

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
CURSO DE AGRONOMIA

Erick Santos Machado

**Desenvolvimento de um lisímetro de pesagem com plataforma Arduino**

Curitibanos  
2019

Erick Santos Machado

**Desenvolvimento de um lisímetro de pesagem com plataforma Arduino**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Agronomia.  
Orientador: Prof. João Batista Tolentino Júnior, Dr.

Curitibanos  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Santos Machado, Erick

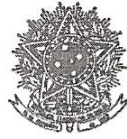
Desenvolvimento de um lisímetro de pesagem com  
plataforma Arduino / Erick Santos Machado ; orientador,  
João Batista Tolentino Júnior, 2019.

43 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus  
Curitibanos, Graduação em Agronomia, Curitibanos, 2019.

Inclui referências.

1. Agronomia. 2. Evapotranspiração. 3. Coeficiente de  
Cultura (kc). 4. Lisimetria de pesagem. I. Batista  
Tolentino Júnior, João. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Agronomia. III. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
Coordenação do Curso de Graduação em Agronomia  
Rodovia Ulysses Gaboardi km3  
CP: 101 CEP: 89520-000 - Curitibanos - SC  
TELEFONE (048) 3721-2176 E-mail: agronomia.cbs@contato.ufsc.br.

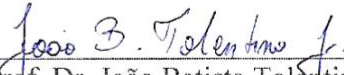
---

ERICK SANTOS MACHADO

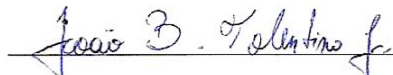
### **Desenvolvimento de um lisímetro de pesagem com plataforma Arduino**


Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Agrônomo, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Agronomia.

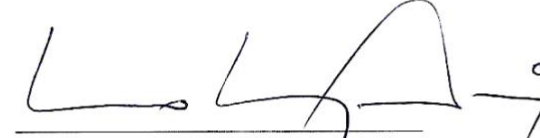
Curitibanos, 18 de novembro de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João.Batista Tolentino Júnior  
Vice-coordenador do Curso

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Batista Tolentino Júnior  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leosane Cristina Bosco  
Membro da banca examinadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Lírío Luiz Dal Vesco  
Membro da banca examinadora  
Universidade Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por me dar forças para superar muitas dificuldades.

As pessoas mais especiais da minha vida, meus pais: Maria e Raimundo, que não tiveram a oportunidade de estudar, e sempre priorizaram o aprendizado dos seus filhos. Em meio a tantas dificuldades e barreiras, nunca me deixaram desistir. A minha irmã, Erika, que juntamente com eles, dedicaram tempo, forças, o possível e o impossível para que este e muitos outros sonhos fossem realizados. Tudo que conquistei até hoje foi graças a vocês. Agradeço pela preocupação, dedicação, e todo cuidado que a mim foi prestado durante toda a minha vida.

A Universidade Federal de Santa Catarina por me proporcionar um imenso crescimento profissional numa instituição pública, gratuita e de qualidade. Pelo amparo recebido desde o primeiro dia como discente com as políticas sociais existentes da PRAE, e sobretudo, agradeço a Patrícia e a Emanoela, por toda ajuda psicológica prestada ao longo destes anos, que me fizeram perder o medo de estar longe de casa e ter coragem para continuar.

Ao meu orientador e amigo, João Batista Tolentino Júnior, e a professora e amiga Adriana Terumi Itako, por todo auxílio prestado na elaboração deste trabalho, pelo companheirismo nos inúmeros jantares e viagens, pela paciência e incentivo, e por toda consideração a mim dedicada. Os considero como a minha família de coração, jamais irei esquecê-los, e serei eternamente grato por tudo que fizeram a mim.

Estendo meus agradecimentos as incríveis amigas que o Sul me presenteou: Ana, Carol, Dani, Juh, Simone e Yanka, que sempre estiveram ao meu lado e me proporcionaram momentos incríveis ao longo destes anos. E, em especial, a Regina, por todas as divertidas vezes que colocamos nossos dotes culinários em prática, pelos cafés e chás para esquentar o frio do inverno, pelos momentos felizes, conversas, conselhos e o conforto que só amizades verdadeiras nos proporcionam.

E a todos, que de alguma forma, fizeram parte da minha trajetória.

## RESUMO

No atual cenário de alto consumo dos recursos hídricos pelas atividades agrícolas, observa-se que a racionalização é essencial. Os dados de evapotranspiração das culturas podem ser obtidos usando ferramentas tecnológicas que ajudam na agricultura de precisão e na tomada de decisão, determinando assim, o momento e a quantidade exata da lâmina de água a ser aplicada ao solo. A lisimetria de pesagem é a melhor técnica existente para determinar a evapotranspiração de culturas. Com a tecnologia disponível para prototipagem eletrônica de baixo custo, objetivou-se com este trabalho montar o equipamento (*hardware*) e criar um programa (*software*) de um lisímetro de pesagem na plataforma Arduino, bem como realizar os procedimentos de calibração da célula de carga, a fim analisar seu desempenho e viabilidade de uso. Para construir o protótipo, utilizou-se um Arduino UNO R3, *shield datalogger* com *RTC*, sensores de temperatura e umidade do ar, temperatura do solo, umidade do solo e uma célula de carga. Com estes sensores, é possível obter dados do consumo de água, por meio do balanço de massa, bem como variáveis ambientais que podem influenciar na evapotranspiração. O software foi programado para que as leituras dos sensores sejam armazenadas a cada cinco minutos. A metodologia utilizada para a calibração do lisímetro foi adequada, com  $R_2 > 0,99$ , e descrita por uma equação do tipo linear:  $y = 282.456 + 253,31 \cdot x$ , com pouca ou nenhuma histerese. O lisímetro de pesagem apresentou bons resultados de calibração, tornando-o adequado para fins de cálculo de demanda hídrica de culturas.

**Palavras-chave:** Evapotranspiração. Coeficiente de cultura (Kc). Lisimetria de pesagem.

## ABSTRACT

In the actual scenario with high consumption of water by agricultural activities, it is observed that the water rationalization is essential. Evapotranspiration data from crops can be obtained using technological tools, which help in precision agriculture and decision making, thus determining, the timing and exact amount of water to be applied to the soil. Weighing lysimeter is the best existing technique for determining crop evapotranspiration. With the technology available for low cost electronic prototyping, the objective of this work was to assemble the hardware and to create a weighing lysimeter software on the Arduino platform, as well as to implement the load cell calibration procedures in order to analyze its performance and feasibility of use. To build the prototype, we used an UNO R3 Arduino, RTC shield datalogger, air temperature and humidity sensors, soil temperature, soil moisture and a load cell. With these sensors it will be possible to obtain water consumption data through mass balance, as well as environmental variables that may influence the evapotranspiration. The software was programmed for the sensor readings to be recorded every five minutes. The methodology used for lysimeter calibration was adequate, with  $R_2 > 0,99$ , and described by a linear equation:  $y = 282.456 + 253,31 \cdot x$ , with little or no hysteresis. The weighing lysimeter showed good calibration results, making it suitable for crop water demand calculation purposes.

**Keywords:** Evapotranspiration. Culture coefficient (Kc). Weighing lysimeter.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demonstração ilustrativa da evapotranspiração de referência (A), evapotranspiração de culturas sob condição padrão (B) e evapotranspiração das culturas em condição real (C).....	14
Figura 2 – Placa Arduino UNO utilizada para o desenvolvimento do lisímetro de pesagem. ....	17
Figura 3 - Tela de criação e compilação de códigos sketches no software Arduino (IDE). ....	17
Figura 4 - Sensor de temperatura e umidade do ar (RHT03) utilizado como componente adicional ao lisímetro de pesagem. ....	18
Figura 5 - Sensor de temperatura digital DS18B20 utilizado como componente adicional ao lisímetro de pesagem. ....	19
Figura 6 - Célula de carga utilizada para a montagem do lisímetro de pesagem. ....	20
Figura 7 - Representação do funcionamento da célula de carga a partir do princípio da ponte de Wheatstone. ....	20
Figura 8 - Conversor analógico digital utilizado para a conversão de medida da célula de carga.	21
Figura 9 - Sensor de umidade do solo utilizado como componente adicional ao lisímetro de pesagem. ....	22
Figura 10 - Esquema do circuito elétrico elaborado no software Fritzing, contendo: (A) <i>Data Logger Shield</i> , (B) Sensor de umidade do solo, (C) Célula de carga, (D) Módulo conversor analógico-digital, (E) Sensor de temperatura do solo, (F) Resistor de 4,7k $\Omega$ , (G) Sensor de temperatura e umidade do ar e (H) protoboard.....	24
Figura 11 - Monitor serial do software Arduino IDE demonstrando a separação dos valores dos sensores.....	25
Figura 12 - Lisímetro de pesagem montado na plataforma arduino. ....	27
Figura 13 – Arquivo de texto salvo no cartão micro SD com os valores das variáveis registradas em cada sensor.....	30
Figura 14 - Variação de tensão (mV) em função da massa medida na célula de carga para a adição (A) e retirada (B) de carga. ....	30
Figura 15 - Variação de tensão (mV) em função da massa medida na célula de carga para todas as cargas e descargas.....	32



