



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



**RAPHAEL HENRIQUE**

**AMPLIFICADOR DE TENSÃO E INSTRUMENTAÇÃO PARA  
UMA CÉLULA ELETROQUÍMICA DE DESAGUAMENTO  
DE REJEITO**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2021**

**RAPHAEL HENRIQUE**

**SISTEMA AMPLIFICADOR DE TENSÃO E  
INSTRUMENTAÇÃO PARA UMA CÉLULA  
ELETROQUÍMICA DE DESAGUAMENTO DE REJEITO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Alan Kardek Rêgo Segundo

Coorientador: Paulo Marcos Barros Monteiro

Ouro Preto  
Escola de Minas – UFOP  
Novembro/2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

H519a Henrique, Raphael.

Amplificador de tensão e instrumentação para uma célula eletrocinética de desaguamento de rejeito. [manuscrito] / Raphael Henrique. Raphael Henrique. - 2021.  
66 f.

Orientador: Prof. Dr. Alan Kardec Rego Segundo.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Marcos Barros Monteiro.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Desaguamento eletrocinético. 2. Rejeitos (Metalurgia) - Minério de Ferro. 3. Equipamentos de laboratórios. 4. Pulse Width Modulation (PWM). I. Henrique, Raphael. II. Monteiro, Paulo Marcos Barros. III. Rego Segundo, Alan Kardec. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E AUTOMACAO



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Raphael Henrique**

**Amplificador de Tensão e Instrumentação para uma Célula Eletrocinética de Desaguamento de Rejeito**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 10 de novembro de 2021

Membros da banca

D.Sc. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
D.Sc. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)  
D.Sc. Lucas Deleon Ferreira (Universidade Federal de Ouro Preto)  
D.Sc. Adrielle de Carvalho Santana (Universidade Federal de Ouro Preto)

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/11/2021



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/11/2021, às 10:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0249488** e o código CRC **ACA424B4**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.012316/2021-74

SEI nº 0249488

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

## **AGRADECIMENTOS**

DEUS, por tudo.

Aos meus pais por serem exemplos de vida.

Ao professor Lucas Deleon Ferreira e meus colegas de laboratório, principalmente a Ana Carolina Ferreira pelas horas dedicadas aos ensaios.

A meu orientador Alan Kardek Rêgo Segundo e o coorientador Paulo Marcos de Barros Monteiro pelo incentivo, apoio e ensinamentos.

A empresa VALE S.A. pelo financiamento e fornecimento de material para ensaios no laboratório.

## RESUMO

Acidentes com estruturas de barragens de mineração impulsionaram investigações de novos métodos para dissociar água de rejeito. Este trabalho está relacionado à melhoria de equipamentos de laboratório não convencionais que são utilizados em experimentos envolvendo a aplicação de processos eletrocinéticos em estudos de desaguamento de rejeitos de mineração, adensamento e descontaminação de solos. Nesse contexto, foi desenvolvido um sistema de instrumentação e acionamento automático via PWM, para um equipamento de laboratório denominado “Célula eletrocinética”. Neste equipamento foram realizados ensaios de desaguamento eletrocinético de rejeitos, com a finalidade de potencializar o processo de filtração deste resíduo. Foram realizadas duas etapas principais para a geração de resultados: (i) realização de ensaios com aplicação de gradientes de tensão de 75 V/m, 100 V/m e 150 V/m e com corrente elétrica intermitente, ambos realizados com rejeito de minério de ferro da Mina do Pico da empresa VALE e (ii) realização de testes do circuito amplificador de tensão simulando sua aplicação na célula eletrocinética. Na primeira etapa foram obtidos resultados de drenagem de água, decaimento da corrente e aumento da resistência do rejeito no decorrer dos ensaios. Na segunda etapa foram obtidos valores de tensão, corrente elétrica e temperatura ao longo do tempo, de acordo com as variações do ciclo de trabalho do PWM. Por fim, são apresentadas as perspectivas de trabalhos futuros para se realizar o controle de tensão e corrente aplicada à célula em malha fechada.

Palavras-chave: Desaguamento eletrocinético de rejeitos; Rejeito de minério de ferro; Equipamentos de laboratórios; Instrumentação; PWM; Amplificador de tensão.

## ABSTRACT

Accidents with mining dam structures have prompted investigations into new methods to decouple tailings water. This work is related to the improvement of unconventional laboratory equipment that is used in experiments involving the application of electrokinetic processes in mining tailings dewatering, compaction, and soil decontamination studies. In this context, an instrumentation system and automatic activation via PWM were developed for laboratory equipment called “Electrokinetic cell”. In this equipment, electrokinetic tailings dewatering tests were carried out, in order to enhance the filtration process of this waste. Two main steps were taken to generate results: (i) testing with the application of voltage gradients of 75 V/m, 100 V/m, and 150 V/m with intermittent electrical current, both performed with iron ore tailings the Pico mine of the company VALE and (ii) carrying out tests of the voltage amplifier circuit, simulating its application in the electrokinetic cell. In the first stage, results of water drainage, current decay, and increased tailings resistance were obtained during the tests. In the second stage, voltage, electrical current, and temperature values were obtained over time, according to the variations in the PWM work cycle. Finally, perspectives for future work to control the voltage and current applied to the closed-loop cell are presented.

**Keywords:** Electrokinetic tailings dewatering; Iron ore tailings; laboratory equipment; Instrumentation; PWM; Voltage amplifier.



## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Efeitos de fluxo do fenômeno eletrocinético .....	14
Figura 2: Diagrama esquemático da estrutura da célula eletrocinético .....	15
Figura 3: Esquema de um sistema embarcado.....	15
Figura 4: Microcontrolador ATMEGA2560 .....	16
Figura 5: Esquema amplificador de tensão.....	17
Figura 6: Componente LM324 .....	18
Figura 7: Esquema interno LM324.....	18
Figura 8: Esquema amplificadores operacionais .....	18
Figura 9: Diagrama esquemático do LM324 na configuração não inversor .....	19
Figura 10: LM324 na configuração inversor.....	19
Figura 11: Transistor na configuração base comum.....	20
Figura 12: Transistor na configuração emissor comum .....	20
Figura 13: Transistor na configuração coletor comum.....	20
Figura 14: Etapa configuração Darlington .....	21
Figura 15: Transistor TIP31C.....	21
Figura 16: Transistor 2N3055 .....	22
Figura 17: Sensor LM35.....	22
Figura 18: Sensor de Corrente INA219 .....	23
Figura 19: Filtro passa-baixa .....	24
Figura 20: Filtro passa-alta .....	24
Figura 21: Esquemático sistema de controle .....	25
Figura 22: Sinal digital e sinal analógico .....	25
Figura 23: Ciclo de trabalho do PWM .....	26
Figura 24: Célula eletrocinética.....	28
Figura 25: Esquemático da Célula Eletrocinética.....	28
Figura 26: Esquemático do interior da célula eletrocinética .....	29
Figura 27: Eletrodo perfurado de aço inox .....	29
Figura 28: Suporte do eletrodo, com a válvula de vazão.....	30
Figura 29: Equipamento de aquisição de dados .....	31
Figura 30: Tela do supervisor <i>software</i> Célula Eletrocinética .....	31
Figura 31: Elementos filtrantes e eletrodo.....	32
Figura 32: Fixador vertical das placas .....	32
Figura 33: Procedimento pós vedação.....	33
Figura 34: Célula com rejeito homogeneizado.....	33
Figura 35: Célula com rejeito e as sondas .....	34
Figura 36: Início ensaio célula eletrocinética .....	34
Figura 37: Circuito regulador amplificador de tensão no <i>software</i> Proteus .....	36
Figura 38: Sensor de temperatura LM35 no <i>software</i> Proteus .....	37
Figura 39: Circuito sensor INA219 no <i>software</i> Proteus .....	38
Figura 40: Circuito PCB da placa no Proteus.....	39
Figura 41: Placa na visualização 3D do Proteus.....	40
Figura 42: Placa circuito impresso gerada pela CNC da Universidade Federal de Ouro Preto.....	41
Figura 43: Placa circuito impresso com os componentes integrados .....	41
Figura 44: Circuito completo para testes .....	42
Figura 45: Variáveis monitoradas em tempo real no serial monitor da IDE do Arduino.....	43
Figura 46: Volume de água drenado ao longo do tempo.....	46
Figura 47: Gráfico das curvas da corrente elétrica ao longo do tempo .....	47

Figura 48: Gráfico da curva da resistência elétrica do rejeito ao longo do tempo .....	47
Figura 49: Gráfico de drenagem de água no catodo e no anodo .....	48
Figura 50: Gráfico do volume drenado com corrente elétrica intermitente .....	48
Figura 51: Ondas resultantes de 20% do PWM.....	50
Figura 52: Ondas resultantes de 40% do PWM.....	50
Figura 53: Ondas resultantes de 60% do PWM.....	50
Figura 54: Ondas resultantes de 80% do PWM.....	51
Figura 55: Ondas resultantes de 100% do PWM.....	51
Figura 56: Gráfico de área entre tensão e o PWM .....	51
Figura 57: Gráfico de tensão ao longo do tempo.....	52
Figura 58: Gráfico de corrente ao longo do tempo.....	52
Figura 59: Gráfico de temperatura ao longo do tempo.....	53
Figura 60: Gráfico de 20% PWM de tensão <i>versus</i> resistência.....	54
Figura 61: Gráfico de 20% PWM de corrente <i>versus</i> resistência.....	54
Figura 62: Gráfico de 40% PWM de tensão <i>versus</i> resistência.....	54
Figura 63: Gráfico de 40% PWM de corrente <i>versus</i> resistência.....	55
Figura 64: Gráfico de 60% PWM de tensão <i>versus</i> resistência.....	55
Figura 65: Gráfico de 60% PWM de corrente <i>versus</i> resistência.....	55
Figura 66: Gráfico de 80% PWM de tensão <i>versus</i> resistência.....	56
Figura 67: Gráfico de 80% PWM de corrente <i>versus</i> resistência.....	56
Figura 68: Gráfico de 100% PWM de tensão <i>versus</i> resistência.....	56
Figura 69: Gráfico de 100% PWM de corrente <i>versus</i> resistência.....	57

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1	Organização do trabalho .....	11
1.2	Objetivos.....	11
1.2.1	Objetivo geral .....	11
1.2.2	Objetivos específicos .....	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
2.1	Fenômeno Eletrocinético .....	13
2.2	Célula Eletrocinética.....	14
2.3	Sistemas Embarcados .....	15
2.3.1	Microcontroladores.....	16
2.3.2	Amplificador de tensão .....	16
2.3.3	Sensores .....	22
2.3.4	Filtros de sinal .....	23
2.3	Sistemas de controle .....	24
2.4.1	PWM.....	25
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>27</b>
4.1	Procedimento Manual .....	27
3.1.1	Caracterização do rejeito de minério de ferro .....	27
3.1.2	Caracterização da célula eletrocinética.....	28
3.1.3	Procedimentos de montagem da célula.....	32
3.2	Proposta de uso do PWM .....	34
3.2.1	Circuito PWM .....	35
3.2.2	Circuito de temperatura.....	36
3.2.3	Circuito de tensão e corrente .....	37
3.2.4	Circuito completo.....	38
3.2.5	Testes de simulação célula eletrocinética .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>45</b>
5.1	Testes Manuais .....	45
4.2	Testes amplificador de tensão via PWM .....	49
4.2.1	Teste de bancada .....	49
4.2.2	Variando o PWM no tempo.....	51
4.2.3	PWM como entrada do sistema.....	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>
5.1	Trabalhos futuros.....	59
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos processos da mineração brasileira, o produto obtido nas minas é transcrito em grande parte por etapas úmidas, para seu melhor beneficiamento, gerando rejeitos compostos de rocha, água e substâncias químicas envolvidas no próprio processo. O local de disposição desses rejeitos é definido principalmente pelas características físicas e tecnologias disponíveis pela empresa mineradora, mas atualmente são contidos em grandes estruturas de contenção como barragens (PORTES, 2013).

As barragens estão cada vez mais complexas em relação a monitoramento (FERREIRA, 2016), tecnologia e a licenciamento, devido a problemas ambientais ocorridos no Brasil relacionados a disposição de rejeito de mineração em barragens (PORTES, 2013).

Em 2017, a Agência Nacional de Mineração estabeleceu a lei 13.575, que determina medidas regulatórias para as estruturas das barragens. Desse modo, com a intuito de descomissioná-las, grandes mineradoras em conjunto com universidades, investigam novas técnicas de adensamento e desaguamento do rejeito.

No processo de adensamento, decorrem etapas de separações sólido-líquido, como os processos de espessamento e filtração, visando reduzir a umidade do rejeito, para uma posterior operação. A filtração é uma técnica de passagem de uma polpa através de um meio filtrante que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O espessamento é um processo de sedimentação de sólidos, resultando em uma divisão água e resíduo decorrente da gravidade, formando a polpa de partículas no fundo do local (GUIMARÃES, 2011). Todavia, essas operações são pouco eficazes, pois esta ainda gera uma polpa muito aquosa para a alocação do rejeito, e aquela compreende um ciclo mais complexo, pois, para não afetar a eficiência do filtro, é indispensável etapas de ciclonagem ou de próprio espessamento para assegurar um teor mínimo de sólidos.

Com o propósito de fomentar a pesquisa de novos métodos de separação sólido-líquido, além de expandir o conhecimento na área da geotécnica, Ferreira (2016) desenvolveu um protótipo denominado célula eletrocinética, que permitiu investigar, por meio de ensaios manuais de laboratório, os processos de eletrodesaguamento de rejeitos, em consequência do fenômeno da eletrodrenagem (BRANCO e SABOIA, 1978). Posteriormente, Ronzani (2018) propôs desenvolver um sistema de controle para célula eletrocinética, que otimizasse o desaguamento de polpa de lama de minério de ferro. O algoritmo de controle proposto era capaz de alterar o gradiente elétrico aplicado no

resíduo, de acordo com dados de volume de água, coletados por um sistema de instrumentação, analisando também a tensão mínima e máxima aplicado a polpa e o gasto energético utilizado no ensaio.

