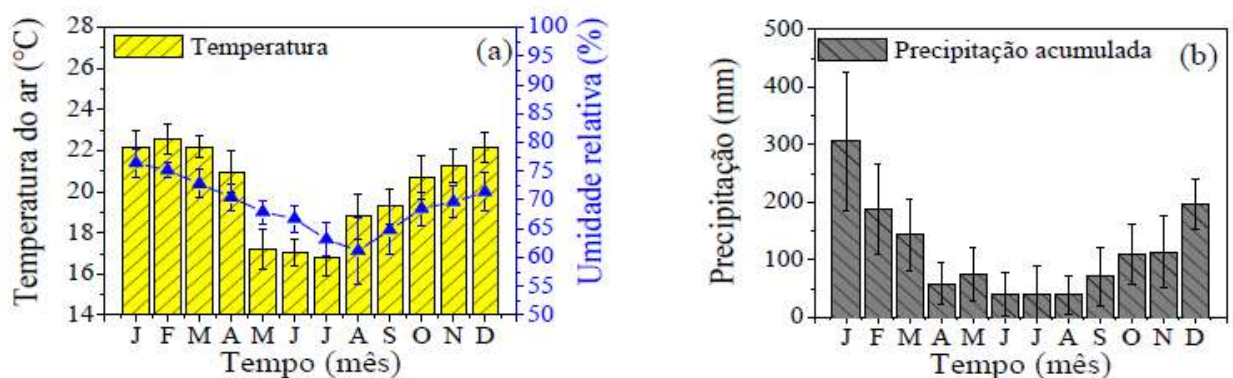
Localizado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, Botucatu possui grande variação de altitude, entre 400 a 500 m na região mais baixa (depressão periférica) e de 700 a 900 no Planalto Ocidental Paulista. O clima é classificado como temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco.

A Figura 12 (a - b) mostra as séries climáticas da temperatura, umidade relativa e precipitação, do período de 1970 a 2008 em Botucatu.

A evolução anual da temperatura e umidade relativa (Figura 12 - a) mostra que fevereiro é o mês mais quente e julho é o mais frio do ano, com temperaturas médias de 22,5°C e 16,8°C, respectivamente. Os meses de janeiro e agosto são mais e o menos úmidos, com percentuais de 76,5% e 61,20% respectivamente.

A Figura 12-b mostra a evolução anual da precipitação, com períodos chuvoso e seco. No mês de janeiro ocorre a maior precipitação, sendo a menor em julho e agosto. De abril a setembro, o período seco.

Figura 12 - Séries Climáticas (período: 1970-2008): (a) Temperatura e Umidade Relativa; (b) Precipitação



4.1.2 Dimensões e padronização da área

A área experimental totalmente coberta com grama Batatais (*Paspalum notatum*), possui área retangular (15,6m x 25,6m) que resulta numa área de 399,36 m², de acordo com o padrão estabelecido pelo boletim da FAO-56 (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura). A altura da grama é mantida em 10cm. O terreno tem declividade de 2%, sendo o solo classificado como Latossolo vermelho distroférico. A Figura 13, mostra imagem da Estação Agrometeorológica.

Figura 13 - Imagem da Estação Agrometeorológica



4.1.3 Sistema de Controle

O monitoramento foi realizado pela plataforma Arduino, também com um sensor ultrassônico, um módulo temporizador em tempo real, um transceiver nRF24L01 e um Shield (placa de expansão) SD-Card. O SD-Card tem como objetivo armazenar a série de medidas realizadas pelo ultrassom e transmitidas pelo transceiver.

4.1.3.1 Arduino

O Arduino modelo UNO é um dos primeiros e mais simples de todos os modelos de placas de Arduino. Consiste numa plataforma de hardware para o desenvolvimento rápido de circuitos eletrônicos, associado a uma IDE de código aberto. Possui um microcontrolador da família AVR de grande confiabilidade. Este é da família 328P que pode atingir uma velocidade de 20MHz, de 8 bits, com 32 KB de memória flash, 1 KB de memória EEPROM, 2 KB de RAM, além de um conversor analógico digital interno de 10 bits (BANZI,2012).

A Figura 14 ilustra o modelo Arduino UNO.

Figura 14 - Componentes de um Arduino.



- 1 - Conector USB para o cabo tipo AB
- 2 - Botão de reset
- 3 - Pinos de entrada e saída digital e PWM
- 4 - LED verde de placa ligada
- 5 - LED laranja conectado ao pin13
- 6 - ATmega encarregado da comunicação com o computador
- 7 - LED TX (transmissor) e RX (receptor) da comunicação serial
- 8 - Porta ICSP para programação serial
- 9 - Microcontrolador ATmega 328, cérebro do Arduino
- 10 - Cristal de quartzo 16Mhz
- 11 - Regulador de tensão
- 12 - Conector fêmea 2,1mm com centro positivo
- 13 - Pinos de tensão e terra
- 14 - Entradas analógicas

Fonte: ARDUINO (2014).

Possui uma conexão USB a qual é utilizada como porta serial, e também pode ser utilizada para alimentar o circuito eletrônico. A alimentação, quando não realizada pela USB, é feita por fonte externa, preferencialmente entre 7 e 12V contínua (STEVAN, 2015).

Tensões presentes na placa:

- 3,3V: fornece tensão de 3,3V para a alimentação de Shield e módulos externos. Corrente máxima de 50mA;
- 5V: fornece tensão de 5V para a alimentação de Shields e circuitos externos;
- GND: pino de referência, terra;
- VIN: pino para a alimentar a placa através de Shield ou bateria externa.

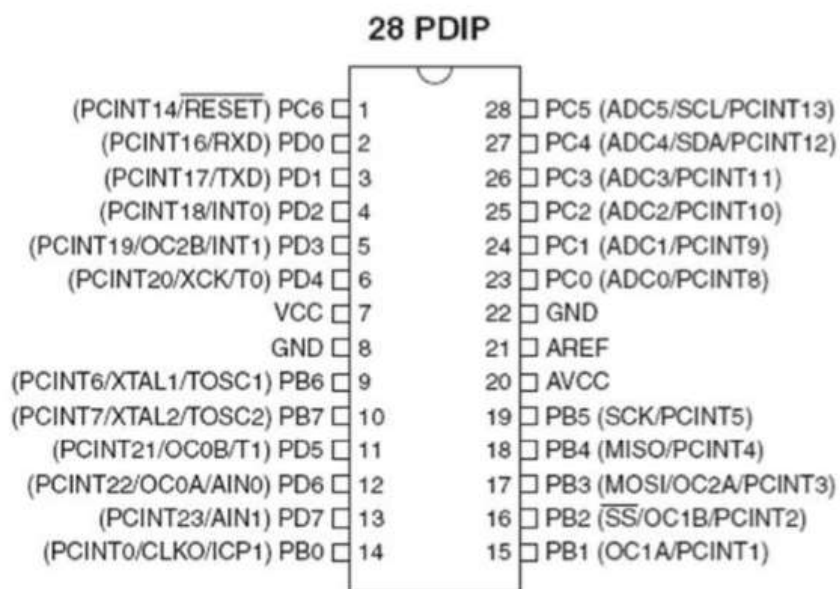
As características do Arduino UNO estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características da plataforma UNO

Microcontrolador	ATMEGA328
Tensão de funcionamento	5V
Tensão de entrada fonte externa	7 – 12V
Tensão de entrada (limites0	6 – 20V
Digital pinos de I/O	14 (sendo 6 pinos fornecem a modulação PWM)
Entrada Analógica	6
Corrente DC para pinos I/O	40mA
Corrente DC para pino 3,3V	50mA
Memória Flash	32KB(ATMEGA328) dos quais 0,5KB utilizado pelo bootloader
SRAM	2KB(ATMEGA328)
EEPROM	1KB(ATMEGA328)
Velocidade de clock	16MHz

Na Figura 15, os nomes dos pinos do ATmega328 são apresentados para os encapsulamentos PDIP. Cada pino acumula várias funções selecionáveis. As siglas nos pinos resumem as funcionalidades desses e serão abordadas no momento adequado.

Figura 15 - Pinagem Arduino ATmega328.



Fonte: LIMA (2012).

4.1.3.2 Sensor Ultrassônico HC-SR04

O Sensor Ultrassônico HC-SR04 componente que realiza leituras entre 2 cm e 4 metros de distância, sendo a sua precisão de 3 mm.

A distância medida pelo HC-SR04, é calculada pelo tempo de envio e retorno do sinal ultrassônicos.

Figura 16 - Sensor Ultrassônica HC-SR04



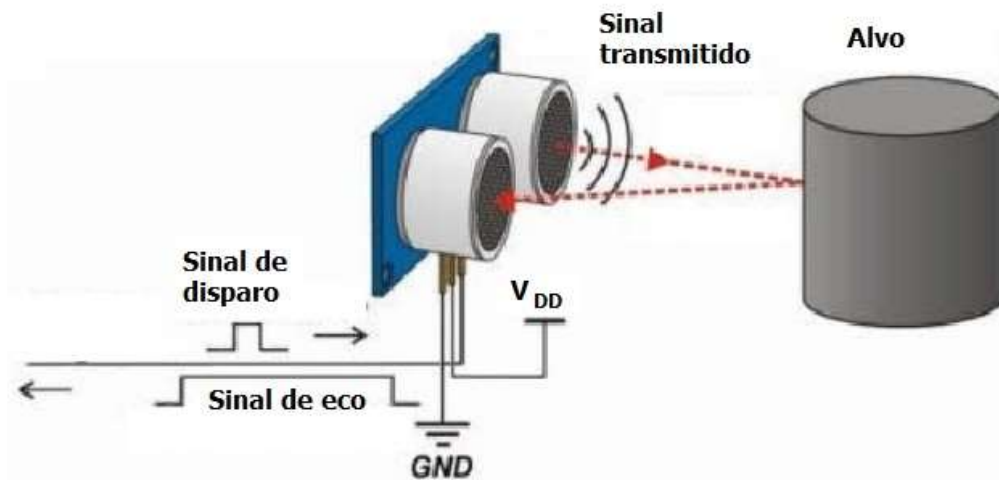
Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Para a ativação necessita-se de um gatilho (trigger) de pelo menos $10\mu\text{s}$ de nível alto (STEVAN, 2015).

Características do HC-SR04:

- Tensão de funcionamento: 5Vdc;
- Corrente: 2mA;
- Saída de sinal: sinal positivo pulsado entre 0 e 5V, proporcional à distância detectada;
- Ângulo de sensor: $<15^\circ$;
- Distância de detecção: de 2 cm a 450cm;
- Precisão: acima de 3mm.

Figura 17 - Sensor ultrassônico – princípio de funcionamento.



Fonte: STEVAN (2015).

4.1.3.3 Módulo NRF24L01 Wireless Transceiver

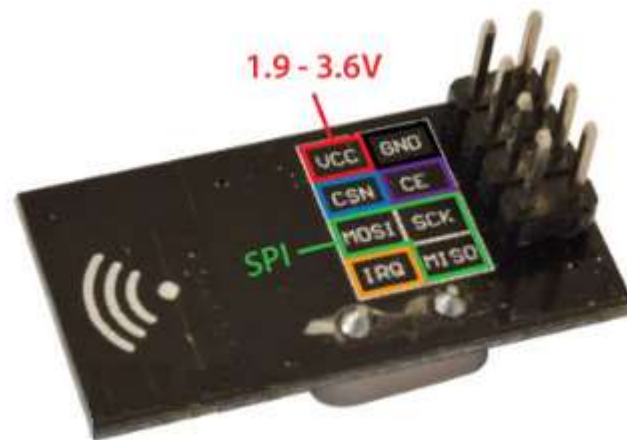
O módulo nRF24L01 é compacto e muito eficiente, utilizado para a comunicação entre a estação lisimétrica e o laboratório onde está instalado o computador responsável pelo recebimento dos dados. Caracteriza-se pelo baixo consumo de energia e pela velocidade de comunicação que pode chegar a 2Mbps. O barramento SPI está integrado a esse dispositivo, possibilitando interligar aos microcontroladores. A Figura 18, mostra o módulo NRF24L01 e a Figura 19 a sua respectiva pinagem.

Figura 18 - Módulo NRF24L01



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

Figura 19 - Módulo NRF24L01 – pinagem.



Fonte: HOW TO MECATRONICS (2017).

Três desses pinos – 09, 10 e 13 – abaixo/relacionados - são para a comunicação SPI e eles precisam ser conectados aos pinos SPI do Arduino, sendo que cada placa Arduino Figura 19 tem diferentes pinos SPI. Os pinos CS e CE podem ser conectados a qualquer pino digital da placa Arduino e são usados para configurar o módulo em modo de espera ou ativo, bem como para alternar entre o modo de transmissão ou de comando. O último pino é um pino de interrupção que não precisa ser usado. A comunicação SPI sempre tem um master e o restante slave. A Tabela 4, lista a pinagem de ligação do NRF24L01.