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.2.1	Objetivo Geral	12
1.2.2	Objetivos Específicos	12
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	13
2.2	COEFICIENTE DE CULTURA ( $K_c$ )	14
2.3	LISIMETRIA	15
2.4	ARDUINO	16
2.5	SENSORES	18
2.5.1	Sensor de temperatura e umidade do ar (RHT03)	18
2.5.2	Sensor de temperatura do solo	18
2.5.3	Célula de carga	19
2.5.4	Conversor Analógico-digital	21
2.5.5	Sensor capacitivo de umidade do solo	21
2.6	TECNOLOGIAS PARA A AGRICULTURA	22
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>23</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	23
3.2	O LISÍMETRO	23
3.3	O SOFTWARE	25
3.4	CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>27</b>
4.1	LISÍMETRO DE PESAGEM	27

4.2	SOFTWARE.....	27
4.2.1	<b>Armazenamento de dados no cartão micro SD.....</b>	<b>29</b>
4.3	CALIBRAÇÃO DO LISÍMETRO .....	30
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	31
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>34</b>
	<b>ANEXO A – Script de funcionamento do lisímetro de pesagem e demais sensores .....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O correto manejo de irrigação é possível de ser realizado a partir do conhecimento do teor de água disponível no solo, para que a quantidade de correta de água seja fornecida no momento exato (CRUZ *et al.*, 2010). O cenário atual de agricultura moderna traz uma inclusão crescente de tecnologias, que podem ser utilizadas para diversos fins, e dentre eles, pode-se destacar a irrigação, utilizando sensores que determinam os limites mínimos e máximos de utilização de água no ciclo da cultura, sendo que tais técnicas sempre estão associadas a tecnologias de monitoramento climático, onde obtém-se dados que possibilitam um manejo adequado do recurso hídrico (SANTOS; UMMUS, 2015).

A criação e implantação de sistemas inteligentes disponíveis no mercado fez com que a tecnologia evoluísse de forma significativa, podendo ser utilizada na educação e em trabalhos de extensão (PRADO, 2017). Com isso, diversos equipamentos passaram a surgir, e dentre eles, muitas plataformas possibilitam a criação de protótipos de baixo custo, utilizando placas com sensores integrados, unidos de maneira a detectar variáveis ambientais, e tornando possível extrair informações do meio a partir de sinais digitais e analógicos (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

Um dos grandes exemplos de plataforma de software livre é a Arduino, que é composta por um microcontrolador e possui portas de entrada e saída que possibilitam a criação de protótipos a partir da união de atuadores e sensores, no qual captam valores da realidade e respondem a ações físicas programadas, convertendo variáveis ambientais em sinais digitais que podem ser lidos e analisados (FONSECA; BEPPU, 2010).

Muitas são as formas de obter informações de consumo de água pelas plantas, e uma das mais precisas e confiáveis são as provenientes de lisímetros de pesagem, que utilizam a diferença de massa do solo para determinação do fluxo de entrada e saída de água no meio, geralmente utilizando uma célula de carga (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Com tais informações é possível, por exemplo, obter valores precisos de consumo de água pelas culturas, e assim, estruturar uma agricultura mais sustentável, utilizando de forma consciente o recurso hídrico disponível. A tecnologia pode aumentar a eficiência de uso da água e manter a produção de alimentos de modo a suprir as necessidades da população (EUCLIDES FILHO *et al.*, 2011).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com a ANA (2017), 67,3% da água doce no mundo é consumida pela agricultura irrigada. Destes, boa parte é desperdiçada devido a falhas no manejo dos sistemas. A aquisição de dados de evapotranspiração obtidos em lisímetros de pesagem pode ser utilizada para determinar o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) em diferentes ambientes. Com isso, é possível conhecer a quantidade de água necessária e o momento certo de aplicação, a fim de implementar técnicas de racionalização de irrigação, as quais diminuirão o impacto ambiental, promovendo a preservação dos recursos hídricos, além de diminuir os custos de produção na agricultura.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um lisímetro de pesagem utilizando plataforma Arduino com sensores de baixo custo.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Montar o lisímetro de pesagem com Arduino e sensores.

Criar a programação para o correto funcionamento dos sensores utilizados.

Realizar curvas de calibração da célula de carga.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração é compreendida como um processo físico em que um líquido é transferido para a forma gasosa pelo solo e planta simultaneamente (BERGAMASCHI *et al.*, 1999). Na irrigação, a evapotranspiração está associada a quantidade de água a ser aplicada no solo, pois com uma correta estimativa, é possível realizar o manejo de forma a minimizar impactos negativos como a falta ou excesso de água, além de reduzir custos com a compra de equipamentos (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

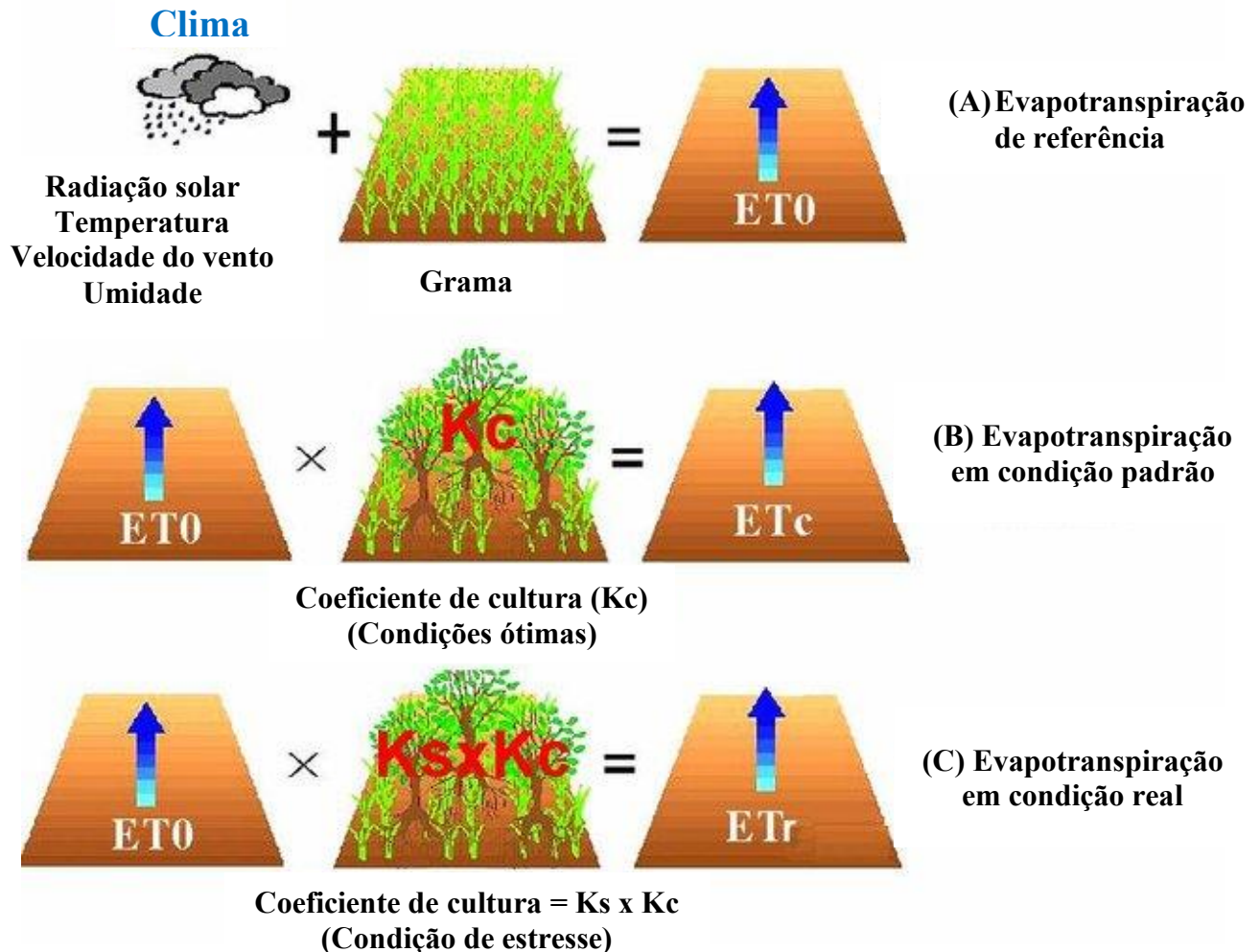
A evaporação no solo é um processo correlacionado com condições externas, sendo que a taxa de evaporação é influenciada pelas propriedades hidráulicas do solo, tendo a condutividade hidráulica como fator principal. Na planta, o processo é denominado transpiração, através da perda de água pelas células para os espaços intercelulares e, por fim, a difusão pelos estômatos para a atmosfera (BERGAMASCHI *et al.*, 1999).

