

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS EDUARDO ENGEL

**INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA PARA ANÁLISE DA
PERMEABILIDADE DE SOLOS GRANULARES**

TOLEDO

2022

LUCAS EDUARDO ENGEL

**INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA PARA ANÁLISE DA
PERMEABILIDADE DE SOLOS GRANULARES**

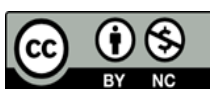
**Instrumentation and automation of a system for permeability analysis of
granular soils**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Jose Dolores Vergara Dietrich
Coorientador: Lázaro Valentin Zuquette

TOLEDO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LUCAS EDUARDO ENGEL

**INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMATIZAÇÃO DE UM SISTEMA PARA ANÁLISE DA
PERMEABILIDADE DE SOLOS GRANULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Campus Toledo, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Data de aprovação: 07/dezembro/2022

José Dolores Vergara Dietrich
Doutor em Engenharia de Automação e Controle
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Alessandro Paulo de Oliveira
Doutor em Engenharia Elétrica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Guilherme Alan Souza Costa
Mestre em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO

2022

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados da construção de um sistema digital microcontrolado utilizado em um permeâmetro para a realização de ensaios e determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Um dos objetivos deste trabalho é automatizar a aquisição dos dados, visto que ensaios manuais podem apresentar dificuldades e erros ao longo do procedimento. Através do dispositivo implementado, é possível registrar a temperatura, a vazão e o horário em que os dados foram coletados, acionar as bombas de recirculação e controlar a temperatura por meio de um aquecedor resistivo. O processamento dos dados registrados ao longo do ensaio, são realizados externos ao sistema digital e a integração entre hardware e software é por meio de um Arduino Mega, o qual utiliza um microcontrolador ATmega 2560. Os dados obtidos com o sistema digital microcontrolado se mostraram confiáveis quando comparados com os dados coletados manualmente e, também, com a ordem de grandeza esperada.

Palavras-chave: filtros granulares; permeabilidade do solo; automação; Arduino.

ABSTRACT

This work presents the results of the construction of a microcontrolled digital system used in a permeameter to perform tests and determine the permeability coefficient of granular soils at constant load. One of the objectives of this work is to automate the acquisition of data, since manual tests can present difficulties and errors throughout the procedure. Through the implemented device, it is possible to record the temperature, the flow rate and the time when the data were collected, activate the recirculation pumps and control the temperature through a resistive heater. The processing of data recorded throughout the test is carried out external to the digital system and the integration between hardware and software is through an Arduino Mega, which uses an ATmega 2560 microcontroller. The data obtained with the microcontrolled digital system proved to be reliable when compared with the data collected manually and also with the expected order of magnitude.

Keywords: granular filters; soil permeability; automation; Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Permeâmetro de carga constante.....	17
Figura 2 – Permeâmetro de carga variável.....	17
Figura 3 – Fator de correção de permeabilidade.....	18
Figura 4 – Sistema de controle.	18
Figura 5 – Controlador PID.....	20
Figura 6 – Estrutura geral do projeto.	24
Figura 7 – Arduino Mega 2560.....	25
Figura 8 – Diagrama funcional da planta desenvolvida.....	25
Figura 9 – Planta desenvolvida.....	26
Figura 10 – RTC PCF8563.....	27
Figura 11 – Sensor de nível.....	27
Figura 12 – Hardware do sensor de nível.....	28
Figura 13 – Bomba de água.....	28
Figura 14 – Sensor de temperatura (DS18B20).....	29
Figura 15 – Relé de estado sólido.....	29
Figura 16 – Desenho do sensor de fluxo.....	30
Figura 17 – Hardware do regulador de tensão.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	<i>Alternating Current</i>
A/D	Analógico-Digital
DC	<i>Direct Current</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
NA	Normalmente aberto
NBR	Normas Brasileiras
NF	Normalmente fechado
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	Transmissor/receptor assíncrono universal
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da superfície
C	Fator de correção da temperatura
i	Gradiente hidráulico
k	Coefficiente de permeabilidade
k ₂₀	Coefficiente de permeabilidade a 20°C
K _p	Ganho proporcional
T	Temperatura
T _d	Tempo derivativo
T _i	Tempo integral
v	Velocidade
Q	Vazão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	Organização do documento	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1	Filtros granulares	15
2.2	Lei de Darcy: permeabilidade e vazão	15
2.3	Ensaio de permeabilidade	16
2.4	Conceitos de sistemas de controle	18
2.5	Controlador PID	19
2.6	Sensores e atuadores	21
2.7	Conversão A/D.....	21
2.8	PWM.....	22
2.9	Comunicação.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Descrição da planta.....	24
3.2	Sensor de nível.....	27
3.3	Acionamento da bomba.....	28
3.4	Sensor de temperatura	28
3.5	Acionamento do aquecedor	29
3.6	Sensor de fluxo.....	29
3.7	Fontes de alimentação elétrica	30
3.8	Aquisição dos dados	30
4	RESULTADOS.....	32
5	CONCLUSÕES	36
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Filtros granulares são camadas drenantes utilizadas em diferentes obras de engenharia, como estruturas viárias, barragens, rebaixamento de lençol freático, entre outros. Trata-se de um sistema de drenagem utilizado para direcionar de forma segura a água que escoar através do solo, melhorando as condições de segurança da obra de maneira geral, prevenindo erosões internas do solo protegido, por exemplo. Deste modo, é importante monitorar as variações sazonais e degradações ao longo do tempo dos filtros granulares, de modo a identificar possíveis eventos de redução da sua capacidade de drenagem.

O monitoramento desses filtros acontece através da análise do coeficiente de permeabilidade, obtido por meio da vazão e da temperatura da água que percola pelo solo. Segundo Neves e Nogueira (1987), pode-se determinar o coeficiente de permeabilidade por diferentes maneiras: fórmulas empíricas, ensaios de laboratório (com o uso de permeômetros) ou ensaios de campo.

Os ensaios em laboratório, para Meinzer (1923), podem ser à carga constante, à carga variável ou sem carga, sendo realizados de forma manual ou automática. Os ensaios manuais podem apresentar dificuldades e erros ao longo do procedimento, desse modo a adoção de ensaios automatizados torna-se uma melhor opção para a obtenção do coeficiente de permeabilidade. Segundo Nise (2017), diversos processos na indústria de controle utilizam sistemas de controle automático para ajuste de parâmetros, como por exemplo o controle de temperatura, a umidade de ambientes ou a regulação do nível de líquidos em reservatórios.

Nesse estudo, um sistema de controle automático será empregado para a determinação do coeficiente de permeabilidade de solos à carga constante, minimizando eventuais dificuldades e erros de operação.

1.1 Justificativa

Ao perceber a importância do coeficiente de permeabilidade do solo em obras de engenharia e a dificuldade na determinação de tal coeficiente em ensaios de forma manual, observou-se a viabilidade de realizar esses ensaios de forma automática.

Para tanto, o presente trabalho visa obter o coeficiente de permeabilidade de forma automática em ensaios de laboratório à carga constante por meio de um sistema digital microcontrolado que monitora a vazão e a temperatura da água.