Sendo assim, o presente trabalho visa aperfeiçoar o circuito apresentado por Ronzani (2018), adicionando um sistema de instrumentação para aquisição de dados em ensaios de laboratório, fomentando material de pesquisa para o projeto principal da célula eletrocinética de Ferreira (2016). Por fim, pretende-se apresentar uma base para possíveis projetos futuros relacionados a variáveis que são relevantes para o controle e a instrumentação da célula.

## **1.1 Organização do trabalho**

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta uma abordagem introdutória ao tema, buscando contextualizar o problema e justificar o projeto. O Capítulo 2 contém o objetivo geral e os objetivos específicos. No Capítulo 3 salienta-se o referencial teórico consultado para o desenvolvimento do projeto, de maneira a apresentar todos os componentes com suas características e seus conceitos. No Capítulo 4 apresenta-se o desenvolvimento do trabalho manual e do sistema de instrumentação, descrevendo o funcionamento e os ensaios elaborados do sistema por completo. O Capítulo 5 dispõe dos resultados obtidos com a implementação e ensaios no sistema. No Capítulo 6 são apresentados os comentários e as conclusões finais. Enfim, no Capítulo 7 são apresentadas sugestões de possíveis trabalhos posteriores.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de laboratório com instrumentos de medição e acionamento automático para uma célula eletrocinética, visando otimizar a drenagem de água do rejeito de minério.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Gerar resultados que acrescentem a pesquisa de Ferreira (2016), fomentando mais material que comprove o fenômeno da eletrocinese.
- Aprimorar o sistema regulador de tensão proposto por Ronzani (2018).
- Desenvolver um circuito de medição de corrente, tensão e temperatura para uma célula eletrocinética.
- Projetar um sistema para controle do gradiente de tensão aplicado à célula eletrocinética a partir do ciclo de trabalho de um sinal de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM).

## **2 REVISÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão abordados os conceitos fundamentais para a compreensão do desenvolvimento do trabalho, como fenômeno eletrocinético, equipamento eletrocinético, microcontrolador, sensores, sistema amplificador de tensão, filtro de sinal e sistema de controle.

### **2.1 Fenômeno Eletrocinético**

O fenômeno eletrocinético consiste na movimentação de um resíduo composto por líquido e partículas, como ocorre em uma quantidade de rejeito da mineração, devido a aplicação de um campo elétrico. O fenômeno engloba alguns tipos de efeitos de fluxo hidráulico e elétrico como a eletroforese, eletromose e eletromigração, ilustrados na Figura 1.

A eletroforese consiste na movimentação das partículas de solo que apresentam cargas eletrostáticas no interior de um meio fluido, ao aplicar uma diferença de potencial elétrico (FERREIRA, 2016).

O fluxo de eletromose é um fenômeno de movimentação líquida de um resíduo aquoso com partículas, devido a aplicação de um campo elétrico em seu interior.

Ao aplicar um campo elétrico em um sistema constituído por partículas sólidas e líquido (FERREIRA, 2016).

Um dos principais é a migração de íons ou também eletromigração, que ao ser estabelecido uma diferença de potencial entre duas extremidades gera um fluxo que se dá pela presença de íons na parte líquida e da parte sólida, repelidos pelo eletrodo de mesmo sinal de carga eletrostática e atraídos pelo sinal contrário, projetando uma força de arraste em todo rejeito.

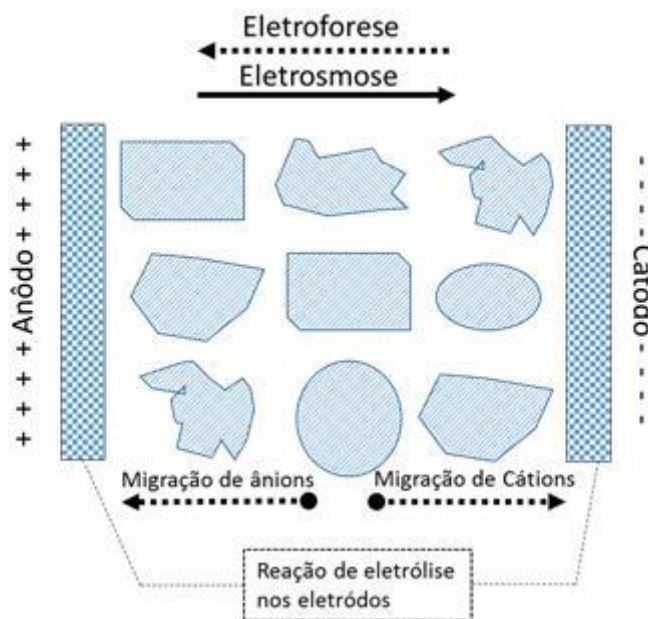


Figura 1: Efeitos de fluxo do fenômeno eletrocinético  
 Fonte: (RONZANI, 2018)

De acordo com Ferreira (2018), a pesquisa desses fenômenos e métodos tem gerado grandes interesses em diversas áreas. Pode-se destacar a aplicação para as empresas mineradoras, petrolíferas e ambientais em processos de adensamento de solos com baixa permeabilidade, na correção de solos contaminados, no desaguamento de resíduos e até mesmo derramamentos de petróleo.

## 2.2 Célula Eletrocinética

A célula eletrocinética é um equipamento de laboratório desenvolvido primeiramente por Ferreira (2016) e engrandecido em questões estruturais e teóricas em trabalhos futuros por Ronzani (2018) e Ferreira (2018), com o objetivo de demonstrar o efeito de eletrocinese, podendo ser utilizado para desaguamento de rejeitos (como os apresentados por Fourie, 2006; Fourie et al., 2007a, 2007b; Fourie e Jones 2009; Hall et al., 2008; MOHAMEDHASSAN, E., SHANG, J. Q., 2001; Ferreira, 2011; Ferreira 2016; Ferreira 2018); adensamento de solos moles (como CASAGRANDE, 1983; SHANG e DUPLANT, 1966; BERGADO et al, 2000; FEITOZA, 2007; NASCIMENTO, 2005 e 2009); descontaminação de solos (Velten, 2008; Silveira, 2009; Souza, 2002); entre outras aplicações.



Sua estrutura é retangular, organizada basicamente por eletrodos, suportes e válvulas em suas extremidades, e sensores de tensão no centro, como representados na Figura 2.

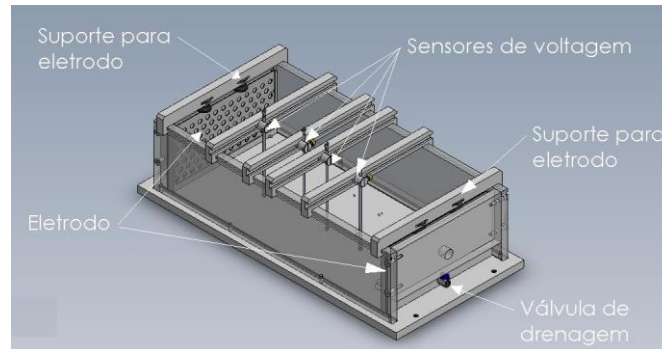


Figura 2: Diagrama esquemático da estrutura da célula eletrocinética  
Fonte: (FERREIRA, 2016)

### 2.3 Sistemas Embarcados

De acordo com Teixeira e Campos (2019), atualmente há uma crescente utilização de sistemas embarcados em grande parte dos equipamentos eletrônicos disponibilizados no mercado. Um sistema embarcado é um equipamento, ou até mesmo um circuito integrado, como ilustrado no esquema da Figura 3, que possui capacidade computacional e que realiza qualquer função específica (CUNHA, 2007).

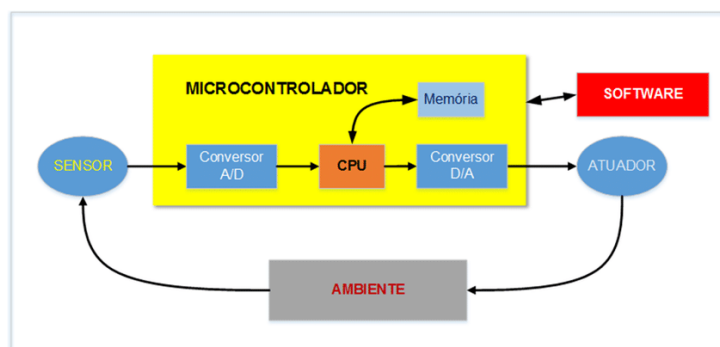


Figura 3: Esquema de um sistema embarcado  
Fonte: (TEIXEIRA e CAMPOS, 2019).

### 2.3.1 Microcontroladores

Os microcontroladores surgiram a princípio na década de 80, com uma evolução dos circuitos digitais, que começaram a ser substituídos por unidades de processamento encapsuladas em um único chip, agrupado com a memória, clock e periféricos (PENIDO e TRINDADE, 2013).

De acordo com Teixeira e Campos (2019), os microcontroladores podem ser associados a plataformas de prototipagem, formando um sistema de *hardware e software*, como é o caso do Arduino.

Arduino é uma plataforma com código aberto para o público, baseados em *hardware e softwares* flexíveis e de fácil implementação. Pode ser aplicado junto com sensores, atuadores, motores, luzes entre outros (PEIXOTO ET AL., 2012). Há uma série de versões de placa Arduino, geralmente com microcontroladores de 8 bits da família ATmel AVR, programável usando linguagem padrão do Arduino, semelhantes às linguagens C e C++.

O microcontrolador utilizado nesta pesquisa é o ATMEGA2560, com alimentação de 7 V a 12 V, 54 pinos de entradas e saídas digitais, dos quais 15 são saídas PWM. Possui também 16 entradas analógicas e 4 portas serial, como ilustrado na Figura 4.

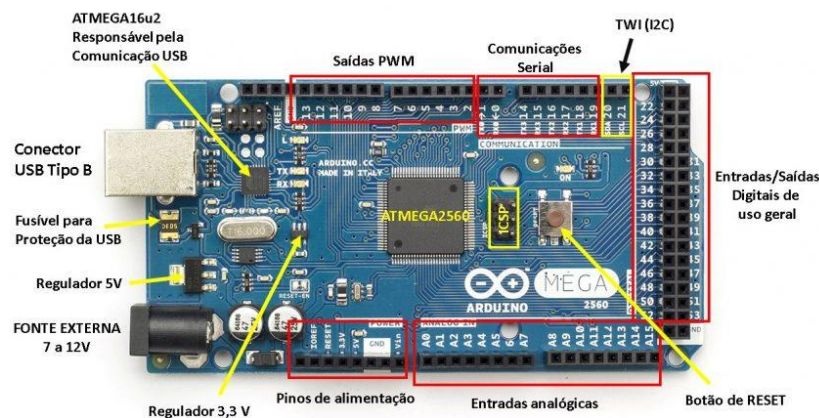


Figura 4: Microcontrolador ATMEGA2560  
Fonte: (SOUZA, 2014)

### 2.3.2 Amplificador de tensão

Circuitos amplificadores de tensão, como ilustrado na Figura 5, são sistemas elétricos que amplificam o sinal da tensão de entrada, para um valor de tensão de saída predeterminado, de acordo com a relação entre alguns componentes, como resistências, ou transistores. Largamente utilizado em sistemas que se deseja ter uma tensão elevada da tensão da fonte, como sistemas de controle industrial, equipamentos de telecomunicações, instrumentação nuclear, instrumentação médica, entre outros (JÚNIOR, 2015).

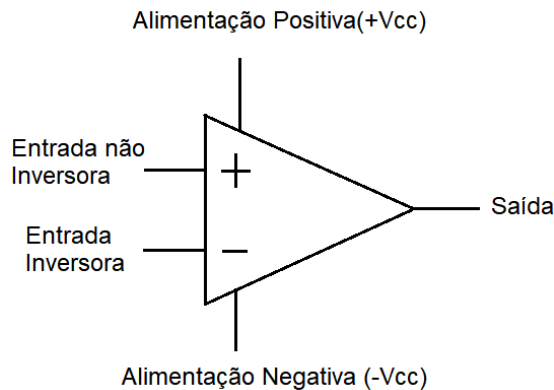


Figura 5: Esquema amplificador de tensão  
Fonte: Elaborada pelo autor

Neste trabalho, foram manipulados três componentes principais para o desenvolvimento do sistema amplificador de tensão: o amplificador operacional LM324, e os transistores TIP31C e 2N3055.

#### 2.3.2.1 Amplificador operacional LM324

O amplificador operacional LM324, representado na Figura 6, é um circuito compacto e integrado, de baixo custo e utilizado para mais de diversas finalidades, devido as várias possibilidades de modificar a tensão de entrada como inversão, elevação e decréscimo. Dentro deste componente existe quatro amplificadores operacionais independentes entre si, apenas compartilhando o mesma GND e a mesma tensão de alimentação de no máximo 32 V na sua estrutura, como ilustrado no esquema da Figura 7.

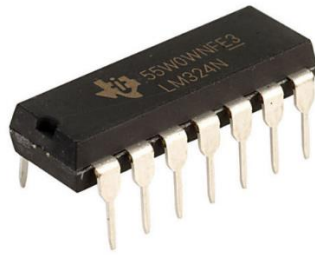


Figura 6: Componente LM324

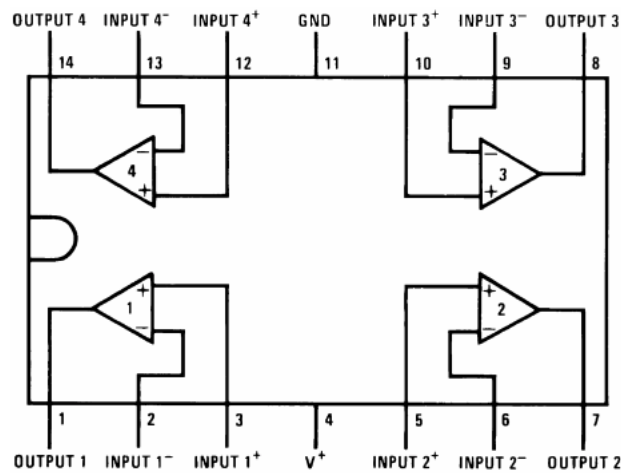


Figura 7: Esquema interno LM324

Basicamente todos os amplificadores operacionais são da forma representados na Figura 8. O LM324 é possível configurar principalmente dois tipos – amplificador não inversor e amplificador inversor.