Tabela 4 - Pinagem para ligação do módulo NRF24L01

Função	Arduino Mega	Arduino UNO	
MOSI	51	11	Dados do máster para slave
MISO	50	12	Dados do slave para máster
SCK	52	13	SPI clock de sincronização
CS	53	10	SPI seleciona qual slave receberá os dados
CE	9	9	SPI slave data output

Características:

- comunicação RF sem fio a 2,4GHz;

- distância de operação entre 70m a 100m para 256kbps (600m a 1Km nos módulos com antena)
- tensão de operação entre 1.9V e 3.6V.
- corrente de operação em 13,2 (RX) e 13,5mA (TX) para 2Mbps (1uA se no modo de baixa potência).
- dimensões figuram em média de 20mm x 29mm x 0.8mm

4.1.3.4 Shield Relógio de Tempo Real

A variação da altura da água no tanque medidor precisa de um monitoramento preciso no acompanhamento do tempo. Como recurso para suprir esta necessidade é utilizada uma Shield RTC (Real Timer Clock), que consiste em uma placa desenvolvida sobre o CI RTC DS3231, um componente de contagem de tempo que possui uma precisão de ± 2 minutos por ano e comunica no protocolo I²C, disponível no Arduino UNO. O mesmo fornece informações de dia, mês, ano, semana, minuto, hora e segundo, devendo sempre ser alimentado com uma bateria de lítio de 3 volts. Na Figura 20 ilustra a Shield RTC (Real Timer Clock) utilizada (MCROBERTS, 2011).

Figura 20 - Shield RTC



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

4.1.3.5 Shield SD-Card

Todo o processo de monitoramento precisa ser armazenado de forma que possa ser facilmente acessado e tratado e deve também ser armazenado de forma segura e robusta, cujos cartões do tipo SD atendem perfeitamente. Uma Shield de cartão tipo SD é utilizada para a conexão de cartões ao sistema de monitoramento. Esta consiste

de um dispositivo mecânico de conexão do cartão, ligado diretamente a uma sequência de divisores de tensão. Estes são conectados aos pinos do Arduino a fim de limitar os sinais de comunicação de 5 volts para 3 volts do cartão. A comunicação é feita através do protocolo SPI, do Arduino. O protocolo SPI define a especificação de uma comunicação serial síncrona usada em pequenas distâncias, normalmente em sistemas embarcados. A Figura 21 ilustra a Shield de cartão SD utilizada.

Figura 21 - Shield SD-Card.



Fonte: PILIPEFLOP (2017).

4.1.3.6 Antena omnidirecional

A antena omnidirecional mostrada na Figura 22, propaga a onda eletromagnética em todas as direções. Esse tipo de antena tem uso facilitado por não precisar de direcionamento. São usadas tanto nas estações de base quanto nas placas de acesso.

Figura 22 - Antena Omnidirecional.



Fonte: MEGAMANUTE (2017).

Características Gerais da antena omnidirecional

- Modelo: L1-ANT2409
- Cor: Preto
- Padrões: IEEE 802.11 b/g/n
- Ganho: 9 dBi
- Frequência de Trabalho: 2.4~2.5 GHz

4.1.3.7 Bomba d'água

A bomba Better 650 é compacta. Características da bomba Sarlo Better B650:

- Isolamento a prova d'água (IPX8) resina epóxi.
- Vazão: 650 l/h.
- Coluna d'água: 1,20 m
- Consumo: 11 W
- Tensão: 127V

Figura 23 - Bomba d'água Modelo B650.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

4.1.3.8 Sensor de Nível de Líquidos

O sensor de nível de líquidos, é fabricado de material plástico, constituído de uma haste sendo de material flutuante onde desliza um cilindro. O sensor magnético que

está no cilindro é acionado por um ímã, que fecha o contato dos fios que saem do sensor. O contato pode ser normalmente aberto ou fechado.

4.1.3.9 Shield Ethernet W5100

A Shield Ethernet W5100 opera com a alimentação de 5V TTL e funciona com velocidade de comunicação de 10/100 Mbps. O Arduino utiliza o barramento SPI para a comunicação com a Shield Ethernet.

Possui alguns leds de indicação do seu funcionamento, tais como:

- PWR: indica que a placa está alimentada.
- LINK: indica que há conexão de rede.
- FULLD: indica que a conexão de rede é full duplex.
- 100M: indica que a velocidade de conexão de rede é de 100Mbps quando acessa e de 10Mbps quando apagada.
- RX: indica a recepção de dados.
- TX: indica a transmissão de dados.
- COOL: indica que houve colisão de rede.

Figura 24 - Shield Ethernet



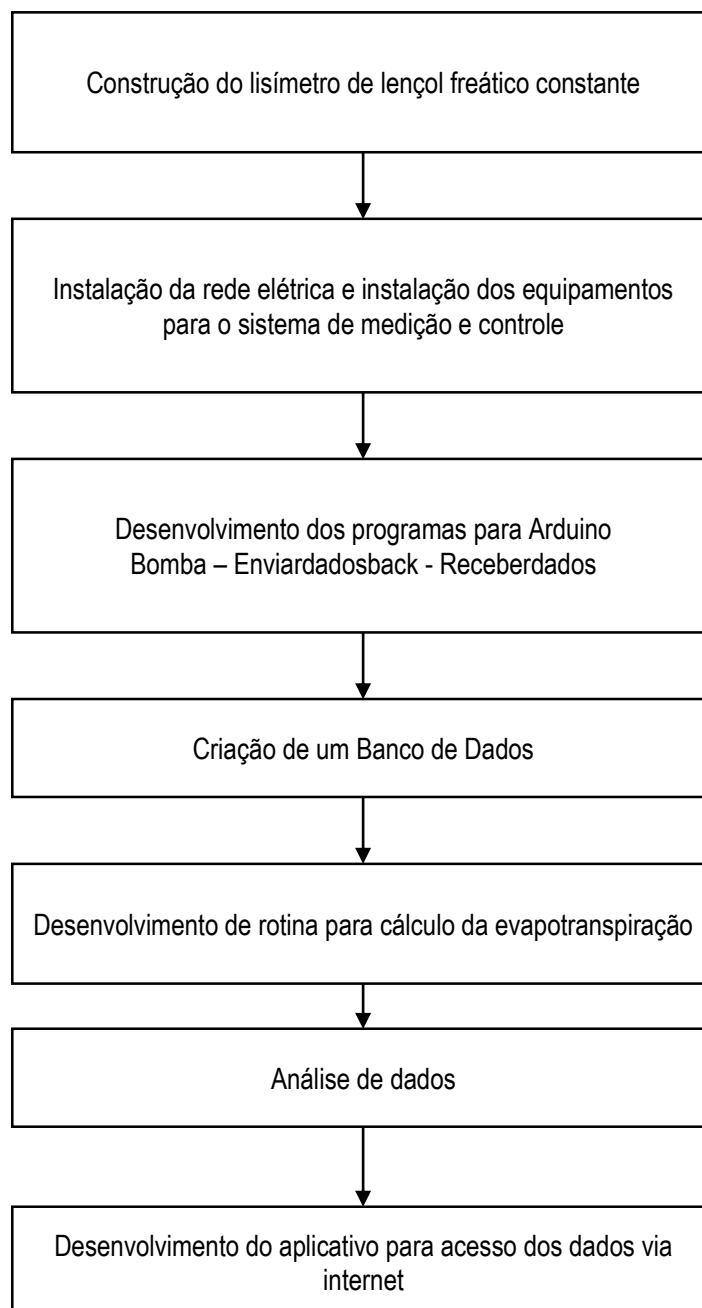
Fonte: PILIPEFLOP (2018).

4.2 Métodos

O sistema de monitoramento do lisímetro seguiu o procedimento metodológico mostrado na Figura 25.

Os sensores ultrassônicos foram instalados para monitorar altura de água no tanque medidor e no intermediário.

Figura 25 - Fluxograma para o desenvolvimento da metodologia



Para cada um dos Arduinos do sistema foi desenvolvido um programa específico. O Arduino que controla o acionamento da bomba d'água, o programa, chamado Bomba, lê o sensor do tanque intermediário, verifica a altura da água. Aciona a bomba caso o nível esteja menor que 25cm.

O Arduino que monitora o sensor do tanque medidor, o programa Sensor, envia a altura de água a cada uma hora, grava o valor medido pelo sensor no cartão SD Card e depois envia os dados. O Arduino conectado no computador é instalado o programa que recebe os dados e os direciona para um banco de dados.

A consulta dos dados será realizada por meio da página hospedada em um servidor web (Hostinger), cujo domínio denominado de: www.irrigafca.online.

A criação dessa página possibilita a visualização e download de dados.

4.2.1 Construção e Instalação do lisímetro

Para a medida da evapotranspiração de referência ETo, foi construído um lisímetro de lençol freático constante, com uma caixa d'água em polietileno de 500 litros, um tanque medidor e um intermediário e a drenagem realizada por bombeamento.

A caixa d'água de 0,58x1,22x0,95 m (altura, diâmetro superior e diâmetro inferior), é conectada ao tanque intermediário através de um tubo de PVC, sendo nível freático mantido a 25 cm da superfície.

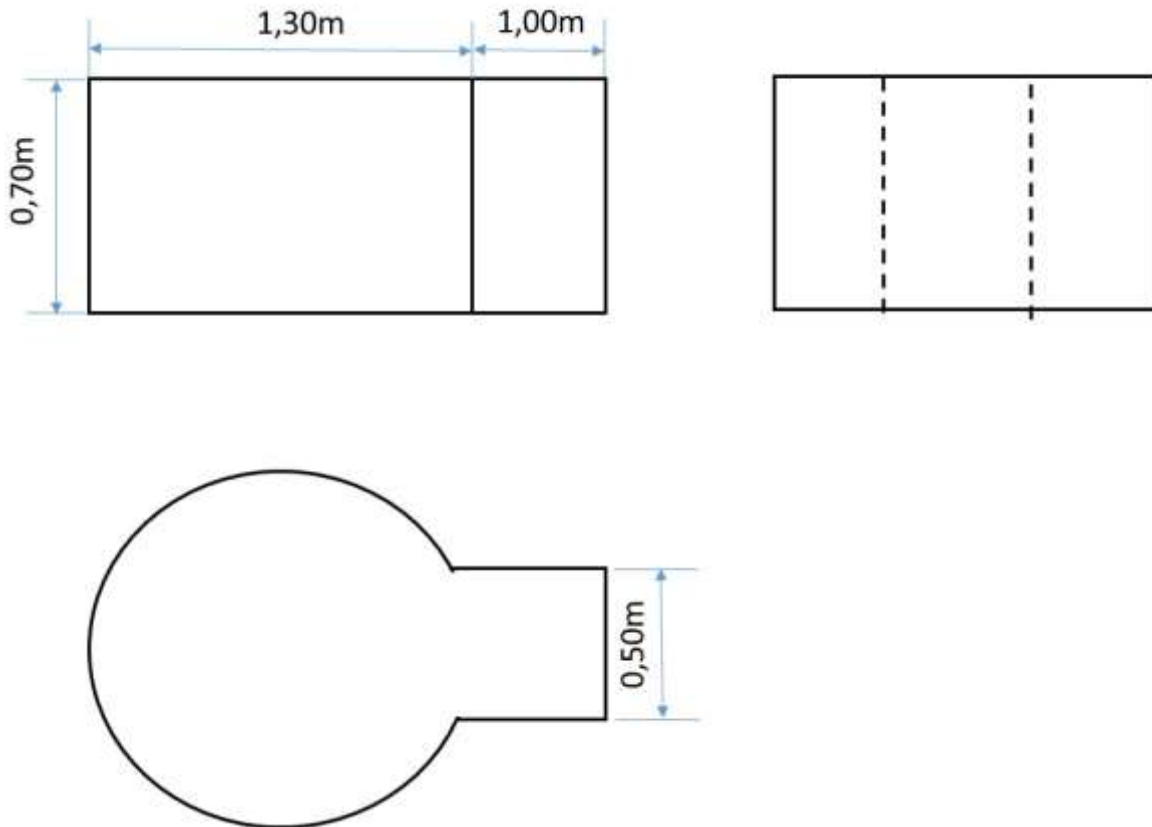
A escavação realizada para a instalação do lisímetro ocorreu de maneira manual, tomando-se o cuidado da separação do volume de terra retirado para posteriormente ser recolocado na caixa d'água do lisímetro, armazenadas no próprio local.