1.2 Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram divididos em Objetivo Geral e Objetivos específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema digital microcontrolado que possibilite a obtenção da permeabilidade do solo em um ensaio com permeâmetro à carga constante.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo principal desse trabalho seja alcançado, os seguintes objetivos específicos foram considerados: elaboração de *hardware* e *software* compatível com as necessidades do projeto, obtenção da vazão e da temperatura da água que percola através do filtro, aplicação da Lei de Darcy para a determinação do coeficiente de permeabilidade; e validação dos dados coletados.

1.3 Organização do documento

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, os quais são descritos de forma sucinta a seguir, dando-se ênfase aos principais aspectos de cada um deles.

O primeiro capítulo apresenta a importância em monitorar o coeficiente de permeabilidade em obras de engenharia, a motivação do trabalho proposto, a descrição dos objetivos a serem alcançados e, por fim, a organização do documento.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica utilizada. Nesta, os filtros granulares são caracterizados e o meio para obtenção do coeficiente de permeabilidade é apontado. Além disso, os conceitos eletrônicos utilizados no estudo são elencados.

O terceiro capítulo expõe os materiais e métodos necessários para a obtenção do coeficiente de permeabilidade por meio de um sistema digital microcontrolado, apresentando as características dos sensores e atuadores utilizados.

O quarto capítulo aborda os resultados obtidos com a elaboração do trabalho e a obtenção do coeficiente de permeabilidade.

E o quinto capítulo refere-se à conclusão, ou seja, as etapas subsequentes para a elaboração do sistema digital microcontrolado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda características de mecânica dos solos, especificamente filtros granulares, e como obter o coeficiente de permeabilidade do solo, além da fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento de um sistema digital microcontrolado capaz de obter tal coeficiente pelo método à carga constante de forma satisfatória.

2.1 Filtros granulares

Para o projeto de filtros drenantes no escopo da engenharia, como em irrigação, drenagem, preparo e conservação do solo, é fundamental o conhecimento e a medição das propriedades físicas do solo, como porosidade, textura, estrutura, entre outras (REINERT; REICHERT, 2006). Ainda, segundo os autores, a textura e o tamanho das partículas são as duas propriedades físicas mais importantes.

Reinert e Reichert (2006) defendem que a porosidade é responsável por um conjunto de fenômenos e desenvolve uma série de mecanismos de importância na física dos solos, tais como retenção e fluxo de água e ar.

No que se refere à eficiência dos filtros, o “Critério Clássico de Terzaghi”, proposto por Karl Von Terzaghi (1926), é o precursor no estudo de projetos de filtros e adota os seguintes critérios para o seu dimensionamento: permeabilidade e retenção. O critério de permeabilidade diz respeito à condutividade hidráulica, conduzindo o material líquido infiltrante através do filtro. O critério de retenção está relacionado à capacidade do filtro de reter partículas, impedindo o carregamento do solo para o interior do dreno.

Neste trabalho serão considerados filtros granulares, os quais são formados por materiais não coesivos e que apresentam um coeficiente de permeabilidade alto. A equação utilizada para determinar tal coeficiente, descrita pela Lei de Darcy, é apresentada na seção seguinte.

2.2 Lei de Darcy: permeabilidade e vazão

A permeabilidade é uma propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento de um material líquido através dele, sendo que todos os solos apresentam essa propriedade em maior ou menor intensidade (VARGAS, 2015). Para filtros granulares, essa permeabilidade deve ser alta, evitando o aumento excessivo

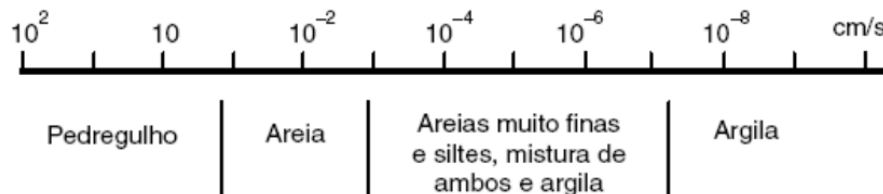
de pressão da água, permitindo a retenção das partículas de solo e promovendo um fácil escoamento da água (SILVA, 2010).

O grau de permeabilidade é expresso numericamente pelo chamado coeficiente de permeabilidade (CAPUTO; CAPUTO, 2022), que é descrito pela lei de Darcy. Para solos permeáveis, a ordem de grandeza desse coeficiente, em centímetros por segundo, é observada na Figura 1. Em 1856, Henry Darcy publicou um experimento simples que descrevia a velocidade de fluxo

$$v = k \cdot i \quad (2.1)$$

como sendo diretamente proporcional ao coeficiente de permeabilidade (k) e ao gradiente hidráulico (i).

Figura 1 – Intervalos de coeficiente de permeabilidade para diferentes solos.



Fonte – Caputo (2022), *apud* Casagrande e Fadum (1940).

O experimento realizado por Darcy ocorreu em coluna saturada de areia, a qual era submetida à percolação da água através da área da seção transversal do permeâmetro (A). Através dessa percolação Darcy observou uma relação para a vazão da água

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (2.2)$$

Massad (2016) aponta cinco fatores que podem influenciar o coeficiente de permeabilidade, sendo eles: o tamanho dos grãos, o índice de vazios, o tipo de fluido, a composição mineralógica e a estrutura do solo.

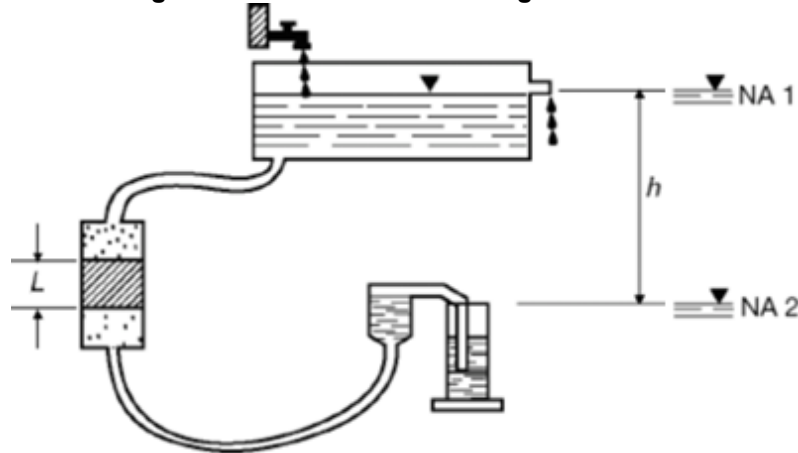
A determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares depende de ensaios e procedimentos através de métodos regidos pelas normas apresentadas na próxima seção.