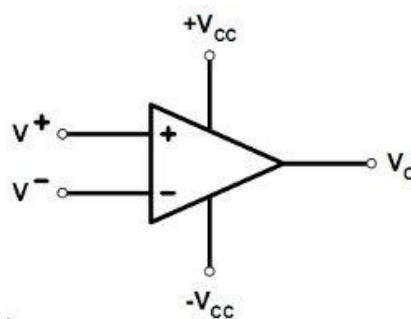


Figura 8: Esquema amplificadores operacionais  
Fonte: Elaborada pelo autor

Na configuração não inversora representado na Figura 9, a tensão  $V_I$  de entrada é aplicada na entrada positivo, enquanto  $R_F$  e  $R_1$  são realimentados na entrada negativa no amplificador, resultando em uma tensão de saída  $V_O$  amplificada em relação a tensão de entrada. O ganho do amplificador é dado da seguinte fórmula:

$$V_O = V_I \times \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)$$

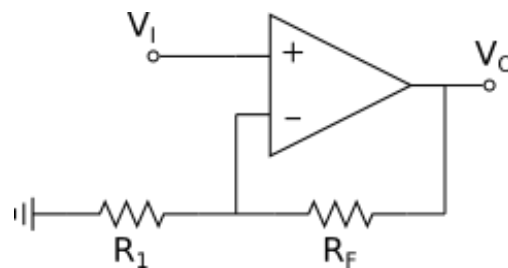


Figura 9: Diagrama esquemático do LM324 na configuração não inversor

Na configuração inversora, ilustrado na Figura 10, o GND está conectado ao positivo e  $R_1$  e  $R_F$  são realimentados no negativo do amplificador, fazendo com que a tensão  $V_O$  seja inversa a tensão de entrada  $V_I$ .

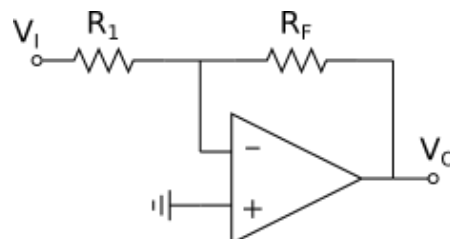


Figura 10: LM324 na configuração inversor

### 2.3.2.2 Transistores bipolares de junção (TBJ)

Transistores são componentes semicondutores usados para amplificar ou atenuar a intensidade da corrente elétrica em circuitos eletrônicos. Existem basicamente três configurações para polarizações de transistores TBJ – base comum, emissor comum e coletor comum. A configuração base comum, representado no esquema da Figura 11, possui ganho de corrente aproximadamente igual a 1, ganho de tensão alto e ganho médio de potência.

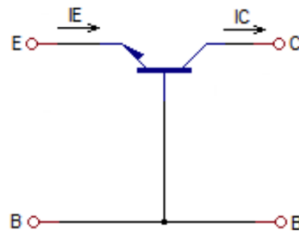


Figura 11: Transistor na configuração base comum  
 Fonte: (TEIXEIRA, 2019)

A configuração emissor comum, representado no esquema da Figura 12, possui ganho de corrente de 10 a 500 vezes, ganho de tensão médio e ganho alto de potência.

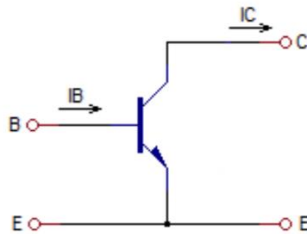


Figura 12: Transistor na configuração emissor comum  
 Fonte: (TEIXEIRA, 2019)

Já na configuração coletor comum representado na Figura 13, possui ganho de corrente também de 10 a 500 vezes, ganho de tensão aproximadamente igual a 1 e baixo ganho de potência.

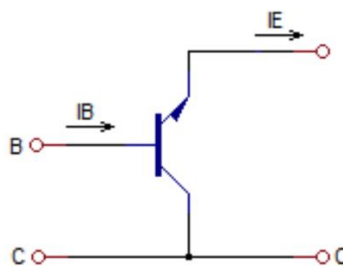


Figura 13: Transistor na configuração coletor comum  
 Fonte: (TEIXEIRA, 2019)

Para essa configuração tem a possibilidade de se acoplar dois ou mais transistores de modo a ampliar os ganhos de corrente, como ilustrado no esquema da Figura 14. Esse modo é denominado etapa Darlington de amplificação.

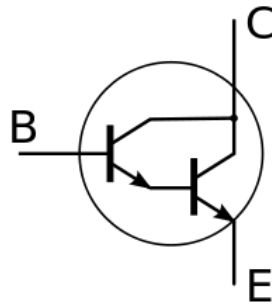


Figura 14: Etapa configuração Darlington  
Fonte: (BRAGA, 2009)

Os transistores em pesquisa é o transistor TIP31C, ilustrado na Figura 15, da série TIP31 com tensão máxima entre o coletor e emissor de 100 V, corrente máxima no coletor de 3 A, tensão máxima entre base e emissor é de 5 V, dissipação máxima de 40 W e principalmente a faixa de ganho (hFE) de 10 a 50 vezes. Muito utilizado em amplificadores, controle de motor de passo, motores comuns e fontes de alimentação.

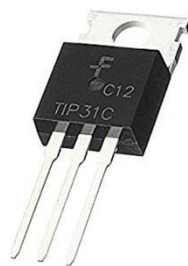


Figura 15: Transistor TIP31C

Por último o transistor 2N3055, representado na Figura 16, um transistor NPN, robusto, com tensão do coletor para base de até 100 V, coletor para emissor de até 70 V e emissor para base de até 7 V, capaz de dissipar potências de até 115 W e correntes do coletor de até 15 A, muito utilizado em fontes de alimentação, amplificadores e controles de potência. Para sua estrutura é indicado acoplagem em um dissipador de calor, devido a passagem de correntes altas.



Figura 16: Transistor 2N3055

### 2.3.3 Sensores

Sensores podem ser otimizados, quando usados com microcontroladores, já que estes podem capturar, organizar e manipular os dados obtidos. Neste trabalho foram utilizados o sensor LM35 e o sensor INA219.

#### 2.3.3.1 LM35

O componente LM35 (apresentado na Figura 17), é um sensor responsável por medir a temperatura em um ambiente. Apresenta saída de tensão linear relativa à temperatura em que ela se encontra no momento. Sua medição de temperatura está dentro da faixa de  $-5^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ , com incerteza de  $0,25^{\circ}\text{C}$  a  $0,75^{\circ}\text{C}$  e sensibilidade de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ . O LM35 possui baixo custo e fácil integração a um microcontrolador, além também de ser calibrado por fábrica, o que facilita sua implementação, por não necessitar de nenhum circuito em conjunto.

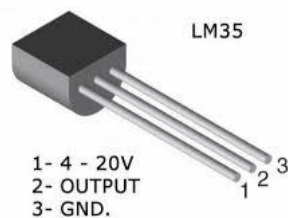


Figura 17: Sensor LM35



### 2.3.3.2 INA219

O segundo sensor que atua na medição da tensão e corrente elétrica é o INA219, apresentado na Figura 18. Ele é composto de 6 pinos em sequência – Vcc, GND, SCL, SDA, V+ e V-; e 2 pinos também de V+ e V-, que são conectados em série com a carga.

O sensor pode realizar medições de 0 a 26V e correntes de até 3,2A ou -3,2A, com resolução de 0,8mA utilizando internamente um conversor analógico digital.

Sua alimentação é de 3 a 5,5V, suportando corrente máxima de até 3,2A e -3,2A e até 128 medições contínuas para maior precisão na leitura. Possui um módulo de comunicação I2C e fácil integração com microcontroladores.

A comunicação I2C, via SDA (Serial Data) e SCL (Serial Clock) do sensor favorece o sincronismo de dados entre sensor e microcontrolador, além também da confiabilidade do sistema.

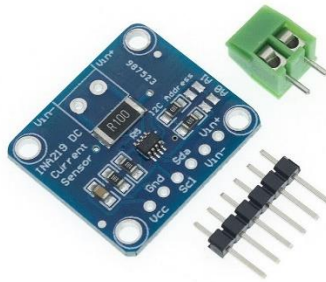


Figura 18: Sensor de Corrente INA219

### 2.3.4 Filtros de sinal

Muitas vezes a tensão de saída de amplificadores, reguladores de tensão, fontes de tensão externa, sensores, ou até mesmo microcontroladores apresentam valores ruidosos, ou seja, não constantes. Para solucionar esse problema circuitos de filtro podem ser implementados permitindo que sinais com frequência dentro de um limite passem, enquanto os sinais fora do limite sejam atenuados.

Filtros podem se dividir basicamente em dois tipos principais, filtros passa-baixa, ilustrado no circuito da Figura 19, que possibilitam a passagem de frequências abaixo da sua frequência de corte; os filtros passa-alta, representado no circuito da Figura 20, que permitem a passagem dos sinais acima da frequência de corte.

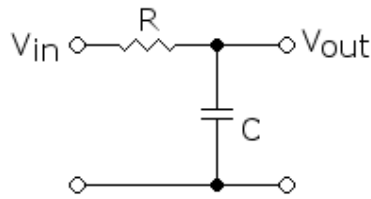


Figura 19: Filtro passa-baixa

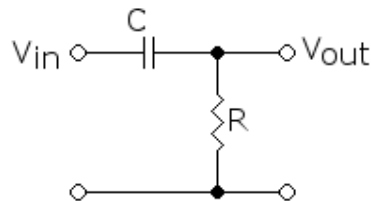


Figura 20: Filtro passa-alta

Os filtros também podem ser separados por passivo, nos casos dos exemplos da Figura 19 e Figura 20, quando são compostos de capacitores, resistores ou indutores, e ativos quando possuem amplificadores para apartação de sinal (SANTOS, 2011).

### 2.3 Sistemas de controle

De acordo com Campos e Teixeira (2010), o controle de um processo se refere a sistemas que têm por objetivo manter as variáveis de uma etapa do processo entre seus limites operacionais, esses sistemas utilizando intervenção humana, ou serem automatizados.

O controle dessas etapas é cada vez mais utilizado e aprimorada ao longo dos anos na tecnologia. Em processos industriais os ganhos obtidos devido a controles eficazes são nas áreas de rentabilidade, produção, qualidade, velocidade e segurança (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010).

Um sistema de controle é uma interconecção de componentes formando uma configuração de outros sistemas que produzirá uma resposta desejada do sistema. A modelagem é definida por um conjunto de finitas de equações matemáticas que representa todo o conjunto do sistema, dessa forma, um sistema pode possuir vários modelos matemáticos (OGATA, 2011).

Sistemas de controle podem ser organizações que recebem distúrbios externos ou variações nos seus parâmetros denominados sistemas em malha aberta, ou organizações que tem seu próprio funcionamento, sem ações externas, chamados sistemas em malha fechado (OGATA, 2011).

Na Figura 21 representa-se um esquemático em blocos de um sistema de controle, com seus devidos elementos, em que  $C(s)$  é o sinal de entrada,  $K(s)$  é um controlador,  $G(s)$  é um modelo denominado planta do sistema, obtido previamente antes de montar o modelo,  $H(s)$  é a realimentação do sistema e, por fim,  $R(s)$  o sinal de saída do modelo.

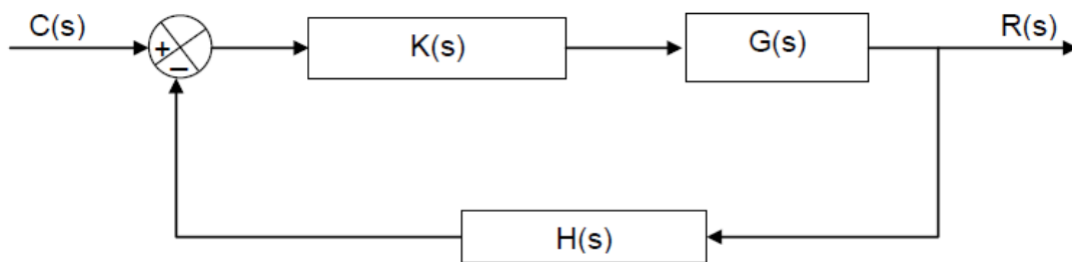


Figura 21: Esquemático sistema de controle

#### 2.4.1 PWM

Na eletrônica, o controle das funções de um circuito, geralmente ocorrem devido a manipulação dos sinais analógicos e digitais. De acordo com Silveira (2016) e demonstrado na Figura 22, sinais digitais, são pulsos elétricos que funcionam “ligados” e/ou “desligados”, já sinais analógicos possuem seus valores variando continuamente com resolução infinita no tempo e magnitude.

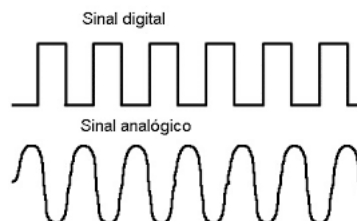


Figura 22: Sinal digital e sinal analógico

A modularização por largura de pulso ou PWM, é um conceito de pulsar um sinal digital rapidamente em um condutor, fazendo com que codifique para um sinal de tensão analógico. Microcontroladores modernos, como no caso o microcontrolador ATMEGA2560, apresentam *hardware* dedicado para sinais PWM, gerando sinais de 0 a 5V (SILVEIRA, 2016).

O *duty cycle* ou ciclo de trabalho corresponde a porcentagem de tempo em que o sinal se encontra em estado ativo. Na Figura 23 a linha azul caracteriza esse ciclo de trabalho do sinal digital (uma parte ligada e outra desligada), gerando uma tensão média (sinal analógico) representado pela linha reta vermelha, cujo o valor é a multiplicação da porcentagem do ciclo de trabalho com a tensão máxima do sinal digital.