O lisímetro foi conectado ao tanque de passagem com um tubo de PVC. Posteriormente testou-se essa ligação colocando-se água e verificando possível vazamento. O tanque de passagem, manterá o nível do lençol freático pelo princípio dos vasos comunicantes.

O lisímetro foi introduzido no buraco cavado e nivelado. Foi colocado no fundo uma camada de brita nº1 e ela foi coberta por uma manta do tipo bidim, cuja finalidade é de separação da brita e terra. Em cima da manta bidim foi utilizada para preencher

o solo retirado do buraco e recolocado de forma a manter as características iniciais. A recolocação ocorreu com preenchimento de camadas e sofreu uma leve compactação (Figura 27).

Figura 26 - Medidas do buraco aberto



Após o preenchimento total da caixa d'água do lisímetro por terra, foi plantada a grama Batatais (*Paspalum notatum*), que é a superfície de referência para a quantificação da ETo, sendo plantada em toda a superfície do solo da Estação Agrometeorológica (Figura 28).

Figura 27 - a) Preenchimento da caixa d'água com brita nº 1; b) manta bidim cobrindo a brita; c) ligação do tanque intermediário com a caixa d'água.



Na instalação do lisímetro, a borda da caixa d'água fica 5cm acima da superfície do solo. No fundo do lisímetro a camada de brita tem 15cm de altura.

Figura 28 - a) preenchimento da caixa d'água com a terra retirada do local; b) preenchimento total de terra; c) plantio de grama.



4.2.2 Controle da Altura do Nível Freático

O tanque intermediário ou tanque controlador da altura do nível freático possui 0,70m de altura e 0,31 m de diâmetro. A parte superior do tanque controlador possui uma tampa que permite a passagem da mangueira que o une com o tanque de medição. No final da mangueira possui uma boia que controla o nível de água no tanque, sendo a altura ajustada por uma haste.

4.2.3 Instalação da Rede Elétrica

Construída uma estrutura para sustentar uma caixa tipo abrigo, para acomodar os Arduinos, o nRF24I01, o Shield SD Card, Shield RTC DS1307, fontes de tensão e facilitar as conexões entre os dispositivos. A estrutura é mostrada na Figura 29.

No quadro foi instalado disjuntor para a proteção das quatro tomadas instaladas, essas tomadas na tensão alternada 127V, que irão alimentar as placas Arduino e a bomba d'água.

Figura 29 - Montagem do quadro



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2017

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Sistema de coleta de dados

5.1.1 Instrumentação

O nível de água no tanque de medição foi realizado por um sensor ultrassônico, modelo HC-SR04. Foi utilizado uma caixa tipo abrigo, para acomodar a placa arduino tipo UNO, Shield SD Card e Shields: RTC DS1307. O arduino executa a mediação a cada uma hora e armazena os dados no cartão de memória.

O sensor ultrassônico deverá estar em nível com a água do tanque medidor.

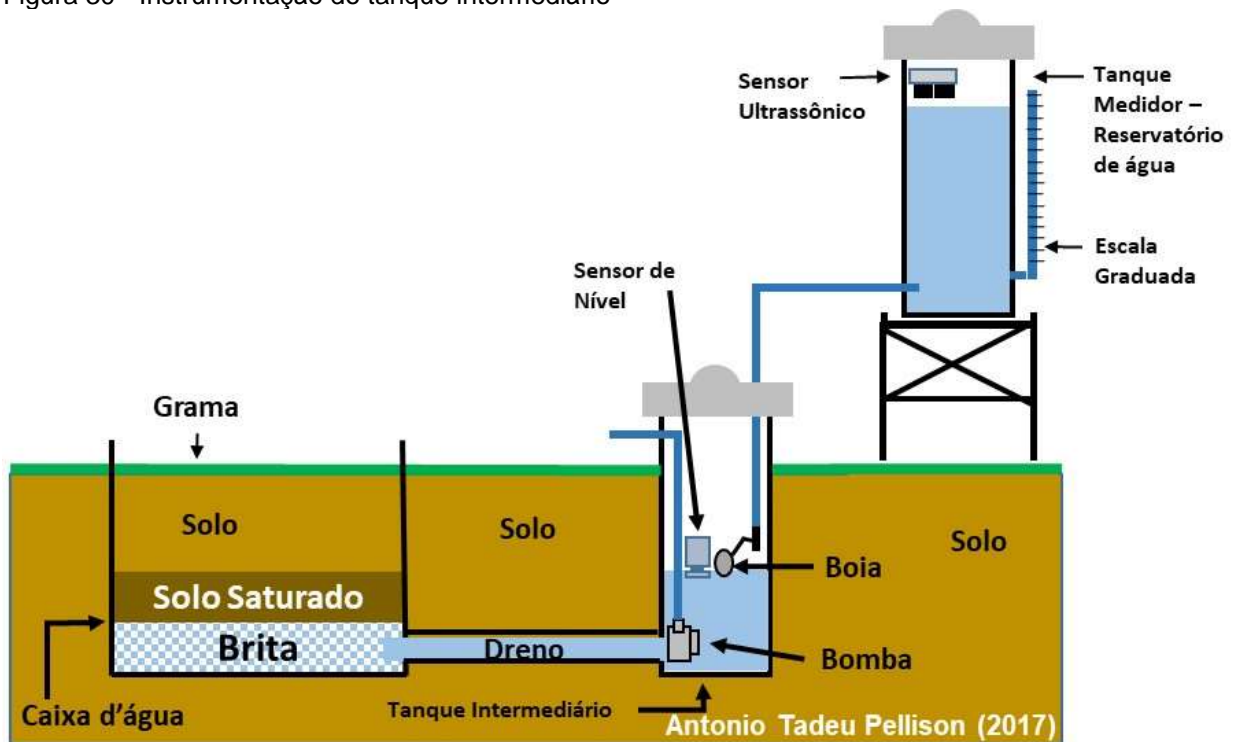
5.1.2 Instrumentação do Tanque Intermediário

Para o caso de precipitação pluvial, foi instalado um sensor de nível. Esse sensor de nível de água monitora o nível de água no tanque. Controlado por uma placa Arduino, uma bomba d'água será acionada para o momento em que a boia fique afogada, conseqüentemente retirando o excesso de água.

Inicialmente para a execução do processo descrito no parágrafo anterior, havia sido instalado um sensor ultrassônico, mas por questões de excesso de umidade no tanque, o sensor ultrassônico foi danificado em decorrência dessa umidade. O sensor de nível de líquidos instalado, é um sensor para aplicações em tanques fechados e com elevada umidade. Esse sensor de nível de líquidos requer um ajuste apurado para a sua utilização no tanque intermediário, em decorrência do ajuste concomitante com a boia.

Na Figura 30, apresenta-se o posicionamento do sensor ultrassônico e também do sensor de nível de água.

Figura 30 - Instrumentação do tanque intermediário



5.1.3 Instalação da Bomba d'água

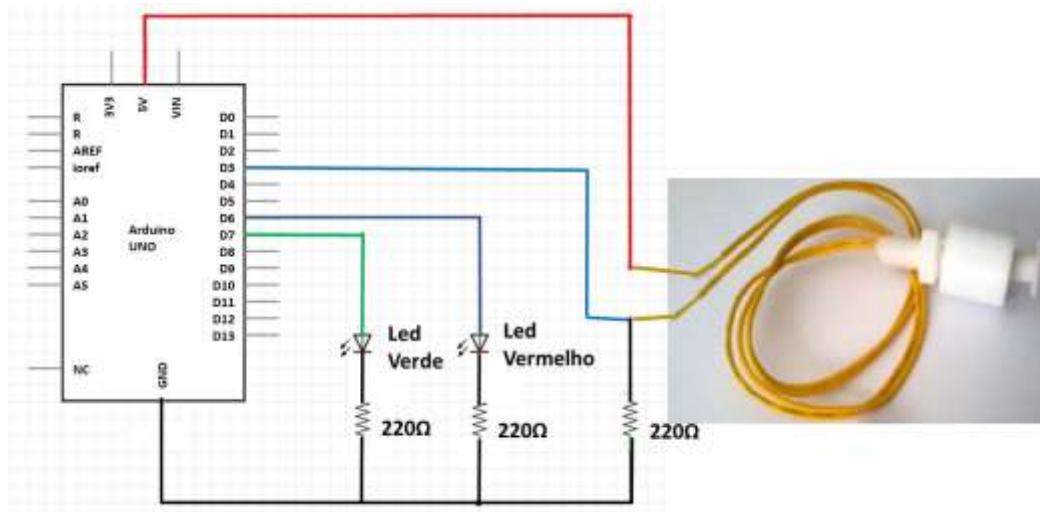
A bomba submersa Sarlo Better B650 está instalada no tanque intermediário, cuja finalidade é de recalque, ou seja, recalcar água no tanque quando ele atingir um nível de água inferior a 25 cm.

5.1.4 Instalação do Sensor de Nível de Líquidos

O sensor de nível de líquidos está instalado no tanque intermediário. Esse sensor está ajustado para manter o nível freático do lisímetro constante. Quando a água sobe em decorrência de precipitações, o sensor envia um sinal para o Arduino em que ele foi acionado. Logo após a bomba d'água é ligada.

A ligação do sensor de nível com o Arduino, contou com a ligação de dois leds, um verde e outro vermelho. Quando o nível freático em nível o *led* verde fica aceso e quando o nível freático sobe o *led* vermelho acende. A utilização desses dois *leds* é também interessante para o ajuste do sensor de nível de líquidos. A ligação dos dispositivos é apresentada na Figura 31.

Figura 31 - Esquema de ligação do Sensor de Nível de Líquidos



5.1.5 Disposição dos equipamentos

Na Figura 32 está mostrada a disposição dos equipamentos instalados para o monitoramento do nível de água nos tanques, Shields e transceiver necessários para o envio dos dados, instalados junto ao lisímetro de lençol freático constante, até a transmissão para um servidor de dados na Internet.

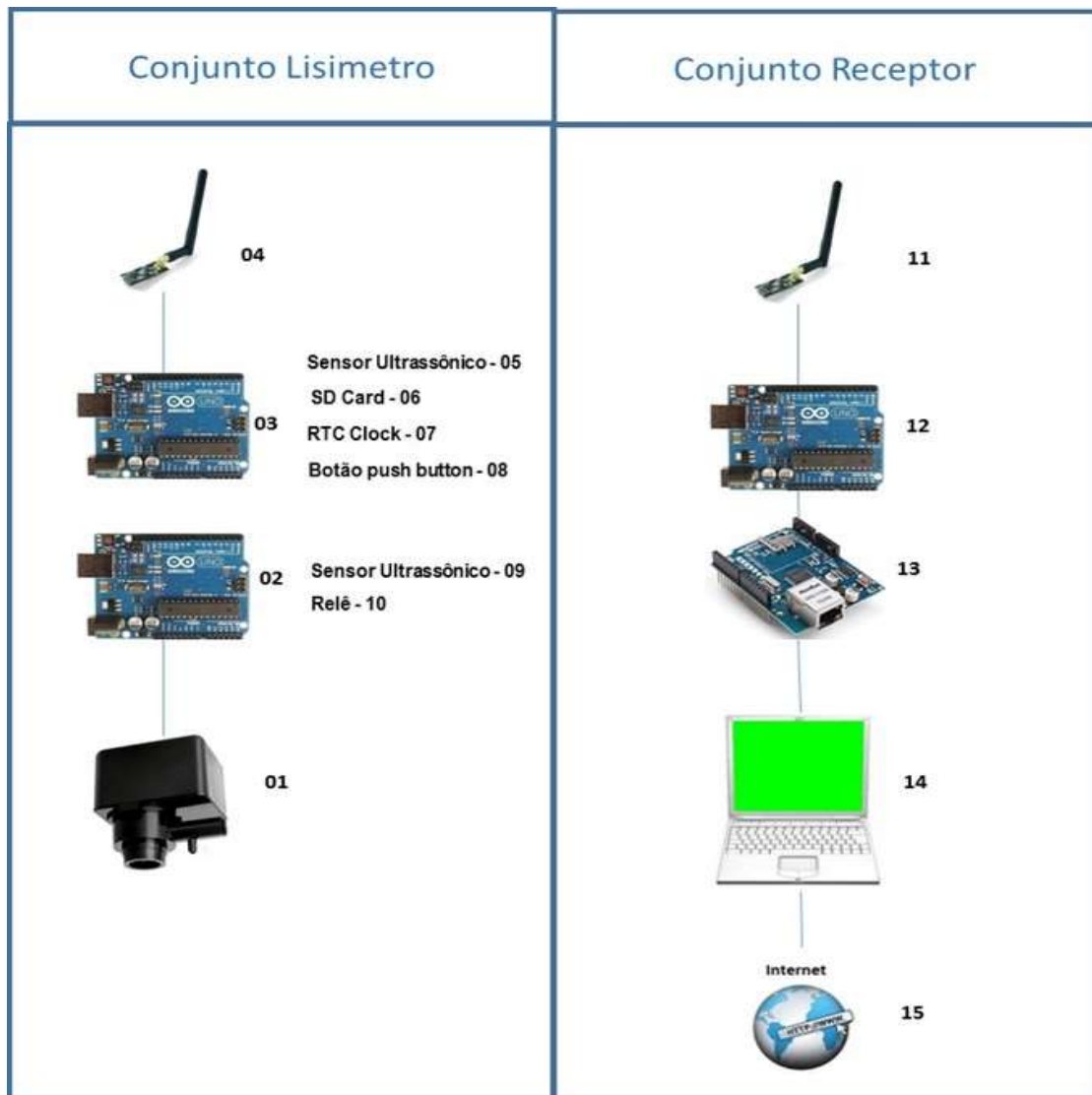
As funções dos equipamentos do esquema de disposição estão descritas na Tabela 5 e a disposição dos equipamentos mostrados na Figura 32.

