



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

JOÃO ANTONIO DA SILVA NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AUTOMATIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONCENTRAÇÃO MICELAR CRÍTICA
(CMC) PARA CALCULAR CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS (CTC) EM
ARGILAS BENTONÍTICAS**

João Pessoa/PB
Outubro de 2023

JOÃO ANTONIO DA SILVA NETO

**AUTOMATIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONCENTRAÇÃO MICELAR CRÍTICA
(CMC) PARA CALCULAR CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS (CTC) EM
ARGILAS BENTONÍICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
da Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento as exigências para obtenção do título
de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof^o Dr. Heber Sivini Ferreira

João Pessoa/PB

Outubro de 2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586a Silva Neto, João Antonio da.

Automatização do método de concentração micelar crítica (CMC) para calcular a capacidade de troca de cátions (CTC) em argilas bentoníticas / João Antonio da Silva Neto. - João Pessoa, 2023.

91 f. : il.

Orientação: Heber Sivini Ferreira.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Argila bentonita. 2. Capacidade de troca catiônica. 3. Concentração micelar crítica. 4. Azul de metileno - Adsorção. I. Ferreira, Heber Sivini. II. Título.

UFPB/BC

CDU 666.322(043)

**AUTOMATIZAÇÃO DO MÉTODO DE CONCENTRAÇÃO MICELAR CRÍTICA
(CMC) PARA CALCULAR CAPACIDADE DE TROCA DE CÁTIOS (CTC) EM
ARGILAS BENTONÍTIAS**

de autoria de

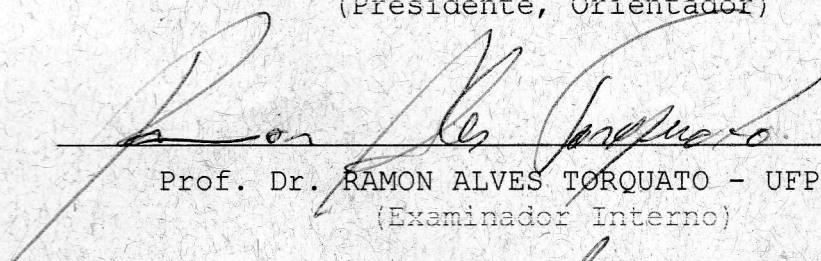
JOÃO ANTONIO DA SILVA NETO

submetida à apreciação da banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – PPCEM, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do título de mestre

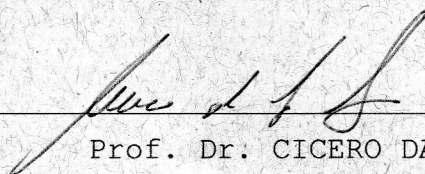
Avaliada e aprovada em 27 de outubro de 2023 pela banca examinadora composta por:



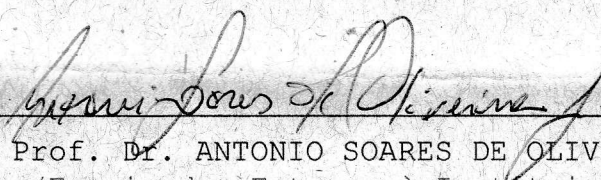
Prof. Dr. HEBER SIVINI FERREIRA – UFPB/PPCEM
(Presidente, Orientador)



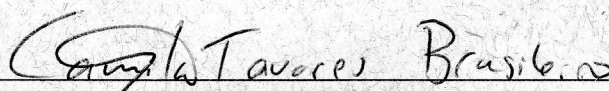
Prof. Dr. RAMON ALVES TORQUATO – UFPB/PPCEM
(Examinador Interno)



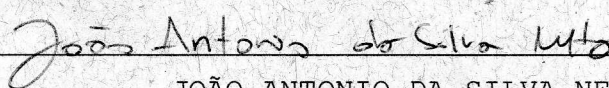
Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
(Examinador Externo ao Programa)



Prof. Dr. ANTONIO SOARES DE OLIVEIRA
(Examinador Externo à Instituição)



Prof^a. Dr^a. CAMILA TAVARES BRASILEIRO
(Examinadora Externa à Instituição)



JOÃO ANTONIO DA SILVA NETO
(Discente)



Jorge Luís Garcia

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À comunidade de desenvolvedores e *makers* engajados em contribuir para um conhecimento livre e de código aberto.

Aos professores que colaboraram para minha formação, em especial ao professor Heber Sivini Ferreira pela orientação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laboratório de Purificação e Aspersão de Minerais Argilosos (LAPAMA) e todos os envolvidos pelo suporte, destacando-se Rivaildo pela atenção e disponibilidade, e Yasmin pelas dicas precisas e úteis.

Aos servidores, amigos e colegas do curso que, mesmo engajados com seus trabalhos, dedicaram tempo para ajudar e compartilhar seus conhecimentos.

Aos familiares, amigos e colegas que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, assim como meu irmão Mateus pela colaboração com seus conhecimentos em Engenharia de Computação.

À minha esposa Sayonara e minha filha Lua, por todo tempo de espera, apoio incondicional e incentivo para continuar lutando.

RESUMO

Para que a argila bentonita possa exercer todas as suas funções, suas propriedades físico-químicas e reológicas devem ser cuidadosamente controladas como forma de garantir o seu bom desempenho. Assim, caracterizar com precisão a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) é fundamental para garantir a qualidade do material analisado. À vista disso, um método comumente usado para calcular a CTC é por adsorção de azul de metileno, que envolve a titulação desse composto numa solução contendo argila, observando a variação na cor para determinar a quantidade adsorvida, o que reflete a CTC da amostra. Nesse contexto, constatou-se que a CTC também pode ser calculada a partir da CMC do tensoativo titulado numa solução contendo argila. Dessa forma, a determinação da CTC ocorre medindo os pontos de virada através da condutividade elétrica da solução. Dessa maneira, a despeito da CMC se mostrar um método mais objetivo, ainda apresenta um grau de subjetividade. Ademais, tanto o método do azul de metileno, quanto a CMC demandam a execução de tarefas repetitivas para movimentação de amostras, dosagem de compostos, controle das variáveis de processo e medição manual da condutividade, ou seja, um processo mecânico repetitivo e exaustivo. Visto que as medições realizadas no método da CMC podem ser aferidas de forma automática, a automatização do processo se mostra a melhor solução para torná-lo mais eficiente e eficaz. Deste modo, os resultados para cálculo da CTC serão mais precisos e os dados gerados serão mais confiáveis. Por consequência, além de proporcionar mais segurança e promover padronização do processo, a automatização do procedimento através de um equipamento dedicado acarretará na mitigação dos erros na identificação do ponto de virada. Primeiramente, determinou-se que a mensuração da condutividade fosse feita com sensor e um sistema que processe essas informações para ser exibidas em tempo real numa tela, tal qual um sistema de supervisão e aquisição de dados típico. Nessas circunstâncias, o desenvolvimento de um equipamento torna-se viável empregando um sistema embarcado num computador de placa única e usando tecnologias livres e de código aberto. Uma vez definidas as estratégias e algoritmos de monitoramento, foram caracterizadas oito amostras de diferentes bentonitas usando azul de metileno como tensoativo. Para fins de comparação, os ensaios foram realizados do modo tradicional e usando o equipamento. De forma inédita, a medição de condutividade e a identificação do ponto de virada foram realizados de maneira automatizada, calculando precisamente a CTC das amostras avaliadas e exibindo o resultado em tempo real. A automatização do processo se mostrou muito eficaz e eficiente para avaliação da CTC de amostras.

PALAVRAS-CHAVES: CMC, CTC, automação, Argilas bentonitas

ABSTRACT

In order for bentonite clay to fulfill all its functions, its physicochemical and rheological properties must be carefully controlled to ensure its good performance. Thus, accurately characterizing the Cation Exchange Capacity (CEC) is crucial to guarantee the quality of the analyzed material. Therefore, a commonly used method to calculate the CEC is through methylene blue adsorption, which involves titration of this compound in a solution containing clay, observing the color change to determine the adsorbed quantity, reflecting the sample's CEC. In this context, it has been found that CEC can also be calculated from the Critical Micelle Concentration (CMC) of the surfactant titrated in a clay-containing solution. Thus, the determination of CEC occurs by measuring turning points through the solution's electrical conductivity. However, despite CMC proving to be a more objective method, it still presents a degree of subjectivity. Furthermore, both the methylene blue method and CMC require the execution of repetitive tasks for sample handling, compound dosing, process variable control, and manual conductivity measurement, which constitutes a repetitive and exhaustive mechanical process. Given that measurements in the CMC method can be automatically calibrated, process automation proves to be the best solution to make it more efficient and effective. Consequently, the results for CEC calculation will be more accurate, and the generated data will be more reliable. As a result, in addition to providing more security and promoting process standardization, automation of the procedure through dedicated equipment will mitigate errors in identifying the turning point. Initially, it was determined that conductivity measurement should be performed using a sensor and a system that processes this information to be displayed in real-time on a screen, similar to a typical data acquisition and supervision system. In these circumstances, the development of equipment becomes feasible by employing an embedded system on a single-board computer and using free and open-source technologies. Once monitoring strategies and algorithms were defined, eight samples of different bentonites were characterized using methylene blue as a surfactant. For comparison purposes, tests were conducted in the traditional way and using the equipment. Uniquely, conductivity measurement and the identification of the turning point were carried out in an automated manner, precisely calculating the CEC of the evaluated samples and displaying the result in real-time. The process automation proved to be highly effective and efficient for evaluating the CEC of samples.

KEYWORDS: CMC, CEC, automation, Bentonite Clays

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Classificação dos materiais cerâmicos.	20
Figura 2: Estrutura da argila bentonítica “ <i>in natura</i> ”.	23
Figura 4: Variação da condutância em função da concentração de SDS.	24
Figura 5: Resultado da CMC para a argila Verde Lodo.	25
Figura 6: Correlação entre a CTC (azul de metileno) e a CMC em mEq/100g.	25
Figura 7: Tela do supervisor para controle de temperatura e pressão.	30
Figura 8: Componentes físicos de um sistema supervisor.	30
Figura 9: Configuração típica de um SoC ARM.	33
Figura 10: Esquema de pino do arduino nano.	40
Figura 11: Visão geral das entradas e saídas do RPi 3 B+.	43
Figura 12: Display touchscreen para Raspberry Pi.	44
Figura 13: TDS Meter v1.0.	44
Figura 14: Fluxograma do processo de caracterização da CTC de uma amostra.	47
Figura 15: Conexão simplificada entre os dispositivos do protótipo.	48
Figura 14: Coleta automatizada dos dados de condutividade.	49
Figura 17: Desenho da montagem do protótipo.	52
Figura 18: Fabricação da caixa por manufatura aditiva.	52
Figura 19: Componentes eletrônicos montados na estrutura.	53
Figura 20: Interface do equipamento.	54
Figura 21: Fluxograma simplificado do algoritmo da interface gráfica.	55
Figura 22: Fluxograma simplificado do algoritmo executado no arduino.	56
Figura 23: Instrumento e equipamento em bancada para comparar aferições.	57
Figura 24: Resultado do ensaio da CTC pelo método tradicional da titulação do azul de metileno no papel filtro.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Motivos para desenvolvimento e uso de FOSS.	35
Tabela 2: Intensidade de uso de FOSS nos setores econômicos.	36
Tabela 3: Características do sensor de condutividade.	45
Tabela 4: Bentonitas usadas nos experimentos.	45
Tabela 5: CTC das amostras de argilas pelo método tradicional com Azul de Metileno.....	58
Tabela 6: Dados do ensaio de CMC.	67
Tabela 7: Comparação dos valores de CTC em mEq/100g para os dois métodos.	68

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Perfil de condutividade específica vs [SDoD] (a) e de condutividade equivalente vs raiz quadrada da [SDoD] em 0,6 de fração molar.	26
Gráfico 2: Curva de correlação entre as medidas feitas no condutivímetro de bancada e no protótipo.	57
Gráfico 3: Condutividade da amostra de Bentogel.	59
Gráfico 4: Condutividade da amostra de Brasgel.	59
Gráfico 5: Condutividade da amostra de Chocobofe.	60
Gráfico 6: Condutividade da amostra de Chocolate.	60
Gráfico 7: Condutividade da amostra de Cloisite Na+.	61
Gráfico 8: Condutividade da amostra de Bentonita DASL.	61
Gráfico 9: Condutividade da amostra de Bentonita RF.	62
Gráfico 10: Condutividade da amostra de Verde Lodo.	62
Gráfico 11: CMC da amostra de Bentogel.	63
Gráfico 12: CMC da amostra de Brasgel.	63
Gráfico 13: CMC da amostra de Chocobofe.	64
Gráfico 14: CMC da amostra de Chocolate.	64
Gráfico 15: CMC da amostra de Cloisite Na+.	65
Gráfico 16: CMC da amostra de Bentonita DASL.	65
Gráfico 17: CMC da amostra de Bentonita RF.	66
Gráfico 18: CMC da amostra de Verde Lodo.	66
Gráfico 19: Tendência e regressão linear entre os métodos para calcular CTC.	68

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AD	Analogico para Digital
ARM	Advanced RISC Machine
BUN	Bentonit União Nordeste
CA	Código Aberto
CAC	Computer Aided Characterization (Caracterização Auxiliada por Computador)
CAD	Computer Aided Design (Projeto Auxiliado por Computador)
CAE	Computer Aided Engineering (Engenharia Auxiliada por Computador)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Manufatura Auxiliada por Computador)
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CMC	Capacidade Micelar Crítica
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPU	Central Process Unity (Unidade de Processamento Central)
CTC	Capacidade de Troca de cátions
DA	Digital para Analógico
FOSS	Free Open Source Software (Software Livre e de Código Aberto)
FSF	Free Software Foundation
GUI	Graphical User Interface (Interface Gráfica de Usuário)
HL	Hardware Livre
I2C	Inter-Integrated Circuit (Circuito Inter-integrado)
IDE Integrado)	Integrated Development Environment (Ambiente de Desenvolvimento Integrado)
IHM	Interface Humano Máquina
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
OPC	OLE for Process Control
PC	Personal Computer (Computador Pessoal)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impresso)
PWM	Pulse Width modulation (Modulação por Largura de Pulso)

RAM	Random Access Memory (Memória de Acesso Ramdômico)
RLS	Regressão Linear Simples
ROM	Read Only Memory (Memória Apenas de Leitura)
RPi	Raspberry Pi
RTAI	Real Time Application Interface
SBC	Single Board Computer (Computador em Placa Única)
SCADA	Supervisory Controle And Data Acquisition (Controle Supervisório e Aquisição de Dados)
SL	Software Livre
SO	Sistema Operacional
SoC	System on Chip
SPI	Serial Peripheral Interface (Interface Periférica Serial)
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (Transmissor/Receptor Universal Assíncrono)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
1.1. Objetivos.....	19
1.1.1. Objetivo Geral	19
1.1.2. Objetivos específicos.....	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. MATERIAIS CERÂMICOS	20
2.1.1. Argilas Bentonitas	21
2.1.2. Capacidade de troca de Cátions (CTC)	22
2.1.3. Técnicas de determinação de CTC	23
2.1.4. Caracterização da CMC	26
2.2. CARACTERIZAÇÃO AUXILIADA POR COMPUTADOR (CAC).....	27
2.2.1. Caracterização de Materiais	27
2.2.2. Ferramentas computacionais	27
2.2.3. Caracterização Auxiliada por Computador (CAC)	28
2.3. SISTEMAS DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	29
2.3.2. Arquitetura de um Sistema supervisório	30
2.4. SISTEMAS EMBARCADOS	31
2.4.3. Microcontroladores	32
2.4.4. Computador em Placa Única.....	32
2.4.5. Sistema Operacional embarcado	33
2.5. TECNOLOGIAS DE CÓDIGO ABERTO.....	34
2.5.1 <i>Software</i> Livre	34
2.5.2 Hardware Livre	37
2.5.3. Tecnologias livres na indústria.....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. MATERIAIS.....	40
3.1.1. Arduino nano.....	40
3.1.2. Scilab.....	41
3.1.3. Raspberry Pi 3 modelo B+	42
3.1.4. Tela 7" touchscreen	43
3.1.5. Sensor de condutividade	44
3.1.7. Bentonitas.....	45

3.1.8. Tensoativo	45
3.2. MÉTODOS	46
3.2.1. Planejamento do processo automatizado.....	46
3.2.2. Interligação dos componentes do sistema	48
3.2.3. Modelagem e fabricação da estrutura do protótipo	48
3.2.4. Desenvolvimento do sistema de controle do processo	49
3.2.5. Calibração do sensor	49
3.2.6. Cálculo da CTC	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Estrutura do protótipo	52
4.2. Interface de monitoramento do processo	53
4.3. Calibração do sensor	57
4.4. Medição da CTC das amostras	58
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
REFERÊNCIAS	73
APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DA ESTRUTURA E ESQUEMA ELÉTRICO	78
APÊNDICE B1 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BRASGEL	94
APÊNDICE B2 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BENTOGEL.....	95
APÊNDICE B3 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BENTONITA RF	96
APÊNDICE B4 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BENTONITA DASL.....	97
APÊNDICE B5 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA CHOCOLATE ...	98
APÊNDICE B6– CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA CHOCOBOFE	99
APÊNDICE B7 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA VERDE LODO	100
APÊNDICE B8 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA CLOISITE NA+	101
APÊNDICE C – EXEMPLO DE RELATÓRIO CRIADO PELO DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO	102

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica está intimamente ligada ao desenvolvimento de novos materiais e processos produtivos. Assim como são fundamentais para computação atual, por exemplo, sem a tecnologia em materiais semicondutores os dispositivos eletrônicos não teriam alcançado seu desempenho e popularidade. A produção e o processamento de uma vasta gama de materiais em produtos acabados levam consigo quatro fatores interdependentes, sendo eles: composição, propriedades, processamento e aplicação. Também conhecido como tetraedro dos materiais, esse conceito demonstra que os fatores dependem um dos outros. Dessa forma, por exemplo, para determinada aplicação é requerido um conjunto de propriedades de um material, que, para obtê-las, precisará ter uma composição específica e ser processado de forma a favorecer o surgimento das características desejadas.