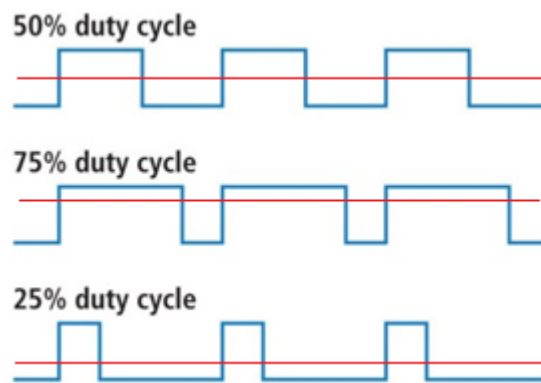


Figura 23: Ciclo de trabalho do PWM

### 3 DESENVOLVIMENTO

Este trabalho contempla duas etapas principais, uma de ensaios geotécnicos na célula desenvolvido por Lucas Ferreira (2011), com o viés de acrescentar dados ao estudo da eletrocinese; e outra de aprimorar o sistema proposto por Marcos Ronzani (2018), com o desenvolvimento de um projeto simulado, até a construção do circuito amplificador de tensão por PWM e seus instrumentos. Estas etapas que são descritas nos tópicos a seguir, são denominadas respectivamente como Procedimento Manual e Proposta de Uso do PWM.

#### 4.1 Procedimento Manual

Os ensaios físicos na célula eletrocinética foram realizados no Laboratório de Rejeitos da Mineração e no Laboratório de Mecânica dos Solos, localizados no centro de pesquisa do Núcleo de Geotecnia Aplicada da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO/UFOP).

##### 3.1.1 Caracterização do rejeito de minério de ferro

O material utilizado nos ensaios foi o rejeito de minério de ferro proveniente da região central do quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. Esse rejeito foi coletado nas usinas de tratamento de minério da Mina do Pico da empresa VALE, sendo acondicionadas em recipientes de 15 e 30 litros, juntamente com amostras de água, também proveniente dos processos de beneficiamento.

De acordo com Guimarães (2011), a Tabela 1 apresenta a composição química característica de rejeito oriundo da Mina do Pico.

Tabela 1: Composição química rejeito Mina do Pico

Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	P (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Mn (%)	PPC (%)
44,59	22,23	0,162	7,77	0,183	5,04

Fonte: (GUIMARÃES, 2011)

### 3.1.2 Caracterização da célula eletrocinética

Para a elaboração deste trabalho foi utilizado um equipamento de laboratório denominado célula eletrocinética, apresentado na Figura 24 desenvolvido por Ferreira (2016).



Figura 24: Célula eletrocinética  
Fonte: (RONZANI, 2018)

Como ilustrado no esquemático da Figura 25, a célula tem uma estrutura de acrílico transparente e reforçada, composta por eletrodos, suporte para os eletrodos, válvulas de drenagem de água e sensores de tensão elétrica.

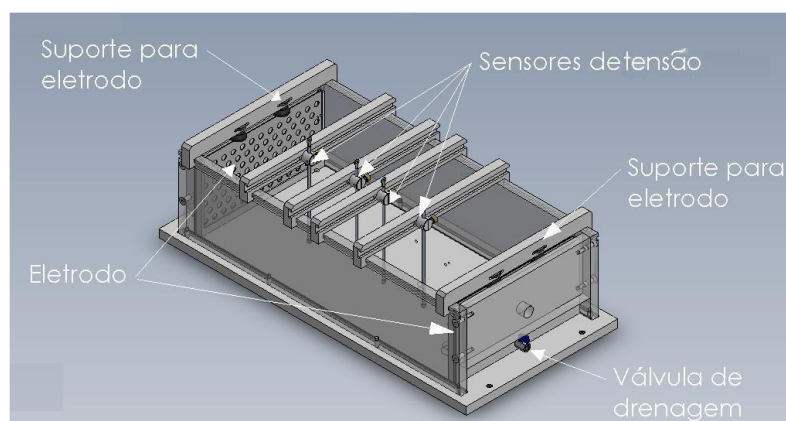


Figura 25: Esquemático da Célula Eletrocinética  
Fonte: (FERREIRA, 2016)

Dependendo da proporção de rejeito disponível para o ensaio e o interesse de experimentar novos gradientes elétricos ou maiores quantidades de rejeito, é possível alterar o comprimento, movimentando os eletrodos em diferentes espaçamentos. Como ilustrado no diagrama da Figura 26. O equipamento tem altura fixa de 30 cm, 40 cm de largura e comprimento variável entre 20 a 80 cm

Os sensores de tensão ou sondas de tensão consistem em ponteiros metálicas de cobre, que são utilizados para analisar as tensões em diferentes locais e profundidades da célula com rejeito, representados pelos pontos numerados de 1 a 6 da Figura 26.

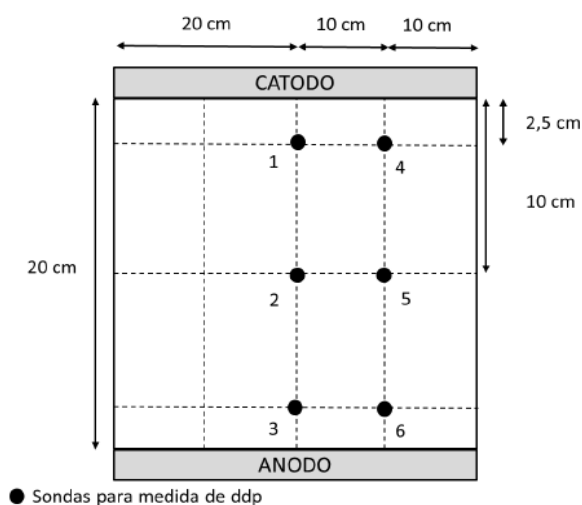


Figura 26: Esquemático do interior da célula eletrocinética  
 Fonte: (FERREIRA, 2018)

Os eletrodos representados na Figura 27 são duas estruturas perfuradas de aço inox de tamanho 37,4 cm de largura e 18,87 cm de altura, com uma área efetiva de 464,13 cm<sup>2</sup>. Um deles é o ânodo e o outro o cátodo, responsáveis por gerar a diferença de potencial no sistema.



Figura 27: Eletrodo perfurado de aço inox  
 Fonte: (FERREIRA, 2016)

O conjunto de suportes para eletrodos fabricados em acrílico com anéis de borracha, localizados nas laterais, garantem que as placas dos eletrodos fiquem fixas e vedadas, sem haver vazamento de material. A drenagem é realizada por meio da válvula de drenagem de líquido, presentes na base dos suportes conforme a Figura 28.



Figura 28: Suporte do eletrodo, com a válvula de vazão  
Fonte: (Ferreira, 2016)

Para a aquisição de dados foi utilizado o sistema representado na Figura 29, elaborado e desenvolvido por uma empresa terceirizada, sem disponibilidade do manual do *hardware* e *software* envolvidos. O principal objetivo deste sistema é automatizar os ensaios e facilitar a visualização dos dados.

O sistema constitui-se de entradas e saídas de tensão contínua: seis entradas para receber os valores obtidos por meio das sondas de cobre, duas entradas para uma fonte externa de 0 a 32 V que alimenta o equipamento de aquisição e duas saídas das tensões aplicadas nos eletrodos da célula. O equipamento também possui uma entrada para receber o valor da pressão de água de uma coluna, para determinar o volume de água no desaguamento, mas que, no entanto, não funciona bem, devidos a erros nos cálculos do volume, possíveis resíduos e imperfeições no tubo da coluna.





Figura 29: Equipamento de aquisição de dados

O painel de aquisição de dados se comunica com um *software* de supervisor via wi-fi. E por esse *software* é possível fazer as configurações iniciais dos ensaios, como a tensão aplicada de 0 a 30 V, as trocas de polaridade e a intermitência de corrente nos eletrodos. Já durante o ensaio é possível analisar, em tempo real, variáveis que são relevantes para a fundamentação teórica como a corrente que percorre pelo conjunto eletrodo - rejeito - eletrodo, a tensão entre os eletrodos, as tensões em cada uma das seis sondas de cobre e o volume da coluna de água nos tubos, como na Figura 30.



Figura 30: Tela do supervisor *software* Célula Eletrocinética

No entanto, apesar do sistema possuir acionamento automático e visualização dos dados, ainda é necessário que as leituras de vazão e a regulagem de tensão da fonte externa sejam ajustadas manualmente, sem nenhum tipo de controle automático.

### 3.1.3 Procedimentos de montagem da célula

Inicialmente é realizado o encaixe dos elementos filtrantes nos eletrodos e fixados nos suportes de acrílico, como ilustrado na Figura 31. Elementos filtrantes são constituídos de papel filtro e geotêxtil de poliéster não tecido.

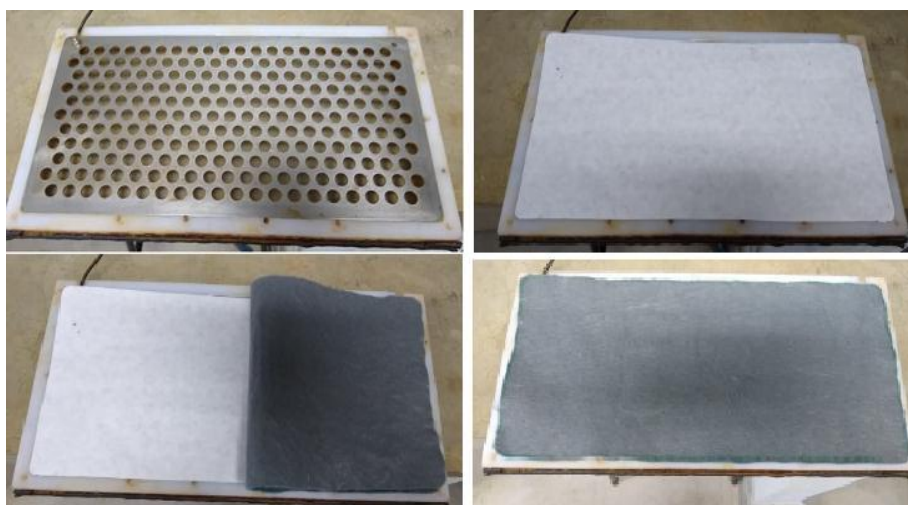


Figura 31: Elementos filtrantes e eletrodo  
Fonte: (FERREIRA, 2018)

Após a organização desse conjunto, é realizado uma pós-fixação, de acordo com a Figura 32, garantindo melhor estabilidade e evitando vazamento de rejeito.



Figura 32: Fixador vertical das placas  
Fonte: (FERREIRA, 2018)

Para convicção de que não haverá vazamento e desperdício do material e tempo de ensaio é realizado um último procedimento antes de alocar o rejeito na célula. Esse procedimento consiste em preencher a célula com água durante um período de 15 minutos, conforme a Figura 33.

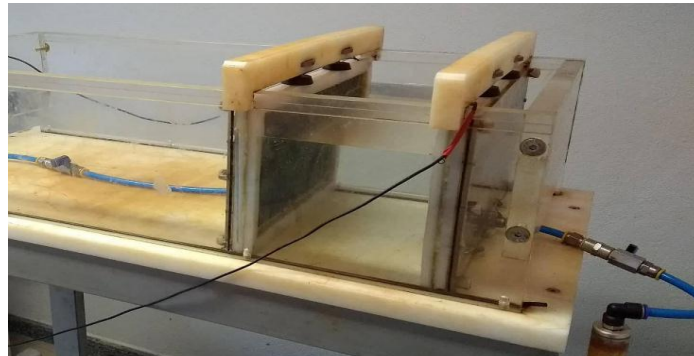


Figura 33: Procedimento pós vedação  
Fonte: (FERREIRA, 2018)

Após essas etapas de preparo estruturais da célula, é realizado a homogeneização do rejeito por meio de um misturador manual, com correções de teor de umidade acrescentando-se a própria água do rejeito, garantindo assim condições mais próximas a realidade. Em seguida este preparo é adicionado a célula conforme a Figura 34.

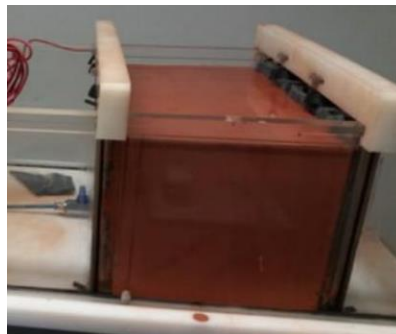


Figura 34: Célula com rejeito homogeneizado  
Fonte: (FERREIRA, 2018)

As sondas de tensão são posicionadas segundo a configuração do esquemático da Figura 26, resultando na visão da célula como na Figura 35.

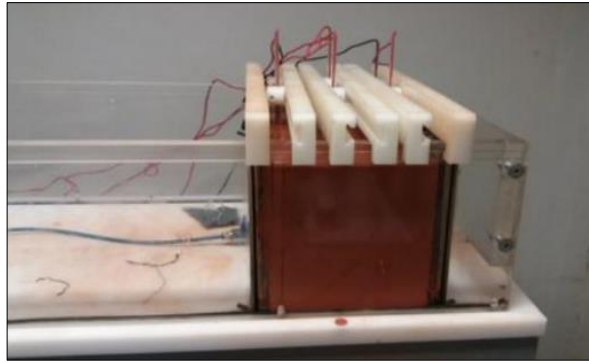


Figura 35: Célula com rejeito e as sondas  
Fonte: (FERREIRA, 2018)

Logo após conectar todos os componentes no painel de dados cadastra-se o ensaio no *software*, definindo todas as informações e as condições iniciais de alimentação de energia, e assim, inicia-se o experimento conforme a Figura 36.



Figura 36: Início ensaio célula eletrocinética  
Fonte: (FERREIRA, 2018)

Em um tempo predeterminado é realizada a captação manual do volume drenado em ambos os lados separadamente para que se possa averiguar qual dos eletrodos, cátodo ou ânodo, pode “drenar” mais água.

### 3.2 Proposta de uso do PWM

Essa etapa do projeto também foi realizada na UFOP, mais especificadamente no Laboratório de Controle e Automação Multiusuário, localizado na área da Engenharia de Controle e Automação dos laboratórios da Escola de Minas.