2.3 Ensaio de permeabilidade

Para a determinação do coeficiente de permeabilidade a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) apresenta dois ensaios em permeâmetros: o ensaio de permeabilidade à carga constante (ABNT, 2021b), Figura 2, e à carga variável (ABNT, 2021a), Figura 3. O primeiro é indicado para solos do tipo areia e silte, por

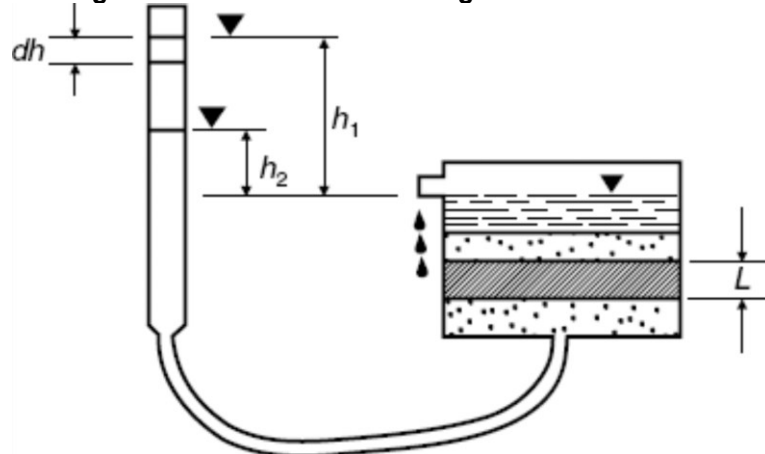
exemplo, ou seja, granulometria grossa, e o segundo é indicado para solos que apresentam baixo coeficiente de permeabilidade, ou seja, argilas, por exemplo.

Figura 2 – Permeâmetro de carga constante.



Fonte – Adaptado de Caputo (2022).

Figura 3 – Permeâmetro de carga variável.



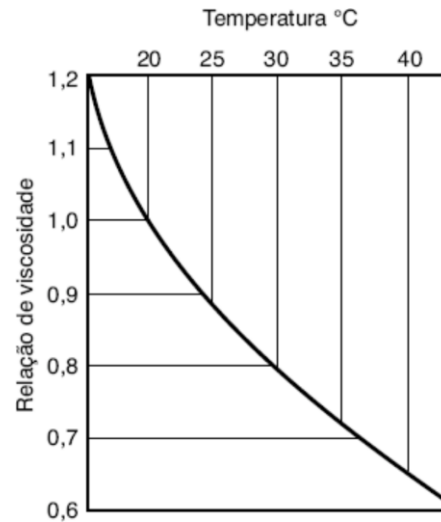
Fonte – Caputo (2022).

A norma traz um fator de correção em relação a temperatura da água, que influencia na viscosidade deste fluido e, conseqüentemente, na sua percolação. Assim, para o coeficiente de permeabilidade a uma temperatura padrão de 20°C, dada por

$$k_{20} = k \cdot C \quad (2.3)$$

sendo k_{20} o coeficiente de permeabilidade a 20°C, k o coeficiente de permeabilidade medido e C o fator de correção. Na Figura 4, pode ser observado os fatores de correção para cada valor de temperatura.

Figura 4 – Fator de correção de permeabilidade.

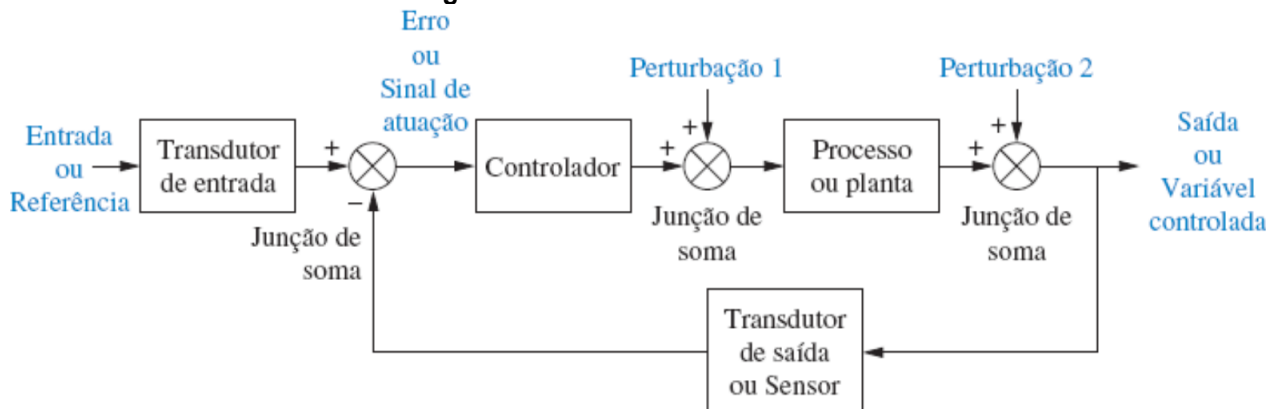


Fonte – Caputo (2022).

2.4 Conceitos de sistemas de controle

Um sistema de controle é uma interconexão de componentes que formam uma configuração que proporciona uma resposta desejada do sistema (DORF; BISHOP, 2018). Ou seja, é a construção de processos com o objetivo de obter uma relação final desejada entre a entrada (referência) e a saída (variável controlada) do sistema, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Sistema de controle.



Fonte – Nise (2017).

A interconexão de componentes apresentada na Figura 5, ilustra os transdutores de entrada e saída, os quais convertem uma informação obtida no processo ou planta em algo que possa ser utilizado pelo controlador, como por exemplo o acionamento de um aquecedor. O sistema realimentado pelo transdutor de saída compensa o efeito das perturbações medindo a resposta da saída,

realimentando essa medida através da malha de realimentação e comparando essa resposta com a entrada na junção de soma (NISE, 2017).

Com o avanço da humanidade, tornou-se muito comum a automatização de processos de controle para aplicações contemporâneas, buscando a otimização de recursos e de produtividade. Essa automatização conta com controladores (ou compensadores) que atuam de forma a garantir uma resposta final desejada.

Um sistema de controle é dito em malha fechada quando utiliza a medida da saída (ou variável controlada) e a compara com a resposta desejada (referência ou *setpoint*), obtendo assim o sinal de erro (ou sinal de atuação) naquele momento (DORF; BISHOP, 2018). Dessa forma, o controlador recebe o sinal de erro e calcula a ação de controle (ou variável manipulada) adequada para o processo, conduzindo o sistema para a resposta desejada, incluindo a compensação de eventuais efeitos de perturbações externas. Na seguinte seção o controlador utilizado é detalhado.

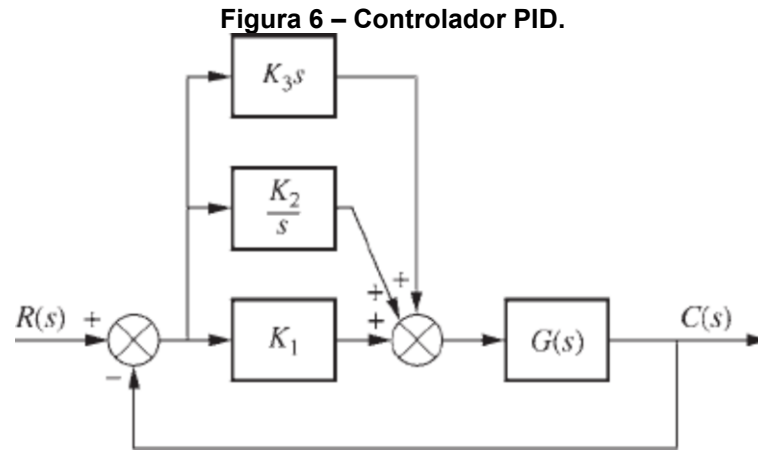
2.5 Controlador PID

O controlador PID, mostrado na Figura 6, é largamente utilizado na indústria de processo, pois nenhum outro controlador corresponde à simplicidade, funcionalidade clara, aplicabilidade e facilidade de uso oferecidas por ele (WANG; BARNES; CLUETT, 1995).

O controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é a combinação da ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa, sendo que essa combinação pode ser definida por

$$u(t) = K_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.4)$$

em que o parâmetro K_p representa o ganho proporcional; T_d representa o tempo derivativo e T_i representa o tempo integral. Esta configuração é chamada de estrutura clássica do controlador PID.



Fonte – Nise (2017).

Cada uma das ações descritas desempenha um papel definido que, resumidamente, são descritas a seguir. A ação proporcional fornece uma ação de controle geral que relaciona a entrada com a saída do controlador através de um fator de ganho ajustável, o parâmetro K_p (GOLNARAGHI; KUO, 2012). Porém, esse tipo de controle permite erros em estado estacionário, já que a saída desta parcela proporcional só existirá se houver erro entre a saída do sistema e a referência. O controle integral, por sua vez, elimina o erro para a referência em estado estacionário através da compensação de baixa frequência por um integrador e, desta forma, complementa a ação proporcional podendo alcançar respostas rápidas (devido à ação proporcional) e erro nulo para referência (ação integral) em regime permanente. Por outro lado, a ação derivativa melhora a resposta transitória através da compensação de alta frequência por um diferenciador. O tempo derivativo T_d pode ser entendido como um fator antecipatório, isto é, pode antecipar a orientação do erro e utilizá-lo para melhor controlar o processo (GOLNARAGHI; KUO, 2012). Na prática, a ação derivativa tem o papel de atenuar eventuais picos ou respostas oscilatórias que o sistema apresente apenas com o ajuste das ações proporcional e integral. É importante ressaltar que a ação derivativa, justamente por apresentar a derivada do sinal de erro, pode amplificar o sinal de eventual ruído de medição (pois a derivada de um sinal de alta frequência é grande). Portanto, na prática, a compensação derivativa deve ser usada com moderação (RICE; COOPER, 2002).

Como foi mencionado anteriormente, os sensores e transdutores de entrada e saída são componentes que convertem uma informação obtida no processo em algo que possa ser utilizado pelo controlador, estes componentes são descritos na próxima seção.

2.6 Sensores e atuadores

O sensor é um instrumento capaz de detectar estímulos físicos, químicos ou biológicos, como por exemplo térmicos, mecânicos e odorantes, e produzir um estímulo correspondente que pode ser convertido, transmitido e monitorado, como um sinal elétrico (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2019). Um sensor pode ser do tipo analógico ou digital.

O sensor analógico apresenta em sua saída um sinal de tensão, corrente, ou resistência proporcional à grandeza física medida e pode assumir qualquer valor ao longo do tempo desde que esteja dentro da sua faixa de operação. Já o sensor digital pode assumir apenas dois estados distintos em sua saída, como ligado ou desligado, sendo utilizados para monitorar a ocorrência ou não de determinado evento (FIALHO, 2006).

Atuadores têm funções inversas aos sensores, atuando em sistemas de controle e provocando mudanças físicas mediante estímulos de outra natureza, como físicos ou químicos. Sensores e atuadores são largamente utilizados em processos devido ao fato que são estes os responsáveis por fazerem a leitura dos sinais a serem interpretados pelo controlador e, ao mesmo tempo, oferecerem a possibilidade de atuar no sistema, possibilitando assim que este seja conduzido ao ponto de operação desejado.

2.7 Conversão A/D

Os sinais de entrada de um sistema de controle podem variar a depender do tipo de sensor (leitura) utilizado. Geralmente, os processos são monitorados por sensores analógicos e digitais. Apesar de existirem controladores industriais preparados para receber tanto sinais analógicos, quanto digitais, pelo fato de que os sinais analógicos apresentam maior dificuldade para o processamento da informação e armazenamento dos dados, não é incomum encontrar sistemas de conversão de sinais analógicos em sinais digitais para, finalmente, serem enviados ao controlador.

A conversão A/D transforma um sinal analógico, contínuo no tempo, em um sinal digital, discreto no tempo, por meio da amostragem e da quantificação. Um sinal digital convertido apresenta uma resolução que pode variar de acordo com o número de bits do conversor (4 bits, 8 bits, 16 bits, entre outros), em um conversor de 8 bits o sinal convertido pode variar de 0 a 255, por exemplo.

Para o controlador do processo, os sinais provenientes dos sensores, sejam eles analógicos ou digitais são chamados de sinais de entrada. A principal função do controlador é, levando em conta os sinais lidos pelos sensores, tomar a decisão de quais saídas devem ser acionadas para que o processo seja conduzido dentro dos parâmetros desejados através dos chamados atuadores, como motores, aquecedores, etc.

Da mesma forma que os sinais de entrada, os sinais de saída podem ser analógicos ou digitais.

Não é incomum que alguns atuadores que admitam sinais analógicos sejam controlados por sinais digitais, dada a facilidade de lidar com estes últimos. Uma técnica amplamente utilizada para isso é o chamado controle por largura de pulso (PWM) que será detalhado na seguinte seção.

2.8 PWM

Um método simples para o controle de potência em sistemas digitais, como o acionamento de motores, aquecedores ou lâmpadas, é a utilização de um controle por faixa, ou seja, operando em dois estados: ligado ou desligado. Entretanto, essa técnica apresenta algumas limitações quanto a precisão de operação, como por exemplo, na variação da velocidade de um ventilador ou na intensidade e brilho de uma lâmpada. Isso posto, uma alternativa hábil à técnica ligado/desligado é o emprego do método PWM para o controle de potência.

PWM (*Pulse Width Modulation*), ou Modulação por Largura de Pulso, utilizada para transferência de potência, é uma técnica para obter resultados analógicos por meios digitais. O PWM consiste na geração de ondas quadradas em alta frequência e controlada por ciclos de trabalho (*Duty Cycle*) que variam de 0 a 255, provocando uma variação média no valor da onda. O uso do PWM é uma alternativa mais versátil ao controle por faixa (Liga/Desliga), trazendo mais precisão nas ações de um sistema.

A técnica de PWM controla a porcentagem em que a onda permanece em nível lógico alto, indo de 0 bits (0% de *Duty Cycle*) até 255 bits (100% de *Duty Cycle*), e pode ser aplicada no controle de alguns motores elétricos, resistências ou luzes em diferentes intensidades.

2.9 Comunicação

Um sistema digital microcontrolado é composto, além do microcontrolador, por sensores, atuadores e demais periféricos que necessitam da troca de informações entre eles para que um objetivo seja alcançado, como o aumento de uma temperatura, o acionamento de um motor ou o envio de dados para um computador. Essa troca de informações é responsabilidade da comunicação, a qual consiste no transporte de dados por meio de bits entre microcontroladores e/ou microcontroladores e periféricos, sendo a conexão entre esses dispositivos é realizada por meio de protocolos de comunicação.

A comunicação pode ser de dois tipos: serial ou paralela. A primeira consiste na transferência de dados sequencialmente, otimizando o número de fios utilizados. Já a paralela, transfere vários bits ao mesmo tempo, simultaneamente, otimizando a transmissão de dados. Este trabalho apresenta apenas comunicações do tipo serial.