Tabela 5 - Funções dos Equipamentos

Nº	Equipamento	Função
01	Bomba	Bombear água do tanque intermediário, quando o nível for maior que 20 cm.
02	Arduino UNO	O monitoramento do nível de água no tanque intermediário.
03	Arduino UNO	Monitorar o nível de água no tanque medidor, gravar e transmitir os dados.
04	Transceiver nRF24I01	Módulo utilizado para transmitir os dados do arduino instalado no tanque medidor.
05	Sensor Ultrassônico	Sensor utilizado para medir o nível de água do tanque medidor.
06	SD Card	Gravar os dados medidos pelo sensor 05.
07	RTC Clock	Gerar a hora e data para alimentar o sistema.

Nº	Equipamento	Função
08	Botão push button	Reposição do nível de água do tanque medidor, medir e gravar o dados.
09	Sensor Ultrassôm	Medir o nível de água do tanque intermediário.
10	Relê	Acionamento da bomba d' água.
11	Transceiver nRF24I01	Receber os dados enviado pelo Arduino 03.
12	Arduino UNO	Recebe os dados do NRF24L01 (11).
13	Shield Rede	Realizar a comunicação com o PC
14	Microcomputador PC	Recebe os dados e realiza os cálculos de evapotranspiração.
15	Conexão com Internet	Enviar os dados de evapotranspiração para uma página de internet.

Figura 32 - Disposição dos equipamentos



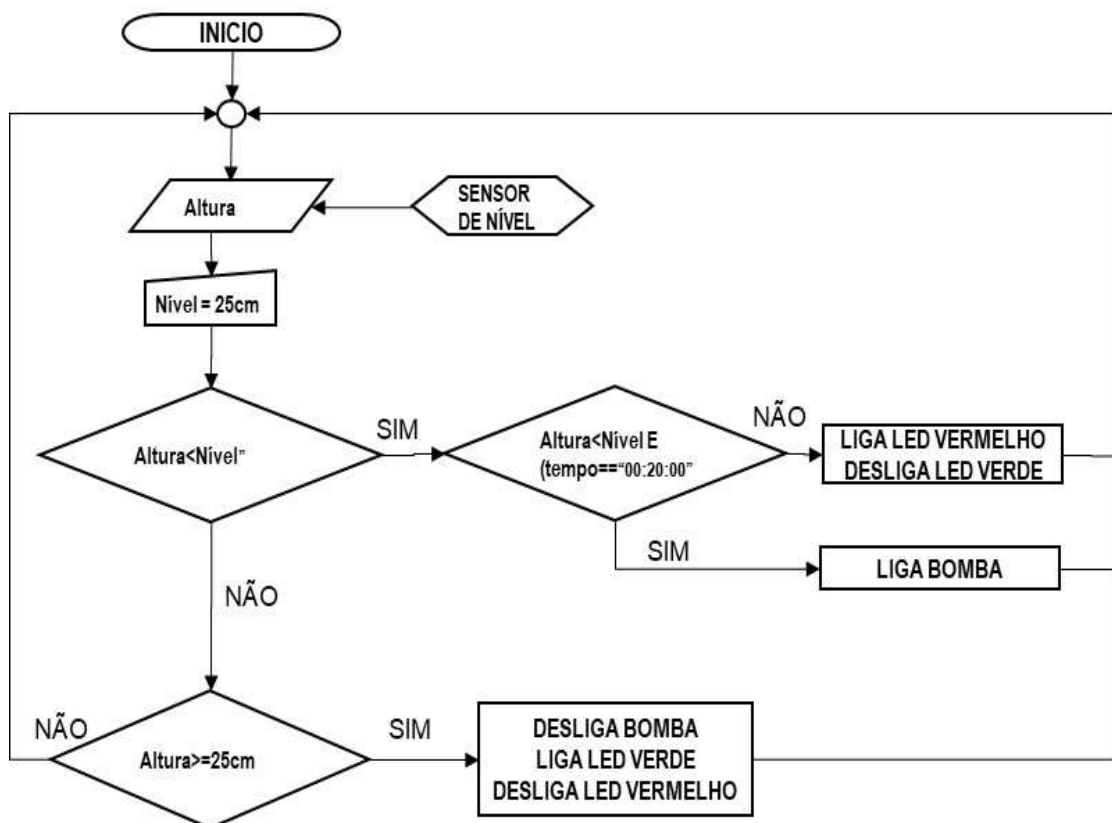
5.1.6 Programas para Arduino

Utilizado três Arduinos, sendo dois no lisímetro e um junto ao microcomputador que receberá os dados. Cada um deles recebeu uma programação específica.

5.1.6.1 Programa Bomba – Tanque Intermediário

A programação feita no Arduino instalado no tanque intermediário, irá monitora o nível de água. Nos dias de precipitação irá ocorrer o nivelamento do nível de água entre a caixa d'água do lisímetro e o tanque intermediário, fazendo com que a boia do tanque intermediário fique afogada e acione a bomba de recalque, fazendo que o nível de água retorne ao nível de 25 cm definido.

Figura 33 - Fluxograma do programa bomba



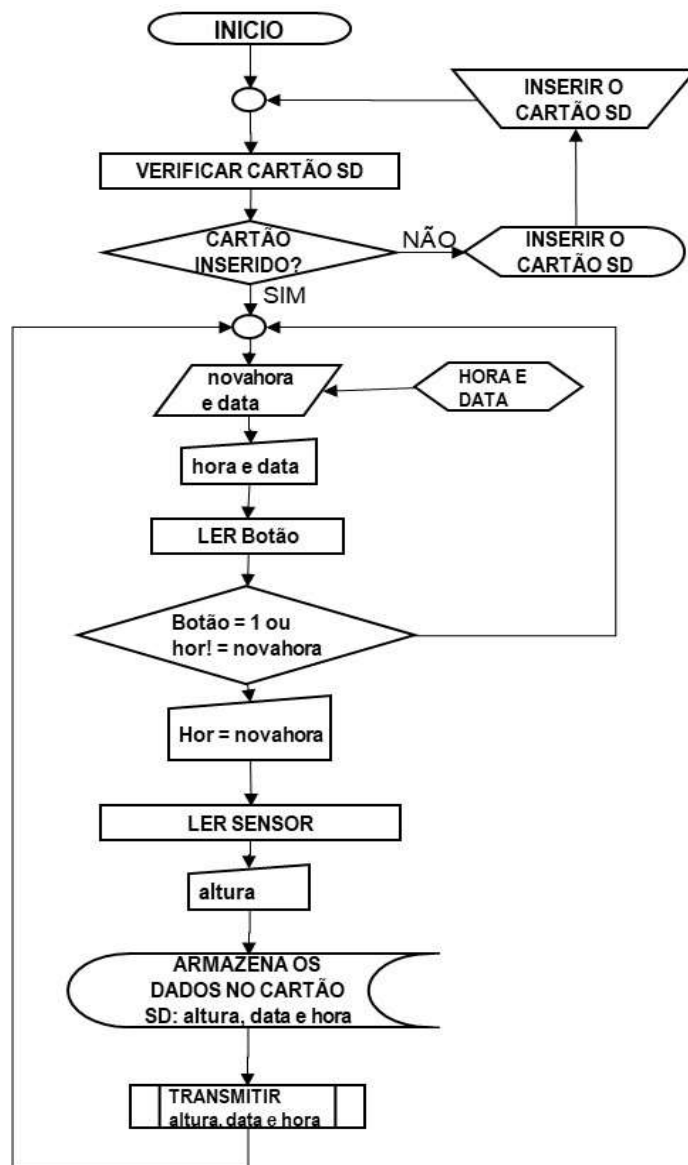
O nível freático foi ajustado em 25 cm, a rotina recebe a leitura do sensor de nível, que envia um sinal informando se está no nível ou fora do nível. Caso o nível esteja no nível ou abaixo, o led verde é ligado e a bomba permanece desligada. Se o nível estiver acima o led vermelho é ligado, e começa uma rotina de tempo. Quando o

tempo atingir 20 minutos a bomba de recalque é ligada. Levar um tempo de 20 minutos para depois acionar a bomba é necessário para se evitar um ligar e desligar da bomba, que poderia ocasionar danos a bomba.

5.1.6.2 Programa para enviar dados e gravar dados – Tanque Medidor

Inicialmente o programa verifica se o cartão SD, está inserido ou não, caso não esteja inserido solicita que insira. A utilização do cartão SD é importante, pois se ocorrer algum erro na transmissão o cartão SD funcionará como backup.

Figura 34 - Fluxograma do programa que envia e grava dados



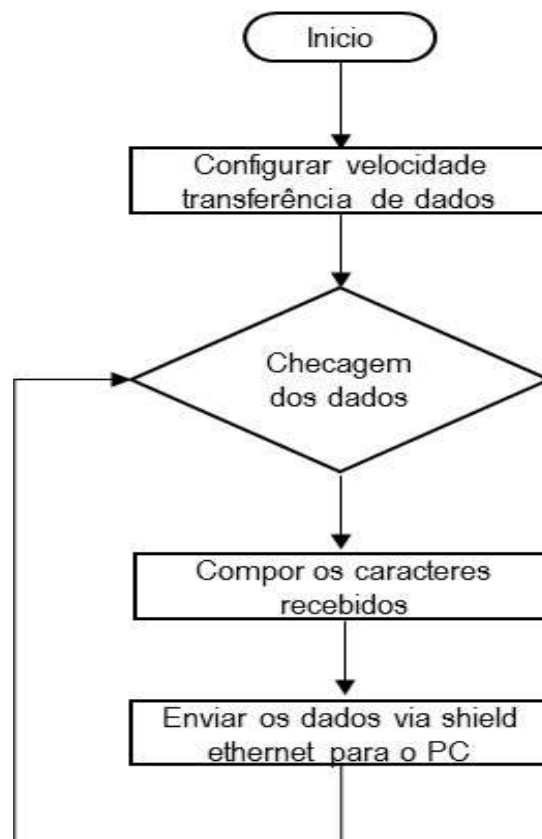
O controle da hora e data ocorre por um Shield RTC Clock, que informa ao programa a hora. A leitura do nível de água no tanque medidor realizada pelo sensor ultrassônico, é realizada a cada uma hora. Essa leitura é gravada no cartão SD e transmitida pelo transceiver NRF24L01. As informações transmitidas pelo NRF24L01 se refere a data, hora e a altura da água no tanque medidor.

Quando for necessário o enchimento de água no tanque medidor, devido ao consumo de água pela evapotranspiração do lisímetro de lençol freático constante, o programa poderá ser informado pelo operador pressionando um botão. Esse botão também está conectado ao Arduino.

5.1.6.3 Programa para receber dados

No laboratório um Arduino foi conectado a um PC via Shield ethernet e programado para receber os dados enviados por um segundo Arduino que fica junto ao lisímetro (tanque medidor). Na Figura 35 é mostrado o fluxograma do programa que recebe os dados.