Assim como os grupos dos polímeros e dos metais, as cerâmicas possuem propriedades únicas que, se exploradas e processadas adequadamente, trazem à luz uma imensa quantidade de aplicações. Dentre as diversas aplicações das argilas bentoníticas, inseridas no grupo das cerâmicas, está o seu emprego como fluido de perfuração de poços, seja a base de água ou óleo, sendo a argila bentonita a base de óleo utilizada nos casos em que as perfurações são sensíveis ao contato com a água e em perfurações ultra profundas. Nesse caso, a bentonita não pode ser usada sem um prévio tratamento orgânico para que se torne hidrofóbica, podendo vir a ser dispersa em meio orgânico. Após tratadas para esse fim essas argilas são chamadas de argilas organofílicas (FERREIRA, 2009).

Desse modo, as alterações químicas nas argilas permitem ajustes nas suas propriedades físico-químicas, concedendo-lhes funcionalidades que garantem dezenas de aplicações industriais (SILVA & FERREIRA, 2008). As argilas bentoníticas, também chamadas de esmectitas, são caracterizadas por sua capacidade de troca de cátions, que quantifica o número de cátions interlamelares trocáveis em um processo de modificação química por cátions orgânicos ou inorgânicos (TEIXEIRA NETO & TEIXEIRA NETO, 2009). O número total de cátions trocáveis que uma argila pode realizar por adsorção é chamado de Capacidade de Troca de Cátions (CTC). Quanto maior a CTC da argila, maior o número de cátions que esta pode reter. Por consequência, as argilas esmectíticas são as argilas que apresentam as maiores CTC (MENEZES et al, 2010).

Portanto, dadas as especificidades de sua aplicação, para que a argila bentonítica possa exercer todas as suas funções, suas propriedades físico-químicas e reológicas (viscosidade plástica, viscosidade aparente etc) devem ser cuidadosamente controladas como forma de garantir o seu bom desempenho. As argilas bentoníticas geralmente possuem, em elevado grau, propriedades plásticas e coloidais, como também apresentam grandes variações em suas propriedades físicas. Essas variações ocorrem pelo fato de haver mudanças na natureza dos cátions trocáveis que neutralizam a estrutura cristalina e a fatores estruturais composicionais como as modificações que ocorrem na população das posições octaédricas (SOUZA SANTOS, 1975, apud BRASILEIRO, 2016).

Diante do exposto, a capacidade de troca catiônica é uma propriedade importante das argilas, pois pela troca de cátions pode-se modificá-las quimicamente, influenciando diretamente sobre suas propriedades físico-químicas (TEIXEIRA NETO & TEIXEIRA NETO, 2009).

Consequentemente, para as argilas organofílicas em fluidos de perfuração usados como agentes viscosificantes, o seu comportamento reológico é fundamental para atender as normas técnicas e necessidades do mercado.

Isto posto, vários são os métodos convencionais utilizados para determinar a CTC de argilas, dentre eles, é comum utilizar a técnica de adsorção de azul de metileno. O método é baseado no gotejamento do azul de metileno em um papel com a amostra, até que uma leve coloração apareça ao redor do círculo formado pela argila. Ao aparecer o anel azulado, e este persistir, o ponto de virada está determinado. A CTC é calculada manualmente com base no volume que foi gotejado, na massa da amostra e da concentração do azul de metileno (BRASILEIRO, 2016).

Por sua vez, a Concentração Micelar Crítica (CMC) também pode ser usada para calcular a CTC de argilas bentoníticas. Para cada tipo de tensoativo (elemento que modifica a tensão superficial do líquido) existe uma concentração na qual todas as superfícies já estão ocupadas e a quantidade de tensoativo excedente atinge uma concentração mínima necessária para o início de formação de micelas. Essa concentração, portanto, é uma característica físico-química do tensoativo utilizado e é chamada de Concentração Micelar Crítica. A CMC de um tensoativo pode ser medida pela avaliação de qualquer propriedade físico-química que seja alterada pela organização das moléculas em micelas, como a tensão superficial e a solubilização. No caso de tensoativos iônicos, utiliza-se também a variação da condutividade, pois essa propriedade cresce com a concentração de tensoativos livres em solução, mas deixa de crescer com o início de formação de micelas. (DALTIM, 2011).

Destarte, Brasileiro (2016), ao correlacionar o método do azul de metileno com o método da Concentração Micelar Crítica (CMC), constatou que este último é melhor para calcular a CTC de uma argila bentonita, apesar de serem experimentos semelhantes. A CMC se mostrou o melhor método, pois torna fácil a interpretação dos resultados, apresentando uma subjetividade menor na escolha do ponto de virada. A determinação da CTC ocorreu medindo os pontos de virada através da condutividade elétrica da solução.

A despeito da CMC ter se mostrado um método melhor, ainda apresenta um grau de subjetividade, cenário que pode ser aprimorado com aquisição automatizada de dados. Tanto o método do azul de metileno, quanto a CMC demandam a execução de tarefas repetitivas para movimentação de amostras, dosagem de compostos, controle das variáveis de processo e medição manual de variáveis, conforme demonstrado durante os experimentos de Brasileiro (2016), cujo trabalho envolveu realização de sucessivas titulações e dezenas de aferições de condutividade, ou seja, um processo mecânico repetitivo e exaustivo.

Assim, fica evidenciada a necessidade de haver equipamentos que automatizem o processo de determinação da CTC, reduzindo a probabilidade de erros e aumentando a velocidade de execução. Além disso, dispositivos desse tipo usados em laboratório tendem a ter custo elevado e o usuário necessitará do fornecedor sempre que tiver algum tipo de ajuste, calibração ou reparo para realizar.

Visto que as medições realizadas no método da CMC podem ser aferidas de forma automatizada e que outras variáveis podem ser controladas, a automatização do processo se mostra a melhor solução para torná-lo mais eficiente. Dessa forma, os resultados para cálculo da CTC serão mais precisos e os dados gerados poderão ser melhor analisados, podendo render

novas conclusões a respeito do tema. Por consequência, além de proporcionar mais segurança e promover padronização do processo, a automatização do procedimento através de um equipamento dedicado acarretará na diminuição e/ou mitigação dos erros de cálculo, atrasos no procedimento e erros de digitação, por exemplo. A automatização do processo pode proporcionar redução no tempo de processamento, melhorar monitoramento do processo, rapidez na geração de relatórios, maior eficiência na obtenção de resultados, criação de banco de dados automático e melhorar repetibilidade das operações. O processo de implementação de um modelo de automação laboratorial gera benefícios importantes para a instituição, além de, cada vez mais, ser fonte geradora de informação com impacto na tomada de decisões (CAMPANA & OPLUSTIL, 2011).

Além do mais, durante o desenvolvimento do sistema é possível a adoção de uma arquitetura facilmente encontrada no mercado e até aquelas de código aberto (*open source*), assim como seus protocolos de comunicação propiciam maior flexibilidade e integração ao sistema. Isso facilita o interfaceamento com sistemas já existentes ou abertos, como os sistemas baseados em Linux, por exemplo

Nos últimos anos, uma alternativa que vem crescendo na indústria e na academia, como parte de suas estratégias de inovação e desenvolvimento, é a adoção de *software* livre (SL) e *hardware* livre (HL), tecnologias de código aberto (CA). A adoção de *software* livre como paradigma do desenvolvimento de projetos pode ser resumida em cinco argumentos (SILVEIRA, 2004):

1. Argumento macroeconômico (custos);
2. Argumento de segurança;
3. Argumento da autonomia tecnológica;
4. Argumento da independência de fornecedores;
5. Argumento democrático.

O SL apresenta grandes vantagens como: custo social baixo, independência de um único fornecedor, desembolso inicial próximo de zero, suporte abundante e gratuito e sistemas e aplicativos muito configuráveis (SILVEIRA, 2004). Com exceção do custo inicial, o hardware possui as mesmas características do software. Isso acarreta diretamente na criação de serviços e produtos com custo, qualidade e características atrativas. No meio acadêmico, o SL não representa apenas redução de custos, mas também eficiência, confiabilidade e flexibilidade (SILVA & CUNHA, 2006). Acrescenta-se ainda que, dessa forma, as publicações acadêmicas não correm risco de serem embargadas devido ao uso de soluções proprietárias e os pesquisadores não ficam dependentes de um único fornecedor de tecnologia.

Diante do exposto, o presente trabalho se justifica pela necessidade de haver uma ferramenta que otimize a geração de resultados na determinação de uma variável tão fundamental quanto a CTC.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver e construir equipamento automatizado que realize a medição da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) pelo método da Concentração Micelar Crítica (CMC).

1.1.2. Objetivos específicos

Para o desenvolvimento e interpretação dos resultados deste trabalho, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- a) Usar *software* e *hardware* livre e de código aberto no desenvolvimento do equipamento;
- b) Realizar ensaios e calibração dos equipamentos;
- c) Calcular CTC de amostras usando o equipamento;
- d) Avaliar resultados obtidos e comparar com a literatura;
- e) Correlacionar os resultados do processo automatizado com o manual;
- f) Depositar patente e disponibilidade comercial.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os conceitos fundamentais para desenvolvimento da pesquisa proposta e resolução do problema apontado. O estado da arte apresentado tem o objetivo de delinear a importância do material estudado, das técnicas e tecnologias empregadas, assim como elucidar os impactos dos resultados obtidos.

2.1. MATERIAIS CERÂMICOS

As cerâmicas, compostas em sua maioria por materiais inorgânicos e não metálicos, eram representadas, até 60 anos atrás, pelas louças, porcelanas, tijolos, telhas e vidros. Agora conhecidas como cerâmicas tradicionais, a maioria dos componentes desse grupo tem a argila como matéria-prima principal (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2018, p.406). Atualmente as cerâmicas têm uma gama de aplicações muito mais ampla, podendo ser classificada conforme a matéria-prima, propriedades e áreas de utilização, por exemplo. Na figura 1 é apresentada uma forma de classificar as cerâmicas de forma geral.

Figura 1: Classificação dos materiais cerâmicos.



Fonte: Adaptado de ABCERAM (2023).

A classificação das cerâmicas, mostrada na figura 1, explicita a diversidade desses materiais e suas aplicações. Os materiais cerâmicos são conhecidos por suas propriedades específicas, que os tornam valiosos em uma ampla gama de indústrias, desde eletrônicos até construção civil. A classificação dos materiais cerâmicos pode ser feita com base em várias características, como composição química, estrutura cristalina, propriedades físicas e aplicações.

A classificação dos materiais cerâmicos é essencial para ajudar os engenheiros e pesquisadores a selecionar o material cerâmico adequado para uma determinada aplicação, levando em consideração as propriedades necessárias, o ambiente de uso e os requisitos de desempenho. Cada categoria de material cerâmico tem suas próprias características distintas, o que permite uma ampla variedade de aplicações em diversas indústrias, contribuindo para avanços tecnológicos e científicos significativos.

Nesse contexto, destacam-se as cerâmicas avançadas ou Cerâmicas de Alta Tecnologia que ao longo dos anos foi o tipo de material que mais teve novas aplicações. Eugênio et al. (2019, p.92) define as cerâmicas avançadas da seguinte forma:

“Esses materiais avançados apresentam características individualmente projetadas para servir aplicações específicas de modo a aperfeiçoar um conjunto particular de propriedades requeridas. Muitas dessas cerâmicas técnicas modernas exibem propriedades que nunca foram antes pensadas pelos ceramistas do passado.”

Como apontado por Eugênio et al., p.93 (2019), ainda pode se dizer que:

“O surgimento das cerâmicas avançadas começou com a necessidade de sofisticação e aprimoramento tecnológico dos materiais cerâmicos em diversas áreas. Basicamente, as cerâmicas avançadas e as tradicionais são iguais, podendo ser aplicadas para as mesmas finalidades, porém o número de variáveis envolvidas no processamento é reduzido, a matéria-prima é extremamente pura, em sua maioria sintética e por isso muito cara, o processo é controlado rigorosamente e as caracterizações são técnicas sofisticadas quando se trata da cerâmica avançada.”

Assim, os processos de fabricação desses materiais são diferentes dos processos com cerâmicas tradicionais. Além de que, o rigor no controle do processo se dá de acordo com a aplicação do material, pois quanto mais específicas as propriedades requeridas, mais complexo será.

Em vários casos, as cerâmicas avançadas são determinantes para o sucesso da operação, visto que, de outra forma, seria muito mais difícil ou impossível a sua realização. Os fluidos usados na perfuração de poços de petróleo, por exemplo, influenciam na profundidade alcançada, dado que são responsáveis por transportar os cascalhos gerados até a superfície, exercer pressão hidrostática sobre as formações, resfriar e lubrificar a broca de perfuração (BRITO, 2020, p.44). Contudo, para obter tal desempenho o fluido precisa ser devidamente processado (FERREIRA, 2009, p.11), o que o torna um material cerâmico de alta tecnologia (EUGÊNIO, 2019). Por fim, esses fluidos de perfuração são comumente fabricados à base de bentonita, uma argila que concede ao fluido as propriedades que garantem um bom desempenho no carreamento de fragmentos rochosos do fundo do poço até a superfície.

2.1.1. Argilas Bentonitas

No geral, as argilas são minerais de origem natural que possuem uma estrutura cristalina laminar. Elas são compostas principalmente por silicatos hidratados de alumínio, com a presença de outros elementos, como ferro, magnésio, potássio e cálcio. Sua formação ocorre ao longo de milhões de anos, através da decomposição de rochas e minerais, sendo encontradas em diversas regiões do mundo (SOUZA SANTOS, 1989, p.1).

Já as bentonitas, por sua vez, pertencem à classe das esmectitas e são caracterizadas pela sua versatilidade e por ser o tipo de argila com maior quantidade de aplicações industriais. Assim, esmectita é o termo usado para nomear o grupo de minerais que abrange a montmorillonita, beidelita, nontronita, hectorita e saponita, cujo argilomineral montmorillonita é a predominante. Cada um deles forma uma estrutura similar, contudo quimicamente diferente. Dentre os citados, a montmorillonita também é a mais encontrada nas reservas possuindo as variedades cálcica e sódica, que se baseiam no íon trocável (LUZ e OLIVEIRA, 2008, p.239).

Dentre suas propriedades, as bentonitas são conhecidas por sua alta capacidade de expansão, quando molhadas, formando géis tixotrópicos; alta capacidade de absorção, podendo absorver água e outras substâncias com óleo e toxinas, e tornando-a eficiente na remoção de impurezas e purificação de líquidos; e, por fim, alta plasticidade, quando misturadas com água, permitindo a sua moldagem em várias formas e estruturas. Todas essas propriedades estão diretamente relacionadas com sua boa capacidade de trocar íons.

Dadas suas principais propriedades, conforme Luz e Oliveira (2008, p.245-247), dentre as suas diversas aplicações destacam-se:

- **Indústria de fundição:** A bentonita é usada como agente ligante em moldes de fundição de metal. Ela permite a criação de moldes flexíveis, que são facilmente removidos após o resfriamento do metal. Também é usado como aglomerante na pelletização de minério de ferro;
- **Cosméticos e cuidados pessoais:** Devido à sua capacidade de absorver água e óleo, as argilas bentoníticas são usadas em produtos cosméticos, como máscaras faciais e xampus. Elas ajudam a remover impurezas da pele e cabelo, proporcionando uma sensação de limpeza;
- **Agricultura:** As bentonitas são utilizadas na agricultura como agentes de condicionamento do solo. Elas melhoram a retenção de água e nutrientes, promovendo o crescimento saudável das plantas;
- **Pet litter:** O uso mais doméstico das bentonitas é como areia sanitária usada como absorvente de dejetos de animais domésticos;
- **Indústria de petróleo e gás:** As bentonitas são amplamente utilizadas na perfuração de poços de petróleo e gás como fluido de perfuração. Elas ajudam a estabilizar as paredes do poço, remover detritos e resfriar a broca.