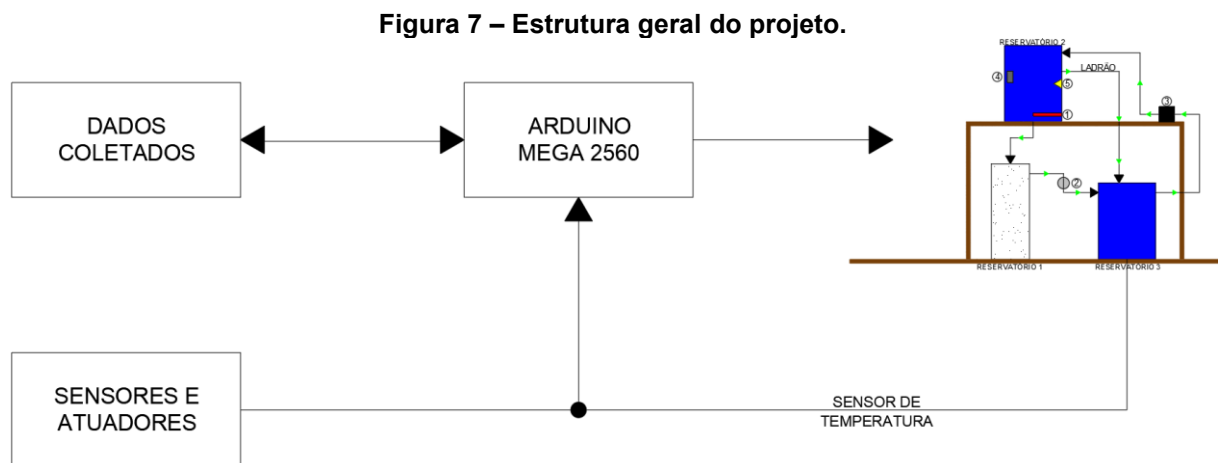
Há duas possibilidades de comunicação serial existentes, os métodos síncronos e assíncronos, os quais destacam-se os seguintes protocolos: UART, SPI, I2C, 1-*Wire* e USB, que podem ser encontrados em *displays*, sensores, módulos e no envio de dados para uma central de controle, por exemplo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo é responsável por descrever os materiais e métodos utilizados para determinar o coeficiente de permeabilidade em um ensaio com permeâmetro à carga constante. Primeiramente, a planta utilizada nos ensaios é apresentada, bem como os sensores e atuadores. Por fim, o microcontrolador, o qual é responsável pela integração entre *hardware* e *software*.

3.1 Descrição da planta

Observa-se na Figura 7 a ilustração da estrutura do projeto proposto, em que a partir dela é possível compreender a interação entre sistema de controle, sensores e atuadores, os dados coletados e o permeâmetro. É possível, também, visualizar a malha de realimentação do sistema proposto, responsável pelo controle da temperatura.



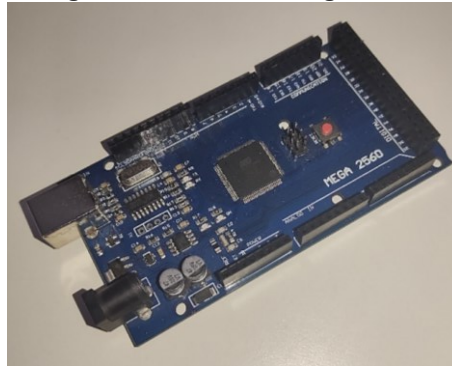
Fonte – Autoria própria (2022).

O hardware do sistema digital microcontrolado desenvolvido conta com a plataforma de prototipagem Arduino Mega 2560 Rev3, Figura 8, a qual conta com um microcontrolador da ATMEL, sendo ele um ATmega 2560 de 8 bits, com 54 pinos de entrada e saída, sendo 15 portas de saída PWM, 16 portas analógicas e, ainda, 6 portas que podem ser utilizadas no uso de interrupções externas (ARDUINO, 2022). Sua tensão de entrada, recomendada, varia entre 7 V e 12 V e a tensão de operação é de 5 V. A programação do sistema digital é em linguagem C, desenvolvida através da Arduino IDE.

Além disso, esse microcontrolador apresenta conversão A/D, a qual é utilizada na leitura das temperaturas, memória EEPROM de 4kB, sendo este o fator decisivo

para a escolha desse modelo de Arduino, e algumas limitações importantes a serem destacadas: corrente máxima de saída por porta é de 40mA e a corrente máxima de saída considerando todas as portas é de 200mA.

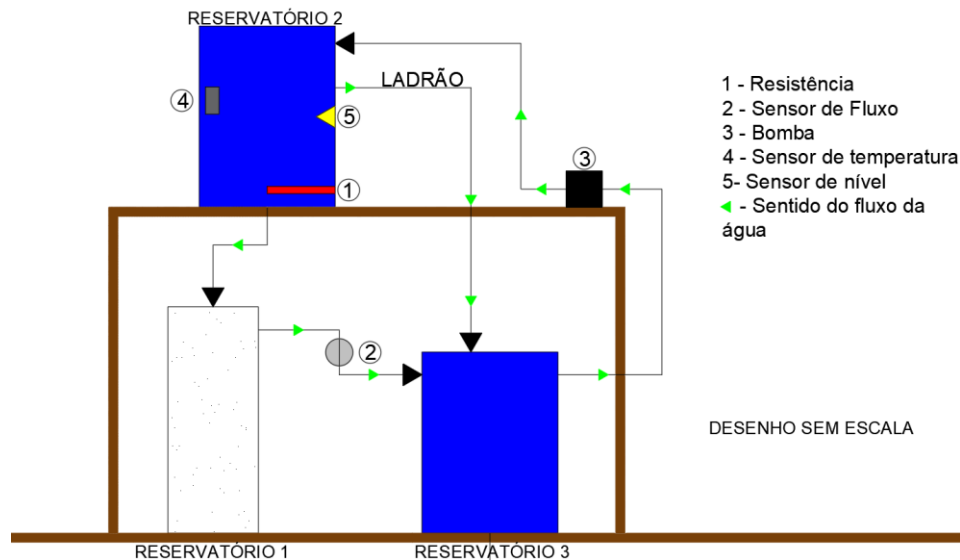
Figura 8 – Arduino Mega 2560.



Fonte – A autoria própria (2022).

O diagrama funcional da planta monitorada é ilustrado na Figura 9. Ele é composto por três reservatórios, sendo que no reservatório número 1 estão os tipos de solo que formam o filtro granular e os reservatórios 2 e 3 estão a água. Para que a água seja drenada através do reservatório 1, mantendo a carga constante, foi inserido um sistema de ladrão no reservatório 2, superior. O reservatório 3, inferior, recebe a água excedente do reservatório 2 e a água percolada através do filtro granular.