De acordo com Allen *et al.* (1998), é importante levar em consideração as práticas de manejo adotadas, pois estes podem influenciar nos fatores climáticos e de culturas, afetando o processo de evapotranspiração, sendo estes: a cobertura do solo e a densidade da planta e teor de água no solo. Como demonstrado na figura 1, este conceito pode ser subdividido como:

- Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ): Refere-se a taxa de evapotranspiração de uma superfície gramada de referência, sendo que os fatores do solo não influenciam visto que não há escassez de água neste sistema.
- Evapotranspiração das culturas sob condições padrões ( $ET_c$ ): É a evapotranspiração que as culturas tem em condições ótimas de crescimento, sem a ocorrência de pragas ou doenças, cultivadas em grandes campos e com ideais condições de água no solo, e por possuir uma dinâmica diferenciada de consumo de água ao decorrer do seu ciclo, utiliza-se um coeficiente de cultura dinâmico apropriado ao estágio de crescimento, desde a semeadura até a colheita.
- Evapotranspiração das culturas em condições não padronizadas ( $ET_{c\ adj}$ ): É utilizada em culturas cultivadas sob condições de manejos que diferem do seu padrão, onde pode ocorrer deficiência de nutrientes, pragas, doenças ou quaisquer outro fator que mude de alguma forma o ciclo da cultura, e esta pode ser calculada a partir de um coeficiente de stress hídrico

ou com o ajuste do coeficiente de cultura para cada um dos fatores ambientais sobre a evapotranspiração da cultura.

Figura 1 - Demonstração ilustrativa da evapotranspiração de referência (A), evapotranspiração de culturas sob condição padrão (B) e evapotranspiração das culturas em condição real (C).



Fonte: adaptado de ALLEN *et al.*, 1998.

## 2.2 COEFICIENTE DE CULTURA (Kc)

O coeficiente de cultura engloba em seu cálculo valores referentes as características de cada cultura juntamente com a evaporação do solo, para fins de planejamento de irrigação e balanço hidrológico, sendo este ajustável para a frequência de umidificação ou condições climáticas durante cada estágio de desenvolvimento da cultura (ALLEN *et al.*, 1998).

De acordo com Medeiros, Arruda, Sakai (2004), o  $K_c$  é muito dinâmico, e pode variar de acordo com fatores ambientais e fisiológicos das plantas, e por isso, deve ser determinado de acordo com a localidade e a cultura instalada. A determinação deste coeficiente é trabalhosa, e no campo exige equipamentos e técnicas específicas para sua determinação, por conta das numerosas informações necessárias de se obter, que de acordo com Carvalho e Oliveira (2012), podem ser o tipo de cultura, parâmetros climáticos, taxa de evapotranspiração do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura, além de fatores físicos do solo (BERGAMASCHI *et al.*, 1999). Ainda de acordo com Medeiros, Arruda, Sakai (2004), para obter valores de  $K_c$  ao longo do ciclo de culturas, o método mais eficaz é a utilização de lisímetros de pesagem.

É normalmente utilizado para técnicas de irrigação o valor de  $K_c$  único, por ser de mais fácil obtenção. Nele, os efeitos da evaporação e transpiração de água são combinados em um único coeficiente (CARVALHO; OLIVEIRA, 2012).

Albuquerque (2010) subdividiu algumas fases para utilização do coeficiente de cultura em plantas anuais de acordo com o seu ciclo, sendo elas:

- Fase inicial, quando a cobertura do solo é menor que 10%;
- Fase vegetativa, quando a cobertura do solo está entre 10 e 80%;
- Fase reprodutiva, que vai até a maturação, e se tem o máximo de cobertura do solo;
- Fase de maturação.

## 2.3 LISIMETRIA

A lisimetria é uma técnica que visa determinar a variação de massa de um determinado volume de solo, com base na entrada e saída de massa hídrica, utilizando uma célula de carga. Pela variação da massa, é possível determinar a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo (CAMPECHE *et al.*, 2011). Para que os lisímetros forneçam dados confiáveis, devem ser devidamente calibrados, pela adição e retirada de massas conhecidas e verificação do sinal elétrico emitido pelo sistema, e, por fim, converter estes sinais para unidades de medida de massa, como por exemplo, grama e quilograma (FARIA; CAMPECHE; CHIBANA, 2006).

Vários autores dizem que o lisímetro de pesagem é o equipamento mais preciso para a determinação da evapotranspiração das culturas (TYAGLI; SHARMA; SUTHRA, 2000). Pereira, Moreira, Klar (2002), descreve que a partir de um lisímetro, é possível obter dados do balanço

hídrico de um volume de solo amostrado pelo equipamento, e este pode ser feito com uma célula de carga que mede a variação de peso do sistema de forma automatizada.

Para o bom funcionamento dos lisímetros, é necessário que ocorra a calibração, para estabelecer a relação entre o sinal proveniente da célula de carga com o peso do sistema, em busca de determinar a curva de linearidade, através da utilização de pesos previamente conhecidos (CAMPECHE, 2002). Campeche *et al.* (2011) utilizaram um lisímetro de pesagem de grande porte com uma célula de carga com capacidade de 200 kg e precisão de 0,02%. Para a calibração, utilizaram sacos de brita com massa conhecida e obtiveram resultados que indicam que este é eficaz para a determinação da evapotranspiração de plantas de grande porte, com um coeficiente de determinação de 0,99 na equação de calibração. Faria, Campeche, Chibana (2006) também utilizaram recipientes com massa conhecida na calibração e obtiveram êxito ao observar uma linearidade entre as variações de massa e tensão (mV), onde o equipamento detectou mudanças de massa correspondente a pelo menos 0,1 milímetro em intervalos de 1 hora.

## 2.4 ARDUINO

O Arduino é uma plataforma simples para prototipagem, que utiliza um microcontrolador, e permite a criação de projetos interativos (Figura 2). Com ele, é possível criar projetos de automação, que podem ser unidos e integrados a diversos tipos de sensores para o funcionamento do equipamento que deseja ser desenvolvido (MELO; BARANIUK, 2012).

O hardware da placa é pequeno e possui características muito semelhantes de um computador comum, como memória flash (para armazenar o *software*), temporizadores, microprocessador e memória RAM. O modelo UNO possui quatorze pinos digitais e seis pinos analógicos, que podem ser utilizados como dispositivos de entrada e saída (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

Com a utilização de sensores, é possível fazer leituras de determinadas variáveis ambientais, tais como temperatura do ar, umidade do ar, umidade do solo, incidência de radiação, dentre outras. Os sensores funcionam como transdutores específicos, que transformam um tipo de energia, como a energia do movimento, em energia elétrica, que é lida pelo Arduino (MELO; BARANIUK, 2012).



Figura 2 – Placa Arduino UNO utilizada para o desenvolvimento do lisímetro de pesagem.



Fonte: Autor

O software utilizado na programação dinâmica da placa é desenvolvido na Arduino IDE (Integrated Development Environment), o qual permite a criação de *sketchs* na linguagem C++, que logo, ao compilar o programa na placa, o converte para a linguagem C, que é mais difícil de ser utilizada por iniciantes (Figura 3). Após o desenvolvimento do código no aplicativo, o Arduino é conectado ao computador através de uma porta USB e assim, pode-se então compilar o código na sua memória flash, fazendo com que este funcione independentemente desde que conectado a uma fonte de energia, executando o código armazenado e fazendo leituras infinitas na sequência armazenada. Este equipamento é capaz de perceber as variáveis do ambiente de acordo com sinais elétricos que os sensores instalados o enviam através dos seus terminais de entrada, e é capaz de controlar outro elemento que esteja conectado no seu terminal de saída (MELO; BARANIUK, 2012).

Figura 3 - Tela de criação e compilação de códigos *sketchs* no software Arduino (IDE).

```

CODULT
//TEMP SOLO (init)
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define DS18B20 7
OneWire ourWire(DS18B20);
DallasTemperature sensors(&ourWire);

//DHT (init)
#include "DHT.h"
#define DHTPIN 6
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

//SD (init)
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
const int chipSelect = 10;

```

Fonte: Autor

## 2.5 SENSORES

### 2.5.1 Sensor de temperatura e umidade do ar (RHT03)

O sensor RHT03 ou DHT 22 (Figura 4), como é popularmente conhecido, utiliza a coleta do sinal digital através de um sensor de umidade capacitivo, que mede valores a partir da mudança de sua capacitância de acordo com a variação de umidade do ar (BOGDAN, 2016). Utiliza ainda um termistor que verifica a diferença da resistência elétrica contida internamente em função da variação de temperatura no ambiente (DEFELICE, 1998). O coeficiente de calibração é armazenado na sua memória ainda na fábrica, e por isso há um padrão de valores nos sensores comercializados. Possui característica de baixo consumo de energia, é bastante compacto e pode ser instalado a uma distância de até 20 metros do microcontrolador, possibilitando o seu uso em diferentes situações (MACHADO, 2017).