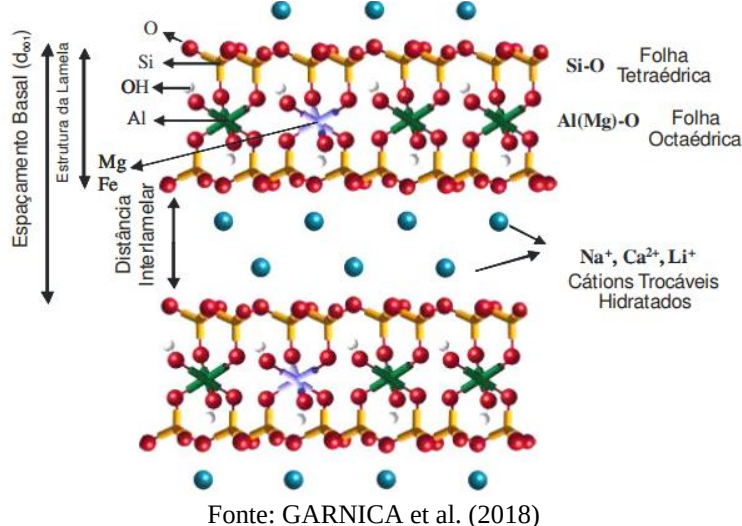
Dentre as suas limitações há a sensibilidade à temperatura e o fator contaminação. As bentonitas podem sofrer alterações em suas propriedades quando expostas a temperaturas elevadas. Desse modo, elas podem perder parte de sua capacidade de expansão e absorção. Por outro lado, elas também podem estar sujeitas à contaminação por minerais indesejados, o que pode afetar suas propriedades e aplicabilidade em certos setores (EUGÊNIO, 2019).

2.1.2. Capacidade de troca de Cátions (CTC)

Como apontado por Souza Santos (1989), a bentonita é um mineral argiloso que a proporciona uma alta capacidade de troca de cátions (CTC), devido à presença de cargas negativas nas superfícies das camadas, como pode ser visto na figura 2. Dessa forma, a CTC é

influenciada por características específicas da argila, como composição mineralógica, área superficial, tamanho de partícula e estrutura cristalina

Figura 2: Estrutura da argila bentonítica “*in natura*”.



Conforme apresentado na figura 2 e descrito por Ferreira (2009) e Garnica et al. (2018), a bentonita é formada por duas folhas de silicato tetraédrica que envolvem uma folha octaédrica, unidas pela ligação em comum de oxigênio. O empilhamento das camadas é regido por forças polares relativamente fracas e por forças de Van der Waals e, no espaço entre essas placas, chamado de camada interlamelar, estão os cátions trocáveis como Na⁺, Ca²⁺ e Li⁺, por exemplo. Esses cátions são fixados eletrostaticamente, compensando as cargas negativas geradas por substituições ocorridas no reticulado cristalino.

Estudos de Fernandes et al (2023) demonstraram que a composição mineralógica da argila bentonita desempenha um papel fundamental na capacidade de troca de cátions. Diferentes minerais presentes na argila, como montmorilonita, beidellita e saponita, possuem diferentes cargas superficiais e geometrias de cristal, afetando a capacidade de adsorção de cátions. Além disso, a área superficial da bentonita, determinada pelo tamanho de partícula e pela porosidade, também influencia a capacidade de troca de cátions, uma vez que maior área superficial proporciona maior superfície de contato para a interação com íons.

Na prática, quanto maior a CTC de uma argila, maior será a sua capacidade de adsorção, ou seja, maior será a sua capacidade de retenção e, consequentemente, inchamento. Enquanto a maioria dos argilominerais tem a capacidade de trocar cátions em torno de 40mEq/100g, as esmectitas superam esse valor, variando geralmente entre 80 e 150mEq/100g de argila seca (MENEZES et al, 2008).

2.1.3. Técnicas de determinação de CTC

Visto que a CTC de uma argila é uma característica preponderante para determinar suas aplicações, é mandatório realizar a sua caracterização para controle de qualidade do processo de organofilização.

A determinação da CTC das argilas bentoníticas pode ser realizada por meio de diversas técnicas analíticas. Essas técnicas permitem quantificar a quantidade de cátions que podem ser adsorvidos pelas partículas de argila, fornecendo informações importantes sobre suas propriedades e sua interação com o meio.

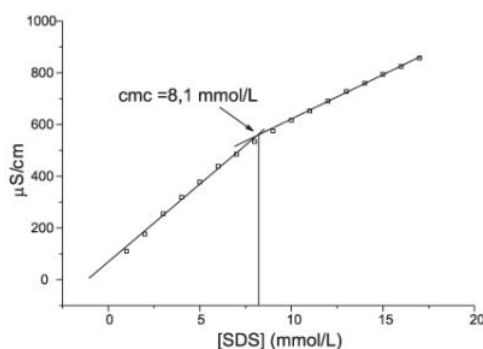
Existem diferentes métodos para medir a capacidade de troca de cátions de argilas bentonitas, mas o mais comum é o método de adsorção de azul de metileno, descrito por Ferreira (2009, p.29, apud FERREIRA et al., 1972). Nesse método, uma solução de azul de metileno é titulada numa solução de argila bentonita previamente preparada e, em seguida, a solução é agitada para que o corante seja adsorvido no processo de troca catiônica da argila. A capacidade de troca catiônica é calculada a partir da quantidade de corante adsorvido até o ponto de saturação da amostra. O ponto de virada será a ocorrência de um anel azul claro circundado o gotejamento no filtro de papel, ou seja, uma avaliação subjetiva e influenciada pela capacidade e experiência do técnico.

Num estudo com argilas bentonitas, Brasileiro (2016) provou de forma inédita a correlação linear e direta entre a caracterização da CTC através do método de adsorção de azul de metileno e através do método usando a Concentração Micelar Crítica (CMC). Esse novo método para calcular CTC apresentou confiança de 95% e, ainda, expôs que a CMC consegue ser um método melhor, pois apresenta menor subjetividade para identificação do ponto de virada.

Por sua vez, a Concentração Micelar Crítica (CMC) é um parâmetro importante em estudos relacionados a surfactantes e sistemas coloidais. Ela representa a concentração mínima de surfactante necessária para formar micelas, que são agregados moleculares autossuficientes em solução (MORAES e REZENDE, 2004). Para a determinação da CMC, usualmente são aplicados métodos de condutividade elétrica, tensão superficial, espectrometria e fluorescência nas amostras de materiais. O tensoativo é adicionado gradualmente até alcançar o ponto de virada e passar a formar micelas.

Um estudo conduzido por Moraes e Rezende (p. 701, 2004) investigou a determinação da CMC de ácidos húmicos por medidas de condutância ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em função da molaridade da amostra (mmol/L). O tensoativo usado foi o SDS ($\text{C}_{12}\text{H}_{25}\text{OSO}_3\text{Na}$) e o valor de CMC em sua análise por condutividade foi obtido pela intercessão de duas retas, como mostrado na figura 4. A CMC se deu em $8,1 \text{ mmol}/\text{L}$ ou $0,0081 \text{ mol}/\text{L}$.

Figura 3: Variação da condutância em função da concentração de SDS.

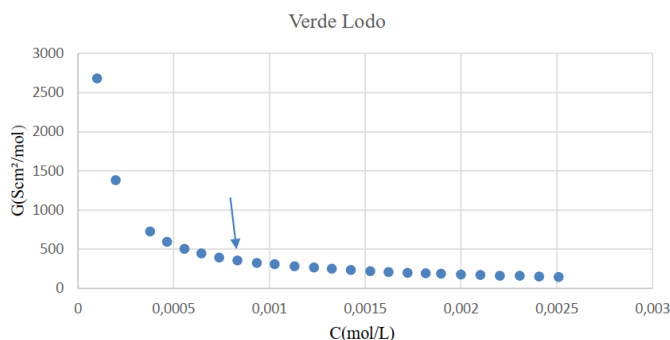


Fonte: Moraes e Rezende (p. 702, 2004)

A mudança do módulo da reta inicial, em comparação com a final, se dá em função da concentração de tensoativo (primeiro momento) e formação de micelas (segundo momento).

Já Brasileiro (2016), determinou a CMC do tensoativo através da análise do comportamento da condutividade molar ($S \cdot \text{cm}^2/\text{mol}$) em função da molaridade (mol/L), como pode ser visto na figura 5.

Figura 4: Resultado da CMC para a argila Verde Lodo.



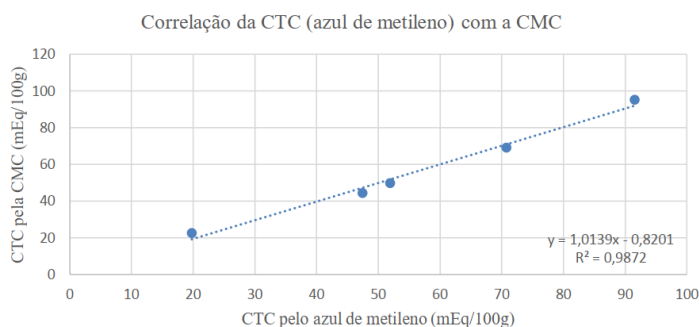
Fonte: Brasileiro (2016)

Brasileiro (p. 38, 2016) aponta que:

“O ponto da CMC é determinado quando na região do gráfico da condutividade molar versus a concentração molar, verifica-se o início de um comportamento linear, de forma que, a medida que se aumenta a massa do tensoativo a ser dissolvida no sistema, tende-se a um valor limite de concentração que determina a saturação na interface. Após atingido esse limite, as moléculas não podem mais se adsorver, dando início ao processo de formação espontânea de agregados moleculares (micelas), também chamado de processo de micelização.”

Por fim, Brasileiro (2016) ainda converteu o peso molecular do tensoativo para $\text{mEq}/100\text{g}$, desse modo determinando a massa do tensoativo em gramas para cada 100g de argila e o equiparando a unidade comumente usada para medir a CTC. Na figura 6 é mostrada a correlação quase perfeita entre os dois métodos, comprovando que é possível medir a CTC de uma argila através da CMC.

Figura 5: Correlação entre a CTC (azul de metileno) e a CMC em $\text{mEq}/100\text{g}$.



Fonte: Brasileiro (2016)

2.1.4. Caracterização da CMC

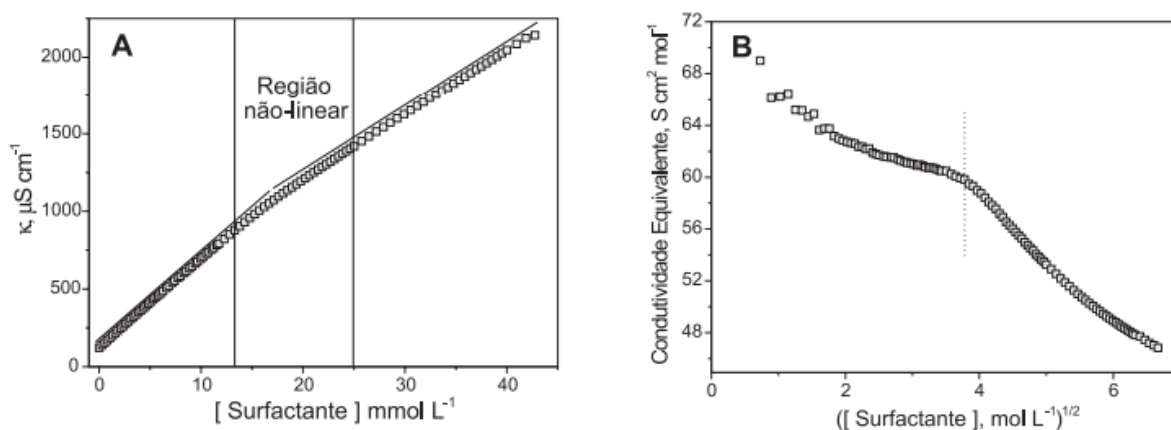
Comumente, a análise do comportamento de tensoativos é feita por meio da condutividade elétrica, pois essa substância apresenta uma série de propriedades que favorecem sua caracterização dessa forma. A principal característica pela qual ele se destaca é a formação de micelas, o que resulta em um aumento significativo na concentração de íons na solução, o que leva a um aumento na condutividade elétrica (DALTIM, 2011). A capacidade de formar micelas é uma característica fundamental dos tensoativos e é facilmente detectada por meio da condutividade elétrica.

Outro fenômeno característico é a variação da condutividade com a variação da concentração de tensoativo na solução. Isso ocorre de forma não linear com a concentração do tensoativo. Abaixo da CMC, a condutividade tende a ser relativamente baixa, mas acima da CMC, ocorre um aumento acentuado na condutividade devido à formação de micelas.

Por fim, a última característica marcante é que as medidas de condutividade são relativamente fáceis de implementar e podem ser realizadas com equipamentos de laboratório padrão, além da possibilidade de ser automatizada.

Em síntese, as medidas de condutividade são particularmente adequadas para caracterizar tensoativos devido à forma como respondem à formação de micelas e à variação na concentração. Como exemplo, Eising et al. (2008), afirmou que a determinação da CMC de amostras analisadas foi melhor executada graficando os resultados de condutividade na forma de condutividade equivalente vs. Raiz quadrada de [surfactante], como mostrado no gráfico 1.

Gráfico 1: Perfil de condutividade específica vs [SDoD] (a) e de condutividade equivalente vs raiz quadrada da [SDoD] em 0,6 de fração molar.



Fonte: Eising et. al (2008).

Esse comportamento para condutividade equivalente se equipara ao que se encontra na literatura, pois a curva característica é facilmente interpretada.

2.2. CARACTERIZAÇÃO AUXILIADA POR COMPUTADOR (CAC)

Neste tópico serão abordados os conceitos que levam ao entendimento dessa ferramenta tecnológica para auxílio no levantamento de informações acerca do material estudado.

2.2.1. Caracterização de Materiais

A caracterização de materiais desempenha um papel fundamental tanto na área da Ciência quanto na Engenharia de Materiais. Isso não apenas auxilia na seleção criteriosa de materiais para atender às demandas específicas dos processos de produção, mas também na otimização de todas as etapas envolvidas. Além disso, visa aprimorar o desempenho, encontrar as aplicações ideais, levando em consideração as propriedades intrínsecas de cada material, e, acima de tudo, agregar valor econômico aos materiais (PIO et al., 2022, p.694).

Além dos benefícios mencionados, a caracterização desempenha um papel crucial na previsão de fenômenos físicos e químicos que os materiais podem enfrentar durante sua vida útil. Essa previsão se torna possível por meio da exposição dos materiais a condições extremas, como testes de temperatura, ensaios destrutivos, simulações de fadiga e outras situações que permitem antecipar o comportamento dos materiais diante de circunstâncias esperadas. Ademais, essa avaliação minuciosa também permite extrair informações em nível atômico, compreender a disposição de defeitos cristalinos e seu impacto, por exemplo, na resistência mecânica, nas propriedades magnéticas, na condutividade térmica e elétrica, e em outras características relevantes (PIO et al., 2022, p.694).

Diante disso, para identificação de tais propriedades, conforme exposto em Brandon e Kaplan (2013), Leng (2013), Ionashiro (2004), Garcia, Spim e Santos (2012) e Callister Jr e Rethwisch (2018) as técnicas de caracterização de materiais mais amplamente utilizadas são: Microscopia Eletrônica de Transmissão (TEM), Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM), Difração de Raios-X (XRD), Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS), Espectroscopia Infravermelha (FTIR), Análise Termogravimétrica (TGA), Ensaio de condutividade, Ensaios Destrutivos e Ensaios Não-Destrutivos.

A aplicação conjunta dessas técnicas de análise tem impulsionado a inovação e o aprimoramento contínuo de produtos e materiais, sendo usada na investigação de suas propriedades ou para controle de qualidade de algum produto.

2.2.2. Ferramentas computacionais

Os computadores desempenham um papel central nas etapas dos processos produtivos em fábricas, processo de desenvolvimento de produtos e processos de engenharia no geral. Com o objetivo de aumentar a produtividade, seu uso abrange desde a caracterização dos materiais até a produção de relatórios em editores de texto, o controle e a gestão de informações, como cronogramas, bem como nos processos logísticos para aquisição de insumos e gestão de estoques. De acordo com Pahl et al. (2005, p. 41), “a aplicação do processamento de dados e da tecnologia da informação contribui tanto para aprimorar o produto quanto para reduzir os custos de projeto relacionados à produção”.

Por isso, em resposta às crescentes demandas, seja em âmbito industrial, empresarial ou acadêmico, várias ferramentas foram e vêm sendo inseridas nas atividades executadas. Nesse contexto surgiram os sistemas auxiliados por computador, conhecidos como *Computer Aided X* (CAx), onde o 'X' representa qualquer tarefa que pode ser automatizada com o uso de um computador. Dentre os mais populares tem-se, conforme Groover (2011, p.9) e Souza e Ulbrich (2009) o *Computer Aided Design* ou Projeto Auxiliado por Computador (CAD), *Computer Aided Engineering* ou Engenharia Auxiliada por Computador (CAE) e *Computer Aided Manufacturing* ou Manufatura Auxiliada por Computador (CAM).

Existem diversas tecnologias que englobam o termo CAx, conforme definido por Pahl (2005, p.45). Essas tecnologias englobam programas que abrangem o cálculo e dimensionamento de peças, subconjuntos e produtos, bem como otimização de componentes e processos. Além disso, incluem ferramentas para a simulação de movimentos e relações entre diversos elementos, entre várias outras funcionalidades. Para cada uma dessas soluções, é atribuída uma nomenclatura específica, refletindo a diversidade de aplicações disponíveis no contexto do CAx.

2.2.3. Caracterização Auxiliada por Computador (CAC)

Nesse contexto surge a Caracterização Auxiliada por Computador (CAC), também chamada de *Computer Aided Characterization* (CADx). Trata-se de uma abordagem que combina técnicas de análise de dados com ferramentas computacionais para obter informações detalhadas sobre materiais e sistemas. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em diferentes áreas da ciência e engenharia, permitindo uma caracterização mais precisa e eficiente de materiais complexos.