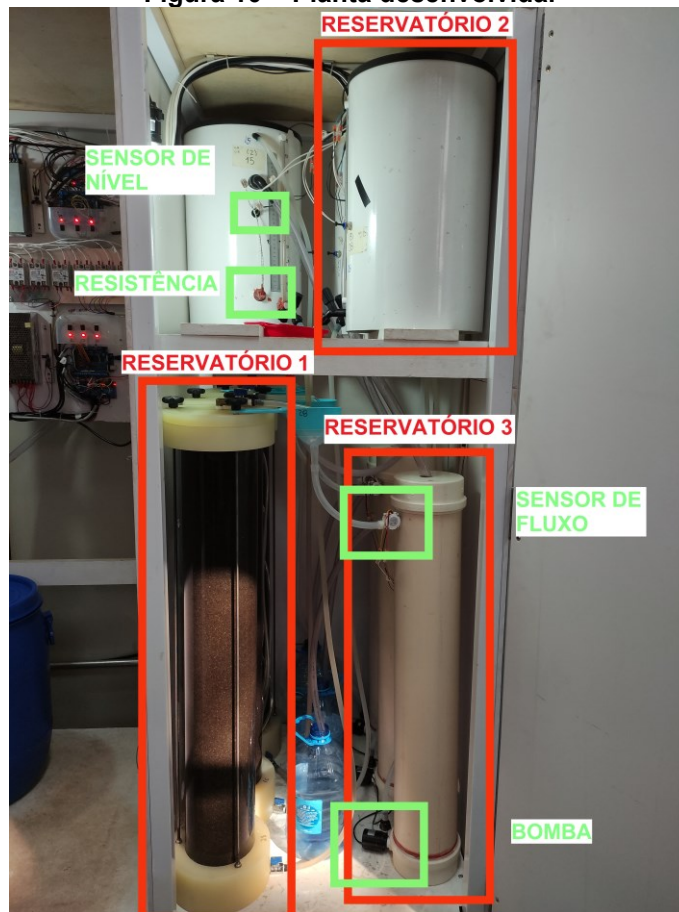
Figura 9 – Diagrama funcional da planta desenvolvida.



Fonte – A autoria própria (2022).

A planta desenvolvida, Figura 10, conta com três colunas, as quais são formadas por 3 reservatórios, conforme ilustrado no diagrama funcional da Figura 9.

Figura 10 – Planta desenvolvida.



Fonte – Autoria própria (2022).

As Figuras 9 e 10 também apresentam os sensores e atuadores que compõem o sistema digital microcontrolado. O sensor de nível é responsável por avisar o microcontrolador se há água no reservatório superior, em caso afirmativo, o microcontrolador responde permitindo o acionamento da resistência. A planta é configurada para trabalhar com uma temperatura da água igual a 40°C, e para que a temperatura se mantenha constante foi utilizado um sistema de realimentação com o uso de sensores de temperatura para a leitura e a técnica PWM para o acionamento da resistência de aquecimento. O sensor de fluxo permite a leitura da vazão em L/min.

O sistema digital proposto salva os dados coletados de hora em hora em sua memória EEPROM, esses dados são: temperatura, vazão, hora e data da leitura. Para o controle de hora e data é utilizado um módulo RTC PCF8563, observado na Figura 11, o qual utiliza comunicação I2C. O módulo é alimentado por uma bateria de 3 V, modelo CR1220.

Figura 11 – RTC PCF8563.

Fonte – A autoria própria (2022).

3.2 Sensor de nível

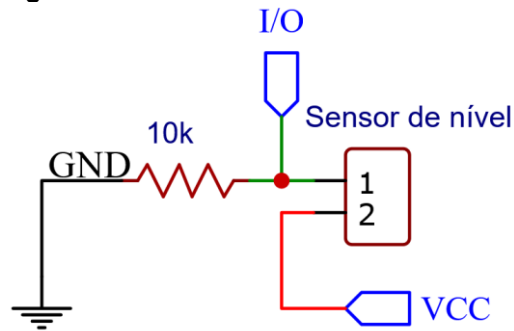
O sensor de nível utilizado possui boia horizontal, Figura 12, o qual monitora o nível de água no reservatório da coluna 2. Usualmente, esse tipo de sensor é utilizado para monitorar os níveis mínimos e máximos de um reservatório, sendo necessária a instalação de dois sensores, entretanto a planta proposta conta com um sistema de ladrão, dessa forma, a alocação do sensor no nível superior torna-se facultativa.

Figura 12 – Sensor de nível.

Fonte – A autoria própria (2022).

O sensor de nível de água com boia horizontal possui interruptor elétrico, o qual é operado por um campo magnético e apresenta contatos normalmente aberto (NA) ou normalmente fechado (NF), emitindo sinais do tipo ligado (ON) ou desligado (OFF). Para o estudo, ele será alimentado com uma tensão de 5 V associada à um resistor de pull-down, conforme Figura 13.

Figura 13 – Hardware do sensor de nível.



Fonte – A autoria própria (2022).

3.3 Acionamento da bomba

A bomba de água submersível, apresentada na Figura 14, é responsável por levar a água do reservatório inferior (Coluna 3) para o reservatório superior (Coluna 2), com tensão de alimentação de 12 V DC e potência de 19 W. Seu acionamento ocorre através de um relé mecânico. É importante destacar que, o relé só será desligado, quando houver *reset* ou quando o sistema for desligado.

Figura 14 – Bomba de água.



Fonte – A autoria própria (2022).

3.4 Sensor de temperatura

Segundo Vieira José et al. (2013), a determinação das variáveis hidráulicas do solo é um processo de difícil obtenção pelo elevado tempo na execução, portanto, com o objetivo de reduzir esse tempo e, ainda, evitar a proliferação de microrganismos, o sistema opera a uma temperatura de 40°C.

O sensor de temperatura utilizado, observado na Figura 15, apresenta as seguintes características técnicas: faixa de operação de -55°C a 125°C, com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, tensão de operação de 3 a 5 Vdc e se comunica através de um barramento de um fio, via protocolo *One-Wire*.

Figura 15 – Sensor de temperatura (DS18B20).



Fonte – Locatelli (2021).

3.5 Acionamento do aquecedor

A resistência elétrica utilizada tem a função de aquecer a água do reservatório superior (Coluna 2), sendo 220 V sua tensão de alimentação e uma potência de 600 W. Seu acionamento ocorre através de um relé de estado sólido, observado na Figura 16, chaveado por um sinal de controle PWM enviado pelo microcontrolador.

Figura 16 – Relé de estado sólido.

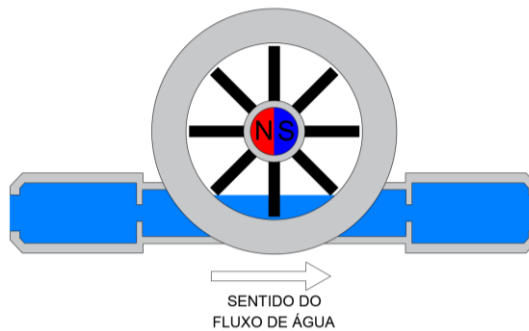


Fonte – Autoria própria (2022).

3.6 Sensor de fluxo

O sensor de fluxo é responsável por monitorar a vazão de água que flui pelo sistema. Esse sensor, cuja tensão de operação está entre 5 V e 18 V, é composto por um sensor de efeito hall, um rotor e uma estrutura plástica. Sua capacidade de medição é de 0,3 a 10 L/min. O sensor envia um pulso elétrico ao microcontrolador a cada revolução do rotor, a qual ocorre devido ao fluxo de água que flui através do sensor. A Figura 17 apresenta um desenho desse tipo de sensor.