Figura 35 - Fluxograma do programa que recebe dados

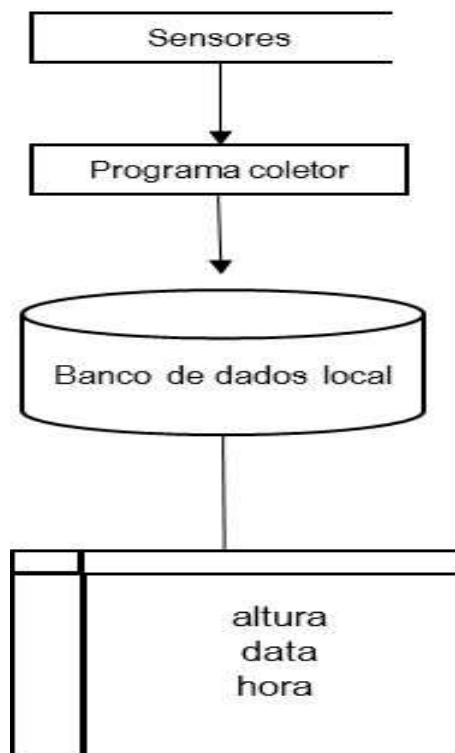


5.1.7 Banco de dados local

O banco de dados, configurado no PC do laboratório, armazenará as informações coletadas do sensor instalado no tanque medidor, que será chamado de BD_sensorM. Na Figura 36 está disposto o esquema da instalação do banco de dados do PC.

O desenvolvimento do banco de dados ocorreu através da utilização do MySQL, que é um banco de dados de código aberto. A utilização de tal banco de dados se justifica pela sua comprovada confiabilidade, desempenho e facilidade de uso. Além do MySQL ser uma opção para aplicativos baseados na Web.

Figura 36 - Estrutura do banco de dados local

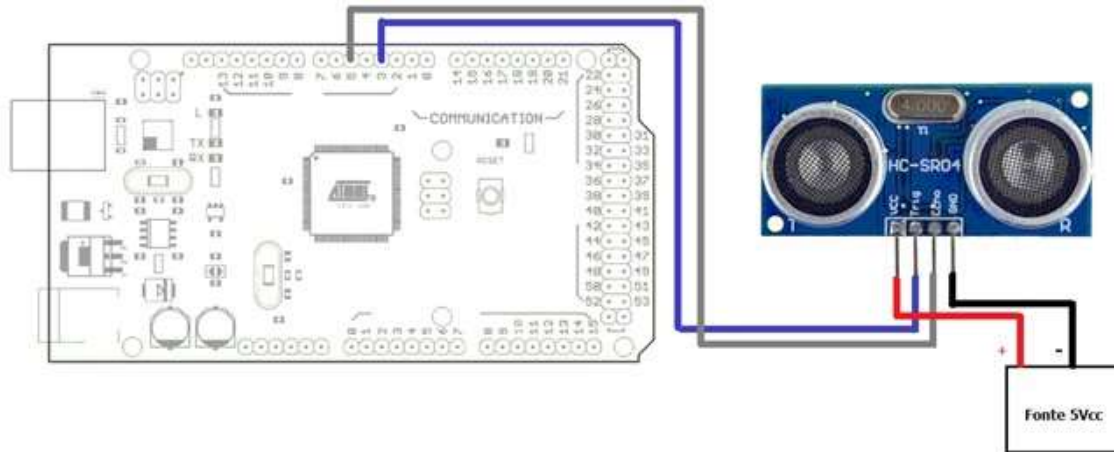


5.1.8 Conexões dos sensores no Lisímetro de Lençol Freático Constante

O Arduino modelo Mega, foi instalado no campo, próximo ao Lisímetro de Lençol Freático Constante e recebe os dados do sensor ultrassônico instalado no tanque medidor, gravar os dados e transmitir para o outro Arduino, no laboratório. Devido a

programação desenvolvida o trigger do sensor ultrassônico foi conectado no pino 3 e o echo no pino 5. A Figura 37, apresenta o esquema de ligação do sensor ultrassônico.

Figura 37 - Ligação do sensor ultrassônico



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

5.1.9 Estrutura básica da comunicação do arduino

O arduino precisa ser acoplado à placa Shield ethernet, para comunicação interna ou mesmo acesso a internet. Por meio da placa Shield *ethernet* foi configurado o número IP 192.168.32.75.

Figura 38 - Estrutura básica de comunicação do hardware.

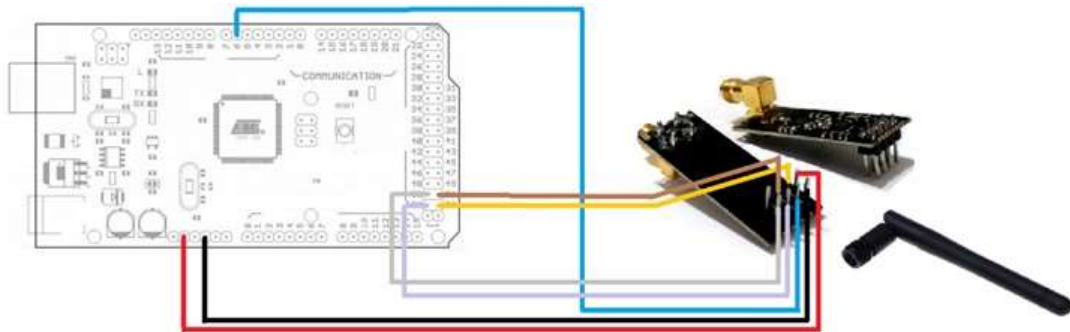


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

5.1.10 Transmissão e recepção dos dados

Os equipamentos utilizados na transmissão e recepção dos dados possui o mesmo transceiver, o nRF24I01, e um Arduino Mega, tanto na transmissão como na recepção e antenas Ominidirecional. A Figura 39, mostra o conjunto.

Figura 39 - Ligação do nRF24I01

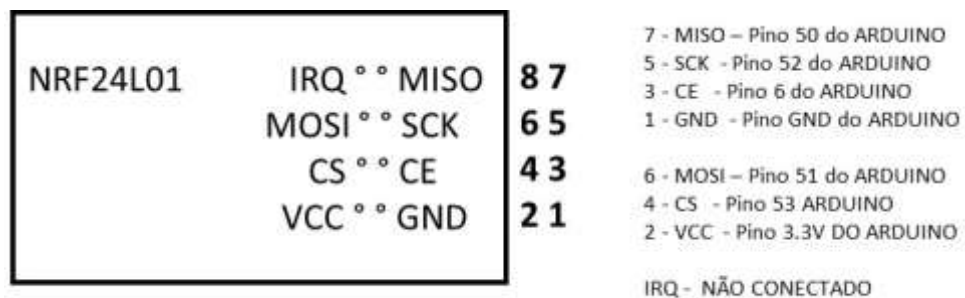


Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

Na recepção utiliza-se o Shield Ethernet, conectado ao Arduino e também o nRF24I01. Como tanto o chip W5100 quanto o nRF24I01 utilizam o barramento SPI, ou seja, somente um deles pode ser ativado de cada vez. Para a utilização de ambos, foi configurado o pino 10 para Ethernet e o pino 53 para o nRF24I01, os pinos inicialmente ajustados em HIGH. Na alternância de utilização ajustado o pino do referindo Shield com LOW.

Olhando o Módulo por cima o nRF24I01, versão que tem apenas 8 pinos, mostrado na Figura 40.

Figura 40 - Pinagem utilizada para a ligação do nRF24I01



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2018

5.1.11 Determinação da Evapotranspiração de Referência (Eto).

A evapotranspiração de referência foi determinada através das leituras do sensor ultrassônico instalado no tanque medidor; essa medida da altura da água ocorre a cada uma hora.

Considerando-se:

$\Delta V1$: volume escoado do tanque medidor para o tanque intermediário para manter o nível constante no evapotranspirômetro (caixa d'água);

$\Delta h1$: altura de água escoada do tanque medidor;

$S1$: área de secção horizontal do tanque medidor;

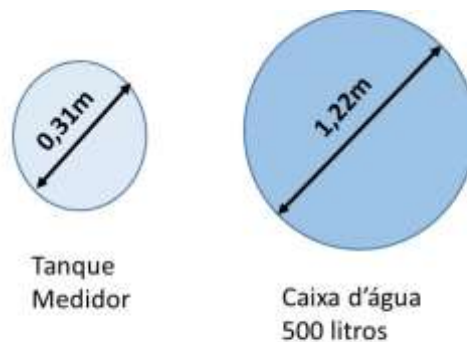
$\Delta v2$: volume de água escoado para a tanque intermediário para manter o nível constante;

$\Delta V3$: volume de água evaporada no evapotranspirômetro (caixa d'água);

$\Delta h3$: altura de água evaporada no evapotranspirômetro (caixa d'água);

$S3$: área de secção horizontal do evapotranspirômetro (caixa d'água);

Levando em consideração que a única perda de água seja pela evapotranspiração, tem-se:



$$A1 = \pi r^2 = \pi \cdot 0,15^2 = 0,0757 \text{ m}^2$$

$$A2 = \pi r^2 = \pi \cdot 0,61^2 = 1,1689 \text{ m}^2$$

$$\Delta V1 = \Delta V2$$

$$f = \frac{A1}{A2} = 0,0647 \cdot 10 = 0,647$$

Transformando o valor de f em mm, multiplicando por 10,

A evapotranspiração é calculada pela equação 18.

$$ET_0 = (H_1 - H_2) \times 0,647 \quad (18)$$

Onde:

ET_0 – evapotranspiração de referência (mm); H_1 – leitura da hora (mm); H_2 – leitura da hora anterior (mm)

5.1.12 Dados coletados pelo sistema

No banco de dados MySQL é possível importar os dados no formato CSV. O sistema grava uma medida a cada uma hora. No período de um ano é previsto 4380 registros, mas tivemos os meses de abril e maio descartados, em decorrência de ajustes no lisímetro. Vários outros problemas no ano ocorreram, tais como: erro gerado no relógio do sistema, descarga atmosféricas - onde tivemos a queima de vários equipamentos, sensor de nível danificado.

Como o sistema possui *backup*, sempre tivemos a gravação de dados do lisímetro, posteriormente, é realizado uma verificação dos dados transmitidos, caso ocorra alguma perda é possível a atualização do banco de dados através da recuperação dos dados no *backup*.

5.1.13 Custo dos equipamentos

Para principais equipamentos do sistema realizou-se uma cotação de preços. Os valores apresentados no Tabela 6 são valores de uma pesquisa de preços realizada no dia sete de fevereiro de 2018, nos principais sites de vendas de componentes Arduino no Brasil.

Tabela 6 - Levantamento de custo

Item	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Subtotal (R\$)
Arduino Mega 2560 R3	2	R\$ 74,90	R\$ 149,80
nRF24I01	2	R\$ 39,90	R\$ 79,80
Shield Ethernet W5100	1	R\$ 54,90	R\$ 54,90
SD Card	1	R\$ 9,90	R\$ 9,90
Sensor Ultrassônico SC-04	1	R\$ 9,90	R\$ 9,90
Shield Real Timer Clock (RTC)	2	R\$ 19,90	R\$ 39,80
Sensor de Nível de Água	1	R\$ 19,00	R\$ 19,00
Bomba Sarlo Better B650	1	R\$ 70,00	R\$ 70,00
Roteador	1	R\$ 100,00	R\$ 100,00
		Total	R\$ 533,10

5.2 Medidas e Modelos de Evapotranspiração

5.2.1 Condições Climáticas

Em 2014, foi implantada na Fazenda Lageado – Faculdade de Ciências Agrônômicas, a primeira estação meteorológica automática com transmissão de dados em tempo real.

A Figura 41 mostra os gráficos dos dados: ETo e Precipitação Acumulada, obtidos pela Estação Meteorológica Automatizada no período de 2015 e 2016.

A radiação solar é responsável pelo fornecimento de energia para que a evapotranspiração ocorra, a umidade relativa e a temperatura que contribuem com o déficit de pressão de vapor próximo à superfície evaporante, sendo a velocidade do vento, responsável pela renovação do ar junto à superfície, tais elementos climáticos relacionam-se com a evapotranspiração.