Um estudo realizado por Baroni et al. (2006) investigou a caracterização de argilominerais usando técnicas de processamento de imagens. Os autores utilizaram análise morfológica para determinar a distribuição de tamanho de partículas e a forma das partículas de argila. Eles destacaram a importância da caracterização auxiliada por computador na obtenção de informações precisas e confiáveis sobre as propriedades dos argilominerais.

Fan, Lu e Cao (2022) usaram ferramentas computacionais para auxiliar na detecção e fases ferroelétricas usando microscopia de luz polarizada. O estudo revelou que o algoritmo desenvolvido pode ser usado para analisar de forma abrangente o processo de transição de fase em outros monocristais ferroelétricos com estruturas de domínio complexas, aprimorando a precisão da análise.

A caracterização auxiliada por computador também pode ser relacionada às medições de condutividade elétrica e sistemas embarcados, uma vez que o uso de ferramentas computacionais e técnicas de processamento de dados é fundamental para obter e analisar informações relevantes nessas áreas. Essa abordagem permite a obtenção de medidas precisas, processamento de dados em tempo real e controle de sistemas complexos. No campo da medição de condutividade elétrica, a caracterização auxiliada por computador pode ser aplicada para obter dados precisos e confiáveis sobre a condutividade de materiais, fluidos ou soluções. Um exemplo de aplicação dessa abordagem é a medição de condutividade elétrica em solos, que é importante para avaliar a qualidade e a composição dos solos em estudos agrícolas e ambientais.

Convém ressaltar que, segundo Van Vlack (1970, p.105), A condutividade elétrica refere-se à capacidade de deslocamento das cargas elétricas de um ponto a outro. Esse movimento envolve íons ou elétrons, cuja capacidade de mobilidade varia de acordo com os materiais, resultando em um amplo espectro de condutividades. Esse espectro abrange desde os metais altamente condutores até os isolantes praticamente impermeáveis à corrente elétrica. Para tal aferição, serão necessários: o aparelho condutivímetro calibrado, a mostra do material, a sonda ou eletrodo que ficará em contato direto com a amostra e, se for preciso melhorar o contato elétrico, usa-se uma solução condutora.

Um estudo realizado por Almeida et al. (2023) utilizou um sistema embarcado para medição de condutividade elétrica em solos. Os autores destacaram que a caracterização auxiliada por computador permitiu a obtenção de medidas em tempo real e o processamento dos dados para análise posterior. O sistema embarcado foi utilizado para coletar as medições e transmitir os dados para um computador, onde foram analisados e interpretados.

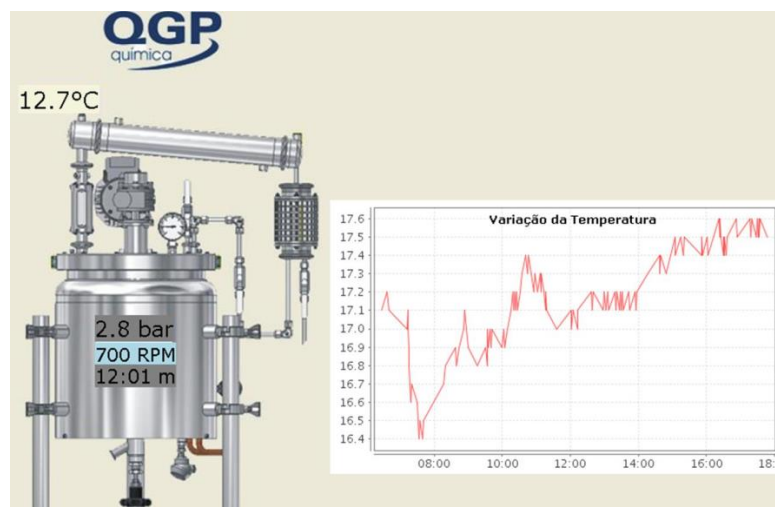
Um estudo conduzido por Fernandes et al. (2019) investigou o uso de sistemas embarcados e técnicas computacionais para monitorar a condutividade elétrica do solo em uma cultura de cana-de-açúcar. Os autores utilizaram um sistema embarcado equipado com sensores de condutividade elétrica para coletar dados em tempo real. Em seguida, esses dados foram processados e analisados por meio de técnicas computacionais para obter informações sobre a umidade do solo e otimizar a irrigação. O estudo demonstrou a viabilidade e a eficácia do uso da caracterização auxiliada por computador e sistemas embarcados no monitoramento de condutividade elétrica em sistemas agrícolas.

2.3. SISTEMAS DE SUPERVISÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Um sistema de supervisão serve como interface para que um operador possa controlar variáveis do processo e acionar dispositivos remotamente. Um sistema supervisório também pode ser definido como uma interface de fácil leitura com o objetivo de converter dados do processo de produção em gráficos ou em “telas amigáveis” (LOPES, 2009, p.6).

Os sistemas supervisórios são usados em processos que precisam ser monitorados e/ou precisam ter seus dados analisados. Todas as informações são armazenadas em bancos de dados e os resultados são apresentados aos operadores e gestores do processo. Na figura 7 é mostrada a tela do supervisório de um sistema de automação para monitoramento e controle da temperatura e pressão do processo.

Figura 6: Tela do supervisório para controle de temperatura e pressão.



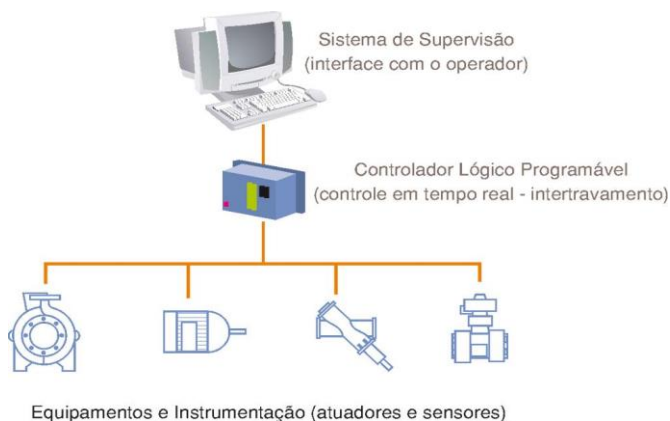
Fonte: ScadaBR (2012).

Os sistemas supervisórios também são conhecidos como SCADA. Contudo, usualmente o termo IHM (Interface Humano Máquina) é usado para descrever os painéis de acesso e acionamento dos equipamentos localizados próximos ao processo. Eles são usados para monitoramento, controle de máquinas, processos e instalações. Os seus principais componentes são o visor (*display*), teclas e botões (para navegação e inserção de dados), barramentos para placas de expansão e portas de comunicação (PAREDE, GOMES e HORTA, 2011).

2.3.2. Arquitetura de um Sistema supervisório

A arquitetura de um sistema diz respeito a maneira como ele é subdividido e organizado. Um supervisório possui vários componentes, os quais desempenham funções essenciais no sistema. Os componentes físicos são os sensores e atuadores, rede comunicação, estações de controle e monitoramento central, como pode ser visto na figura 8.

Figura 7: Componentes físicos de um sistema supervisório.



Fonte: Mecatrônica Atual (2004).

Já os componentes lógicos processam os dados captados e executam as tarefas programadas. O sistema de aquisição e dados, por exemplo, converte as informações dos sensores em informações que podem ser interpretadas pelo sistema. Por sua vez, as interfaces de comunicação são responsáveis por conectar o sistema de supervisão com elementos externos. Esses elementos podem ser: drivers e protocolos.

Um protocolo de comunicação é um conjunto de regras que estabelecem o envio e o recebimento de dados entre equipamentos. Cada equipamento deve estar preparado para se comunicar utilizando determinado protocolo. Por esse motivo foram criados protocolos abertos. Isso possibilita que equipamentos de diferentes fabricantes possam se comunicar sem qualquer incompatibilidade, pois todos usam o mesmo conjunto de regras de envio e recebimento de dados.

2.4. SISTEMAS EMBARCADOS

Segundo Raghavan, Lad e Neelakandan (2006, p.1), “um sistema embarcado é um computador com propósito específico, projetado para atuar em funções específicas das atividades designadas”. Eles estão presentes no cotidiano das pessoas em dispositivos como: telefones residenciais, smartphones, videogames, TVs, carros (sistema de ignição, freio ABS), brinquedos, câmeras digitais, GPS, micro-ondas, geladeiras, roteadores de internet sem fio, aparelhos de som, *tablets*, impressoras, scanners, cercas elétricas e muitos outros.

Devido às constantes inovações da informática, definir um sistema embarcado não é tão simples. Assim é mais apropriado citar suas características mais recorrentes (NOERGAARD, 2005, p. 5)

A primeira característica marcante dos sistemas embarcados é a de serem mais limitados em *hardware* e/ou *software* que os computadores pessoais. Este ponto é verdadeiro para uma parte significativa dos sistemas embarcados existentes. Em termos de *hardware* a limitação pode ser de processamento, memória e consumo de energia, por exemplo. Para o *software* pode ser realizar apenas uma função, não ter muitas funções, não possuir sistema operacional (SO) ou possuir um SO limitado.

Em sequência, um sistema embarcado é projetado para ser dedicado a uma única função, pois a maioria é criada por esse motivo. Contudo, os *smartphones* atualmente podem executar muitas funções, diferente dos telefones móveis dos quais evoluíram. Assim como as *smart* TVs também possuem várias funções.

Por fim, um sistema embarcado possui maior requisito de confiabilidade do que outros sistemas computacionais. Sistemas embarcados em equipamentos médicos e carros, de fato, possuem alta confiabilidade, caso contrário vidas correm perigo. Já *videogames*, *smartphones* e TVs não apresentam risco se não funcionarem corretamente.

Suas principais características são, em resumo, conforme Molloy (2016, p. 56):

- Tendem a ter funções específicas;
- Frequentemente tem limite de processamento, memória e armazenamento disponível;

- Geralmente fazem parte de um sistema maior;
- Possuem aplicações em sistemas críticos, devido a sua confiabilidade
- Frequentemente usado em sistemas de tempo real, os quais suas saídas estão diretamente relacionadas com as suas entradas (sistemas de controle, por exemplo);
- Consomem menos energia e possuem menor custo que os computadores pessoais (PCs).

No que tange seus usos, de acordo com Cunha (2010, p.3), as aplicações para sistemas embarcados podem ser de propósito geral, para sistemas de controle, para processamento de sinais ou comunicação e redes. Para este trabalho o sistema embarcado vai cumprir principalmente a função de processamentos de sinais, pois envolve um grande volume de informação a ser processada em curto espaço de tempo. Os sinais a serem tratados são digitalizados através de conversor Analógico-Digital. Contudo, como fará a comunicação com microcontroladores e executará diferentes *softwares*, também terá uma função de propósito geral, uma vez que, semelhantes aos computadores de mesa, terá maior interação entre o usuário e o sistema. Para esse tipo de aplicação os computadores em placa única são bastante utilizados

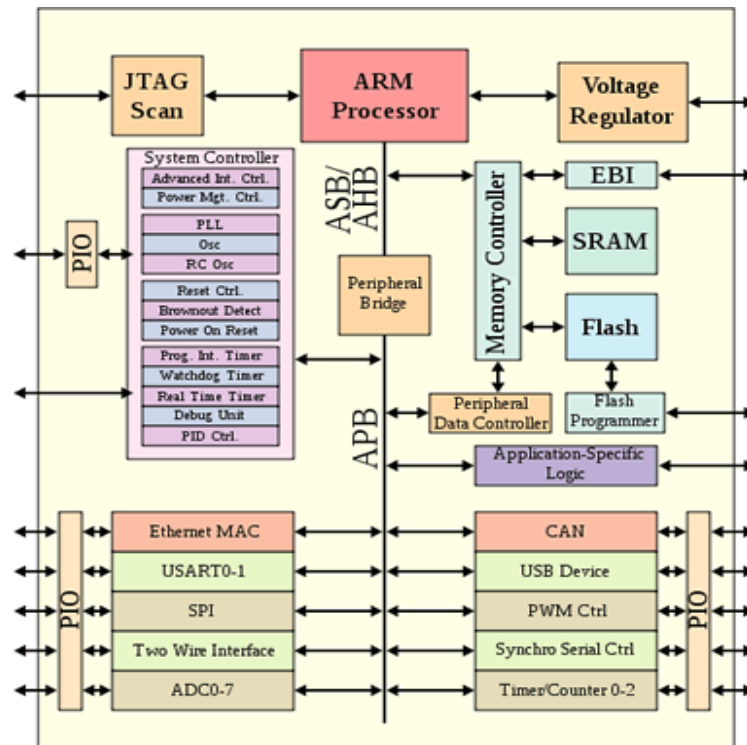
2.4.3. Microcontroladores

O microcontrolador é um chip que contém memória de armazenamento (memória ROM), memória de acesso randômico (memória RAM), unidade central de processamento de dados (CPU), pinos de entrada e saída. Ele é sempre usado para executar funções específicas. O microcontrolador possui todos os seus componentes integrados em um único chip. Os microcontroladores são aplicados tanto em equipamentos domésticos quanto em processos industriais de automação, controle e instrumentação.

2.4.4. Computador em Placa Única

Computador em Placa Única ou *Single Board Computer* (SBC) são computadores que possuem todos os componentes necessários para o seu funcionamento em uma única placa eletrônica, cujo principal elemento é o SoC (*System on a Chip* – Sistema em um Chip). Segundo Maciel (2014), “SoC é um chip eletrônico que reúne todos os elementos básicos de um sistema computacional como CPU, memória principal (RAM), memória secundária (ROM/FLASH) e alguns periféricos”. Atualmente um SoC contém internamente diversos periféricos dos mais variados tipos como I2C, SPI, UART, CAN, entre outros. Ele também pode possuir um processador com arquitetura ARM®, MIPS®, PowerPC™ ou qualquer arquitetura voltada para sistemas embarcados como as citadas. Na figura 9 é mostrado um típico SoC ARM.

Figura 8: Configuração típica de um SoC ARM.



Fonte: Maciel (2014).

Dos SBC que se destacam atualmente no mercado tem-se: Raspberry Pi, A20-OlinuXino-micro, Arduino TRE, Banana Pi, Orange Pi, Cubieboard, BeagleBone Black, BeagleBone Green, C.H.I.P., Odroid-XU4, PineA64, HummingBoard, entre outros.

Convém destacar que a diferença básica entre microcontroladores e os SBC é a capacidade de processamento de dados. Eles são constituídos basicamente pelos mesmos componentes de um computador, mas um SBC possui suporte para vídeo e pode executar sistemas operacionais. Enquanto um microcontrolador terá sua aplicação mais voltada aos sistemas embarcados com função específica, um SBC poderá ser usado como sistema embarcado de propósito geral.

2.4.5. Sistema Operacional embarcado

Conforme Noergaard (2005, p. 383), o sistema operacional (SO) é uma parte opcional de um sistema embarcado. Ele pode ser usado se o processador do sistema puder suportá-lo. Um SO é uma coletânea de bibliotecas e aplicações que visam facilitar o uso e gerenciamento do sistema embarcado. Necessariamente todo SO possui um *kernel* (núcleo). Por sua vez, o *kernel* é responsável pela comunicação entre *software* e *hardware*. Ele também permite que os aplicativos sejam usados e gerencia os recursos do computador (memória e processamento, por exemplo). Portanto um SO embarcado é otimizado para funcionar com uma determinada arquitetura de um determinado processador. Por esse motivo alguns fabricantes mantêm versões de SOs para dar suporte ao seu hardware específico.

Neste trabalho, o SO embarcado será baseado em Linux. Dessa maneira, o uso do Linux tem as seguintes vantagens, segundo Molloy (2016, p. 57):

- É eficiente e escalável, pois pode ser executado desde dispositivos de 8 bits e/ou com programação orientada a objetos até em servidores web, ou seja, ele funcionará em uma grande diversidade de arquiteturas e processadores;
- Possui excelente suporte de código aberto para os seus periféricos;
- É livre, ou seja, não necessita de permissão para usá-lo;
- Seu *kernel* é utilizado massivamente em todo o mundo, dessa forma erros são detectados tão rapidamente quanto são resolvidos.

BeagleBone Black e Raspberry Pi, por exemplo, mantém *kernels* Linux, otimizados para suas plataformas, disponíveis na internet. Assim qualquer um que queira desenvolver um SO ou aplicação já encontrará o *kernel* pronto.

Convém ressaltar que um sistema operacional que utiliza o *kernel* Linux é comumente chamado de GNU/Linux. A denominação ‘GNU’ vem do projeto homônimo que desenvolveu uma extensa série de ferramentas para ser usado em conjunto com o *kernel*. Além das ferramentas, esse projeto também é responsável pela filosofia do SL e deu início a comunidade que dá suporte ao sistema.

2.5. TECNOLOGIAS DE CÓDIGO ABERTO

Compreende tanto *softwares* como *hardwares* de código aberto e vem gerando repercussão no meio acadêmico, empresarial e industrial.