Opera em uma faixa de temperatura do ar que varia de  $-40^{\circ}\text{C}$  até  $80^{\circ}\text{C}$ , de 0 a 100% para a umidade do ar, tendo uma precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  para a temperatura e  $\pm 2\%$  para a umidade relativa do ar (MACHADO, 2017).

Figura 4 - Sensor de temperatura e umidade do ar (RHT03) utilizado como componente adicional ao lisímetro de pesagem.



Fonte: Autor

### 2.5.2 Sensor de temperatura do solo

O sensor de temperatura digital DS18B20 (Figura 5) pode ser utilizado para determinar a temperatura em diversos ambientes, tais como na água e no solo. É comunicado com a plataforma Arduino através de uma porta digital do microcontrolador, opera entre  $-55^{\circ}\text{C}$  e  $+125^{\circ}\text{C}$  com

precisão de +/- 0,5°C quando operado entre 0°C e 85°C, e pode ser conectado ao Arduino através de uma fonte de 5v utilizando um resistor de 4,7kΩ (AMORIM; DIAS; SOARES, 2015).

Figura 5 - Sensor de temperatura digital DS18B20 utilizado como componente adicional ao lisímetro de pesagem.

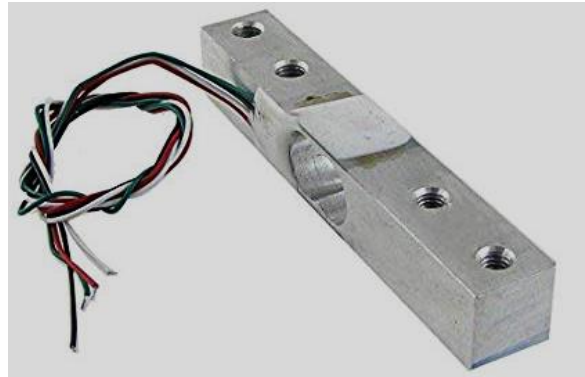


Fonte: Autor

### 2.5.3 Célula de carga

A célula de carga é um sensor que utiliza princípios físicos para determinar o peso (Figura 6). Uma grande variedade de informações pode ser utilizada, tais como a tensão, pressão e a força, e estes, são convertidos em sinais elétricos através de tensões elétricas, frequência ou corrente. Estas células geram sinais elétricos a partir de elementos denominados extensômetros resistivos, que utilizam uma pressão mecânica em uma estrutura deformável, formando células de carga utilizadas para mensurar grandezas como força e pressão, ligados a partir de uma ponte de Wheatstone (VIEIRA, 2016).

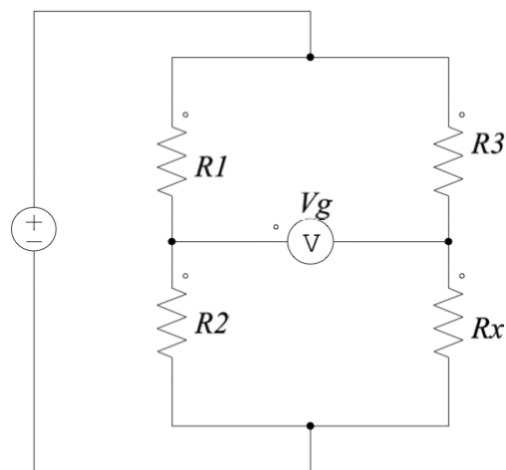
Figura 6 - Célula de carga utilizada para a montagem do lisímetro de pesagem.



Fonte: Autor

A ponte de Wheatstone é utilizada para determinar a resistência de um resistor. São compostas por quatro resistências, onde quando todas estão equilibradas, possuem valores idênticos (Figura 7). Este circuito é utilizado na tensão mecânica, onde há um resistor sensível a compressão e os outros três sensores possuem um valor conhecido, onde, quando aplicado uma força, resultará num valor do resistor variável ao valor da resistência, e assim, torna-se possível saber a massa sobre o equipamento (DREYER NETO *et al.*, 2001).

Figura 7 - Representação do funcionamento da célula de carga a partir do princípio da ponte de Wheatstone.

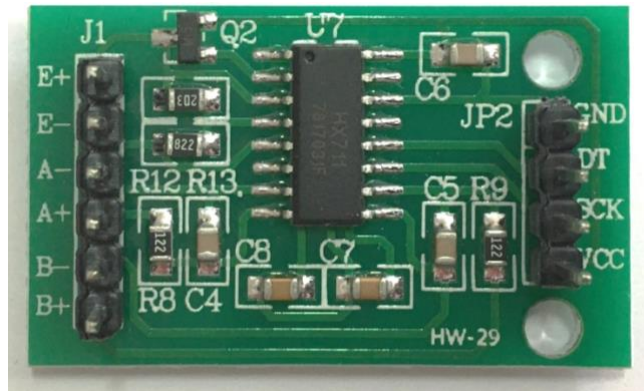


Fonte: MARTINS, 2013.

### 2.5.4 Conversor Analógico-digital

Esta peça é responsável pela conversão analógico-digital (Figura 8). É um processo eletrônico responsável pela transformação de um sinal analógico em seu equivalente digital. Este processo é requerido, pois o sinal analógico não é estável, e a cada intervalo existem infinitos valores de corrente analógica. O procedimento para a transformação em sinal digital é formado basicamente pela amostragem de alguns destes valores analógicos recebidos em valores fixos, sendo que quanto maior o número de bits recebidos maior é o número de sinais analógicos amostrados para representar um sinal digital, e menor é o erro (FALLEIRO, 2015).

Figura 8 - Conversor analógico digital utilizado para a conversão de medida da célula de carga.



Fonte: Autor

### 2.5.5 Sensor capacitivo de umidade do solo

São constituídos basicamente de condutores separados por um meio dielétrico, que resultam em valores de acordo com a variação da capacitância destes, em resposta a diferentes variáveis de propriedades físicas no qual estes são submetidos (Figura 9). São utilizados para diversos fins, e dentre eles, para medir o teor de água no solo (SEGUNDO, 2010). Estes sensores detectam deslocamentos a partir de 10-10 mm e são estáveis em ambientes desfavoráveis, apresentando ainda um baixo consumo de energia (GARCIA *et al.*, 2004).

Figura 9 - Sensor de umidade do solo utilizado como componente adicional ao lisímetro de pesagem.



Fonte: Autor

## 2.6 TECNOLOGIAS PARA A AGRICULTURA

A inclusão da tecnologia na agricultura ocasionou uma ampla mudança de técnicas nos modelos de produção agrícola (VASCONCELOS; GARCIA, 2005). A atividade econômica moderna é representada pelas tecnologias, bem como resulta da pesquisa e de ciências voltados para o crescimento e desenvolvimento econômico e social (GASTALDI, 2001).

A produção agrícola engloba as tecnologias como um instrumento de redução de trabalho. Nela, basicamente, utiliza-se a mecanização para reduzir a mão de obra e favorecer fatores relacionados a organização e gestão de propriedades, podendo obter um maior rendimento por unidade de trabalho, reduzindo a grande procura por extensão de escala de operação (GELINSKI NETO, 2012). Fernandes, Preuss, Silva (2017), uniram na plataforma Arduino sensores de temperatura, luminosidade e umidade do solo para construir um protótipo automatizado para estufas, onde estes exerciam a função de captar variáveis ambientais do meio e converter estes sinais para a ativação de sistemas de exaustão e aquecimento. Capelli (2014) desenvolveu uma estufa controlada remotamente utilizando a internet unida a módulos eletrônicos de baixo custo na elaboração do projeto e obteve resultados satisfatórios, atendendo as expectativas esperadas. Bueno (2015), utilizou LED's, sensor de temperatura e coolers para a criação de um aplicativo explorado a partir do sistema operacional Android para o controle de iluminação pela plataforma Arduino via celular, e Gomes (2016), desenvolveu um sensor digital de umidade do solo com uma unidade remota de monitoramento utilizando a comunicação sem fio.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

A montagem do lisímetro ocorreu após a seleção dos componentes necessários para o funcionamento do protótipo. A montagem física e de software, bem como a calibração do equipamento ocorreu entre os meses de junho a outubro de 2019 no Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Catarina.