Nas três sessões adiante serão descritos os circuitos isolados do circuito completo. Nessas três etapas foram realizados testes do circuito no *software* Proteus, testes de bancadas em *protoboard* juntamente com um Arduino Mega e seu respectivo código de programação.

Em questão de código foram utilizadas funções da própria IDE do Arduino, como *analogRead()*, para leitura analógica do sensores, *Serial.print()*, para exibição dos valores no serial do IDE, *delay()* para atraso em milissegundos do código, e *void loop()*, para laço de repetição do código como um todo. Já em questão de *hardware* foram utilizados filtros RC para os sinais de saída no sensor de tensão, corrente e temperatura, propiciando melhores valores de leitura.

### 3.2.1 Circuito PWM

O circuito referente ao amplificador de tensão, ilustrado na Figura 37, consiste principalmente de uma entrada de tensão fornecida por uma fonte externa de até 26 V e de um sinal PWM fornecido pelo Arduino Mega. O sinal PWM passa por dois filtros passa-baixa (RC) em cascata, tornando-o um sinal de tensão constante, de 0 a 5 V, de forma proporcional ao ciclo de trabalho do PWM. Essa tensão é amplificada pelo amplificador operacional LM324, configurado como não inversor, com saída destinada ao conjunto de transistores NPN TIP31C e 2N3055 na configuração coletor comum com etapa Darlington, resultando em ganho de tensão e corrente a cada transistor adicionado em sequência.

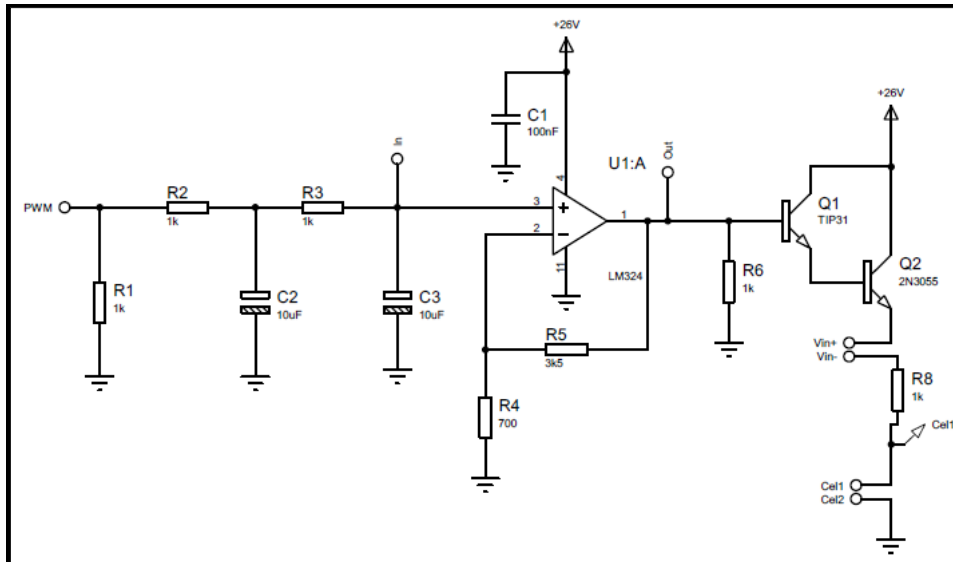


Figura 37: Circuito regulador amplificador de tensão no *software* Proteus

O circuito apresentado na Figura 37 foi testado em protoboard, respeitando as limitações do sistema em relação a sobrecarga ou possíveis curtos circuitos.

O pseudocódigo do Algoritmo 1 representa a forma que o código do Arduino foi implementado.

#### Algoritmo 1: Pseudocódigo para o PWM

- |   |   |
|---|---|
| 1 | : Define-se qual a porta PWM que será utilizada                         |
| 2 | : <b>(1)</b> Laço de repetição para compiar o código até um caso de fim |
| 3 | : Configura o valor do ciclo de trabalho do PWM (0 a 255)               |
| 4 | : Plota a porcentagem do ciclo de trabalho do PWM configurado           |
| 5 | : <b>(1) FIM</b>  |

### 3.2.2 Circuito de temperatura

A leitura da temperatura foi realizada pelo sensor LM35, pois atende à faixa de medição na qual o sistema opera, além de ter baixo custo e fácil implementação. O circuito de temperatura foi simulado no *software* como ilustrado na Figura 38, com a alimentação +VS de 5V.



tornaria complexo o circuito e com possíveis incertezas, já que um divisor de tensão depende das proporcionalidades de suas resistências para entregar o valor de saída.

A partir dessa análise, foi escolhido um único sensor para realizar a medição dos valores de tensão e corrente elétrica na carga. O sensor INA219, cujo esquemático do Proteus ilustrado na Figura 39, que foi colocado em série com uma carga resistiva, representada pelo potenciômetro RV1, igual a medição convencional da corrente em uma carga. Sua alimentação é de 5V, gerando de saída um sinal analógico de 0 a 5V.

O código do sensor foi desenvolvido com auxílio de uma biblioteca da Adafruit, empresa responsável pelo sensor INA219. O pseudocódigo para leitura da tensão e corrente é representado pelo Algoritmo 3.

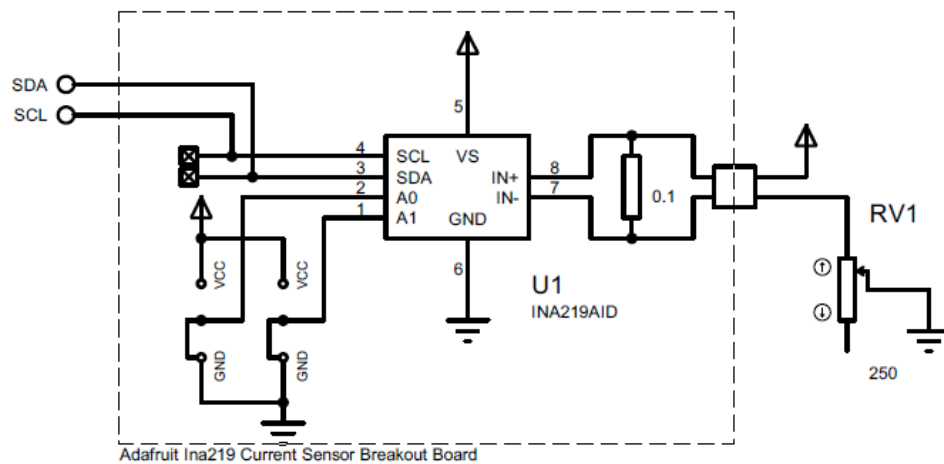


Figura 39: Circuito sensor INA219 no *software* Proteus

### Algoritmo 3: Pseudocódigo para o sensor INA219

```

1 : Inclui biblioteca Adafruit_INA219
   Cria-se um instância do sensor
   Inicializa a instância do sensor ina219
2 : (1) Laço de repetição para rodar até um caso de fim do código
3 :     Realiza a leitura do valor analógico da tensão
4 :     Realiza a leitura do valor analógico da corrente
5 :     Retorna o valor da tensão e corrente
6 :     Plota o valor da tensão e corrente
7 : (1) FIM

```

#### 3.2.4 Circuito completo



Depois de testar e verificar o circuito de PWM e os instrumentos de medição de temperatura, tensão e corrente individualmente, foram agrupados os sensores em um projeto do *software* Proteus, junto com o Arduino e a programação do código. Por meio do código hexadecimal gerado pelo IDE do Arduino quando é compilado, foi possível executar o código na simulação do Proteus, com os sensores e o circuito como um todo.

Em seguida foi reconstruído o circuito em um *proto board* para teste em bancada, analisando os pontos de atenção do sistema, como corrente elevada, curto circuitos e capacidade do Arduino ATMEGA2560.

Com essa assertividade, foi possível gerar o arquivo PCB da placa no Proteus, com a melhor distribuição dos componentes e trilhas, ilustrado na Figura 40. Uma ferramenta que o Proteus disponibiliza é a visualização 3D da placa do PCB, o que facilita a visualização da placa final, como na Figura 41.

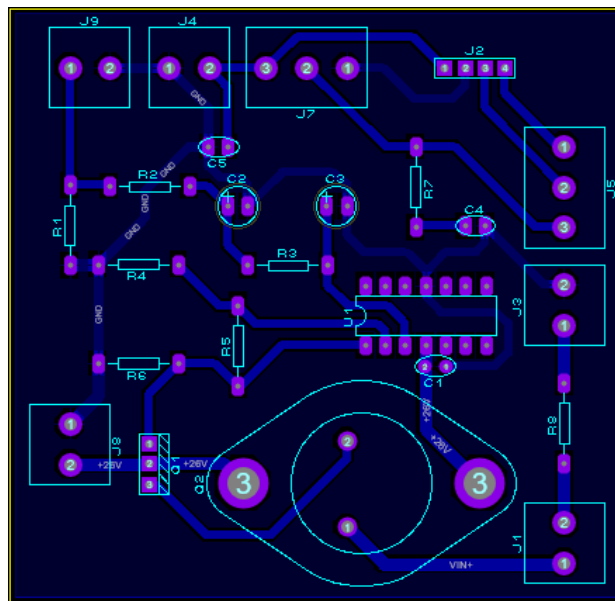


Figura 40: Circuito PCB da placa no Proteus

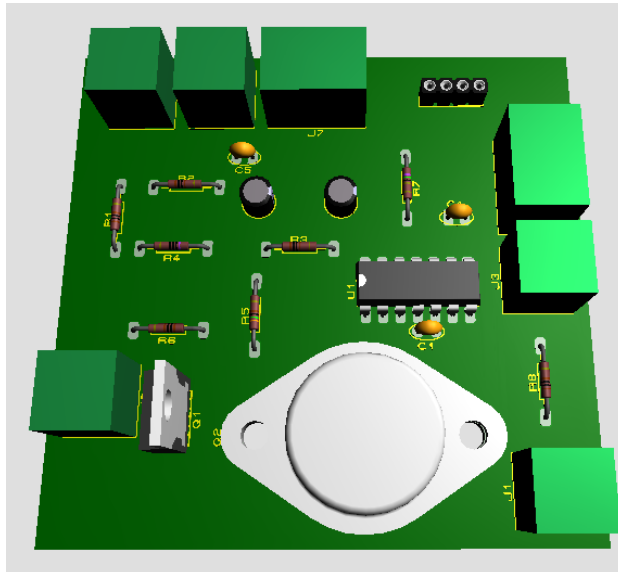


Figura 41: Placa na visualização 3D do Proteus

Para a impressão da placa de circuito impresso, primeiramente foi utilizado o *software* PCB ProtoSender, para leitura do arquivo PCB do Proteus e conversão em um código de hexadecimais para as posições exatas das trilhas e furos. Em seguida, foi exportado o arquivo de hexadecimais para o *software* PCB ProtoStudio, responsável pela interface com a máquina CNC alocada no Laboratório de Controle e Automação Multiusuário, da Universidade Federal de Ouro Preto. Logo após a produção da placa em circuito impresso, ilustrado na Figura 42, cada componente foi colocado em sua posição no circuito e depois soldado, como representado na Figura 43 com equipamentos do próprio laboratório.

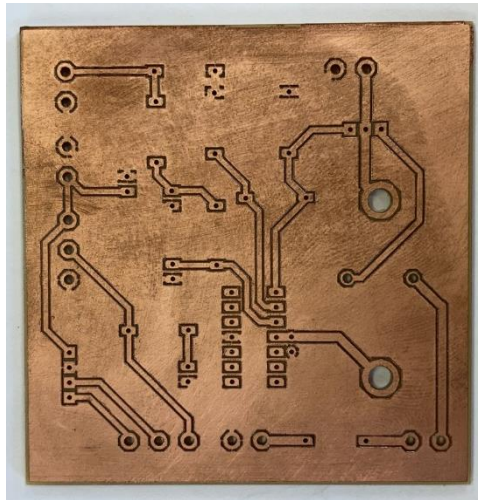


Figura 42: Placa circuito impresso gerada pela CNC da Universidade Federal de Ouro Preto

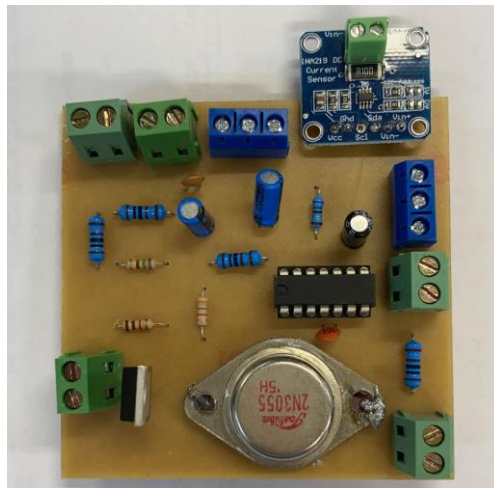


Figura 43: Placa circuito impresso com os componentes integrados

### 3.2.5 Testes de simulação célula eletrocinética

Os procedimentos de testes envolvendo o circuito completo foram realizados simulando o comportamento da célula eletrocinética, para validação do desempenho do circuito.

Inicialmente é realizada a montagem do sistema, como na Figura 44, onde a marcação A sinaliza o microcontrolador ATmega2560; a marcação B ilustra a placa

amplificadora de tensão desenvolvida; a marcação C, sinaliza o sensor de temperatura LM35 com seu revestimento de silicone, para testes de temperatura em líquidos; e por fim, a marcação D representa as fontes externas de 32 V e de 5 V para alimentação dos sensores.