2.5.1 Software Livre

“O movimento software livre é um movimento político para liberdade dos usuários de programas. Um programa livre pertence ao conhecimento humano, mas um privado não” diz Richard Stallman (Impropriários, 2008) fundador da *Free Software Foundation* (FSF) e do movimento no início da década de 1980. Frequentemente confundido com *software* gratuito, o SL se destaca por se preocupar com a comunidade e não com o mercado. Conforme Silveira (2004, p.13), a FSF se refere ao SL como a liberdade dos usuários executarem, copiarem, distribuírem, estudarem, modificarem e aperfeiçoarem o programa. Isso é definido nas quatro liberdades para os usuários:

- **Nº 0:** A liberdade de executar o programa para qualquer propósito;
- **Nº 1:** A liberdade de estudar como o programa funciona e adaptá-lo para suas necessidades. O acesso ao código-fonte é um pré-requisito para essa liberdade;
- **Nº 2:** A liberdade de redistribuir cópias de modo que você possa ajudar ao seu próximo;
- **Nº 3:** A liberdade de aperfeiçoar o programa e liberar os seus aperfeiçoamentos, de modo que toda a comunidade se beneficie.

Software livre é de código aberto, mas nem todo código aberto é software livre, pois ele nem sempre assegura as quatro liberdades. Um fornecedor pode disponibilizar o código fonte do seu software, mas pode restringir a sua distribuição, por exemplo.

É importante distinguir algumas categorias de software como código aberto (CA), gratuito e livre. Há vários softwares proprietários gratuitos como o Adobe Reader®, mas ele não é CA, nem livre. Uma característica marcante do *Software* livre e de Código aberto (do inglês FOSS – *Free and Open Source Software*) é a sua comunidade. Através dela os softwares são testados, avaliados e reparados.

Criada para incentivar a aproximação de entidades comerciais com o *software* livre, a Iniciativa *Open Source* é uma organização dedica a promoção do *software* livre. Sua atuação principal é a de certificar quais licenças se enquadram como licenças de *software* livre e promover a divulgação do *software* livre e suas vantagens tecnológicas e econômicas. Em sua visão, o *software* livre no longo prazo é economicamente mais eficiente e de melhor qualidade e, por isso, deve ser incentivado.

No meio acadêmico SL não representa apenas redução de custos, mas também eficiência, confiabilidade e flexibilidade (SILVA e CUNHA, 2006). No curso de engenharia elétrica da UERJ o SL Scilab substituiu o proprietário Matlab® e constatou-se que ele pode ser usado no ensino e no projeto de sistemas eletrônicos e de controle, segundo Silva e Cunha (2006), professores da área.

Também foi realizada uma pesquisa sobre softwares CAD livre para aplicação em engenharia civil (BIZELLO e RUSCHEL, 2011). Os pesquisadores compararam vários programas com o líder de mercado AutoCAD®. Eles avaliaram três características básicas: recursos 2D, recursos 3D e extensibilidade (capacidade de invocar comandos do programa dentro do código). De forma conjunta nenhum dos SL avaliados (QCAD, PythonCAD e BRL-CAD) corresponderam ao esperado. Todavia, individualmente, cada um se destacou em uma característica.

O *software* livre tem sido muito empregado em programas de inclusão digital no país. Seja nas estações digitais para o uso comunitário de computadores e acesso à internet ou no ensino de robótica, por exemplo. Este último vem sendo realizado em escolas públicas e frequentemente em conjunto com *hardware* livre.

O uso de *software* livre na indústria brasileira vem crescendo nos últimos anos. Em 2006, a SOFTEX, a UNICAMP em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT) realizaram uma grande pesquisa sobre o impacto do software livre e de código aberto na indústria de software brasileira. Dentre as empresas entrevistadas encontram-se: Varig, Petrobrás, Carrefour, Grupo Pão de Açúcar, Wall-Mart, UOL, Telemar, Itáu, entre outras.

Em uma entrevista com 15 empresas identificou-se os motivos para adoção e uso do SL em seus ambientes de trabalho. Os dados são apresentados na tabela 1. Esta pesquisa utilizou a escala de Likert de 1 a 5, crescente em importância.

Tabela 1: Motivos para desenvolvimento e uso de FOSS.

Motivos	Média	Desvio padrão
Redução de custos (hardware e software)	4,36	0,84
Maior flexibilidade/liberdade para adaptação	3,71	1,44

Maior qualidade (estabilidade, confiabilidade, disponibilidade)	3,64	1,34
Maior autonomia de fornecedor	3,64	1,69
Maior segurança/privacidade/transparência	3,57	1,34
Maior escalabilidade	3,50	1,29
Maior aderência a padrões/interoperabilidade	3,43	1,65
Filosofia/princípios	3,29	1,73
Inclusão digital/social	2,64	1,95
Maior legalidade (licenças)	2,57	2,28
Disponibilidade de recursos humanos qualificados	2,14	1,03
Menor tempo para o desenvolvimento	2,29	1,45

Fonte: SOFTEX, UNICAMP e MCT (2005).

Já entre os setores econômicos que usam FOSS, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) ficam em primeiro lugar. Esse setor compreende gerenciamento de informações, publicidade, educação a distância, rede de computadores, aplicações para internet e pode envolver inclusive processos de automação dentre muitas outras áreas. Esse setor cresceu com a popularização da internet. Os setores são mostrados na tabela 2.

Tabela 2: Intensidade de uso de FOSS nos setores econômicos.

Setor	Somatório das notas dadas pelos grupos
Comunicações e Informação	46
Governo	44
Comércio	43
Educação	41
Setor Financeiro	27
Serviços	20
Equipamento Eletro-eletrônico e de Comunicação	20
Saúde	15
Cultura e Entretenimento	11
Energia	10
Transporte, Logística e Armazenamento	3
Agricultura, Extração Vegetal, Silvicultura, Caça	2
Indústria Bélica	1

Fonte: SOFTEX, UNICAMP e MCT (2005).

Vê-se que a intensidade do uso de FOSS concentra-se em mercados de TIC, governo, comércio, educação e outros serviços. Destacando TIC, governo e serviços podemos caracterizá-los da seguinte forma, conforme SOFTEX, UNICAMP e MCT (2005):

- **TIC:** alvo sistemático de desenvolvimento tanto de sistemas operacionais, infraestrutura, middleware como de aplicativos;
- **Governo:** gera forte demanda provocada por razões filosóficas e por redução de custos. Faz uso de sistemas operacionais, aplicativos, middleware, entre outros;
- **Serviços:** forte presença de sistemas operacionais e secundariamente outros itens de infraestrutura. Tem pouca presença de aplicativos.

Alguns *softwares* livres muito populares são: Android (sistema operacional para *smartphones*), navegador Firefox, Blender (*software* de modelagem), Ubuntu, Debian, entre outros.

2.5.2 Hardware Livre

Com base nos mesmos princípios do SL, o *hardware* livre (HL), ou aberto, propõe que o projeto do produto físico seja distribuído sob uma licença aberta. Esse movimento começou no final da década de 1990 por engenheiros que buscavam aplicar os conceitos do SL ao *hardware* eletrônico de computador (OSIER-MIXON, 2010).

Assim como no *software*, existe a Associação do *Hardware* de Código Aberto. Essa organização tem por objetivo assegurar que esse tipo de tecnologia e conhecimento seja acessível a todos, encorajando o desenvolvimento colaborativo nos âmbitos educacional, ambiental, sustentável e bem estar humano.

As informações compartilhadas entre usuários e até empresas dos segmentos são projetos descritos em desenho, diagramas de circuitos eletrônicos, esquemas elétricos, lista de componentes, *layout* de placas de circuito impresso, códigos de programação do *hardware* (*firmware*), seu *software* de controle, entre muitas outras formas. Existem projetos muito bem-sucedidos de HL e eles são muito utilizados por *hobbystas*, estudantes e até empresas, tais como: Arduino, Beagle Bone, Oscar (projeto de carro), RepRap e Raspberry Pi. Dentre eles o projeto Reprap talvez tenha sido a iniciativa que causou mais impacto na indústria.

A RepRap é a primeira impressora 3D de mesa e de baixo custo disponibilizada livremente. Iniciada em 2004, é uma máquina que manufatura objetos em plástico e pode criar as peças para construção de outra RepRap. Seu nome é abreviado de *Replicating Rapid-prototyper* (Prototipador de Replicação Rápida).

A manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, é uma tecnologia disruptiva, uma vez que barateou todos os custos com esse tipo de tecnologia, se tornou muito acessível, criou novos mercados e descentralizou a produção. A facilidade de acesso a um equipamento do tipo possibilitou, em conjuntos com outros *hardwares* livre, a difusão da robótica, processos de manufatura, Internet da Coisas e o desenvolvimento de tecnologias derivadas (“impressão 3D” de casas, por exemplo).

2.5.3. Tecnologias livres na indústria

Na indústria, o FOSS ainda está ganhando impulso. A implantação de novas tecnologias na indústria ocorre de maneira lenta, diferente do ambiente doméstico. As novas tecnologias têm de passar pelo aval de técnicos e engenheiros que atestem sua funcionalidade, caso contrário pode haver falhas (MECATRÔNICA ATUAL, 2011). No ambiente industrial insalubre e agressivo com altas temperaturas, vibrações e partículas em suspensão, por exemplo, falhas podem causar perdas irreparáveis e gerar grandes prejuízos.

No sul do país há casos em que Controladores Lógicos Programáveis (CLP), máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) e outros projetos são totalmente controlados a partir de sistemas com linux (MECATRÔNICA ATUAL, 2011). Além disso, as aplicações de linux embarcado são promissoras e estão crescendo dentro da indústria e diversas aplicações. Conforme a pesquisa desenvolvida pela UNICAMP, SOFTEX e MCT (p.6, 2005) são os modelos com maior oportunidade investimento.

O SL e HL apresentam uma série de modelos de negócios que podem ser implantados de acordo com a criatividade do empresário e a sua funcionalidade. Esses modelos podem ser aplicados tanto para serviços quanto para a criação de novos produtos.

Dentre as empresas que comercializam produtos com tecnologias livres destacou-se a estadunidense Adafruit Industries e a italiana Arduino e a brasileira Metamáquina. A Adafruit, criada por uma aluna de engenharia eletrônica do MIT, desenvolve *gadgets* e aparelhos eletrônicos. É considerada a líder na indústria do HL (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2013). Arduino é o nome da empresa que desenvolve o produto homônimo citado anteriormente. A Metamáquina foi a primeira fabricante brasileira de impressoras 3D de baixo custo. Todas as máquinas eram operadas por SL e baseadas em HL. Seu projeto é baseado em vários projetos disponíveis na internet, entre eles o RepRap.

Conforme a pesquisa mais recente da SOFTEX (2014, p.153), “É provável que Linux continue mantendo alguma participação no mercado de servidores/estações de trabalho, em virtude de este segmento ser menos contaminado por escolhas e preferências do usuário final sem perfil técnico”.

Como a indústria é predominantemente guiada pelas preferências de profissionais com perfil técnico, a não adoção de *software* livre se dá, segundo SOFTEX, UNICAMP e MCT (2005, p.45). Por:

- Cultura estabelecida do software proprietário: as empresas ou clientes obrigam o uso de software proprietário e muitas vezes não há compatibilidade com os arquivos gerados em softwares comerciais;
- Problemas para instalação, como a falta de padronização dos sistemas a fim de facilitar a instalação e configuração de dispositivos e ferramentas, para utilização, pois as interfaces com o usuário não são intuitivas e são mal elaboradas;
- Dificuldades em obter os drivers compatíveis com os fabricantes de *hardware*;
- Falta de versões em FOSS de ferramentas especializadas, como Autocad, Photoshop; para muitos, por enquanto, alguns softwares proprietários ainda são superiores;
- Falta de documentação, arquivos de ajuda e poucas bibliografias em português;
- Falta de suporte técnico ao usuário final (*help desk*).

Resumidamente, nesta revisão bibliográfica, foram apresentados aspectos gerais dos materiais cerâmicos, dando ênfase às cerâmicas avançadas e ao rigor no controle do seu processamento, de acordo com a aplicação do material. Nesse contexto, as argilas bentonitas são um exemplo notável, com propriedades como expansão, adsorção, e plasticidade, tornando-as valiosas em várias indústrias. Assim, o controle da Capacidade de Troca de Cátions (CTC) desempenha um papel vital nas aplicações dessas argilas, e surgem diferentes técnicas para sua determinação, como o método de azul de metileno e da Concentração Micelar Crítica (CMC). Sendo a mais recente, testada por Brasileiro em 2016, a CMC provou ser uma técnica promissora e objetiva para avaliar a CTC das bentonitas, pois o faz observando a formação de micelas através da aferição de condutividade elétrica. Entretanto, todas essas técnicas de caracterização são executadas e processadas manualmente, ou seja, são sujeitas a subjetividade e erros operacionais. Sob essas circunstâncias, a mensuração da condutividade pode ser feita de forma automatizada utilizando-se um sensor e as medidas de condutividade podem ser exibidas em tempo real numa tela, tal qual um sistema de supervisão e aquisição de dados típico. Desse modo, o emprego de ferramentas computacionais para otimizar o processo de caracterização dos materiais traz à tona a Caracterização Auxiliada por Computador. Nessas circunstâncias, o desenvolvimento de um equipamento torna-se viável empregando um sistema embarcado num computador de placa única e usando tecnologias livres e de código aberto (hardware e software).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, ferramentas e insumos, assim como os métodos necessários para desenvolvimento do projeto.

3.1. MATERIAIS

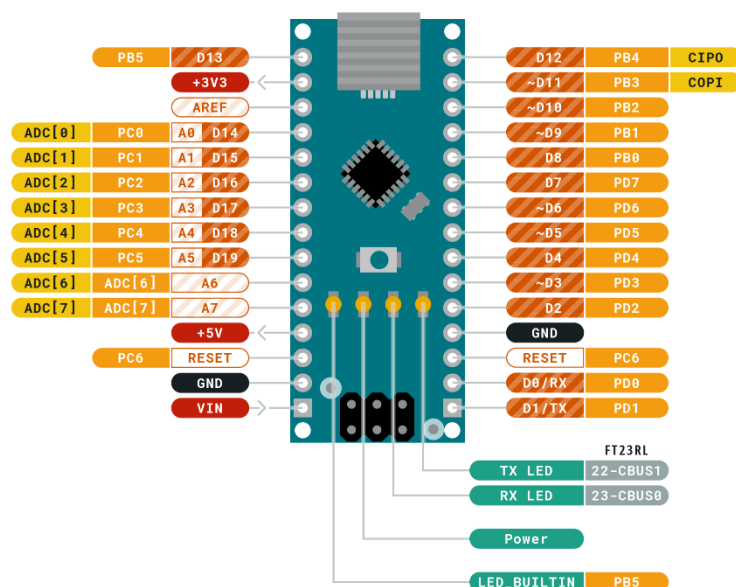
Os materiais usados no decorrer desta pesquisa são os componentes para construção do protótipo, *softwares* para seu funcionamento e os insumos usados para caracterização.

3.1.1. Arduino nano

O arduino é uma plataforma de código aberto para prototipagem eletrônica. O projeto do hardware, firmware, IDE, esquemático e PCB podem ser adquiridos em seu website. Por esse motivo existem várias plataformas semelhantes, derivadas e réplicas. Esse componente foi selecionado por ser de código aberto e ter vasta documentação e comprovada eficiência em aplicações similares.

Corriqueiramente o arduino é confundido com um microcontrolador, mas ele é uma plataforma de desenvolvimento. O microcontrolador é de fato o chip que processa as entradas e fornece saídas, neste caso o Atmega328, fabricado pela ATMEL. O termo plataforma é devido ao fato do chip possuir todos os seus pinos já direcionados a portas em uma placa de circuito impresso, ou seja, ele já possui USB, fonte de alimentação, cristal oscilador, encaixe para pino nas portas e outros recursos, como mostrado na figura 10.

Figura 9: Esquema de pino do arduino nano.



Fonte: Arduino (2023).

O arduino pode ser alimentado tanto pela porta USB quanto por uma fonte externa. Em caso de erro no projeto ou falha do circuito, há um fusível resetável para proteger a porta USB do computador em que for conectado. Seus pinos operam com tensão de 5V e podem fornecer ou drenar até 40 mA (ATMEL, 2014). A saída PWM possui 8 bits de resolução, variando de 0 a 255. Já a conversão de analógico para digital é feita com uma resolução de 10 bits, isto é, pode variar de 0 a 1023

A IDE usada para programar o arduino foi a versão 1.8.19. Ela possui uma ferramenta que permite monitorar a comunicação serial entre o arduino e o computador, muito útil para desenvolvimento deste projeto.

3.1.2. Scilab

Scilab (*Scientific Laboratory*) é um *software* livre e de código aberto de cálculo numérico, que prover um ambiente computacional para aplicações científicas e de engenharia (SCILAB, 2015). Ele está disponível para sistemas baseados em Linux, Mac OS X e Windows.

É desenvolvido desde 1990 por pesquisadores do *Institut Nationale de Recherche en Informatique et en Automatique* (INRIA) e pela *Ecole Nationale des Ponts et Chaussée* (ENPC) na França. Atualmente é mantido pelo Scilab Enterprises.

O Scilab tem uma sofisticada estrutura de dados que inclui objetos como funções racionais, polinômios e sistemas lineares, por exemplo. Possui um interpretador e uma linguagem de programação estruturada própria, além de poder trabalhar com as linguagens C e Fortran. Dentre as suas muitas bibliotecas e funções, o Scilab também trabalha com:

- Operações matemáticas e análise de dados;
- Visualização de dados em 2D e 3D;
- Estatística;
- Projeto e análise de sistemas de controle;
- Processamento de sinais contínuos e discretos;
- Otimização de sistemas.