#### 3.2 O LISÍMETRO

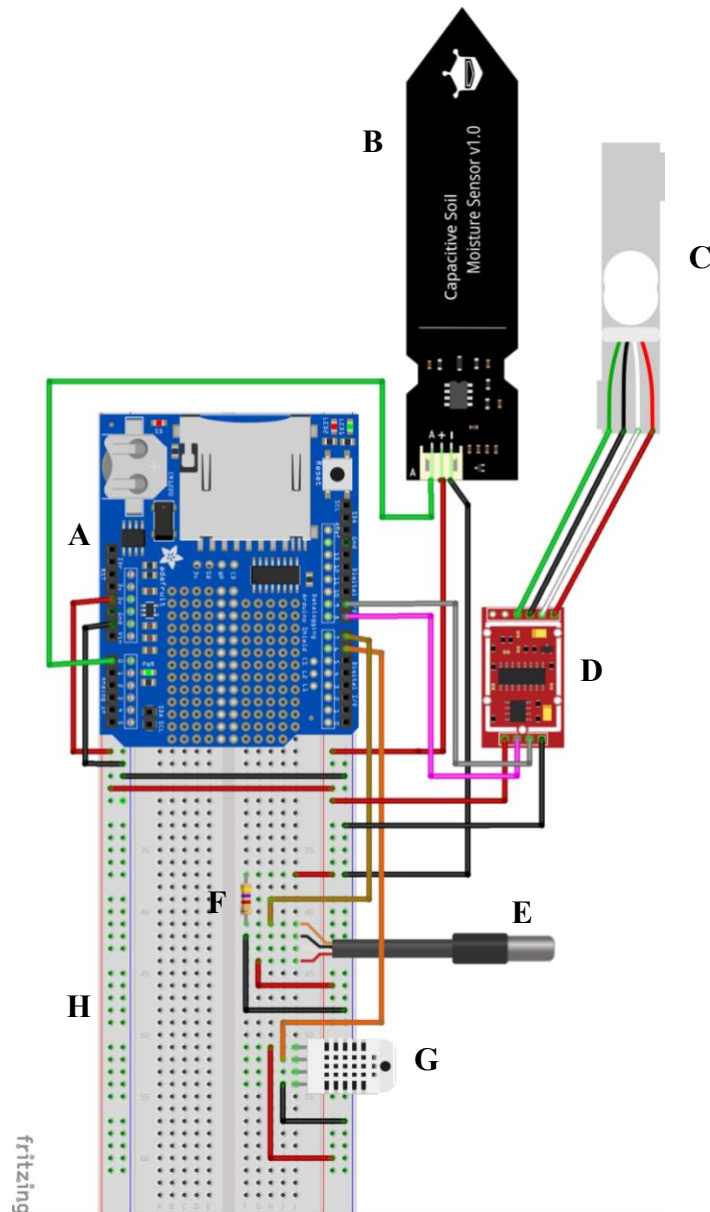
Buscando obter informações sobre o consumo hídrico de pequenas culturas em vasos com ou sem irrigação, obteve-se como meta a construção de lisímetros de pesagem para determinar com boa precisão a evapotranspiração deste recipiente. A escolha pela metodologia do lisímetro de pesagem foi adotada pois esta é considerada, dentre as existentes, a melhor tecnologia disponível para determinar a evapotranspiração das culturas. Além disso, a escolha da montagem na plataforma Arduino, se deve ao fato que esta é uma plataforma livre e pode ser explorada a partir da utilização de sensores de baixo custo, possibilitando a aquisição e montagem de um equipamento de qualidade com custo reduzido. Para a montagem do lisímetro, foram utilizados os seguintes componentes:

- Arduino Uno
- *Protoboard*
- Sensor de temperatura e umidade do ar RHT03
- Sensor de temperatura do solo DS20B18
- Sensor capacitivo de umidade do solo
- Datalogger Shield, composto por um leitor de cartão SD e um RTC (DS1307)
- Cartão microSD 32Gb
- Célula de carga Straight Bar TAL220 10Kg
- Módulo conversor analógico-digital HX711
- Jumpers

- Resistor de 4,7k $\Omega$
- Estrutura plástica para fixação da célula de peso
- Fonte de alimentação de 5V e 1A

O esquema do circuito para a construção física do lisímetro, elaborado no software Fritzing, pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - Esquema do circuito elétrico elaborado no software Fritzing, contendo: (A) *Datalogger Shield*, (B) Sensor de umidade do solo, (C) Célula de carga, (D) Módulo conversor analógico-digital, (E) Sensor de temperatura do solo, (F) Resistor de 4,7k $\Omega$ , (G) Sensor de temperatura e umidade do ar e (H) *protoboard*.



Fonte: Autor



### 3.3 O SOFTWARE

A elaboração do software foi realizada na *Arduino (IDE)*, utilizando bibliotecas previamente existentes para cada sensor (Anexo A). Este foi escrito para que realizasse a leitura de todas as variáveis e a armazenasse em cartão micro SD acoplado no *shield* datalogger a cada 5 minutos. Como pode-se observar na Figura 11, os dados foram armazenados na ordem: data, hora, peso, valor em milivolts da célula de carga, temperatura do ar, umidade do ar, temperatura do solo. Todos os valores são separados por “;” para facilitar a transformação destes dados em tabela através de softwares específicos.

Figura 11 - Monitor serial do software Arduino IDE demonstrando a separação dos valores dos sensores.



The screenshot shows the Arduino IDE serial monitor window for a device named "/dev/cu.usbmodem14101 (Arduino/Genuino Uno)". The window displays a stream of sensor data lines, each starting with a timestamp and followed by several numerical values separated by semicolons. The data lines are as follows:

```

2019-11-05;13:33:59;738.45;464415;64.50;22.80;26.62;361;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:01;738.70;464467;64.50;22.80;26.69;360;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:02;738.32;464448;64.40;22.80;26.56;361;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:03;738.63;464508;64.40;22.80;26.62;360;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:04;738.41;464529;64.40;22.80;26.50;361;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:06;738.13;464333;64.40;22.80;26.56;360;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:07;738.29;464406;64.40;22.80;26.50;361;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:08;738.73;464397;64.40;22.80;26.50;360;
TCC - Erick Machado
2019-11-05;13:34:09;738.53;464489;64.30;22.80;26.62;361;

```

At the bottom of the window, there are control options: "Défilement automatique" (checked), "Show timestamp" (unchecked), "Pas de fin de ligne" (dropdown), "9600 baud" (dropdown), and "Effacer la sortie" (button).

Fonte: Autor

### 3.4 CALIBRAÇÃO DA CÉLULA DE CARGA

Para este procedimento, foi realizada a metodologia semelhante a apresentada por Campeche (2002), na qual foi coletada a tensão (mV) inicial do lisímetro e procedeu-se com a adição e retirada de massas conhecidas. Neste experimento foram utilizadas medidas de 50 g de água. Para a leitura inicial, foi utilizado um Becker com água com massa total de 500 g. Em seguida, adicionou-se 50 g de água em cada intervalo até o máximo de 1500 g. Cada adição de massa foi efetuada com o auxílio de uma pipeta eletrônica, onde foi adicionado 50 mL de água. Para cada valor de massa, realizou-se a leitura da saída da célula de carga, em milivolts. O mesmo

procedimento foi realizado retirando massa de água, em que o peso inicial foi de 1500 g e retirou-se de 50 g em cada intervalo, até o valor final de 500 g.

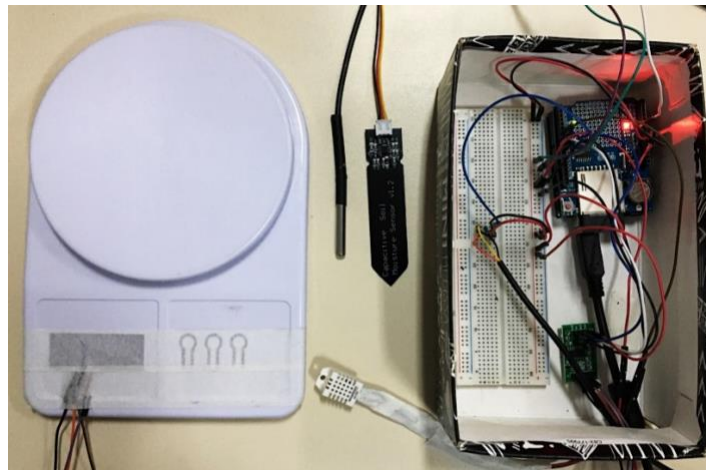
Os valores obtidos a cada adição ou retirada de massa foram coletados 3 minutos após a adição de cada massa, para que as oscilações durante a adição do conteúdo não afetassem a leitura. Foram obtidos nestes procedimentos 84 pontos para a confecção da curva de calibração, visto que o procedimento de adição e retirada de massa foi realizado duas vezes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 LISÍMETRO DE PESAGEM

Todo o circuito eletrônico do lisímetro foi construído sobre uma *protoboard*, como pode ser observado na figura 12.

Figura 12 - Lisímetro de pesagem montado na plataforma Arduino.



Fonte: Autor

A adoção de uma estrutura plástica para fixação da célula de carga resultou em uma estabilidade para o equipamento (Figura 12), visto que a massa na superfície pôde ser distribuída uniformemente a fim de restringir uma possível variação. Isso dificultaria a precisão na medida de evapotranspiração em uma superfície sobreposta no equipamento. A célula foi fixada com parafusos e os seus fios de conexão foram soldados com estanho em um fio extensor até as portas de entrada do Arduino.

### 4.2 SOFTWARE

Na elaboração do software utilizou-se a definição de entrada, com alimentação de 5V para os sensores de temperatura e umidade do ar, temperatura do solo e umidade do solo, e de 3,3V para a célula de carga, nos pinos analógicos e digitais da placa Arduino, como demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 – Portas e tensão utilizada em cada componente.