Figura 41 - Estação Meteorológica Automatizado do Lageado (período 2015-2016): (a) ETo (b) Precipitação acumulada

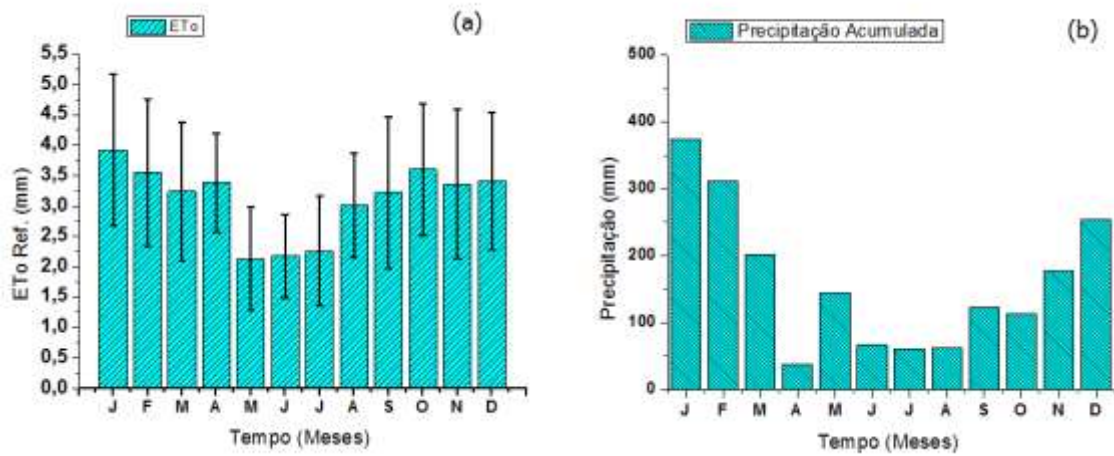


Tabela 7 - Dados da Estação Automatizada do Lageado - período 2015 -2016

	\overline{ETo} (mm)	ΣETo (mm)	$\Sigma Chuva$ (mm)
jan	1,25 ± 0,16	243,2	747,5
fev	1,22 ± 0,16	202,1	621,5
mar	1,15 ± 0,15	200,6	404,1
abr	0,83 ± 0,11	202,7	75,7
mai	0,86 ± 0,11	132,2	287,8
jun	0,70 ± 0,09	130,3	132,9
jul	0,91 ± 0,12	140,2	120,4
ago	0,87 ± 0,11	186,7	124,7
set	1,26 ± 0,16	193,4	244,1
out	1,09 ± 0,14	219,6	226,8
nov	1,24 ± 0,16	201,7	352,3
dez	1,14 ± 0,15	197,6	506,2

A Figura 42 apresenta a variação dos valores médios mensais de radiação solar global e de temperatura do ano de 2017. Observando o período do ano de 2017, a temperatura varia de acordo com a radiação solar.

A velocidade média do vento e a umidade relativa média do ar são apresentados na Figura 43, relativo ao ano de 2017. Nota-se que nos meses com maior umidade relativa é justamente os meses relativos a estação chuvosa.

Figura 42 - Dados Médios mensais de temperatura e radiação solar global no ano de 2017, Botucatu - SP

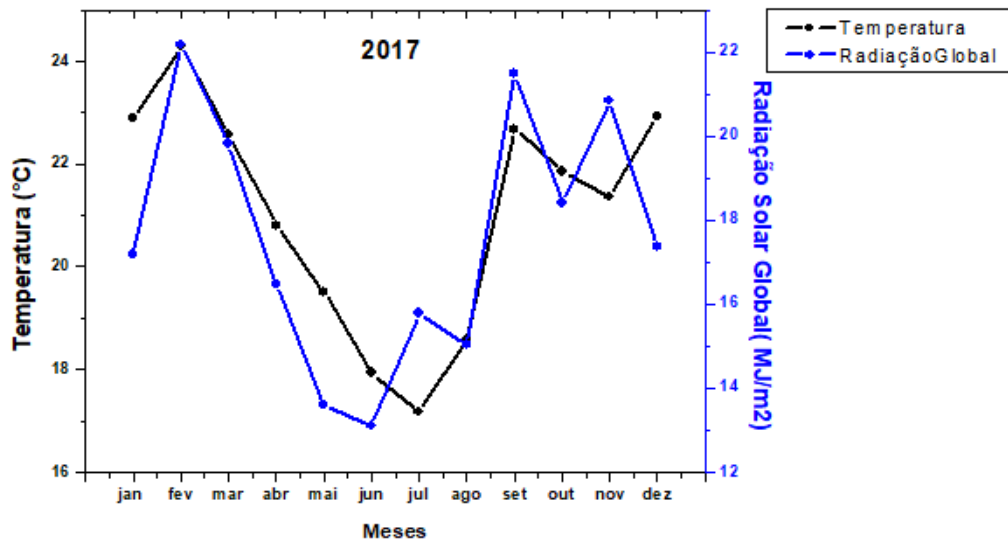
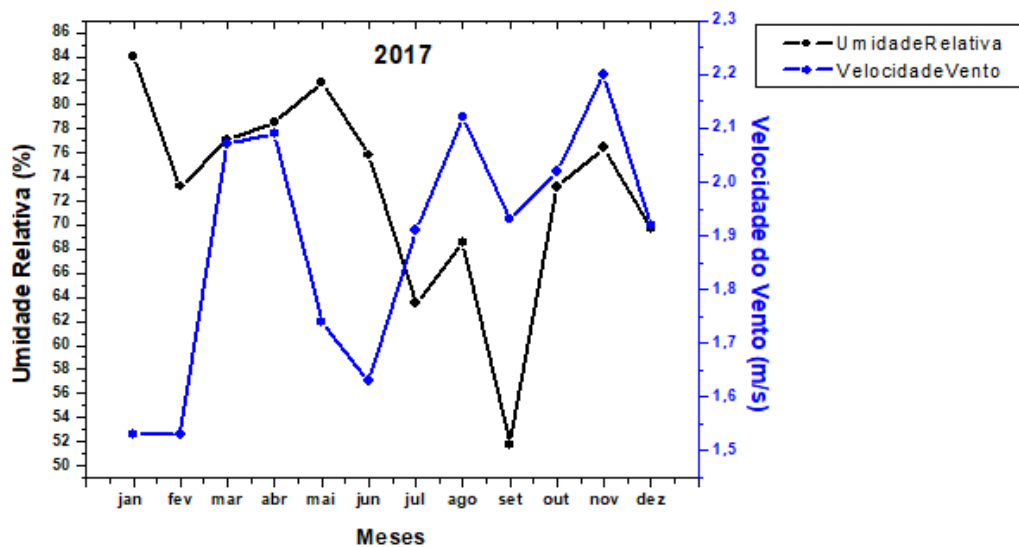


Figura 43 - Dados Médios mensais de Umidade Relativa e Velocidade do Vento no ano de 2017, Botucatu - SP



5.2.2 Medidas de Evapotranspiração

A medição de nível de água no tanque medidor foi realizada a cada uma hora, período de 24 horas, e calculada o valor da evapotranspiração através da equação 18.

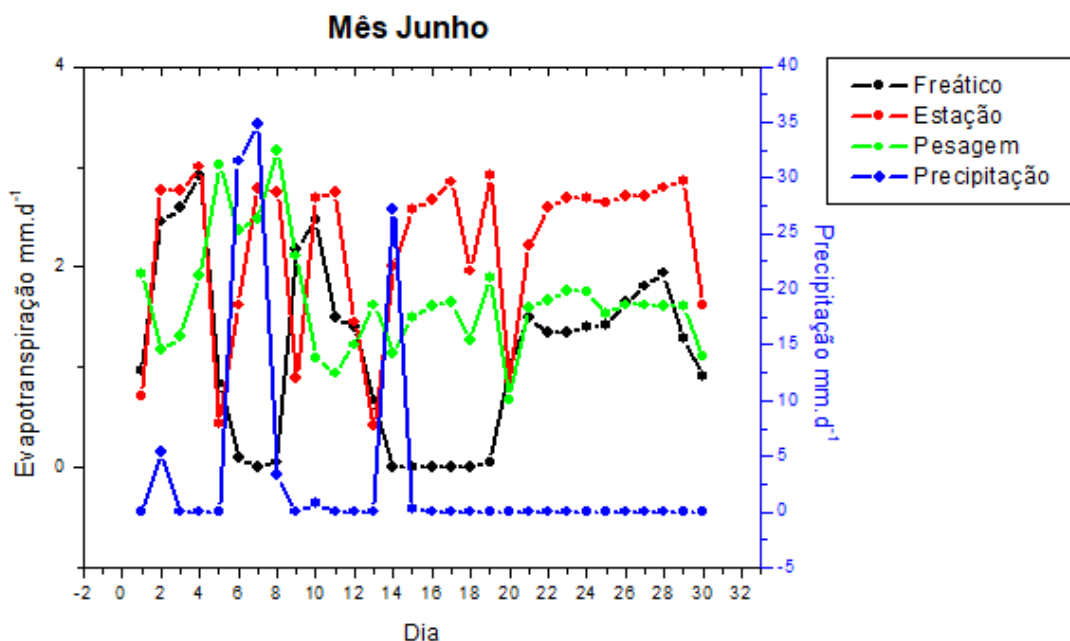
5.2.2.1 Medidas de Evapotranspiração – Evolução diária

A análise dos dados medidos pelo lisímetro de lençol freático constante foi comparada com os dados do lisímetro de pesagem, construído no Laboratório de Radiometria do Departamento de Engenharia Rural e pelos dados estimados pelo modelo de Penman-Monteith, sendo esse obtido da Estação Automatizada.

No mês de junho de 2017, houve precipitação de chuvas nos dias: 5, 6, 7, 9, 13 e no dia 14. Neste período ainda não estava instalado no tanque intermediário a bomba de recalque. Gerando uma perda de medida do dia 15 ao dia 20. Consequentemente para a análise dos dados esses dias foram descartados.

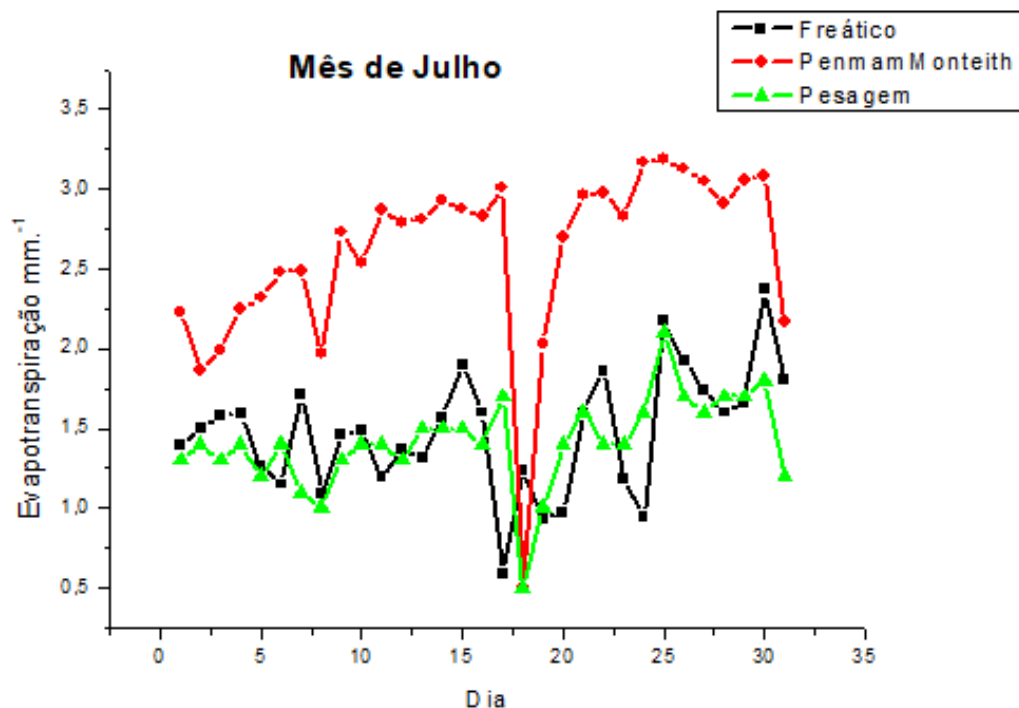
Na Figura 44, apresenta-se os valores medidos pelo lisímetro de lençol freático constante, o de pesagem e com os estimados por Penman-Monteith, referentes ao mês de junho. Para este mês, em decorrência de um período de chuva nota-se o comportamento do lisímetro de lençol freático constante. No período de precipitação não ocorre a medição da evapotranspiração, mas logo após o término da precipitação o lisímetro de lençol freático constante faz a medição.

Figura 44 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penman-Monteith – Mês de Junho.