Possui ferramentas para troca de dados com dispositivos externos. Ainda possui um modelador e simulador de sistemas dinâmicos híbridos, o Xcos, comparado constantemente com o Simulink do Matlab.

Por ser usado internacionalmente em ambientes acadêmicos e industriais, o Scilab é uma plataforma em constante atualização e aperfeiçoamento. É usado por empresas como o Grupo Airbus, a Arcelor Mittal e a Peugeot. Ainda possui vários estudos de caso documentados para acesso ao público nas seguintes áreas: aeroespacial, automotiva, energia, meteorologia, mineração, metalurgia, médica, farmacêutica, educacional e de pesquisa.

Em automação, o Scilab é usado para modelagem e simulação (Scicos), controle de processos, controle clássico, controle robusto, controle discreto (digital), controle inteligente, robótica, criação de supervisorio, RTAI (Real Time Application Interface) etc. Além disso ele possui ferramentas para uso do protocolo de comunicação digital OPC (*OLE for Process Control*), protocolo modbus, serial, HART, entre outros.

Esse software foi selecionado por ser de código aberto, por sua versatilidade (ter funções expandidas por novas bibliotecas) e ser multiplataforma. Para este projeto foram usadas ferramentas para criação de uma interface gráfica de usuário (GUI), ferramentas para aquisição e armazenamento de dados, e protocolo para transmissão de dados pela porta serial.

3.1.3. Raspberry Pi 3 modelo B+

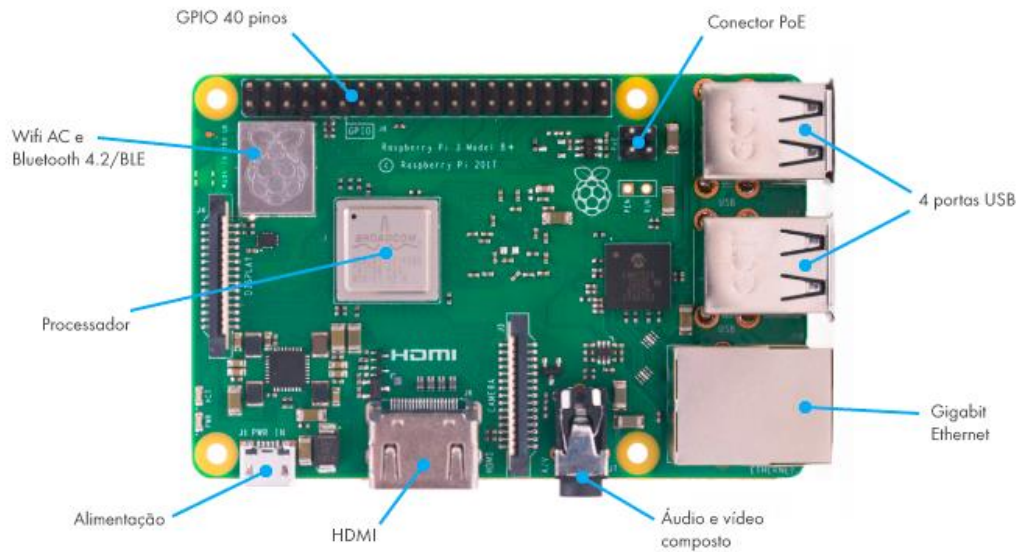
O Raspberry Pi (RPi) é um SBC desenvolvido pela inglesa *Raspberry Pi Foundation*. Ele foi criado para servir como plataforma educacional com o objetivo de criar uma forma das pessoas entenderem mais sobre o mundo digital, aprenderem a resolver problemas desse tipo e estarem preparadas para os empregos do futuro. É um projeto de hardware livre, além de ser uma placa de baixo custo para que o maior número de pessoas tenha acesso (RASPBERRY PI, 2023).

Esse modelo vem com as seguintes especificações técnicas

- Processador Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz
- 1GB LPDDR2 SDRAM
- 2.4GHz e 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE
- Gigabit Ethernet over USB 2.0;
- 40-pin GPIO header
- Conector de interface HDMI
- 4 portas USB 2.0
- Conector CSI para câmera Raspberry Pi
- Conector DSI para display capacitivo Raspberry Pi
- Saída de vídeo composto e áudio através do plug P4
- Slot cartão micro SD para carregamento do sistema operacional e armazenamento de arquivos
- Entrada de fonte DC micro USB 5V/2.5A
- Suporte a Power-over-Ethernet (PoE) (requer HAT PoE separadamente)

Na figura 11 é possível observar como esses componentes estão distribuídos na placa.

Figura 10: Visão geral das entradas e saídas do RPi 3 B+.



Fonte: Raspberry Pi (2023).

O RPi foi escolhido para esse projeto por ser de código aberto, por suas configurações e pela necessidade de processamento gráfico para a IHM. Como ele pode ser configurado para ser um sistema embarcado de propósito específico ou geral, ainda será possível implementar novas funcionalidades futuramente.

Devido ao seu processador ARMv8, o Raspberry Pi pode executar uma gama de distribuições GNU/Linux otimizadas para processadores de arquitetura ARM. Para este projeto foi usado o sistema operacional Ubuntu 22.04 com interface MATE, otimizado para Raspberry Pi.

O Ubuntu MATE foi escolhido por ser livre, flexível, compatível com os softwares de controle necessários (Scilab e Arduino), possuir boa documentação, receber atualizações frequentemente e oferecer um bom suporte por parte da comunidade.

3.1.4. Tela 7" touchscreen

Muito usado em projetos com o Raspberry Pi, o *display* TFT touchscreen 7" tem tela sensível ao toque e resolução de 800×480 pixels. Essa tela foi escolhida para o protótipo, pois a sensibilidade ao toque dispensa o uso de teclado e mouse, facilitando a interação com a interface. Além de que se conecta perfeitamente ao RPi, ocupando pouco espaço durante a montagem. Na figura 12 a tela pode ser vista, assim como a placa de conexão com o RPi também.

Figura 11: Display touchscreen para Raspberry Pi.



Fonte: Raspberry (2023).

3.1.5. Sensor de condutividade

O sensor de condutividade utilizado no protótipo foi o KS0429 TDS Meter v1.0 da Keystudio (figura 13). Esse componente foi selecionado por ser simples e de baixo custo, além de atender as necessidades do projeto. Ele vem com um transdutor para amplificar o sinal de condutividade, de forma que possa ser lido pelo microcontrolador. O equipamento foi calibrado com solução de condutividade padrão HI7031, da *Hanna Instruments*, com condutância específica de $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$, à temperatura de 25°C .

Figura 12: TDS Meter v1.0.



Fonte: Keystudio (2023).

Na tabela 3, podem ser vistos as características do sensor de condutividade.

Tabela 3: Características do sensor de condutividade.

Tensão de entrada	3.3 ~ 5.5Vcc
Tensão de saída	0 ~ 2.3Vcc
Corrente de trabalho	3 ~ 6mA
Faixa de medição de TDS	0 ~ 1000ppm
Sonda de medição	Encapsulamento a prova d'água
Número de terminais	2
Interface de conexão	XH2.54-2P
Precisão da sonda	± 10% F.S. (25 °C)

Fonte: Keystudio (2023).

3.1.7. Bentonitas

Nos experimentos para validação da medição de CTC foram usadas oito argilas bentonitas previamente caracterizadas nos trabalhos de Brasileiro (2016), Silva et al. (2014) e Silva (2013). As bentonitas caracterizadas são apresentadas na tabela 4:

Tabela 4: Bentonitas usadas nos experimentos.

Argila Bentonita	Condição	Sódica	Beneficiador	Origem
Verde Lodo	Natural	Não	Bentonit União Nordeste (BUN)	Boa Vista-PB
RF	Natural	Não	-	Sossêgo-PB
DASL	Natural	Não	-	Sossêgo-PB
Bentogel	Natural	Sim	Bentonisa	Boa Vista-PB
Closite Na ⁺ ®	Industrializada e ativada	Sim	Southern Clay Products Inc	Texas-EUA
Chocobofofe	Natural	Não	-	Boa Vista-PB
Chocolate	Natural	Não	Bentonit União Nordeste (BUN)	Boa Vista-PB
Brasgel PA	Industrializada	Sim	Bentonit União Nordeste (BUN)	Boa Vista-PB

Fonte: Produzido pelo autor (2023).

3.1.8. Tensoativo

Para realização da CMC foi usado o mesmo azul de metileno, composto aromático heterocíclico, com peso molecular 319,85 g/mol e concentração 0,01N. A solução foi produzida no LAPAMA com concentração de 3,7 g/L a partir do composto C₁₆H₁₈N₃SCI₃H₂O do fabricante Nuclear.

3.2. MÉTODOS

Os métodos usados no decorrer desta pesquisa são os compostos por análises de viabilidade, planejamento, configuração, programação e técnicas de caracterização.

3.2.1. Planejamento do processo automatizado

Para avaliar a necessidade, impacto e até viabilidade da automatização do sistema, faz-se necessário aplicar o princípio U.S.A. que consiste de, conforme Groover (2011, p.12):

U → *Understand*: Compreender o funcionamento do processo e analisar as variáveis de entrada e saída do sistema.

S → *Simplify*: Verificar a real necessidade de cada etapa do processo e, se possível, reduzir passos e movimentos desnecessários.

A → *Automate*: Aplicar estratégias para melhorias de processos.

A etapa de AUTOMATIZAR só é realizada depois que o processo for estudado entendido. Se houver propostas de simplificação, elas devem ser realizadas. Se depois da simplificação do processo ainda não se alcançar as expectativas aplica-se as estratégias para melhorias de processos, tais como:

- Especialização das operações: uso de equipamentos projetados especificamente para execução de uma única função com maior eficiência possível;
- Operações combinadas: uma mesma máquina responsável por mais de uma operação, reduzindo o número de máquinas necessárias;
- Operações simultâneas: duas ou mais operações do processo são executadas simultaneamente, reduzindo o tempo de processamento;
- Integração de operações: envolve a ligação de diferentes estações de trabalho utilizando dispositivos automatizados;
- Aumento de flexibilidade: usar conceitos de manufatura flexível para reduzir tempo de setup (configuração);
- Melhoria de armazenamento e manuseio de materiais: uso de sistemas automatizados para armazenamento de materiais.
- Inspeção on-line: efetua correções no processo a medida que ele é realizado, evitando inspecionar quando o processo termina. Isso reduz o risco de descarte;
- Otimização e controle do processo: inclui vasta variedade de esquemas de controle cujo objetivo é operar processos individuais de maneira mais eficiente;
- Controle de operações de fábrica: gerenciar e coordenar operações na fábrica de maneira eficiente;

Aplicando-se o princípio USA, primeiramente, o processo foi destrinchado e este resultado pode ser visto no fluxograma da figura 14



Figura 13: Fluxograma do processo de caracterização da CTC de uma amostra.

Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Todas as etapas descritas no fluxograma são fundamentais para correta execução do processo. As ferramentas, instrumentos e equipamentos usados não podem ser dispensados ou substituídos sem que haja investimentos consideráveis. As operações não podem ser combinadas ou trocadas de sequência, assim como a movimentação para realização das tarefas já é a mínima.

Contudo, esse é um processo repetitivo e cansativo para o operador, pois exige muita concentração e um longo tempo de atividade sem intervalos. Outro problema identificado é o fato de o resultado do ensaio ser subjetivo, dependendo da experiência do operador para uma correta avaliação.

Uma vez que se mostrou possível avaliar o resultado do ensaio de forma objetiva e sem viés, optou-se por automatizar a última etapa e realizar a especialização da operação. Conforme descrito no capítulo anterior, essa forma de automatizar implica no uso de equipamentos projetados especificamente para execução de uma única função com maior eficiência possível. Assim, levando em consideração o estudo de Brasileiro (2016), foi proposto o monitoramento da condutividade elétrica através de um equipamento que pudesse armazenar os dados, exibir informações em tempo real, gerar relatórios e ser operado.

Para que houvesse independência de fornecedores que, por ventura, viessem inviabilizar o uso ou descontinuar as tecnologias empregadas, optou-se por usar *software* e *hardware* livre e de código aberto. Isso também evita quaisquer impedimentos na geração de patentes de novas soluções.

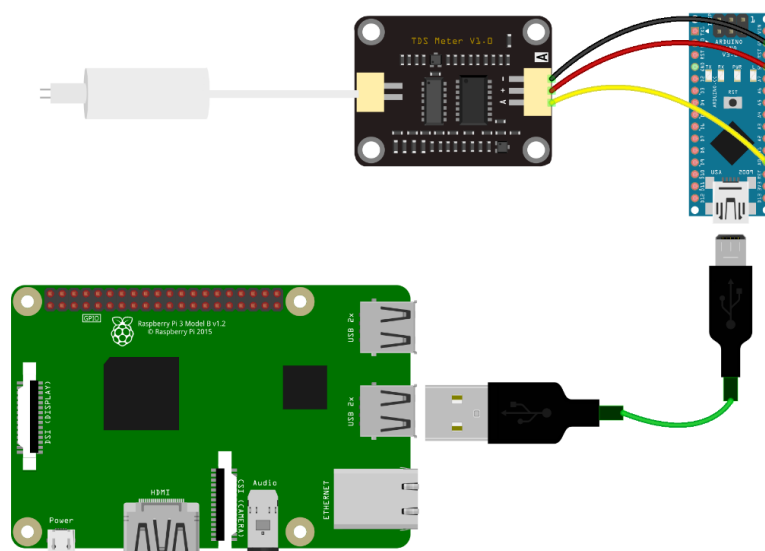
Com a finalidade de esboçar o conceito inicial do equipamento, optou-se um computador em placa única que pudesse comportar um sistema operacional baseado em Linux. Esse mesmo computador deveria ter suporte à telas sensíveis ao toque, evitando periféricos sobre as bancadas do laboratório. Também se pensou em um sensor de baixo custo que pudesse captar os dados de condutividade, assim como os algoritmos que seriam necessários para determinar a forma que isso ocorreria. Os componentes com tais características foram descritos no tópico ‘3.1. Materiais’.

3.2.2. Interligação dos componentes do sistema

Uma vez feito o planejamento da automação, é necessário estabelecer a forma de interligação dos componentes para que a execução de suas funções seja otimizada.

Com base nos componentes selecionado, na figura 15 pode ser visto o esquema de conexão dos dispositivos do protótipo. Eles foram conectados de forma que a sonda enviasse informações para o computador em placa única e este, por sua vez, pudesse usar softwares que fizesse o tratamento e armazenamento dos dados gerados. O Raspberry Pi tem uma *touchscreen* acoplada, a qual é possível acompanhar o processo em tempo real. Conectado ao raspberry há um Arduino Nano que faz a conversão analógica para serial do sensor de condutividade.

Figura 14: Conexão simplificada entre os dispositivos do protótipo.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

O esquema de ligação elétrica dos dispositivos usados no protótipo pode ser visto em mais detalhes no apêndice A.

3.2.3. Modelagem e fabricação da estrutura do protótipo

O projeto da estrutura deve comportar os componentes do sistema, de forma que garanta seu pleno funcionamento. Além disso, por se tratar de um aparelho operador por um técnico, deve-se levar em consideração características como ergonomia e usabilidade. Por fim, ainda será necessário levar em consideração detalhes construtivos, uma vez que planejou-se fabricá-lo através de manufatura aditiva.

3.2.4. Desenvolvimento do sistema de controle do processo

O desenvolvimento do software de controle do sistema abrange:

- Instalação do sistema operacional baseado em Linux, assim como dos softwares e bibliotecas necessárias;
- Criação da Interface Gráfica de Usuário, desenvolvida no Scilab usando a toolbox GUI Builder 4.2.1;
- Programação do arduino para aquisição dos dados do processo;
- Configuração da comunicação serial entre o arduino e RPi para troca de dados;
- Algoritmo para cálculo da CTC, assim como de outras funções do sistema;
- Implementação e teste de todos os recursos do sistema.

3.2.5. Calibração do sensor

A fim de garantir a precisão e qualidade da aferição das medidas de condutividade, o sensor usado no protótipo foi calibrado usando o condutímetro Edge®, fabricado pela *Hanna Instruments*. Ademais, esses procedimentos também foram usados para levantar a curva de calibração usada para desenvolver um algoritmo para calibração automática do sensor.

3.2.6. Cálculo da CTC

A CTC das argilas bentonitas foi determinada pelo método de adsorção de azul de metileno, conforme descrito por FERREIRA et al, 1972 (apud BRASILEIRO, 2016). O ensaio foi conduzido de forma controlada e padronizada no Laboratório de Purificação e Aspersão de Minerais Argilosos (LAPAMA) da Universidade Federal da Paraíba. Paralelamente à execução do método tradicional foi usado o equipamento desenvolvido neste projeto para aferição automatizada da condutividade da solução, conforme figura 14.

Figura 15: Coleta automatizada dos dados de condutividade.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Para preparar as amostras de argilas, primeiramente elas foram maceradas, depois passaram pela peneira nº 200 e então pesadas na balança de precisão. Em seguida, os 500 mg de argila foram misturados em um Becker de vidro com 300 mL de água destilada sob agitação constante usando um agitador magnético. O pH da solução foi ajustado inicialmente para 9 com solução de 1N Na₂CO₃ e depois para 3,5 com solução de 1N HCl após 5 minutos de agitação, para que a análise com azul de metileno apresente melhores resultados.