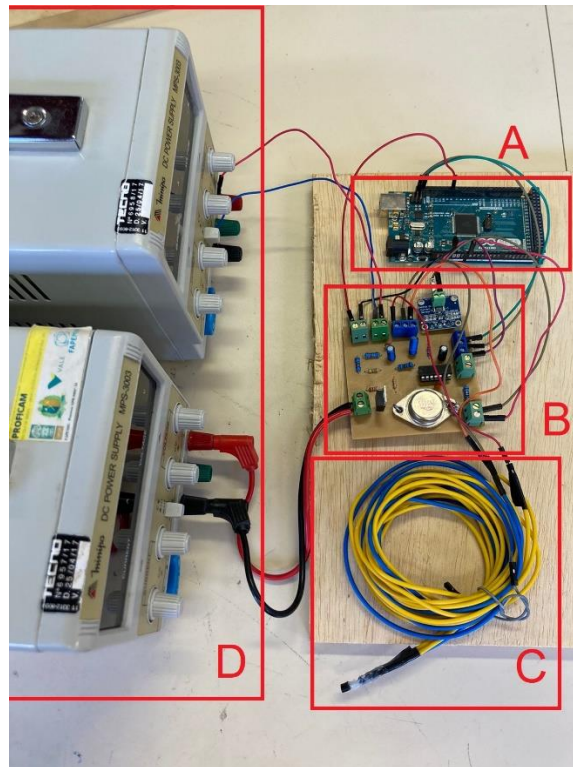


Figura 44: Circuito completo para testes

A Figura 45 ilustra como os valores são mostrados por meio do serial monitor do IDE do Arduino. As variáveis lidas a cada 2 segundos são as porcentagens do ciclo de trabalho do PWM, tensão, corrente elétrica e temperatura da carga.

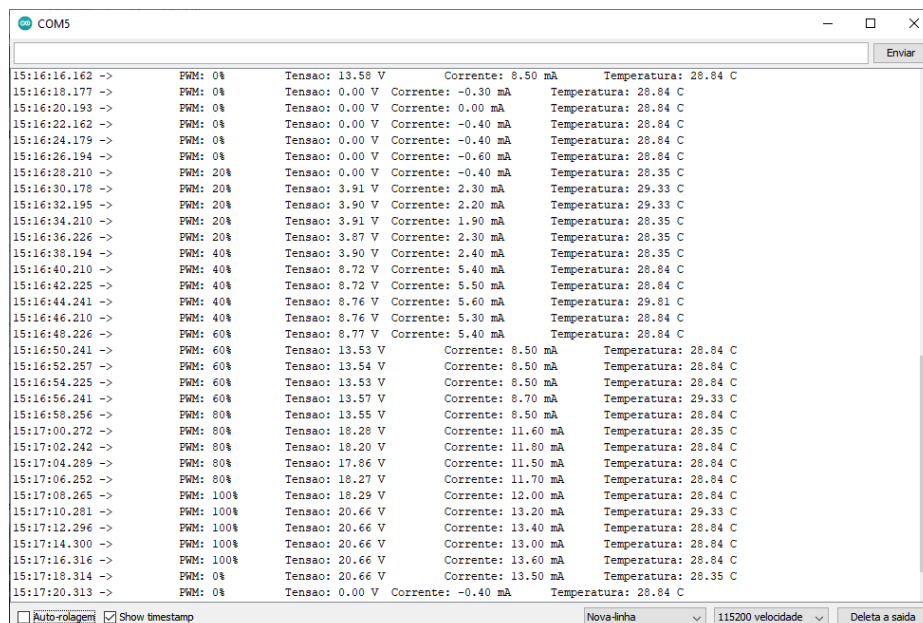


Figura 45: Variáveis monitoradas em tempo real no serial monitor da IDE do Arduino

Para simular um ensaio da célula eletrocinética, é configurada uma tensão inicial para o sistema e de acordo com a duração do experimento o desaguamento do rejeito diminuiria, o que seria relevante aumentar a tensão do sistema, para manter elevado o desaguamento de água. Dessa forma foram realizados dois testes para verificação e possíveis situações da célula eletrocinética.

### 3.2.5.1 Variando PWM no tempo

Esse primeiro teste teve como objetivo variar o ciclo de trabalho do PWM a cada intervalo de 10 segundos mantendo a resistência da carga, que simula o rejeito, fixa no valor de 1000 ohms. Assim nos primeiros 10 segundos foi aplicado inicialmente 0% do ciclo de trabalho do PWM, nos 10 segundos seguintes foi aplicado 20% do PWM, nos 20 a 30 segundos seria aplicado 40% do PWM, de 30 a 40 segundos 60% do PWM, de 40 a 50 segundos 80% do PWW e de 50 a 60 segundos foram aplicados 100% do ciclo de trabalho do PWM.

### 3.2.5.2 PWM como entrada do sistema

Esse segundo teste teve como objetivo variar o ciclo de trabalho do PWM, de acordo com valores de entrada do usuário. Como ilustrado na Tabela 1, quando o usuário digitasse um número do teclado de 0 a 5 no serial monitor da IDE do Arduino, este representaria o a porcentagem do PWM desejado, seguindo a tabela abaixo:

Tabela 1: Número do teclado referente ao ciclo de trabalho

<b>Número do teclado</b>	<b>Ciclo de trabalho PWM (%)</b>
0	0
1	20
2	40
3	60
4	80
5	100

Em contra partida ao primeiro teste, este tem a variação da resistência, para simular a variação do comportamento do rejeito. Dessa forma para cada ciclo de PWM foi realizada a variação da resistência em 2000 ohms, até 10000 ohms para cada ciclo de trabalho, sendo possível verificar como o sistema se comportaria na variação da resistência da carga.

Para análise e visualização da onda no osciloscópio do ciclo do PWM e da tensão média gerada pelo circuito, foi colocado respectivamente ponteiros na saída do PWM do Arduino e na saída do sistema, local onde se alimentam os eletrodos na célula eletrocinética.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesse tópico são expostos os resultados obtidos nos testes manuais na célula eletrocinética como gráficos de drenagem de água por tempo, desaguamento de água em cada eletrodo com tensões variadas, drenagem de água com corrente elétrica de uso intermitente, corrente no decorrer do tempo e resistência do rejeito durante todo o ensaio. Posteriormente são expostos os resultados obtidos no desenvolvimento do sistema amplificador de tensão e seus instrumentos, como as ondas no osciloscópio do ciclo de trabalho do PWM e tensão de saída do sistema em cinco intervalos de tempo, o gráfico da tensão e corrente medida pelo sensor INA219 e gráfico de temperatura do sensor LM35.

### **5.1 Testes Manuais**

Foram realizados uma série de ensaios na célula eletrocinética do trabalho de Ferreira (2016) com espaçamento entre os eletrodos de 20 cm, captando a água a cada momento determinado, analisando o experimento e as amostras.

O gráfico da Figura 46 a seguir, mostra os dados obtidos em três ensaios de volume de água drenado do rejeito em relação ao tempo, aplicando gradientes de tensão de 75 V/m, 100 V/m e 150 V/m, ou seja, uma diferença de potencial nos eletrodos de 15V, 20V e 30V respectivamente, levando em conta os 20 cm de distância entre os eletrodos.

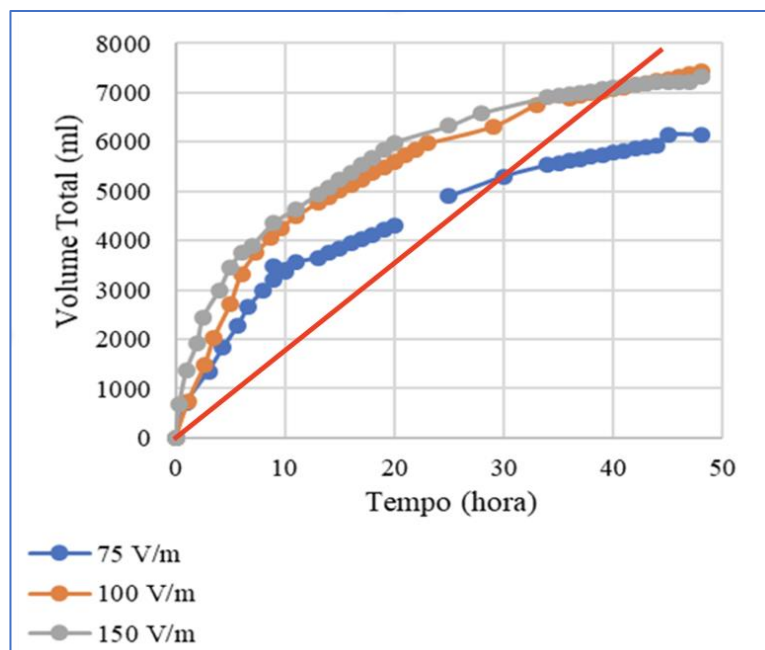


Figura 46: Volume de água drenado ao longo do tempo  
 Fonte: adaptado de Henrique, 2018

Por meio desse gráfico, observa-se que quanto maior a tensão aplicada, maior é o volume de água drenado por hora. Nota-se que a partir de um momento do gráfico os desaguamentos de água referentes ao gradiente de tensão elétrica de 100 V/m (linha laranja) e 150 V/m (linha cinza) são semelhantes, de onde se conclui que a melhor configuração é do gradiente de 100 V/m, já que possui um gasto energético menor que do ensaio com 150 V/m. Nesse contexto foi simulado uma curva retilínea vermelha na Figura 46, que representa o volume de água drenado, caso houvesse a implementação de um sistema que otimizasse a tensão elétrica na célula, tendo a possibilidade de superar os 8000 ml de líquido drenado.

A Figura 47 ilustra as curvas de variação da corrente elétrica no tempo nos três ensaios realizados. Este gráfico representa o resultado do comportamento do rejeito no sistema eletrocinético, já que, o sistema apresenta o gradiente de tensão constante e com o decorrer do ensaio o desaguamento aumenta a porcentagem de sólidos no rejeito de minério de ferro. Dessa forma, o valor resistivo do rejeito aumenta, conseqüentemente a corrente elétrica diminui para valores menores que 50 mA.



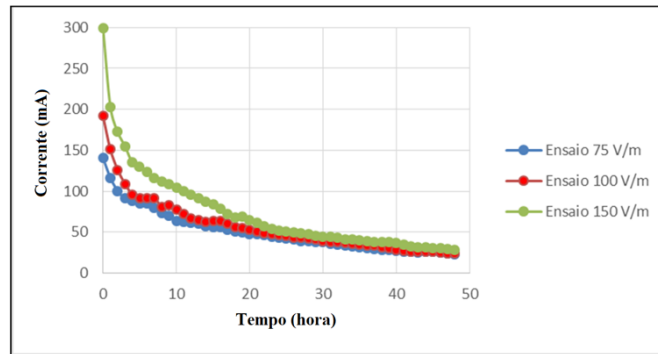


Figura 47: Gráfico das curvas da corrente elétrica ao longo do tempo  
 Fonte: (Henrique, 2018)

De acordo com os valores utilizados para gerar os gráficos da Figura 46 e Figura 47 foi possível gerar as curvas equivalentes ao valor da resistência elétrica do rejeito nos três ensaios na Figura 48. É possível validar que no final do ensaio utilizando 100 V/m o rejeito teve maior valor de resistência elétrica do que os rejeitos dos outros ensaios.

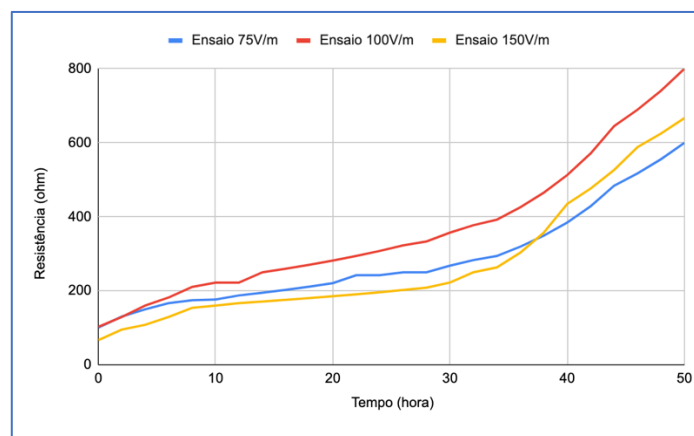


Figura 48: Gráfico da curva da resistência elétrica do rejeito ao longo do tempo

Devido a captação das águas de cada lado separado, foi possível verificar a drenagem de água de cada eletrodo. A Figura 49 apresenta essa drenagem no anodo e catodo em função do tempo de experimento em três ensaios: o primeiro ensaio (1.1) utilizando 150 V/m de gradiente elétrico; o segundo ensaio (1.2) utilizando 100V/m; e o terceiro (1.3) utilizando 75V/m. De acordo com gráfico, nota-se que o volume drenado no anodo supera em todos os ensaios o volume drenado de água no lado do catodo, concluindo que o fluxo eletrosmótico do sistema ocorre no sentido do catodo para anodo. Ressalta-se que nos dois últimos ensaio, os volumes de água drenados no anodo são

semelhantes, e que o volume drenado está associado ao aumento do gradiente elétrico, devido a concentração de cátions e ânions no rejeito.

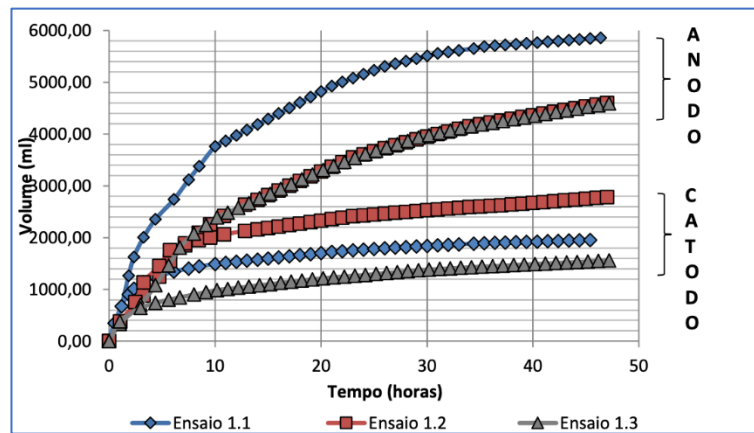


Figura 49: Gráfico de drenagem de água no catodo e no anodo  
 Fonte: (Ferreira, 2018)

Outra técnica utilizada para testes de drenagem de água do rejeito, foi a aplicação de uma corrente elétrica intermitente, ou seja, a corrente era ligada num instante e desligada em outro. Foram realizados três ensaios, cujos os resultados são apresentados no gráfico da Figura 50, o primeiro com a corrente elétrica ligada durante 2 minutos e desligada durante 1 minuto; no segundo ensaio a corrente ficou ligada 3 minutos e 1,5 minutos desligada; e no último ensaio a corrente ficou ligada durante 4 minutos e desligada durante 2 minutos.