Figura 17 – Desenho do sensor de fluxo.

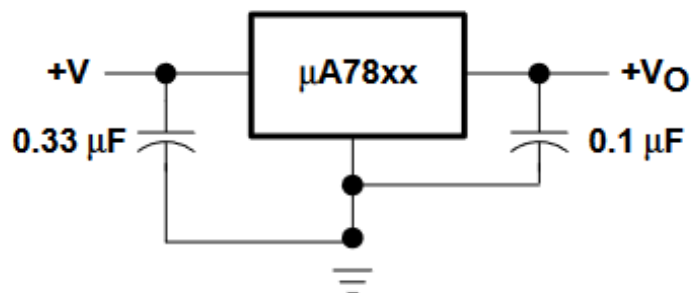


Fonte – Autoria própria (2022).

3.7 Fontes de alimentação elétrica

A alimentação do sistema é feita por uma fonte chaveada de 12 V / 20 A, a qual é responsável por alimentar as bombas de água, o circuito regulador de tensão, apresentado na Figura 18, e o Arduino. O regulador é composto por dois capacitores (0,33 μ F e 0,10 μ F) e um regulador de tensão, modelo LM7805, o qual é responsável por ajustar a tensão a um nível de 5 Vdc, tensão utilizada para a alimentação dos sensores de temperatura e, também, dos relés.

Figura 18 – Hardware do regulador de tensão.



Fonte – Folha de dados da Texas Instruments (1976).

3.8 Aquisição dos dados

O *software* desenvolvido para o sistema digital microcontrolado tem por objetivo, além do controle e automação da planta, a aquisição de dados para posterior processamento, ou seja, o cálculo do coeficiente de permeabilidade com base nos dados obtidos é realizado externo ao Arduino. Os dados obtidos através dos sensores de temperatura e de fluxo são enviados, via porta serial, e coletados via terminal para fazer as análises necessárias, juntamente com o horário e data da leitura.

É interessante destacar, apenas como informação complementar, que outro aluno envolvido no projeto desenvolveu um sistema de aquisição de dados baseado

em Python que armazena as informações em um banco de dados MySQL, sendo este o tema do Trabalho de Conclusão de Curso dele.

Além dos dados já mencionados (temperatura e vazão) outra informação importante para a determinação do coeficiente de permeabilidade à carga constante é a pressão do sistema, a qual é obtida de forma manual, sem a interferência do sistema digital proposto.

4 RESULTADOS

Serão apresentados nesse capítulo os resultados do sistema digital utilizado para determinar o coeficiente de permeabilidade. Inicialmente, será apresentado os parâmetros utilizados no controlador PID, na sequência serão apresentadas as alturas do ensaio à carga constante da Figura 2, as quais serão necessárias para o cálculo do coeficiente. Posteriormente, será apresentado o ciclo de leitura e armazenamento dos dados, as tabelas com os dados obtidos, a qualidade das leituras e, por fim, as dificuldades encontradas e sugestões.

Para a configuração mais adequada dos parâmetros do controlador PID, optou-se por utilizar o método de tentativa e erro, uma vez que o controle da temperatura não exige um nível de exatidão elevado, como resultado, chegou-se nos seguintes valores para os parâmetros do controlador PID: K_p igual a 60, T_d igual a 170 e T_i igual a 5.

Dentre os dados necessários para a obtenção do coeficiente de permeabilidade temos valores estáticos, como a altura L e a área da seção transversal (A) do filtro. A carga hidráulica h, a qual é obtida através da subtração de NA 1 por NA 2 e, ainda, valores dinâmicos, os quais serão apresentados na sequência deste capítulo. Essas alturas são fixas e foram obtidas por meio de medidas manuais. A Tabela 1 apresenta, em centímetros, as alturas e a área da secção transversal do permeâmetro de cada coluna estudada.

Tabela 1 – Alturas do ensaio à carga constante.

	Coluna 15	Coluna 16	Coluna 28
NA 1	163,2 cm	163,2 cm	163,2 cm
NA 2	113 cm	111,5 cm	111 cm
L	160 cm	160 cm	160 cm
h	50,2 cm	51,7 cm	52,2 cm
A	855,3 cm ²	855,3 cm ²	855,3 cm ²

Fonte – Autoria própria (2022).

O método de leitura utilizado não considera uma amostra grande o suficiente, dessa forma não se obtêm uma resposta representativa dos dados coletados. Esta falta de representatividade é observada ao comparamos o erro do coeficiente de permeabilidade calculado para os ensaios manuais e automáticos apresentados nas Tabelas 6 e 7 deste capítulo.

Das leituras realizadas pelo sistema, destacam-se a temperatura e a vazão, pois ambas as informações são utilizadas nos cálculos de Darcy para que o coeficiente

de permeabilidade seja determinado. A vazão é lida de segundo em segundo, entretanto seu valor é salvo apenas a cada uma hora, juntamente com a temperatura e as informações de hora e data.

Diferente da vazão, o valor da temperatura é obtido a cada ciclo do Arduino e sua informação, além de registrada na memória, é utilizada no controle da resistência de aquecimento da planta. O nível de água é apenas para controle e acionamento da bomba de água.

Os dados utilizados para a determinação do coeficiente de permeabilidade (vazão e temperatura) são armazenados na memória EEPROM do Arduino Mega, de hora em hora, formando um banco de dados, contendo a informação das leituras e, também, do horário e data das coletas. Os resultados são observados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2 – Aquisição automática (23/06/2022).

Coluna 15		Coluna 16		Coluna 28		Hora e Data	
Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Data
41	1,10	42	1,10	41	1,20	8:41	23/06
38	1,10	40	0,90	40	1,20	9:41	23/06
39	1,00	39	1,10	40	0,80	10:41	23/06

Fonte – Autoria própria (2022).

Tabela 3 – Aquisição manual (23/06/2022).

Coluna 15			Coluna 16			Coluna 28		Hora e Data	
Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Data
42	0,59	9:00	43	1,12	9:40	43	1,16	10:00	23/06
42	0,59	9:00	43	1,27	9:40	43	1,12	10:00	23/06
42,5	0,61	9:00	43	1,19	9:40	43,2	1,12	10:00	23/06

Fonte – Autoria própria (2022).

Tabela 4 – Aquisição automática (18/08/2022).

Coluna 15		Coluna 16		Coluna 28		Hora e Data	
Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Data
38	0,30	38	1,00	38	1,20	9:07	18/08
37	0,30	37	1,10	37	1,20	10:07	18/08
38	0,30	37	1,00	37	1,20	11:07	18/08

Fonte – Autoria própria (2022).

Tabela 5 – Aquisição manual (18/08/2022).

Coluna 15			Coluna 16			Coluna 28		Hora e Data	
Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Temperatura [°C]	Vazão [L/min]	Hora	Data
36,5	0,62	10:25	37,5	1,11	10:00	38	1,12	9:30	18/08
35,5	0,61	10:25	37	1,11	10:00	35,5	0,90	9:30	18/08
35,5	0,59	10:25	37	1,11	10:00	37	1,13	9:30	18/08

Fonte – Autoria própria (2022).