Após o ajuste do pH, realizou-se uma titulação com uma solução 0,01N de azul de metileno. A cada 5 minutos, foram adicionados 2 mL da solução, e uma gota da suspensão foi coletada em papel filtro Whatman nº 50 a intervalos regulares. Quando o líquido absorvido no papel mostrou uma coloração distinta, passou-se a adicionar 1 mL do titulante a cada 15 minutos até observar um círculo azul em volta da gota, marcando o ponto de virada. Assim, a CTC foi calculada com base no volume da solução adicionada, conforme a Equação I.

$$CTC = \frac{V \times C \times 100}{m} \quad (I)$$

Onde:

CTC: Capacidade de Troca de Cátions (mEq/100g)

V: volume adsorvido (ml)

C: concentração do azul de metileno (N)

m: massa seca da amostra (g)

A determinação da CMC do azul de metileno foi realizada através da análise do comportamento de sua condutividade molar (Ω) em função da molaridade (m). Para determinar o valor de Ω as aferições de Condutância (G) foram realizadas diretamente com a sonda do condutivímetro mergulhado nas soluções de tensoativo em 300 ml de água destilada, como visto na figura 14. Convém apontar que, a condutância é a capacidade de um material condutor permitir a passagem de corrente elétrica, equivalente à condutividade (k'), que mede a mobilidade de íons em solução, conforme a Equação II.

$$G = \frac{k'}{k} \quad (II)$$

G: Condutância (S)

k': Condutividade (S.cm⁻¹)

k: constante de célula = 1 cm⁻¹

Uma vez que G foi determinada, aplica-se a equação de condutividade molar (Equação III), assumindo que k' equipara-se à G:

$$\Omega = \frac{k'}{Cm} \quad (III)$$

Ω : Condutividade molar (S.cm²/mol)

Cm: Concentração molar da amostra (mol/L)

Na prática, a Cm calculada no ponto em que a solução é saturada será a CMC da amostra. Para determinar o valor de Cm usa-se a equação IV:

$$Cm = \frac{mols}{Va} \quad (IV)$$

mols: quantidade de mols do tensoativo

Va: volume de água destilada usada (L) = 300 mL = 0,3L

Por sua vez, para calcular a quantidade de mols aplica-se a equação V:

$$mols = \frac{mT}{MM} \quad (V)$$

mT: massa de tensoativo adicionado à amostra (g)

MM: massa molar do tensoativo (g/mol) = 319,85 g/mol (azul de metileno)

A massa do tensoativo adicionada a cada titulação será determinada com base na quantidade titulada e na concentração em que foi preparada, como visto na equação VI:

$$mT = \frac{cT \times Vt}{1000} \quad (VI)$$

cT: concentração do tensoativo (g/L) = 3,7g/L (solução preparada para estes experimentos)

Vt: volume titulado (mL) = 2mL por vez

Por fim, o ponto da CMC será determinado através do gráfico da condutividade molar em função da concentração molar, observando o início de um comportamento linear de sua curva característica. Nesse trecho, a massa de tensoativo dissolvida na solução tende a um valor limite, assim determina-se a sua saturação. Dessa forma, as moléculas não podem mais adsorver, iniciando a formação de micelas, agregados moleculares do tensoativo (DALTIM, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados da pesquisa.

4.1. Estrutura do protótipo

A fim de comportar os componentes do sistema, foi projetada e fabricada uma caixa que pudesse abarcar todos os componentes do sistema. Há um suporte para que a sonda do sensor seja deixada enquanto estiver fora de uso. Para ajudar com a ergonomia durante o uso, a estrutura possui uma inclinação que permite ao usuário visualizar bem a tela operá-la facilmente. O enclausuramento dos componentes também evitará contatos dos componentes eletrônicos com líquidos e poeira. Na figura 17 pode ser visto o modelo virtual da estrutura.

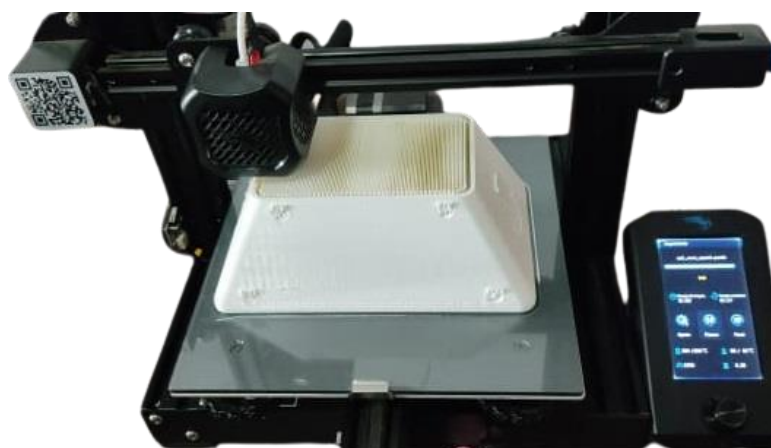
Figura 16: Desenho da montagem do protótipo.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Com intuito de acelerar o desenvolvimento, buscou-se modelos prontos na internet. Um dos modelos disponibilizados livremente foi adaptado e fabricação por manufatura aditiva, como visto na figura 18.

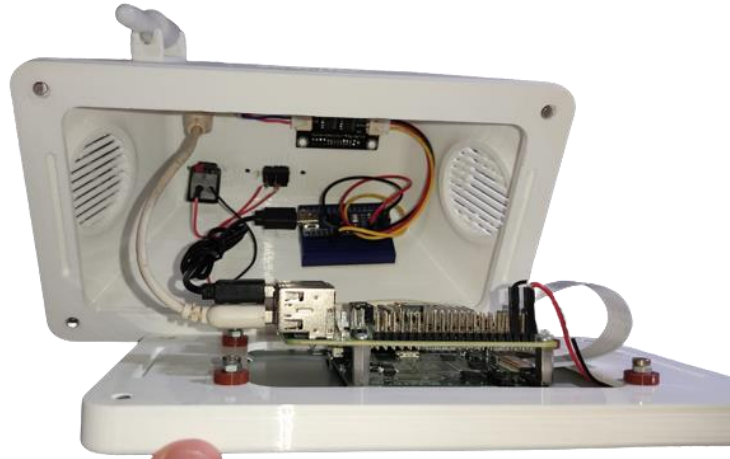
Figura 17: Fabricação da caixa por manufatura aditiva.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Após a fabricação dos componentes que compõem o enclausuramento, foi possível realizar a montagem dos componentes eletrônicos, como visto na figura 19.

Figura 18: Componentes eletrônicos montados na estrutura.



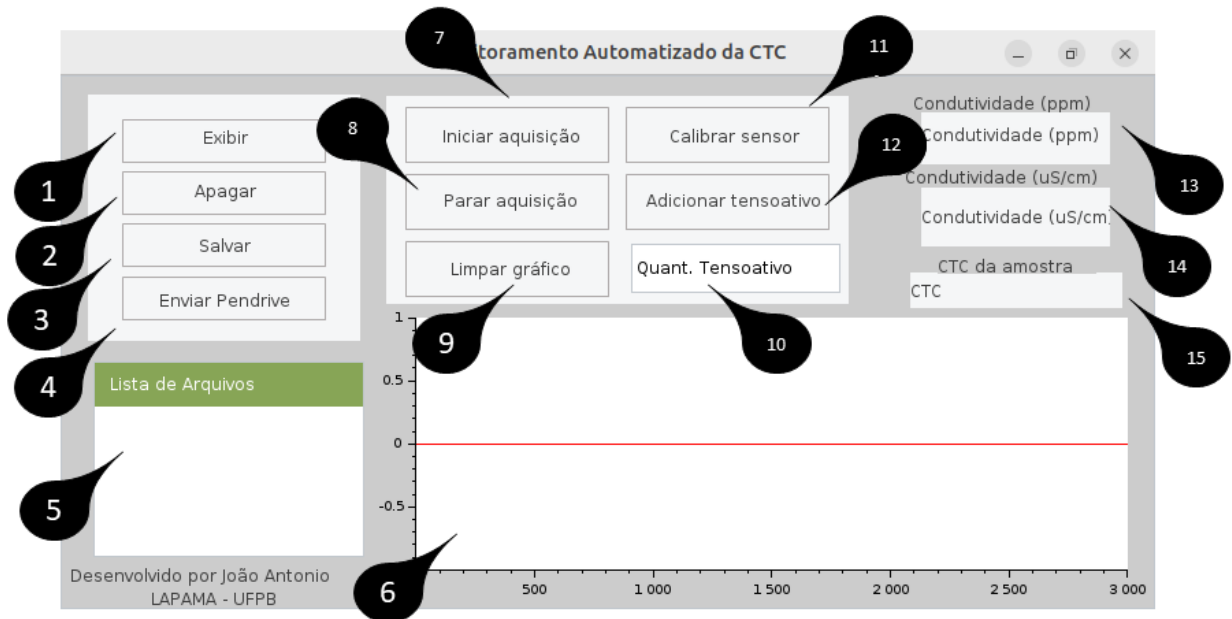
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

A estrutura do protótipo, assim como a montagem dos componentes podem ser vistos em mais detalhes no apêndice A.

4.2. Interface de monitoramento do processo

Tanto a interface gráfica, quanto o script para execução dos comandos enviados pela interface gráfica foram desenvolvidos no Scilab. Na figura 20 é mostrada a interface gráfica exibida no protótipo.

Figura 19: Interface do equipamento.



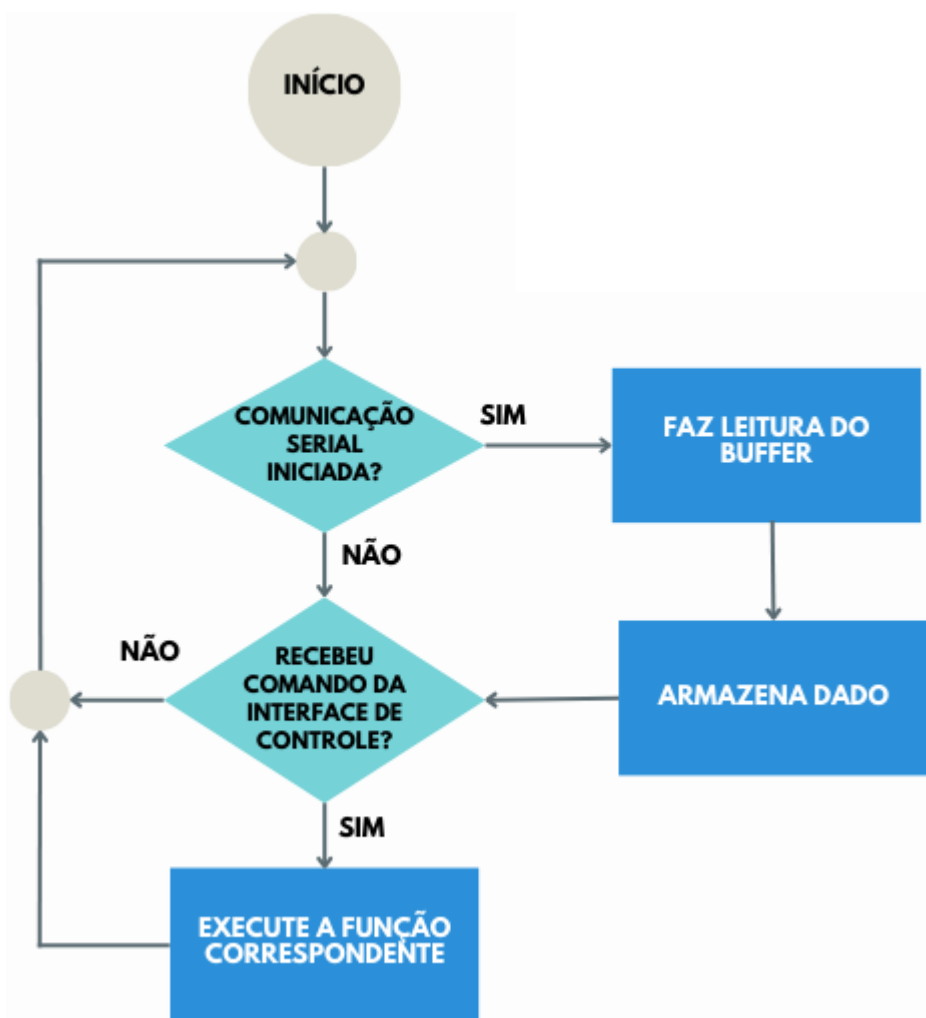
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

- 1: Botão para exibir o gráfico de um arquivo da lista.
- 2: Botão para apagar um arquivo da lista.
- 3: Botão para salvar os dados e gráfico em exibição.
- 4: Botão para enviar relatório para o *pendrive*.
- 5: Lista de arquivos salvos.
- 6: Espaço para exibição do gráfico.
- 7: Botão para iniciar aquisição e armazenamento dos dados.
- 8: Botão para interromper aquisição e armazenamento dos dados.
- 9: Botão para apagar gráfico em exibição. Caso não tenha sido salvo, será perdido.
- 10: Editor da quantidade de tensoativo que será adicionada.
- 11: Botão para realizar calibração automática do sensor.
- 12: Botão para informar que tensoativo foi titulado na quantidade indicada.
- 13: Mostrador do valor de condutividade instantâneo em ppm.
- 14: Mostrador do valor de condutividade instantâneo em $\mu\text{S/cm}$
- 15: Mostrador do valor de CTC da amostra ensaiada. Exibido apenas quando a aquisição é interrompida.

A interface apresentada na figura 20 é a quinta versão desenvolvida, onde cada nova versão foi proposta conforme o protótipo foi sendo testado. Durante os teste e aplicações nos ensaios percebeu-se a necessidade de aprimoramentos e inclusão de recursos que facilitassem seu uso ou favorecessem a execução de alguma atividade.

Cada elemento disponível e listado aciona uma função correspondente do algoritmo e o fluxo de execução dos ciclos pode ser visto no fluxograma da figura 21

Figura 20: Fluxograma simplificado do algoritmo da interface gráfica.



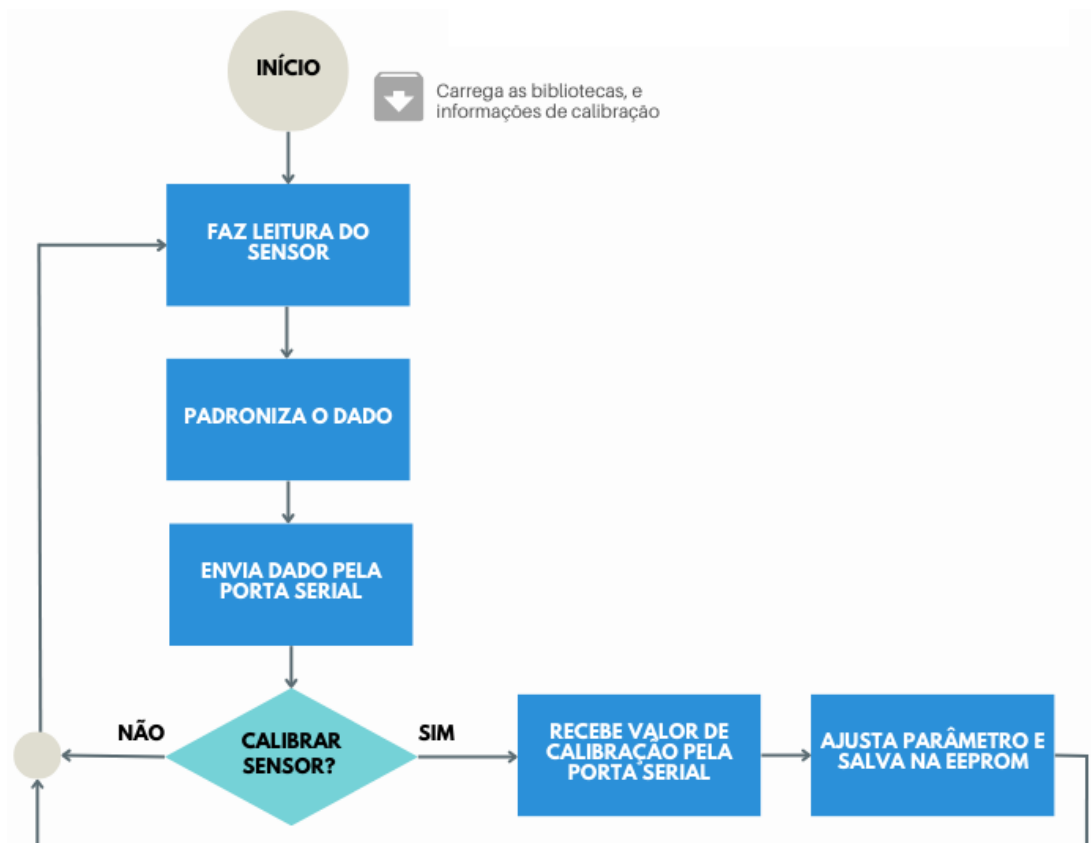
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Como visto no fluxograma da figura 21, a leitura da porta serial e armazenamento dos dados só acontecerá quando o botão de ‘Iniciar aquisição’ for pressionado, por exemplo. Estando recebendo dados ou não, o algoritmo sempre aguarda um comando pela interface. Convém ressaltar que a interação com o arduino se dará em apenas dois momentos: para receber os dados do sensor e para comandar a execução da calibração do mesmo.