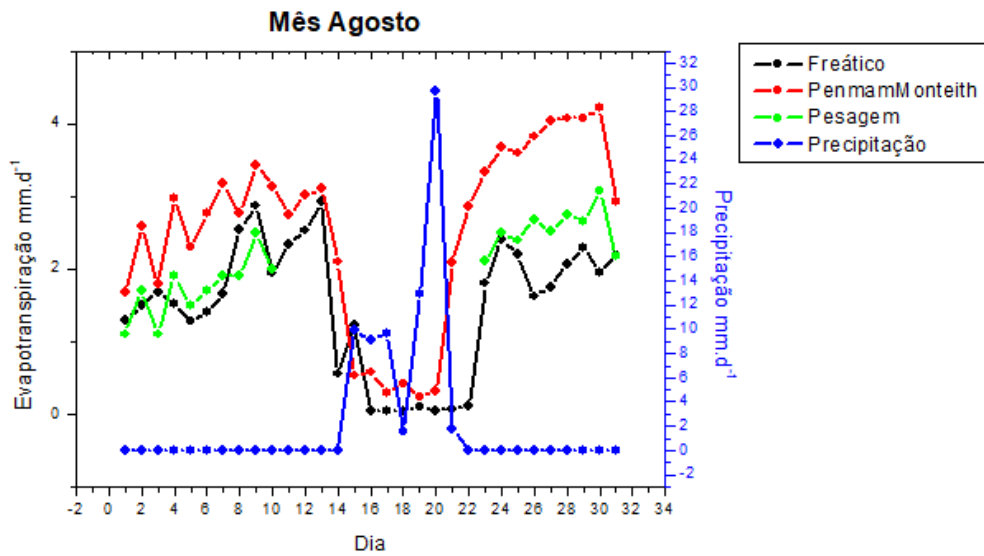
No mês de julho os valores medidos pelos lisímetros de pesagem e de lençol freático constante estão próximos, mas os estimados pelo método de Penman-Monteith estão com valores acima. Neste mês não houve incidência de precipitação. Na Figura 45 mostra a evolução das medidas para o mês de julho.

Figura 45 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penman-Monteith – Mês de Julho



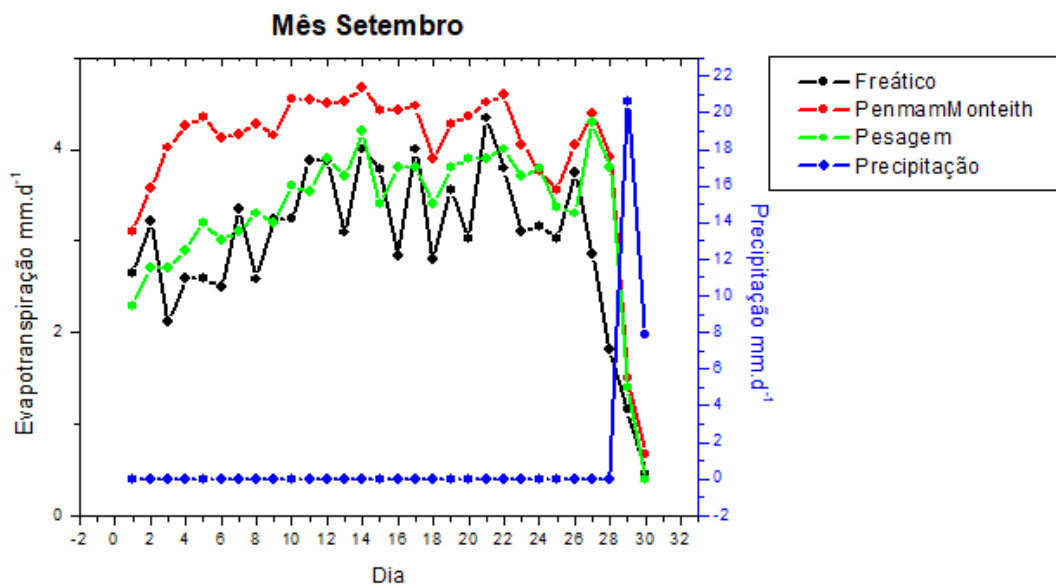
Em agosto mostrado na Figura 46, houve um período de precipitação do dia 14 ao 22, onde o lisímetro de lençol freático não mediu a evapotranspiração e o lisímetro de pesagem também não teve medidas. No restante do período as medidas dos lisímetros estão próximas, mas em relação as medidas estimadas pelo método de Penman-Monteith observam-se valores acima.

Figura 46 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de agosto



No mês de setembro os valores medidos pelos lisímetros de pesagem e de lençol freático constante estão muito próximos, mas o estimado pelo método de Penmam-Monteith na primeira quinzena do mês apresenta acima das medidas dos lisímetros, sendo o restante do mês acompanha as medidas dos lisímetro. Nota-se também no final do mês um período de precipitação, em que o lisímetro de lençol freático constante não realiza a medição da evapotranspiração. Na Figura 47 mostra a evolução das medidas.

Figura 47 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de setembro



Observando a Figura 48 referente ao mês de outubro, percebe-se em vários dias a incidência de precipitação, e um período onde a estação automatizada não forneceu medidas da evapotranspiração. Nos demais dias as medidas de evapotranspiração seguem o mesmo comportamento, mas com medidas divergentes.

No mês de novembro os valores de evapotranspiração medidos pelos lisímetros e os valores estimados pelo método Penman-Monteith estão próximos. Na Figura 49 mostra a evolução das medidas para o mês de novembro.

A Figura 50 mostra as medidas de evapotranspiração para o mês de dezembro, na segunda quinzena do mês houve precipitação em praticamente todos os dias, prejudicando as medidas de evapotranspiração dos lisímetros.

Figura 48 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penman-Monteith – Mês de outubro

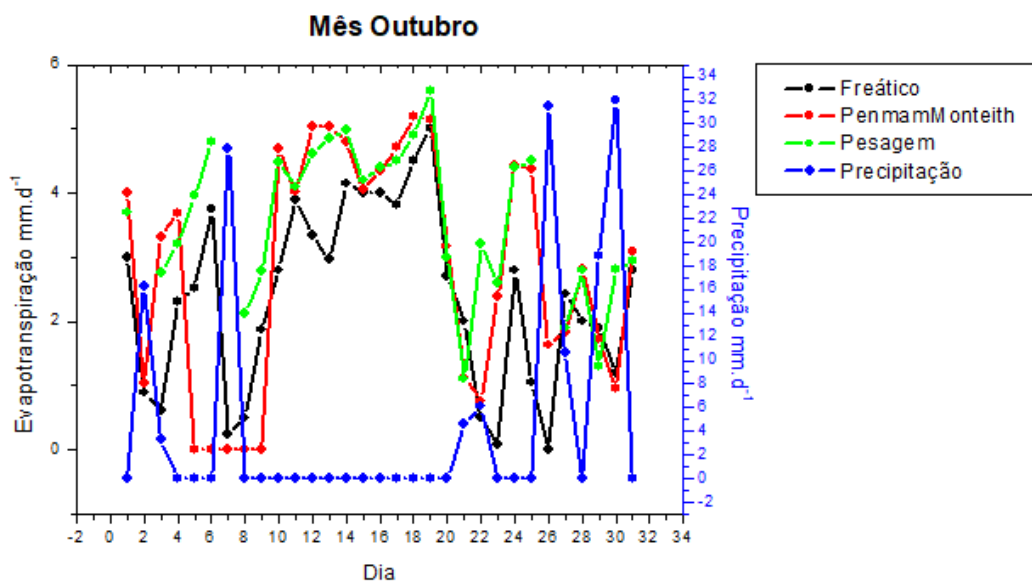


Figura 49 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de novembro

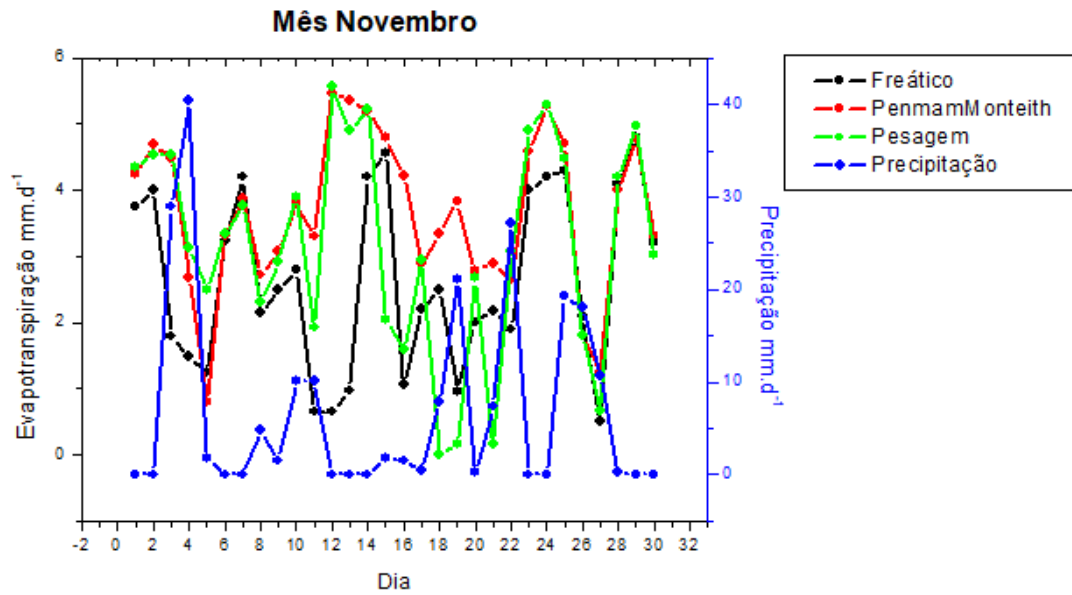
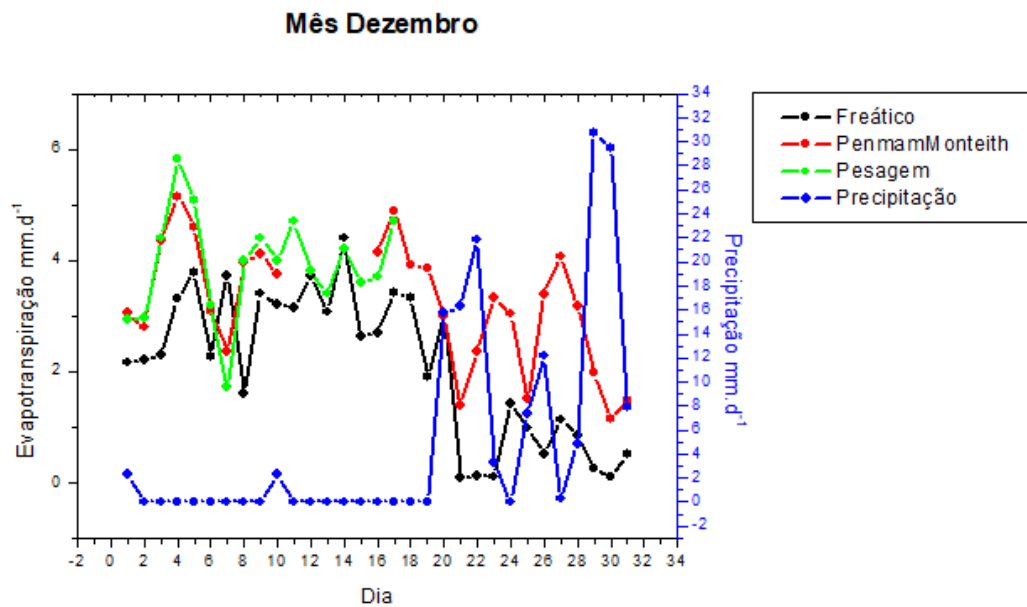


Figura 50 - Gráfico de evapotranspiração medidos pelo lisímetro de lençol freático constante e lisímetro de pesagem e os valores estimados por Penmam-Monteith – Mês de dezembro.



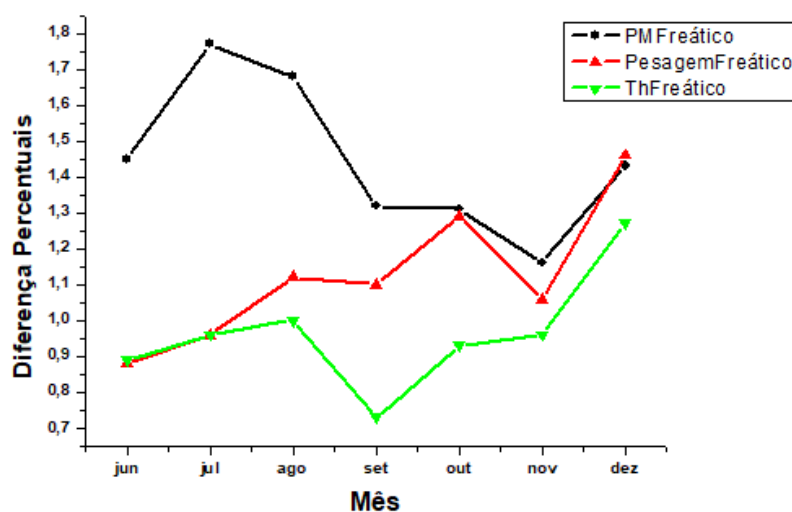
5.2.2.2 Medidas de Evapotranspiração – Evolução mensal

O método Penman-Monteith superestimou na média de 45% os valores obtidos através de medidas lisimétricas, para o período desde trabalho. Comparando as medidas entre os lisímetros essa diferença aparece na média em 12%, e com Thornthwaite 4%.