Componentes	Porta	Alimentação (V)
Sensor de temperatura e umidade do ar RHT03	Digital 06	5
Sensor de temperatura do solo DS20B18	Digital 07	5
Sensor capacitivo de umidade do solo	Analógica 01	5
Célula de carga	CLK Digital 08	3,3
	DOUT Digital 09	

Após a definição das portas de cada sensor, o “String” criado, comando que realiza o armazenamento temporário dos valores lidos em cada sensor, armazenou cada valor proveniente de uma média de 20 leituras.

```
String dataString = "";
```

Os comandos também foram programados para realizar o armazenamento da data e hora para cada leitura:

```
DateTime time = rtc.now();
dataString += String(time.timestamp(DateTime::TIMESTAMP_DATE));
dataString += String(";");
dataString += String(time.timestamp(DateTime::TIMESTAMP_TIME));
dataString += String(";");
```

No desenvolvimento do protótipo, as ações se repetem a cada *loop* na ordem:

1. Célula de carga (massa ajustada com *offset* e *scale* e tensão (mV)).

Para a célula de carga, cada leitura simples foi obtida proveniente de uma média de 10 leituras realizada pelos seguintes comandos:

```
mass = balanca.get_units(10);
rawmass = balanca.read_average(10);
```

## 2. Umidade e temperatura do ar:

```
h_ar = dht.readHumidity();
t_ar = dht.readTemperature();
```

## 3. Temperatura do solo:

```
sensors.requestTemperatures();
t_solo = sensors.getTempCByIndex(0);
```

## 4. Umidade do solo:

```
h_solo = analogRead(pino_sinal_analogico);
```

### 4.2.1 Armazenamento de dados no cartão micro SD

Após a leitura de todos os sensores, os valores armazenados temporariamente no comando “String” foram salvos definitivamente no cartão micro SD, a cada 5 minutos, em um arquivo de texto, denominado de “datalog.txt”:

```
void sd (String dataString) {
  File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile); {
    dataFile.println(dataString);
    dataFile.close();
  }
}
```

Para a visualização dos dados armazenados no cartão SD, foi implementada a função de *download* diretamente no monitor serial do *software Arduino IDE*, o qual pode ser acionada a partir da tecla “d”, e demonstrará todos os dados armazenados no cartão de memória, na ordem de *loop* “data;hora;peso;raw;ur\_ar;t\_ar;t\_solo;u\_solo”, separadas por “;”, para que seja facilitada a transformação destes em tabela de dados em um software de análise (Figura 13).

Figura 13 – Arquivo de texto salvo no cartão micro SD com os valores das variáveis registradas em cada sensor.

```

Download lisímetro (04/11).TXT — Modifié
2019-11-03;04:15:00;1216.68;586826;98.20;28.90;20.40;326;
2019-11-03;04:15:40;1216.82;586846;98.61;28.90;20.45;326;
2019-11-03;04:20:00;1216.64;586801;98.57;28.90;20.50;326;
2019-11-03;04:20:40;1216.37;586739;98.25;28.90;20.40;326;
2019-11-03;04:25:00;1215.98;586652;99.90;28.95;20.47;326;
2019-11-03;04:25:40;1216.26;586730;99.90;28.90;20.65;326;
2019-11-03;04:30:00;1216.53;586778;99.90;29.00;20.58;326;
2019-11-03;04:30:40;1216.25;586715;99.90;28.97;20.48;326;
2019-11-03;04:35:00;1216.65;586800;91.43;28.89;20.52;326;

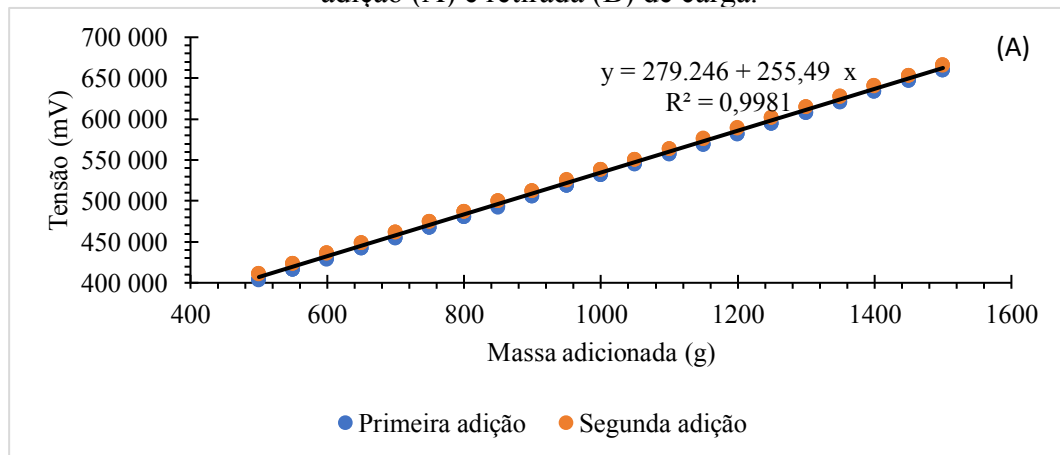
```

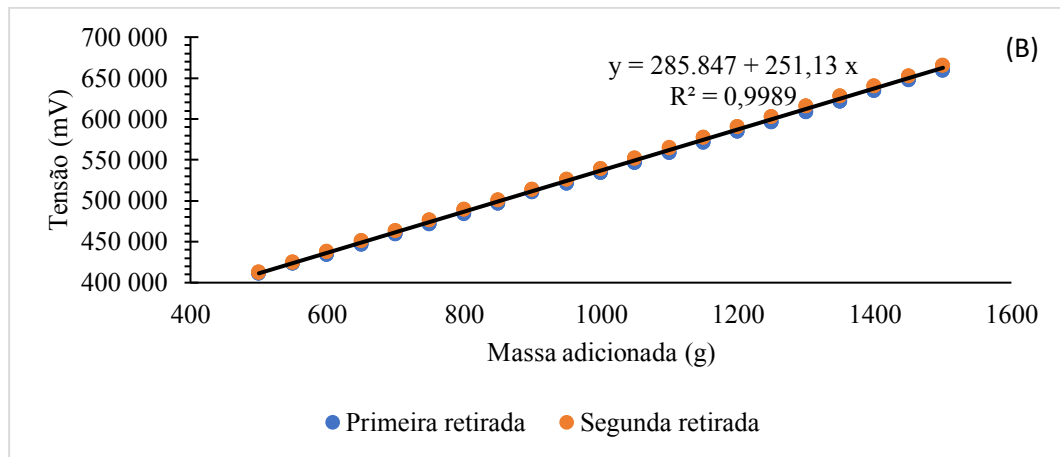
Fonte: Autor

### 4.3 CALIBRAÇÃO DO LISÍMETRO

Após a aplicação da metodologia de Campeche (2002), foram obtidos valores da tensão da célula de carga (mV) e a massa colocada no equipamento (g). Realizou-se a plotagem gráfica dos valores, e foi possível verificar que o modelo linear representou adequadamente a relação entre os valores, apresentando um ótimo coeficiente de variação ( $R^2$ ) de 0,9981 para a adição de carga (Figura 14A) e de 0,9989 para a retirada de carga (Figura 14B).

Figura 14 - Variação de tensão (mV) em função da massa medida na célula de carga para a adição (A) e retirada (B) de carga.

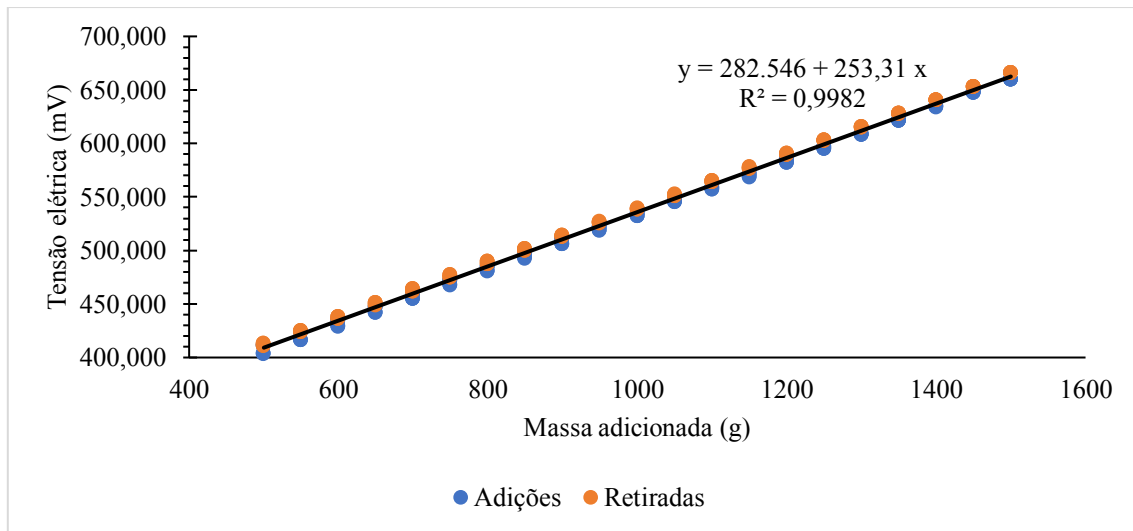




Após o ajuste da equação linear, foi possível observar uma excelente concordância entre os valores obtidos, gerando a equação  $y = 279.426 + 255,49 x$  para a adição de massa com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9981$ , e a equação  $y = 285.847 + 251,13 x$  para a retirada de massa com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9989$ . Isso indica que os valores de tensão (em mV) da célula de carga são explicado em 99,81% pelos valores de massa para a adição e de 99,89% para a retirada.