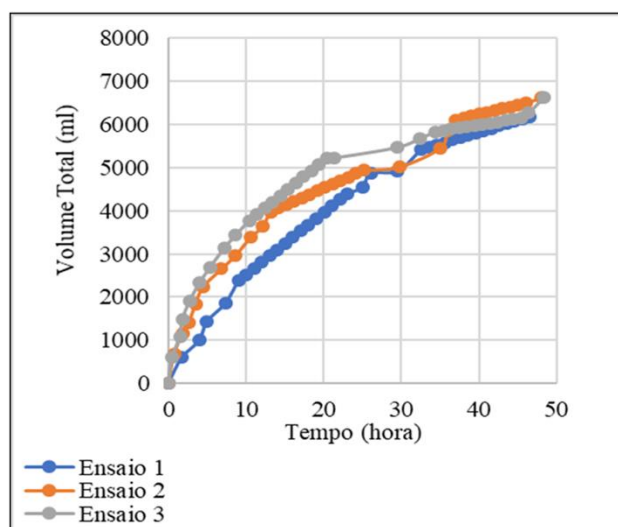


Figura 50: Gráfico do volume drenado com corrente elétrica intermitente  
 Fonte: (Henrique, 2018)

De acordo com o gráfico da Figura 50 é possível visualizar que, apesar das curvas serem distintas no início do tempo, elas finalizam o ensaio com praticamente o mesmo volume de água drenado. Sendo necessário uma pesquisa maior sobre o comportamento da resistência do rejeito e gasto energético do sistema.

## **4.2 Testes amplificador de tensão via PWM**

### **4.2.1 Teste de bancada**

No teste em bancada do sistema amplificador de tensão e sensores, foi introduzido um ponto de prova de osciloscópio na saída do PWM do microcontrolador e outro ponto na saída do sistema, para verificar a onda do ciclo do PWM e a tensão de saída, respectivamente. Esse resultado é ilustrado no conjunto de imagens a seguir, cuja a primeira onda (canal 1) dada pela cor branca representa a tensão de saída do sistema, enquanto a segunda onda (canal 2) dada pela cor amarela representa o ciclo de trabalho do PWM, e que sua proporção vertical é de 5V, com ambas as ondas centralizadas no campo.

Mediante a 20% do ciclo de trabalho do PWM, a tensão média de saída do sistema equivale 4,2 V, como ilustrado na Figura 51; com 40% do ciclo do PWM, a tensão média de saída equivale aproximadamente a 9 V, como ilustrado na Figura 52; com 60% do ciclo do PWM, a tensão média de saída equivale a 14,5 V, como ilustrado na Figura 53; com 80% do ciclo do PWM, a tensão média de saída equivale a aproximadamente 20V, como ilustrado na Figura 54; e por fim com 100% do ciclo de trabalho do PWM, a tensão média de saída do sistema equivale aproximadamente 24 V até o máximo de 25 V, como ilustrado na Figura 55. A relação entre o ciclo de trabalho do PWM e a tensão de saída do circuito também pode ser visualizada por meio do gráfico apresentado pela Figura 56.



Figura 51: Ondas resultantes de 20% do PWM



Figura 52: Ondas resultantes de 40% do PWM



Figura 53: Ondas resultantes de 60% do PWM



Figura 54: Ondas resultantes de 80% do PWM



Figura 55: Ondas resultantes de 100% do PWM

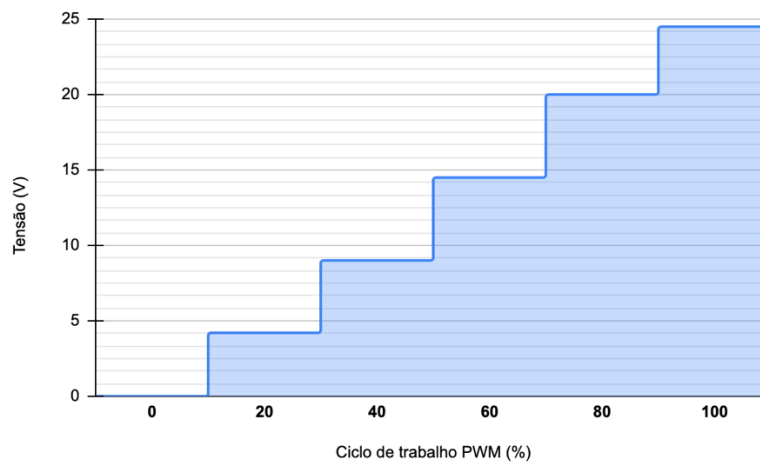


Figura 56: Gráfico de área entre tensão e o PWM

#### 4.2.2 Variando o PWM no tempo

No teste do ciclo de trabalho variando a cada 10 segundos, com resistência fixa da carga no valor de 1000 ohms, foram gerados três gráficos a partir dos valores obtidos de tensão, corrente e temperatura no serial monitor da IDE do Arduino.

O gráfico da Figura 57, representa os valores de tensão obtidos a cada 10 segundos, enquanto ocorria a variação do ciclo de trabalho do PWM.

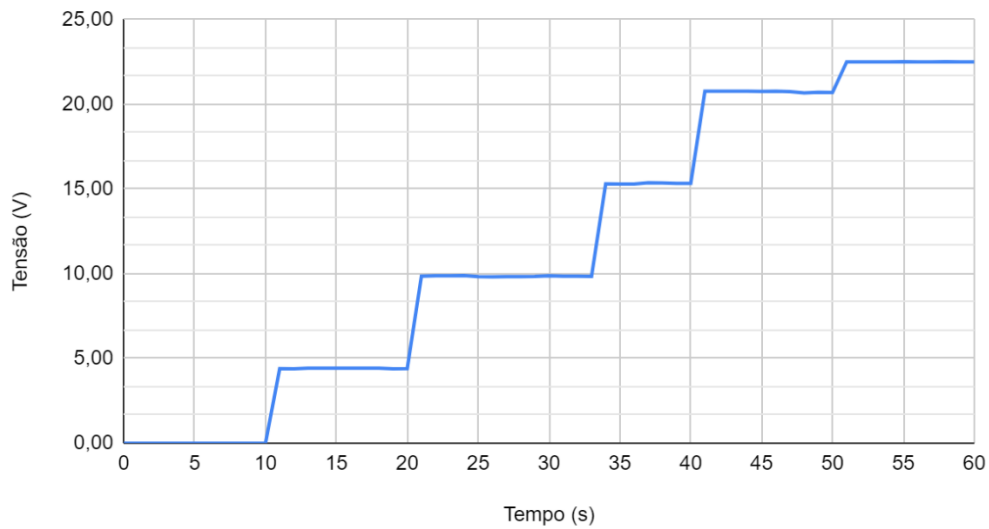


Figura 57: Gráfico de tensão ao longo do tempo

O gráfico da Figura 58 representa a corrente elétrica obtidos a cada 10 segundos, enquanto ocorria a variação do ciclo de trabalho do PWM.

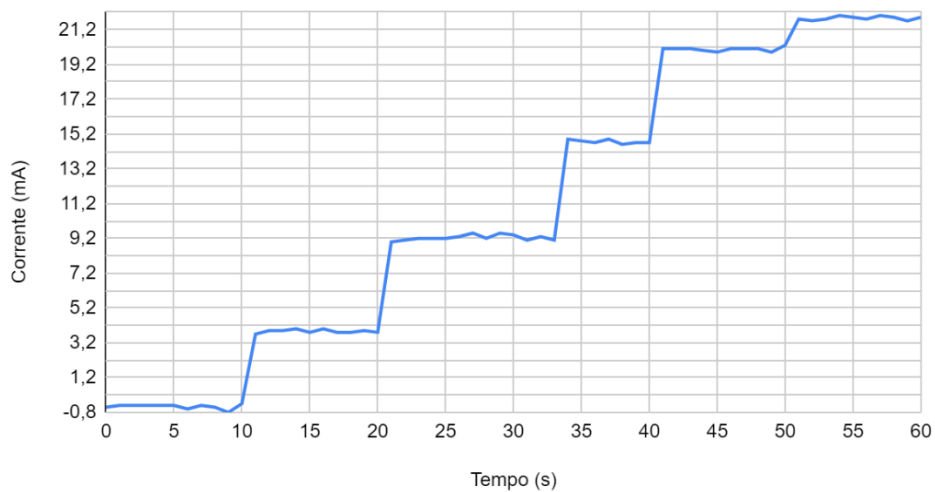


Figura 58: Gráfico de corrente ao longo do tempo

O gráfico da Figura 59 mostra a temperatura obtidos a cada 10 segundos, enquanto ocorria a variação do ciclo de trabalho do PWM.

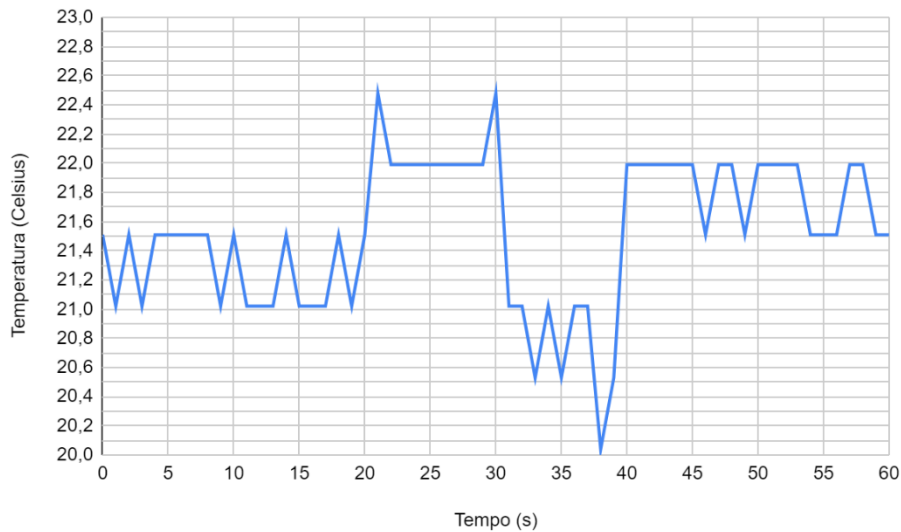


Figura 59: Gráfico de temperatura ao longo do tempo

#### 4.2.3 PWM como entrada do sistema

No teste do ciclo de trabalho do PWM como entrada do sistema, variando as resistências da carga em 2 k $\Omega$ , 4 k $\Omega$ , 6 k $\Omega$ , 8 k $\Omega$  e 10 k $\Omega$ , foram gerados gráficos a partir dos valores obtidos de tensão e corrente no serial monitor da IDE do Arduino. Neste teste não teve grandes alterações nos valores de temperatura, portanto se desconsiderou a necessidade de uma tabela ou gráfico para seus valores.

Os gráficos da Figuras 60 a 69 representam as variações da tensão e corrente aplicados a um ciclo de trabalho de 20%, 40%, 60%, 80% e 100% do ciclo de trabalho do PWM, respectivamente.