Tabela 8 - Diferenças percentuais

	Freático (mm.d ⁻¹)	Penman- Monteith (mm.d ⁻¹)	Pesagem (mm.d ⁻¹)	Thornthwaite (mm.d ⁻¹)	$\frac{PM}{Freático}$	$\frac{Pesagem}{Freático}$	$\frac{Thornthwaite}{Freático}$
junho	1,67	2,41	1,46	1,49	45%	-12%	-11%
julho	1,48	2,60	1,41	1,42	77%	-4%	-4%
agosto	1,89	3,18	2,11	1,89	68%	12%	0%
setembro	3,01	3,99	3,31	2,19	32%	10%	-27%
outubro	2,99	3,91	3,86	2,80	31%	29%	-7%
novembro	3,18	3,70	3,38	3,04	16%	6%	-4%
dezembro	2,69	3,85	3,91	3,40	43%	46%	27%
Média	2,41	3,38	2,78	2,32	45%	12%	-4%

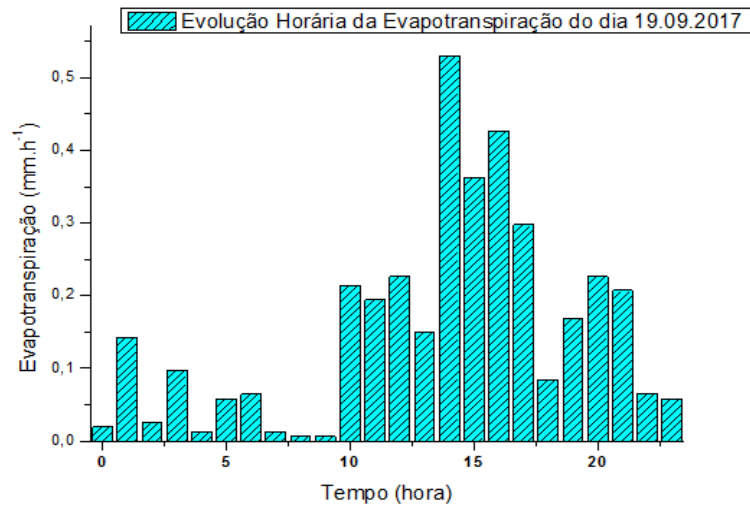
Figura 51 - Diferenças percentuais entre os valores estimados com os métodos de P-M, Lisímetro de Pesagem e Thornthwaite em relação às leituras obtidas pelo Lisímetro de Lençol Freático Constante.



5.2.2.3 Evolução horária

No Figura 52, refere-se à evolução horária da evapotranspiração do dia 19/09/2017, medidos no lisímetro de lençol freático constante.

Figura 52 - Evolução horária do dia 19/09/2017



Analisando os valores, nota-se que a evapotranspiração iniciou às 10 horas. Das 14 horas até às 16 horas, a evapotranspiração ocorreu com maior intensidade, atingindo seu pico por volta das 15 horas. O acumulado das medidas da evapotranspiração para o dia em questão foi de 3,65 mm.dia⁻¹. A medida realizada pela estação automatizada do Lageado no mesmo dia feita pelo método de Penman Monteit, apontou uma evapotranspiração de 4,28 mm. dia⁻¹, essa diferença no acumulado deu pela diferente dinâmica de cada método, ou seja, um método é direto e o outro indireto, sendo o método indireto, o que mais rapidamente respondeu as variações ambientais que interferem na evapotranspiração.

6 CONCLUSÕES

O lisímetro de lençol freático constante foi construído e instalado adequadamente, apresentado condições adequadas de funcionamento e obtendo medidas de evapotranspiração.

O sistema de automatização do lisímetro de lençol freático constante foi desenvolvido com sucesso e possibilita a coleta, armazenamento de dados e transmissão dos dados. Tanto o hardware com o software utilizados são livres. O hardware utilizado de tecnologia aberta, além de bastante flexível, mostrou-se confiável.

Os softwares desenvolvidos para o armazenamento e envio dos dados para a Internet atenderam as necessidades do projeto e possibilitam que outros sistemas possam ser monitorados. A página do projeto na Internet www.irrigafca.online, facilita o acesso aos dados e o download no formato CSV, o que torna possível a sua utilização em outros trabalhos.

A aplicação da automatização em um lisímetro de lençol freático constante revelou-se confiável e importante para futuros trabalhos e aplicações.

REFERÊNCIAS

ABOUKALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 39).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297p. (FAO, Irrigation and Drainage, 56).

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

ARDUINO. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>>. Acesso em: 22/11/2014.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 625 p.

BHUYAN, MANABENDRA. **Instrumentação inteligente: princípios e aplicações**; tradução e revisão Sérgio Gilberto Taboada. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CAMARGO, A. P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Bragantia, v.21: p.163-213,1962.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. **Teste de uma equação simples da evapotranspiração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar**. In: Cong. Bras. de Agrometeorologia. Campinas, p. 229-244, 1983.

CAMARGO, A.P. **Balço hídrico no Estado de São Paulo**. 3.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1971. 24p. (Boletim, 116)

CAMPECHE, L. F. M. S. DE.; NETTO, A. O. A.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA DA, V. P. R. DE.; AZEVEDO, P. V. DE. **Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, n.5, p.519-525, 2011.

CARVALHO, H. P. DE.; MELO, B. DE.; ATARASSI, R. T.; CAMARGO, R. DE.; SILVA, DA. C. R.; MORAES, M. R. B. **Desenvolvimento de lisímetros de pesagem na cultura do café**. Biosci. J., Uberlândia, v.29, n.6, p. 1750-1760, 2013.

CLEAVER, K.; GANGULY, S. **Shaping the future of water for agriculture: a sourcebook for investment in agricultural water management**. Washington, DC: World Bank, 2005, 334 p.

CULTIVAR. **Agricultura 4.0 e a gestão agro na palma da sua mão**. Disponível em: <https://www.grupocultivar.com.br/artigos/agricultura-4-0-e-a-gestao-agro-na-palma-da-sua-mao>. Acesso em Março de 2018.

DOORENBOS, J. & KASSAN, A.H. **Yield response to water**. FAO. Irrig. and Drain. Paper 33, 1979, 193p.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 204p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

EMBRAPA. **Agricultura 4.0: a agricultura conectada**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/15894563/agricultura-40-a-agricultura-conectada>. Acesso em Março de 2018.

EVANS, MARTIN; NOBLE, JOSHUA; HOCHENBAUM, JORDAN. **Arduino em Ação**; tradução: Camila Paduan. São Paulo: Novatec, 2013.

Filipeflop. **Módulo de Cartão SD Card**. Disponível em: <http://www.filipeflop.com/pd-6b847-modulo-cartao-sd-card.html>. Acesso em Abril de 2017.

Filipeflop. **Shield Ethernet**. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/produto/ethernet-shield-w5100-para-arduino/>. Acesso em Março de 2018.

FLUMIGNAM, D. L.; FARIA DE. R. T. **Evapotranspiração e coeficientes de cultivo de cafeeiros em fase de formação**. Bragantia, Campinas, v.68, n.1, p.269-278, 2009.

GAUCHAZH, Campo e Lavoura. **Agricultura 4.0 é a nova fronteira do campo**. Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/economia/campo-e-lavoura/noticia/2016/09/agricultura-4-0-e-nova-fronteira-no-campo-7413654.html>. Acesso em Março de 2018.

HARGREAVES, G. H. SAMANI, Z. A. **Reference crop evapotranspiration from ambient temperature**. Applied Engineering Agriculture, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

How to mecatronics. **Arduino Wireless Communication – NRF24L01 tutorial**. Disponível em: <http://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>. Acesso em Abril de 2017

HOWELL, T.A.; CUENCA, R.H.; SOLOMON, K.H. Crop Yield response. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Org.) **Management at farm irrigation systems**. St. Joseph: The American Society of Agricultural Engineers, 1990. p. 93-122.

JENSEN, M.E., BURMAN, R.D; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. 2ª ed. São Paulo, Nobel: 1988

LAFOND, J. A.; PIETTE, É. B.; CARON, J.; RANCOURT, G. T. **Evaluating fluxes in Histosols for water management in lettuce: A comparison of mass balance, evapotranspiration and lysimeter methods**. Agricultural Water Management. v.135, p.73-83, 2014.

LECINA, S.; MARTINES-COB,A.; PEREZ,P.J.; VILLALOBOS,F.J.; BASELGA, J.J. **Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman–Monteith equation under semiarid conditions.** *Agricultural Water Management.* v.60, p.181-198, 2003.

LEE, T. M.; NAJIM, M. M. M.; AMINUL, M. H. Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West coast of the Peninsular of Malaysia. **Journal of Applied Irrigation Science**, v.39, n.1, p.103-117, 2004.

LIMA, C. Borges de. **AVR e Arduino : técnicas de projeto** 2. ed. – Florianópolis: Ed. dos autores, 2012.

LIMA, CHARLES BORGES DE. **Técnicas de projetos eletrônicos com os microcontroladores AVR.** Florianópolis: Ed. do Autor, 2010.

M, Banzi. **Primeiros Passos com o Arduino.** São Paulo: Novatec Editora Ltda, 2012, p. 17.

M. McRoberts. **Arduino Básico.** São Paulo: Novate Editora Ltda, 2011, p. 334.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da Equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas,** em Paraipaba, CE. 2002. 120p. (Tese de Doutorado em Agronomia), Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo.

Megamamute. **Antena Omnidirecional 2.4GHz 9dBi.** Disponível em: <<http://www.megamamute.com.br/antena-omnidirecional-2-4ghz-9dbi-l1-ant2409-link-one/p>>. Acesso em Abril 2017.

MONK, SIMON. **30 Projetos com Arduino;** tradução: Anatólio Laschuk. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

MORIMOTO, CARLOS E. **Hardware, o guia definitivo.** 1 ed. São Paulo: GDH Press, 2007.

OLIVEIRA, ANDRÉ SCHNEIDER DE; ANDRADE, FERNANDO SOUZA DE. **Sistemas Embarcados: hardware e o firmware na prática.** 1. Ed. São Paulo: Érica, 2006.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. **Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo.** *Scientia Agrícola,* v.59, n.2, p.211-216, abr/jun. 2002

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações prática.** Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba: FEALQ, 1997.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R. J. On the assessment for surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.* 100: 81-92, 1972.

PUPPO, L.; GARCÍA-PETILLO, M. **Determinación del consumo de agua del duraznero por lisimetria.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.1, p.25-31, 2010.

SCHMIDT, C. D. S.; PEREIRA, F. A. C. DE.; OLIVEIRA, A. S. DE.; JÚNIOR, J. F. G.; VELLAME, L. M. **Design, installation, and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies.** *Water resources and Irrigation Management*, v.2, n.2, p.77-85, 2013.

SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas.** Brasília, DF: ABEAS, 1998, 181 p. (Curso de especialização por tutoria à distância).

SENTELHAS, P.C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. In: MIRANDA, J.H. & PIRES, R.C.M. **Irrigação – Série Engenharia Agrícola.** Piracicaba, SP: FUNEP, 2001. 410 p.

SENTELHAS, P.C. Class A pan coefficients (Kp) to estimate daily reference evapotranspiration (ET_o). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.7, n.1, p.111-115, 2003.

SOUSA, I. F.; NETTO, A. O. A.; CAMPECHE, L. F. M. S. DE.; BARROS, A. C.; SILVA DA, V. P. R. DE.; AZEVEDO, P. V. DE. **Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte II: Consumo hídrico do coqueiro anão verde irrigado.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.5, p.526-532, 2011.

STEVAN, Sérgio Luiz. **Automação e instrumentação industrial com arduino: teoria e projetos.** São Paulo: Érica, 2015.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 3. ed. São Paulo: Artmed, 2006. 719p.

TEIXEIRA, A. H. C.; FILHO, J. M. P. L. **Cultivo da mangueira.** Embrapa Semi-arido, 2004.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94, 1948.

TOOLEY, MIKE. **Circuitos eletrônicos: fundamentos e aplicações;** tradução Luiz Cláudio de Queiroz Faria. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

UNICAMP, FEAGRI. **Agricultura 4.0 conecta o campo.** Disponível em: <https://www.unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2017/09/21/agricultura-40-conecta-o-campo>. Acesso em Março de 2018.

VAREJÃO, MÁRIO A. **Meteorologia e Climatologia;** Versão digital 2. Recife, 2006.

WEBSTER, J. G. **The measurement, instrumentation and sensors handbook.** Heidelberg: Springer, 1999. 156 p.