Após a plotagem gráfica contendo todos os 252 valores de adição e subtração de massa, foi possível ajustar uma equação linear gerando a equação de ajuste linear  $y = 282.456 + 253,31 x$  com um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9982$  (Figura 15). Os coeficientes desta equação foram utilizados nos parâmetros *scale* e *offset* do software carregado no equipamento. O valor de  $R^2 > 0,99$  para experimentos de calibração com metodologias semelhantes a este também foi observado por Lima *et al.* (2013), Vilela *et al.* (2015), Sanches *et al.* (2017) e Mariano *et al.* (2015). Carvalho *et al.* (2007), Carvalho *et al.* (2013) e Bomfim *et al.* (2004), ao realizar o procedimento de calibração de um lisímetro de pesagem eletrônica também encontraram resultados lineares tanto para o carregamento quanto para o descarregamento de massas do equipamento. Assim como observado por Faria, Campeche, Chibana (2006) não houve necessidade de ajuste de histerese.

Figura 15 - Variação de tensão (mV) em função da massa medida na célula de carga para todas as cargas e descargas.



#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alguns itens devem ser levados em consideração na montagem deste equipamento, como: A união dos fios devem ser soldadas com estanho, pois a utilização de plugues causou uma variação da tensão de saída dos sensores instalados nas portas digitais e analógicas. A variação de tensão de saída também foi constatada ao utilizar diferentes fontes de alimentação, e por isso, durante o experimento foi utilizada apenas uma fonte de alimentação de 5V e 1A; Os sensores de temperatura e umidade do ar e umidade e temperatura do solo foram instalados apenas a caráter de armazenamento de informações, as quais não foram utilizadas para a calibração da célula de carga, podendo estes serem eliminadas em desenvolvimento do protótipo para os fins dispostos neste presente trabalho, caso não seja necessário conhecer as variáveis ambientais do local em que o equipamento foi instalado.

Pretende-se ampliar este estudo a partir da instalação e calibração de células de carga com maior capacidade de pesagem, visando a sua utilização com a evapotranspiração em grandes volumes de solo e em grandes culturas, bem como a instalação de deste protótipo para o acompanhamento real da evapotranspiração de culturas em ambiente controlado e a campo em condições naturais.



## 5 CONCLUSÃO

O protótipo montado atendeu adequadamente aos objetivos propostos.

O software criado foi capaz de controlar adequadamente o correto funcionamento dos sensores unidos ao equipamento.

O registro frequente das variáveis pelo *datalogger* facilitou a análise dos dados, o qual pode gerar uma grande quantidade de informações, demonstrando sua eficácia para determinar o consumo de água pela planta com boa precisão.

O coeficiente de determinação  $R^2 > 0,99$  demonstrou que a célula de carga possui grande estabilidade nos valores de resposta, percebendo a diferença do balanço de massa durante a calibração, com pouca ou nenhuma histerese.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P. Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo. **Circular Técnica – Embrapa**. ISSN 1518-4269, 2010. p.25. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/25532/1/Circ-136.pdf>. Acesso em: 3 set. 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, p. 300, 1998.
- AMORIM, H. S.; DIAS, M. A.; SOARES, V. Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: Um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v.37, p.9. 2015.
- Agência Nacional de Águas - ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: relatório 2017**. Brasília: Agência Nacional de Águas.
- BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada a irrigação**. Editora Universidade. Porto Alegre, 2. Ed. 130p. 1999.
- BOGDAN, M. **How to Use the DHT22 Sensor for Measuring Temperature and Humidity with the Arduino Board**. ACTA Universitatis Cibiniensis, v. 68, n. 1, p. 22-25, 2016.
- BUENO, G. N. M. **Controle de Iluminação e Temperatura pela Plataforma Arduino via Celular**. 2015. p.70. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Automação Industrial). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8688/1/PG\\_COAUT\\_2015\\_2\\_04.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8688/1/PG_COAUT_2015_2_04.pdf). Acesso em: 2 out. 2019.
- BOMFIM, G. V. *et al.* Calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de utilização. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 35, p. 284-290, 2004.
- CAMPECHE, L. F. M. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V. 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.
- CAMPECHE, L. F. S. M. **Construção, calibração e análise de funcionamento de lisímetros de pesagem para determinação da evapotranspiração da cultura da lima ácida ‘Tahiti’ (*Citrus latifolia* Tan.)**. 2002. p. 67. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- CAPELLI, B. M. **Desenvolvimento de uma estufa controlada e monitorada remotamente**. 2014. p.77. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia da Computação). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: [http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/97/970010/tce-20022015-140355/publico/Capelli\\_Beatriz\\_Midena.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/97/970010/tce-20022015-140355/publico/Capelli_Beatriz_Midena.pdf). Acesso em: 16 set. 2019.

CARVALHO, D. F.; OLIVEIRA, L. F. C. **Planejamento e Manejo de Água na Agricultura Irrigada**. Viçosa, p.240, 2012.

CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B.; GUERRA, J. G. M.; CRUZ, F. A.; SOUZA, A. P. **Instalação, Calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem**. ISSN 0100-6916. v.27. p.363-372, 2007.

CRUZ, T.M.L.; TEIXEIRA, A.S.; CANAFÍSTULA, F.J.F.; SANTOS, C., OLIVEIRA, A.D.S.; DAHER, S. **Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo**. v.30, n.1, p.33-45, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n1/a04v30n1.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2019.

DEFELICE, T. P. **An introduction to meteorological instrumentation and measurement**. Upper saddle River. p.229, 1998.

DREYER NETO, C *et al.* Desenvolvimento de uma plataforma de força em pedal de ciclismo. **Revista Brasileira de Biomecânica**, v. 2, n. 3, p. 39-44, 2001. Acesso em: 6 set. 2019.

EUCLIDES FILHO, K.; FONTES. R. R.; CONTINI, E.; CAMPOS. F. A. A. O papel da ciência e da tecnologia na agricultura do futuro. **Revista de Política Agrícola**. p. 98-111, n.4. 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/930906/1/Opapeldaciencia.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2019.

EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em ação**. São Paulo: Novatec, 2013. 424p.

FALLEIRO, F. D. **Conversor Analógico-digital com capacitores mínimos integrado na tecnologia CMOS**. 2015. p.75. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Eletrônica e de Computação). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013087.pdf>. Acesso em: 12 set. 2019.

FARIA, R. T.; CAMPECHE, L. F. S. M.; CHIBANA, E. Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p. 237-242, 2006.

FERNANDES, G. D.; PREUSS, E.; SILVA, T. L. **Sistema Automatizado de Controle de Estufas para Cultivo de Hortaliças**. p.32, 2017. Disponível em: [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12958/TCCG\\_SIFW\\_2017\\_FERNANDES\\_DOUGLAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/12958/TCCG_SIFW_2017_FERNANDES_DOUGLAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 9 set. 2019.

FONSECA, E. G. BEPPU, M. M. **Apostila Arduino**. Niterói, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Fluminense. p. 23. 2010.

GARCÍA, M. A. P.; ANTÓN, J. C. A.; RODRÍGUEZ, J. C. C.; MARTÍN, F. J. F.; ORTEGA, G. J. G. **Instrumentación Electrónica**. ed.1. Madrid, España: Thomson, 2004.

GASTALDI, J. P. **Elementos de economia política**. 17. Ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2001.

GELINSKI NETO, F. **Tecnologia na agricultura: produtividade e renda**. p.45, 2012. Disponível em: <http://fgelneto.paginas.ufsc.br/files/2011/08/TEC-NA-AGRICULTURA-VERSÃO-FINAL-CORRIGIDA.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2019.

GOMES, I. C. **Desenvolvimento de um sensor digital de umidade do solo e unidade remota de monitoramento utilizando comunicação sem fio**. 2016. p. 57. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia da Computação). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2016. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5553/1/PB\\_COENC\\_2016\\_1\\_03.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5553/1/PB_COENC_2016_1_03.pdf). Acesso em: 7 ago. 2019.

LIMA, N. S. DA; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. A. C.; SILVA, E. F. F.; MONTENEGRO A. A. de A.; NASCIMENTO, A. H. C. Desempenho de um lisímetro de pesagem hidráulica com sensor de pressão hidrostática e sistema manométrico. **Irriga**, Botucatu, v.18, p.540-557, 2013.