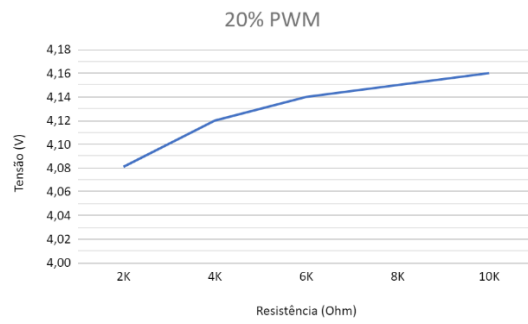


Figura 60: Gráfico de 20% PWM de tensão *versus* resistência

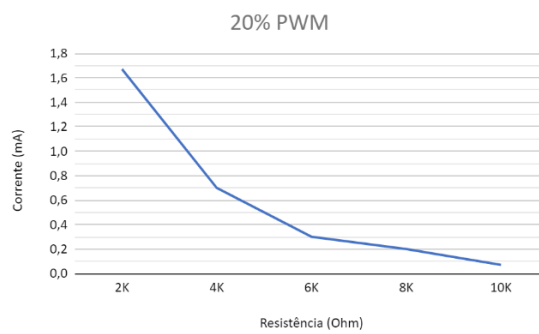


Figura 61: Gráfico de 20% PWM de corrente *versus* resistência

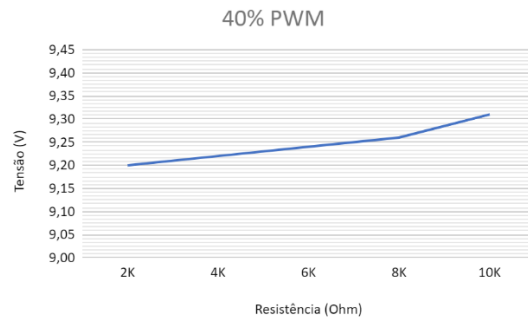


Figura 62: Gráfico de 40% PWM de tensão *versus* resistência



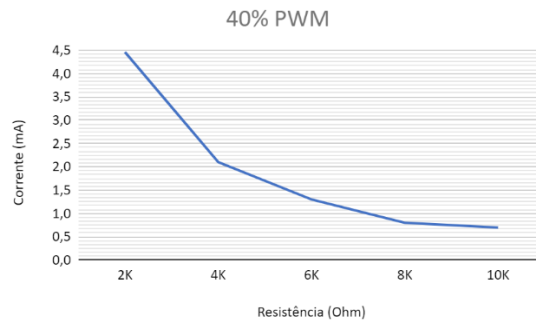


Figura 63: Gráfico de 40% PWM de corrente *versus* resistência

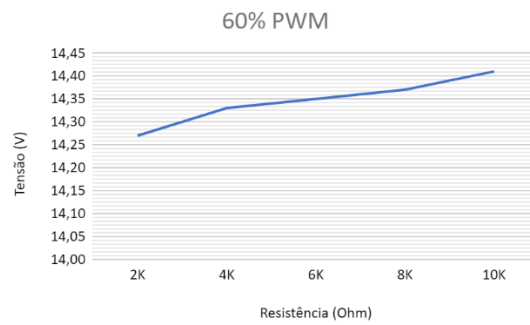


Figura 64: Gráfico de 60% PWM de tensão *versus* resistência

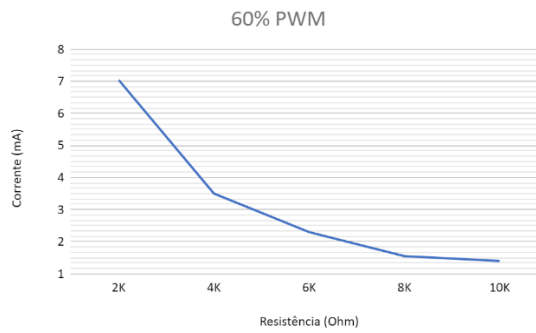


Figura 65: Gráfico de 60% PWM de corrente *versus* resistência

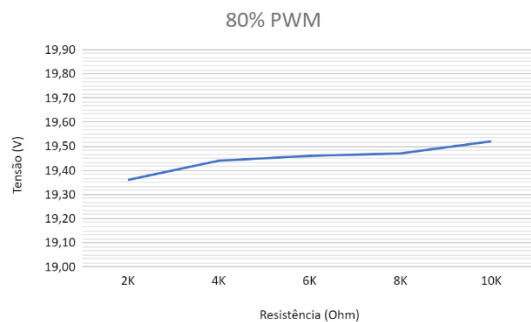


Figura 66: Gráfico de 80% PWM de tensão *versus* resistência

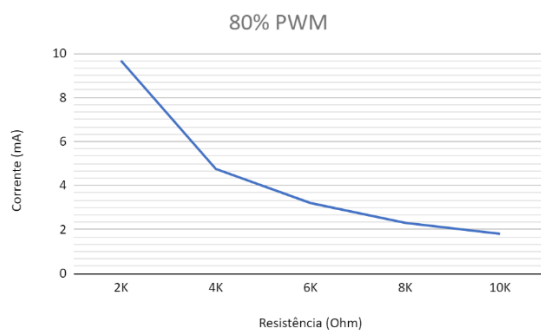


Figura 67: Gráfico de 80% PWM de corrente *versus* resistência

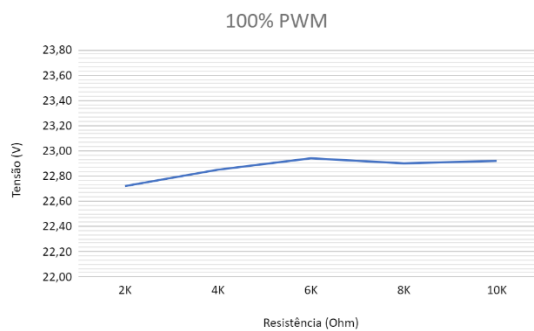


Figura 68: Gráfico de 100% PWM de tensão *versus* resistência

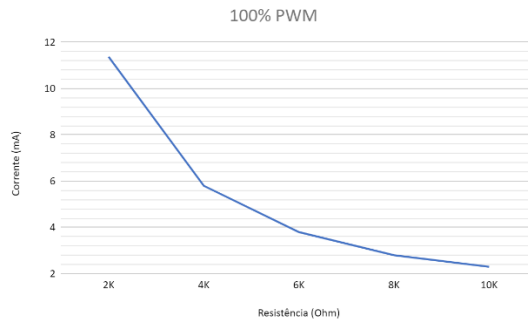


Figura 69: Gráfico de 100% PWM de corrente *versus* resistência

De acordo com esses gráficos, os menores valores de tensão e corrente ocorrem quando o ciclo de trabalho do PWM é 20%, já os maiores valores quando o PWM é 100%. Também é possível notar que nos gráficos de tensão por resistência, a tensão elétrica tem uma pequena elevação quanto maior a resistência da carga. Já nos gráficos de corrente por resistência, a corrente decai quanto maior a resistência na carga, seguindo os princípios da lei de Ohm.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como foco principal um estudo detalhado da área da instrumentação para a mineração, complementando a pesquisa sobre o fenômeno eletrocinética para separação de rejeito e descomissionamento de barragens.

A primeira fase desse trabalho limita-se no levantamento de curvas de volume drenado por tensão em determinado tempo na célula eletrocinética. Os momentos iniciais dos ensaios dessa primeira fase, apresentaram resultados eficazes para comprovação do desaguamento de rejeito por meio do fenômeno eletrocinético, já que os valores do gradiente elétrico influenciaram diretamente no volume de água drenado do rejeito, no entanto em períodos elevados essa diferença na tensão não se faz relevante para desaguamento, mas sim prejudica se levado em conta o gasto energético, uma vez que em um grande complexo minerador representaria uma perda em grande escala. Fica evidente diante dos resultados apresentados, que com a utilização de um sistema amplificador de tensão num ensaio da célula eletrocinética, otimizaria tanto a drenagem de água quanto o gasto energético do sistema.

A segunda fase do trabalho consiste inicialmente num estudo detalhado na área da instrumentação, para determinar quais seriam as melhores opções para aprimorar o sistema regulador de tensão proposto por Ronzani (2018). Dessa forma foi descartado a utilização do sensor ACS712 3A, por ser um componente mais robusto e superdimensionado para essa aplicação, já que na carga do sistema teria uma corrente elétrica na faixa dos miliamperes. Também foi descartado a utilização de um circuito divisor de tensão para obtenção da tensão elétrica, já que o divisor de tensão possui um circuito resistivo que proporciona apenas a tensão em uma faixa de valores, sendo necessário a utilização de um potenciômetro, o que tornaria o circuito mais vulnerável a falhas. Os sensores LM35 e o INA219 foram escolhidos para medição de temperatura e medição da corrente e tensão respectivamente, pois possuem uma fácil implementação, baixo custo, e se enquadraram bem com as especificações do sistema.

Depois dessa análise dos componentes, foi agrupado o circuito completo com os componentes, o Arduino e seu código, no *software* Proteus, gerando resultados satisfatórios para continuação deste trabalho.

Em seguida foi realizado a montagem dos componentes no protoboard e comparado com os valores obtidos na simulação do Proteus.

Na última etapa foi realizado a construção da placa em circuito impresso utilizando uma CNC para gerar as trilhas e os furos nas placas. Agrupando e conectando todos os componentes na placa do circuito, foi realizado testes simulando os efeitos de um ensaio na célula eletrocinética. Estes testes apresentaram sucesso nos resultados de tensão, corrente e temperatura, mostrando-se valores bem próximos aos simulados no Proteus. A utilização de filtros passa-baixa no sinal do PWM e no retorno do sinal de cada sensor foi essencial para diminuição de sinais ruidosos que poderiam ocasionar problemas na medição.

Conclui-se que estes testes já validam a proposta da construção de um circuito amplificador de tensão, mas que é imprescindível realizar testes desse circuito em um ensaio na célula eletrocinética com seus devidos procedimentos, e utilizando rejeito de minério de ferro, para que possa receber resultados ainda mais concretos.

## 5.1 Trabalhos futuros

A partir da finalidade e dos obstáculos encontrados no desenvolvimento desde trabalho, sugere-se como trabalhos futuros:

- Adequar o sistema de instrumentação proposto nesse projeto para suportar tensões maiores que 30 V, testando maiores valores para o gradiente elétrico no rejeito.
- Acrescentar um sensor de vazão ou sensor de ultrassom para medir a vazão de desaguamento de água do rejeito na célula eletrocinética, podendo aplicar em malha fechada o controle do sistema. Atualmente há dificuldades para medir a vazão, devido ao fato da célula construída por Ferreira (2016) ser um protótipo de pequeno porte, apresentando vazão de água baixa, na ordem de ml/h. Assim a variação da tensão seria resultado do desaguamento de água no tempo, o que otimizaria a vazão de água e o gasto energético.
- Investigar a corrente elétrica como variável relevante. Desenvolver um circuito para controle de vazão baseado na corrente elétrica aplicada a célula, ao invés da tensão. Uma opção é o sistema ter como base o amplificador operacional OPA519, um componente de baixo custo, com limiar de 0 a 10 A e entrada para sinal de

controle. Dessa forma, a tensão será uma variável livre e a corrente a variável que dependerá da vazão de água do desaguamento.

- Implantar algum sistema de segurança da célula eletrocinética para correntes altas, já que atualmente o cabeamento fica exposto e o topo da célula aberta, o que pode afetar a segurança do manipulador do ensaio.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- BRAGA, N. C. **Instituto Newton C. Braga**, 25 nov. 2009. Disponível em: <<https://www.newtonbraga.com.br/index.php/como-funciona/679-configuracao-de-transistores-art077.html>>.
- BRANCO, C.; SABOIA, J. E. **Estudo da eletro-osmose em solos finos**, Rio de Janeiro, 1978.
- CAMPOS, M. C. M. M. D.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de equipamentos processos industriais**. São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- CUNHA, A. F. **O que são sistemas embarcados?** [S.l.]: Revista Saber Eletrônica, v. 414, 2007. 39-43 p. Disponível em: <[http://files.comunidades.net/mutcom/ARTIGO\\_SIST\\_EMB.pdf](http://files.comunidades.net/mutcom/ARTIGO_SIST_EMB.pdf)>.
- FERREIRA, A. C. **Análise da técnica de inversão de polaridade e a influência da porcentagem de sólidos inicial, no processo de desaguamento eletrocinético de um rejeito proveniente de mineração de bauxita**, Ouro Preto, 2018.
- FERREIRA, L. D. **Desaguamento e adensamento de rejeito de mineração utilizando processos eletrocinéticos**, Ouro Preto, 2016.
- FOURIE, A. **Harnessing the Power: Opportunities for Electrokinetic Dewatering of Mine Tailings**, Geotechnical News, 24 (2): 27-33, 2006.
- FOURIE, A.B., JOHNS, D.G., and JONES C.J.F.P. **Dewatering of Mine Tailings using electrokinetic geosynthetics**. Candian Geotechnical Journal. 44: 160-172, 2007a.
- FOURIE, A. B., GLENDINNING, S., HUNTLEY, D. T., JONES, C. J. F. P., LAMONTBLACK, J. **Laboratory Evaluation of The Potential for electrokinetic belt filter press dewatering of kimberlite slimes**. 10th International conference on Paste and Thickened Tailings, PASTE, Perth, Australia, 2007b.
- FOURIE, A.B., JONES C.J.F.P. **Improved Estimates of Power Consumption During Dewatering of Mine Tailings Using Electrokinetic Geosynthetics (EKGs)**. Geotextiles and Geomembranes. 28 (2): 181-190, 2009.
- GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**, Belo Horizonte, 2011.
- JÚNIOR, A. P. **Amplificadores operacionais e filtros ativos**. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- KARUNARATNE, G.P., JONG, H.K., CHEW, S.H. **New Electrically Conductive Geosynthetics for Soft Clay Consolidation**. 3th Asian Regional Conference on Geosynthetics, International Geosynthetics Society, Seoul, Korea. 277-284, 2004.

MITCHELL, J. K. and SOGA, K. **Fundamentals of Soil Behavior**, 3rd Ed., Wiley and Sons Inc, New York, 577 p, 2005.

MOHAMEDHASSAN, E., SHANG, J. Q. **Electrokinetic dewatering of Eneabba West mine tailings: A laboratory experimental study**. Soft Ground Technology n° 112, 346-357, 2001b.

NASCIMENTO, A., J., P. **Aceleração da consolidação de solos argilosos com o uso de eletro-osmose. Dissertação de mestrado**, Publicação G.TD 131/2005, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília-DF, 117p. , 2005.

NASCIMENTO, A., J., P. **Aceleração da consolidação em solos tropicais com drenos condutores elétricos. Tese de Doutorado**, Publicação G.TD 062/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília-DF, 256p. (2009)

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**, 2011.

PEDRAZZOLI, C., D. **Remediação eletrocinética de chumbo em resíduos industriais**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia e Materiais, 128p., 2004.

PEIXOTO ET AL., T. M. **Sistemas embarcados: explore sua criatividade construindo *Hardware* e *Software***. SIMPÓSIO MINEIRO DE COMPUTAÇÃO DA VII ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA DE MINAS GERAIS, 2012. Disponível em: <<http://www.lrc.ic.unicamp.br/~luciano/publications/smc12.pdf>>.

PENIDO, É. D. C. C.; TRINDADE, R. S. **Microcontroladores**, 2013. Disponível em: <[http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifmg/tecnico\\_automacao\\_industrial/microcontroladores.pdf](http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifmg/tecnico_automacao_industrial/microcontroladores.pdf)>.

PEREIRA, P. R. D. S. **Métodos para otimização dos ajustes dos reguladores de tensão e zonas de tap em sistemas de distribuição**, Santa Maria, 2009.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**, 2013.

RONZANI, M. M. **Desenvolvimento de um sistema de controle em uma célula de adensamento/desaguamento eletrocinético de rejeito da mineração**, Ouro Preto, 2018.

SANTOS, C. F. G. D. **Simulação de filtro passa-baixa de quinta ordem com análise a sensibilidade**, Santa Catarina, p. 75-80, 2011.

SILVEIRA, C. B. **O que é PWM e Para que Serve?**, Citisystems, 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>.

SOUZA, F. **Embarcados**, 2014. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>.



**SOUZA, M., V., Transporte Eletrocinético de Gasolina e Óleo Através de um Solo Residual Gnáissico e Borra de Petróleo da Bacia de Campos.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil, 137p., 2002.

**TEIXEIRA, G. R.; CAMPOS, G. L. Sistema automatizado para redução de perdas associadas ao processo de refrigeração do leite em pequenas propriedades,** Formiga, 2019.

**TEIXEIRA, G. T. Estrutura do TRansistor Bipolar (TJB),** Projtecc, 19 abr. 2019. Disponível em: <<http://projtecc.com/eletricidade/electronica-basica/transistor-de-juncao-bipolar-tjb/transistor-bipolar-estrutura/>>.

**VELTEN, R. Z., Condutividade Eletrosmótica e Remediação de Solos Contaminados com Cádmiio Via Eletrosmose.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Civil da UFV, 145 p., 2008.