As Tabelas 2, 3, 4 e 5 apresentam os valores de temperatura e vazão medidos nos dias 23 de junho e 18 de agosto de 2022, representando leituras automáticas e manuais. Ao comparar os resultados é possível constatar que as leituras foram realizadas em diferentes horários e, conseqüentemente, apresentam valores de temperatura e vazão ligeiramente diferentes entre si, o que é esperado.

Assim sendo, os dados obtidos com o sistema digital microcontrolado se mostraram confiáveis quando comparados com os dados coletados manualmente. Entretanto, os dados coletados no dia 18 de agosto apresentam uma diferença nos resultados da Coluna 15, a qual não foi classificada, pois não se comprovou se essa diferença é atribuída à mau contato, calibração ou problema com o sensor, por exemplo.

Observa-se na Tabela 6 o valor do coeficiente de permeabilidade a 40°C calculado, em cm/s, com base nos dados das medições automáticas e manuais referente às coletas do dia 23 de junho. Em seguida, na Tabela 7, são apresentados os valores corrigidos do coeficiente de permeabilidade para a temperatura de 20°C. Além disso, a ordem de grandeza obtida está condizente com os solos do tipo granular, os quais apresentam uma permeabilidade mais alta (Figura 1, capítulo 2).

Tabela 6 – Coeficiente de permeabilidade a 40°C em cm/s.

Coluna 15			Coluna 16			Coluna 28		
Manual	Automático	Erro	Manual	Automático	Erro	Manual	Automático	Erro
$3,6 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-2}$	47%	$6,8 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-2}$	2%	$6,9 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-2}$	3%
$3,7 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-2}$	46%	$7,7 \times 10^{-2}$	$5,4 \times 10^{-2}$	41%	$6,7 \times 10^{-2}$	$7,2 \times 10^{-2}$	7%
$3,8 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-2}$	39%	$7,2 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-2}$	8%	$6,7 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-2}$	40%

Fonte – Autoria própria (2022).

Tabela 7 – Coeficiente de permeabilidade a 20°C em cm/s.

Coluna 15			Coluna 16			Coluna 28		
Manual	Automático	Erro	Manual	Automático	Erro	Manual	Automático	Erro
$2,4 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$	47%	$4,5 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-2}$	2%	$4,6 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$	3%
$2,4 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$	46%	$5,1 \times 10^{-2}$	$3,6 \times 10^{-2}$	41%	$4,4 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-2}$	7%
$2,5 \times 10^{-2}$	$4,1 \times 10^{-2}$	39%	$4,7 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-2}$	8%	$4,4 \times 10^{-2}$	$3,2 \times 10^{-2}$	40%

Fonte – Autoria própria (2022).

Conforme mencionado anteriormente, os dados coletados automaticamente não consideram uma amostra representativa, de modo que, ao compararmos os valores do coeficiente de permeabilidade obtidos pelos métodos manuais e automáticos, apresentam porcentagens que destoam da realidade. Como por exemplo, o erro de 41% na coluna 16, conforme apresentado nas Tabelas 6 e 7.

Como foi mencionado anteriormente, a coleta de dados estava sendo feita através da leitura do terminal de comunicação (arquivo no formato txt). Inicialmente, pensou-se na utilização de um módulo de armazenamento, modelo cartão SD Card) para salvar e coletar os dados, entretanto não houve evolução, pois ao longo do desenvolvimento do sistema digital microcontrolado outro trabalho de conclusão de curso está desenvolvendo um sistema supervisor e aquisição de dados. O trabalho que está sendo desenvolvido conta com um código escrito em linguagem Python que armazena as informações em um banco de dados MySQL.

5 CONCLUSÕES

Com a confecção e implementação do sistema digital microcontrolado proposto, os dados obtidos da vazão e da temperatura da água que percola no filtro apresentam resultados aceitáveis para a determinação da permeabilidade do solo em um ensaio com permeâmetro à carga constante, desde que um fluxo mínimo de líquido infiltrado no solo seja atendido.

As variações no coeficiente de permeabilidade dependem de alterações do solo e, conseqüentemente, do filtro, dessa forma, variações no valor do coeficiente demoram para acontecer.

Considerando que outro estudo está dedicado à construção e elaboração de um controle supervisorio, as soluções apresentadas no presente trabalho são preliminares.

Por fim, observou-se a necessidade de melhorias no sistema digital microcontrolado visando proporcionar a implementação de um sistema mais prático e confiável. Assim, como algumas propostas para trabalhos futuros, destacam-se:

- Utilização de um sensor de pressão para automatizar as leituras feitas manualmente;
- Análise do comportamento do conjunto bomba/sensores de fluxo para verificar a possibilidade de melhorar a leitura da vazão de água; e
- Melhoria na importação dos dados, assunto previsto para ser tratado por outro aluno participante do projeto.

REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **ATmega2560-Arduino Pin Mapping**. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/hacking/hardware/PinMapping2560>>. Acesso em: 13 jun. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14545**: solo - determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13292**: solo - determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v. 1
- BITTENCOURT, Douglas: **Permeabilidade e Fluxo Unidimensional em Solos**. Notas de Aula. Disponível em: http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/17430/material/GEO_II_01_Percolacao%20e%20Fluxo%201D_1-2.pdf. Acesso em: 25 de novembro de 2022.
- CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- FIALHO, A. B. **Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2006.
- GOLNARAGHI, F.; KUO, B. C. **Sistemas de Controle Automático**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- LOCATELLI, C. Como utilizar o DS18B20. **Curto Circuito**. Guarulhos, 19, fevereiro. 2021. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/blog/Categoria%20Arduino/como-utilizar-o-ds18b20>. Acesso em: 19 de novembro. 2022.
- MASSAD, F. **Mecânica dos Solos Experimental**. 1. ed. [s.l.] Oficina de Textos, 2016.
- MEINZER, O. E. The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles. **Water Supply Paper**. Washington, DC, 1923. Disponível em: <<http://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp489>>. Acesso em: 12 maio. 2022.
- NEVES, M. DAS; NOGUEIRA, J. B. **Estudo da permeabilidade do solo colapsível da região de São Carlos**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1987.
- NISE, N. S. Engenharia de Sistema de Controle. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- REINERT, D.; REICHERT, J. M. **Propriedades Físicas do Solo**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, jun. 2006.

RICE, Bob; COOPER, Doug. Design and Tuning of PID Controllers for Integrating (Non-Self Regulating) Processes. **Proc. ISA 2002 Annual Meeting**, v. 424, n. 057, [s.n.]. 2002.

SILVA, C. A. DA. **Ensaio de transmissibilidade em geocompostos para drenagem**. Dissertação—Brasília: Universidade de Brasília, 13 jan. 2010.

TEXAS INSTRUMENTS. Datasheet: μ A7800 Series Positive-Voltage Regulators. Publicação Eletrônica, 1976. Revisado, 2003.

VARGAS, R. M. DE A. **Permeabilidade do solo**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/rosane/mecsolo.htm>>. Acesso em: 14 maio. 2022

VIEIRA JOSÉ, J. et al. **Determinação da velocidade de infiltração básica de água em dois solos do noroeste do estado do Paraná**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, p. 155–170, 2013.

WANG, L.; BARNES, T. J. D.; CLUETT, W. R. New frequency-domain design method for PID controllers. **IEE proceedings-control theory and applications**, v. 142, n. 4, p. 265–271, 1995.