MACHADO, B. L. F. **Sistema de monitoramento da qualidade do ar por meio de micro sensores aplicado ao conceito de cidade inteligente**. 2017. p.76. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017. Disponível em: [http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9170/1/LD\\_COEAM\\_2017\\_2\\_06.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9170/1/LD_COEAM_2017_2_06.pdf). Acesso em: 2 ago. 2019.

MARIANO, D. C.; FARIA, R. T.; FREITAS, P. S. L; LENA, B. P.; JOHANN, A. L. Construction and calibration of a bar weighing lysimeter. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.37, n.3, p.271-278, 2015. Disponível em: [http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/19368/pdf\\_61](http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/19368/pdf_61). Acesso em: 9 ago. 2019.

MARTINS, R. P. R. Circuito Para Leitura e Aquisição de Dados de um Sensor Químico. 2013. p. 47. Tese de Mestrado (Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores). Universidade do Minho, Braga, Portugal. 2013. Disponível em: <http://intranet.dei.uminho.pt/gdmi/galeria/temas/pdf/40462.pdf>. Acesso em: 7 jul. 2019.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. **Acta Scientiarum Agronomy**. v.26, n.4, p.513-519, 2004.

MELO, J. L. G. G; BARANIUK, J. **Mini Curso: Arduino**. Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 20, 2012. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/~james/Laboratorio%20V/arquivos/Mini%20Curso%20Arduino.pdf>. Acesso em: 8 jul. 2019.

PEREIRA, A. L.; MOREIRA, J. A. A.; KLAR, A. E. Efeitos de níveis de cobertura do solo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro (*phaseolus vulgaris* L.). **Irriga, Botucatu**. v.7, n.1, p. 42-52, 2002.

PRADO, S. C. **Estudo orientado de programação aplicada a robótica**. 2017. p.91. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017. Disponível em: [http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2016\\_SuzanaCarnielliPrado.pdf](http://www.uel.br/ctu/deel/TCC/TCC2016_SuzanaCarnielliPrado.pdf). Acesso em: 20 ago. 2019.

SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P. ; MENDONÇA, F. C. MAFFEI, R. G. Constrution and calibration of weighing lysimeters with an automated drainage system. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.21, n.7, p.505-509, 2017.

SANTOS, D.; UMMUS, M. E. Formas de uso mais eficiente da água pela agricultura. **Informativo técnico: EMBRAPA**. p.3. 2015. n.9 Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1039319/1/CNPASA2015fa9.pdf>. Acesso em 14. ago. 2019.

SEGUNDO, A. K. R. **Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação**. 2010. p.65. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3563/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 1 set. 2019.

TYAGI, N. K.; SHARMA, D. K.; LUTHRA, S. K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower w lysimeter. **Agricultural Water management**. v.145, p.41-54, 2000.

VASCONCELLOS, M. A. S.; GARCIA, M. E. **Fundamentos de economia**. São Paulo: Editora Saraiva, 2005.

VIEIRA, M. A. R. **Sensor Inteligente para Medição de Cargas Mecânicas**. Relatório Final da Dissertação de Mestrado (Engenharia Ambiental). Instituto Politécnico de Bragança. p.89, 2016. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/13185/1/Dissertação.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2019.

VILELA, M. S.; CABRAL FILHO, F. R.; TEIXEIRA, M. B.; AMARAL, A. M.; VELLAM, L. M.; SOARES, F. A. L. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. **Irriga**, v.1, ed.esp., p.158-167, 2015.

**ANEXO A – Script de funcionamento do lisímetro de pesagem e demais sensores**

```
1 //Lisímetro de pesagem com plataforma Arduino
2 //Autores: Erick S. Machado e João B. Tolentino Jr.
3
4 //numero de repetições de cada leitura
5 int n = 20;
6
7 //UmidSolo (init)
8 #define pino_sinal_analogico A0
9 int valor_analogico;
10
11 //TEMP SOLO (init)
12 #include <OneWire.h>
13 #include <DallasTemperature.h>
14 #define DS18B20 7
15 OneWire ourWire(DS18B20);
16 DallasTemperature sensors(&ourWire);
17
18 //DHT (init)
19 #include "DHT.h"
20 #define DHTPIN 6
21 #define DHTTYPE DHT22
22 DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
23
24 //SD (init)
25 #include <SPI.h>
26 #include <SD.h>
27 const int chipSelect = 10;
28
29 //Balança (init)
```

```
30 #include "HX711.h"
31 #define DOUT 9
32 #define CLK 8
33 HX711 balanca;
34 float calibration = 255.879203;
35 float offset = 275465;
36
37 //RTC (init)
38 #include <Wire.h>
39 #include "RTCLib.h"
40 RTC_DS1307 rtc;
41
42 //SETUP
43 void setup() {
44     //SERIAL (setup)
45     Serial.begin(9600);
46
47     //Balanca (setup)
48     balanca.begin(DOUT, CLK);
49     balanca.set_scale(calibration);
50     balanca.set_offset(offset);
51
52     //TEMP SOLO (setup)
53     sensors.begin();
54
55     //DHT (setup)
56     dht.begin();
57
58     //Umidsolo (setup)
59     pinMode(pino_sinal_analogico, INPUT);
60
61     //SD (setup)
```

```
62   Serial.print("Inicializando o SD...");
63   if (!SD.begin(chipSelect)) {
64       Serial.println("SD falhou");
65       while (1);
66   }
67   Serial.println("SD iniciado.");
68   if (!SD.exists("datalog.txt")) {
69       Serial.println("datalog.txt doesn't exist.");
70       File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
71
72   dataFile.println("data;hora;peso;raw;ur_ar;t_ar;t_solo;u_solo");
73       dataFile.close();
74   }
75
76   //RTC (setup)
77   if (! rtc.begin()) {
78       Serial.println("Couldn't find RTC");
79   } else {
80       Serial.println("RTC find");
81       //rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));
82   }
83
84   delay(2000);
85 }
86
87 void loop() {
88     Serial.println("TCC - Erick Machado");
89     String dataString = "";
90
91     //RTC (loop)
92     DateTime time = rtc.now();
93     dataString += String(time.timestamp(DateTime::TIMESTAMP_DATE));
```



```
94   dataString += String(";");
95   dataString += String(time.timestamp(DateTime::TIMESTAMP_TIME));
96   dataString += String(";");
97
98   //SD (loop)
99   int rm = time.minute() % 5;
100  if (rm == 0) {
101    //loop de 'n' leituras de cada variável
102    double mass = 0;
103    long rawmass = 0;
104    double h_ar = 0;
105    double t_ar = 0;
106    double t_solo = 0;
107    long h_solo = 0;
108
109    for (int i = 1; i <= n; i++) {
110      //Balanca (loop)
111      mass = mass + balanca.get_units(10);
112      rawmass =rawmass + balanca.read_average(10);
113
114      //DHT (loop)
115      h_ar = h_ar + dht.readHumidity();
116      t_ar = t_ar + dht.readTemperature();
117
118      //TEMP SOLO (loop)
119      sensors.requestTemperatures();
120      t_solo = t_solo + sensors.getTempCByIndex(0);
121
122      //Umidsolo (loop)
123      h_solo = h_solo + analogRead(pino_sinal_analogico);
124    }
125
```

```
126     dataString += String(mass / n);
127     dataString += String(";");
128     dataString += String(rawmass / n);
129     dataString += String(";");
130     dataString += String(h_ar / n);
131     dataString += String(";");
132     dataString += String(t_ar / n);
133     dataString += String(";");
134     dataString += String(t_solo / n, 2);
135     dataString += String(";");
136     dataString += String(h_solo / n);
137     dataString += String(";");
138     sd(dataString);
139 } else {
140     Serial.print(time.timestamp(DateTime::TIMESTAMP_DATE));
141     Serial.print(";");
142     Serial.print(time.timestamp(DateTime::TIMESTAMP_TIME));
143     Serial.print(";");
144     Serial.print(balanca.get_units(2));
145     Serial.print(";");
146     Serial.print(balanca.read_average(2));
147     Serial.print(";");
148     Serial.print(dht.readHumidity());
149     Serial.print(";");
150     Serial.print(dht.readTemperature());
151     Serial.print(";");
152     sensors.requestTemperatures();
153     Serial.print(sensors.getTempCByIndex(0));
154     Serial.print(";");
155     Serial.print(analogRead(pino_sinal_analogico));
156     Serial.println(";");
157 }
```

```
158
159   if (Serial.available()) {
160       char temp = Serial.read();
161       if ( temp == 'd')  {
162           File dataFile = SD.open("datalog.txt");
163           // if the file is available, write to it:
164           if (dataFile) {
165               while (dataFile.available()) {
166                   Serial.write(dataFile.read());
167               }
168               dataFile.close();
169           }
170       } else if (temp == 't') {
171           balanca.tare();
172       }
173   }
174   delay(1000);
175 }
176
177 void sd (String dataString) {
178     //SD (loop)
179     File dataFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
180     if (dataFile); {
181         dataFile.println(dataString);
182         dataFile.close();
183     }
184     Serial.println("Dados salvos no SD-card");
185     Serial.println(dataString);
186 }
```