No que lhe diz respeito, as funções basais do arduino serão as já citadas: coletar dados do sensor e ajustar o parâmetro de calibração do mesmo. Evidentemente que não são funções

triviais, uma vez que envolve o uso de bibliotecas, modelagem matemática do sensor para ajuste do parâmetro de calibração e tratamento e padronização dos dados coletados antes do envio para buffer. No fluxograma da figura 22 é possível observar o funcionamento do algoritmo presente no arduino.

Figura 21: Fluxograma simplificado do algoritmo executado no arduino.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Observa-se que, sendo solicitado pela interface do usuário ou não, a coleta de dados ocorre continuamente, podendo ser visualizada pelo monitor serial do próprio arduino. Para reduzir a margem de erro nas aferições feitas, a taxa de amostragem da condutividade foi ajustada em intervalos de 1 segundo. Esse intervalo foi escolhido, pois é o suficiente para observar os fenômenos decorrentes das variações de condutividade ocorridas durante o monitoramento. A medida apresentada nesse período é a mediana das últimas 30 aferições.

Ainda sobre o algoritmo de calibração automática do sensor, a identificação de seus parâmetros foi feita utilizando a modelagem matemática do tipo caixa preta. Esse tipo de modelagem consiste em criar um modelo matemático aplicando entradas conhecidas e observando a saída do sistema. Isso possibilita a construção de modelos matemáticos da dinâmica de um sistema a partir de dados obtidos experimentalmente.

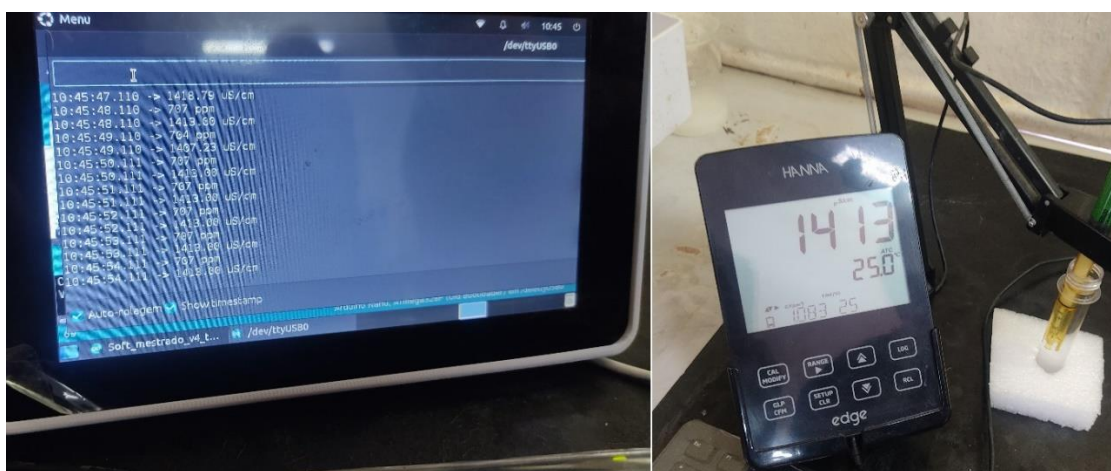
Entretanto, durante o desenvolvimento do algoritmo, a pesquisa revelou uma biblioteca disponibilizada pelo fabricante do sensor. Portanto, com finalidade de acelerar o

desenvolvimento, adaptou-se uma biblioteca disponibilizada pelo fabricante para atender especificamente as necessidades do projeto.

4.3. Calibração do sensor

Uma vez que o algoritmo de calibração automática do sensor ficou pronto, foram realizados testes para averiguar a eficácia do algoritmo e compará-lo com o instrumento de bancada usado para medir condutividade no laboratório, o Edge, fabricado pela *Hanna Instruments*. Como mostrado na figura 20, ambos foram calibrados com a solução de calibração da *Hanna Instruments*. À 25 °C a condutividade deve ser de 1413 µS/cm, dessa forma ambos os instrumentos foram calibrados.

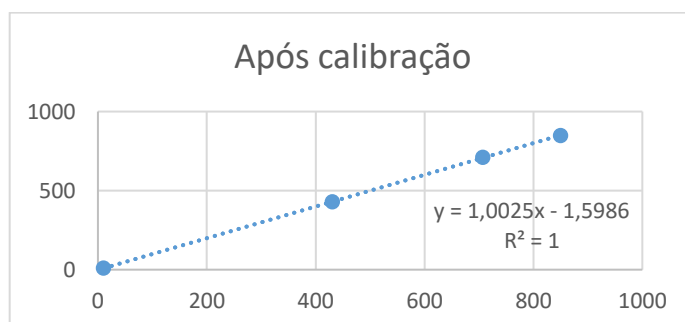
Figura 22: Instrumento e equipamento em bancada para comparar aferições.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

A fim de verificar a precisão do sensor do protótipo, foram feitas aferições com NaCl solubilizado em água destilada. Todas as medições feitas acarretaram no mesmo valor em ambos os sensores. Traçando a correlação entre as medidas, observa-se que, embora a amostragem seja pequena, não houve variação entre os resultados da calibração, indicando uma correlação praticamente perfeita, conforme o gráfico 2.

Gráfico 2: Curva de correlação entre as medidas feitas no condutímetro de bancada e no protótipo.

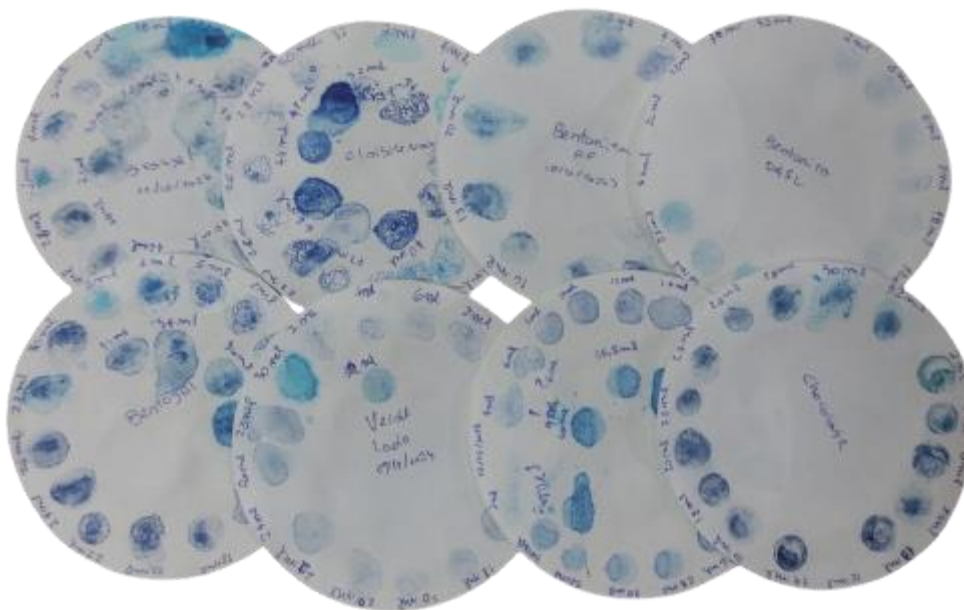


Fonte: Produzido pelo autor (2023).

4.4. Medição da CTC das amostras

Como citado no tópico 3.2.6, foi realizado o ensaio de CTC da forma tradicional enquanto o equipamento aferia a condutividade da solução. Os resultados pelo gotejamento do azul de metileno no papel filtro podem ser vistos na figura 21, enquanto as CTCs calculadas a partir da avaliação deles estão expostas na tabela 5.

Figura 23: Resultado do ensaio da CTC pelo método tradicional da titulação do azul de metileno no papel filtro.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Tabela 5: CTC das amostras de argilas pelo método tradicional com Azul de Metileno.

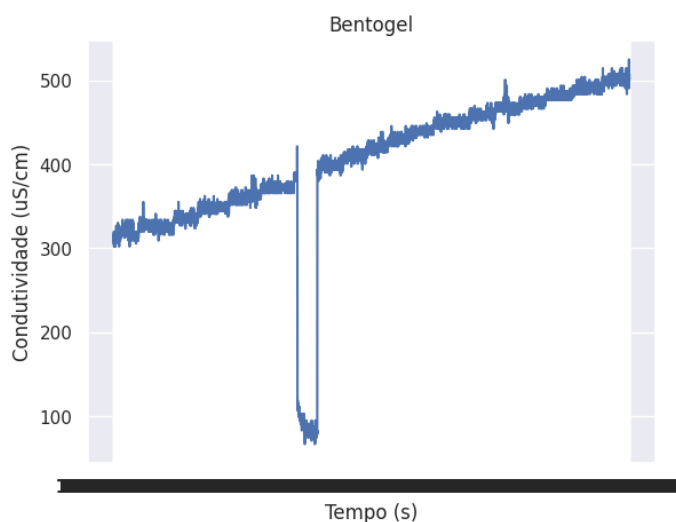
Bentonita	V (ml)	C (N)	m (g)	CTC (mEq/100g)
RF	14	0,01	0,5	28,00
DASL	16	0,01	0,5007	31,96
Chocolate	24	0,01	0,503	47,71
Verde Lodo	26	0,01	0,5025	51,74
Bentogel	28	0,01	0,5013	55,85
Chocobofe	28	0,01	0,5	56
Brasgel	34	0,01	0,5024	67,68
Cloisite Na ⁺	44	0,01	0,5	88

Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Apesar de sódicas, a única que apresentou valores dentro da faixa esperada de 80-150mEq foi a Cloisite Na⁺; Brasgel e Bentogel foram calculadas com valores abaixo do esperado. Segundo Carvalho (2020, p.85), os valores de CTC podem ser considerados proporcionais à pureza da argila bentonita, assim o armazenamento destas e a umidade pode ter afetado sua CTC. Em sequência, as demais amostras apresentam valores dentro da faixa esperada, Além de que esses resultados são semelhantes aos de Brasileiro (2016).

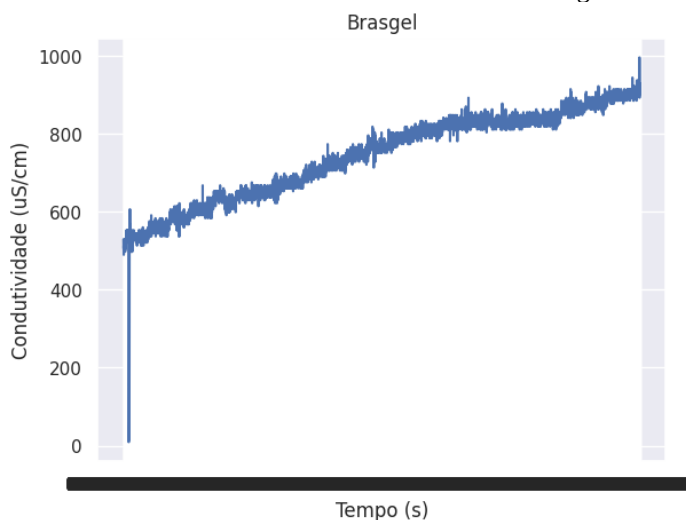
Nos gráficos 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 são mostradas as curvas de condutividade ao longo do tempo do ensaio. Conforme citado na literatura, o aumento de tensoativo na solução faz com que a condutividade também cresça. Convém destacar que a variação brusca no gráfico 3 se deu pela saída repentina da sonda do recipiente com a solução.

Gráfico 3: Condutividade da amostra de Bentogel.



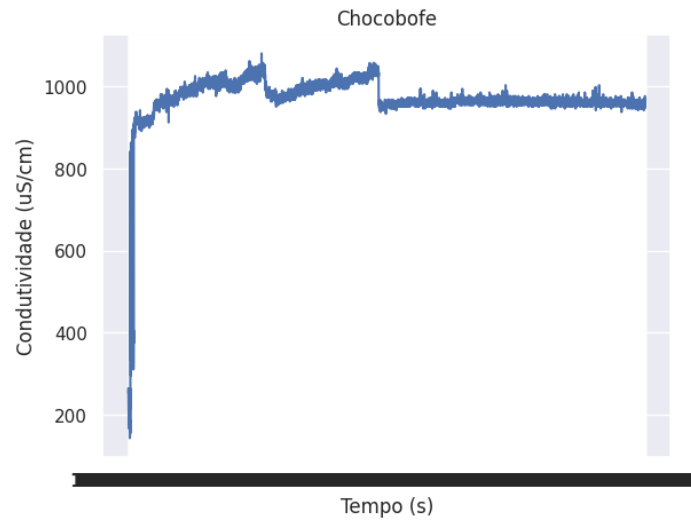
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 4: Condutividade da amostra de Brasgel.



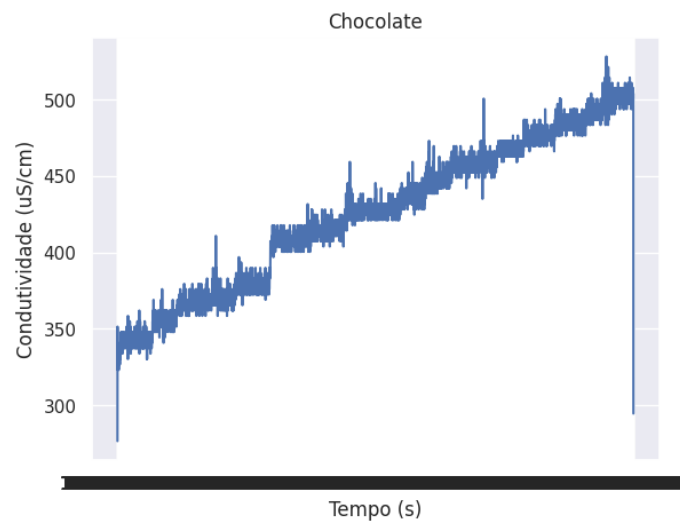
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 5: Condutividade da amostra de Chocobofe.



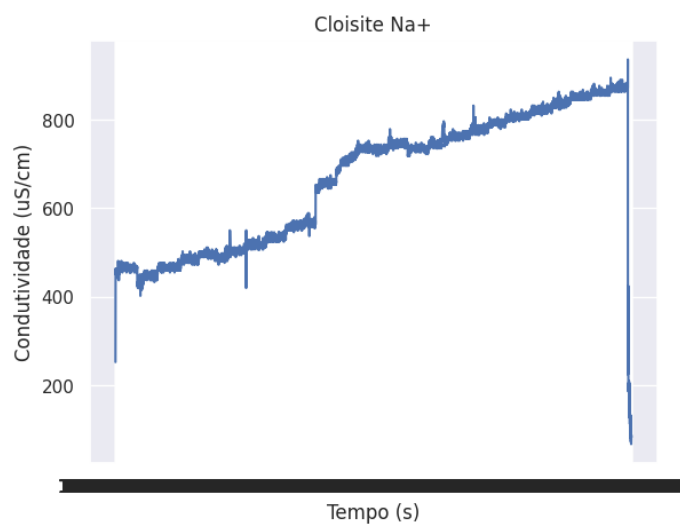
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 6: Condutividade da amostra de Chocolate.



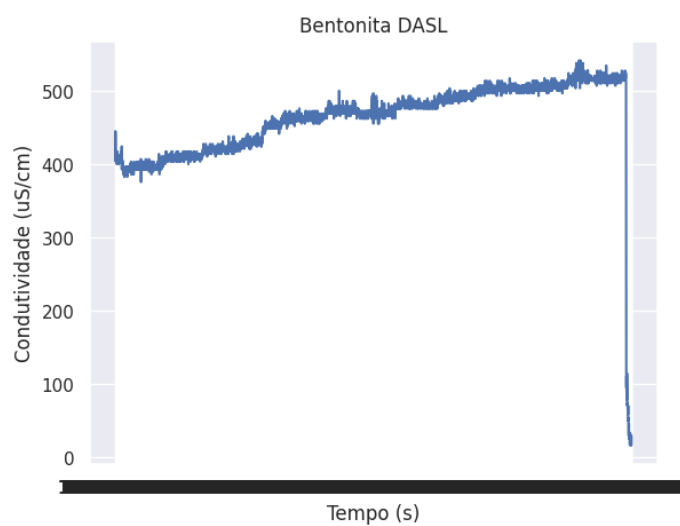
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 7: Condutividade da amostra de Cloisite Na+.



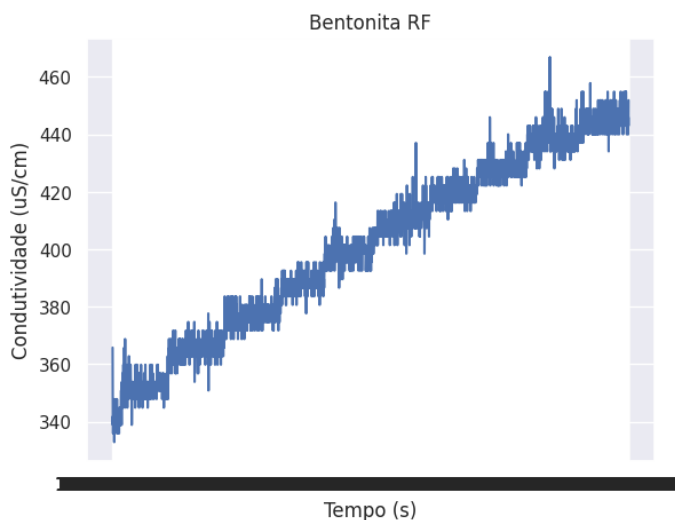
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 8: Condutividade da amostra de Bentonita DASL.



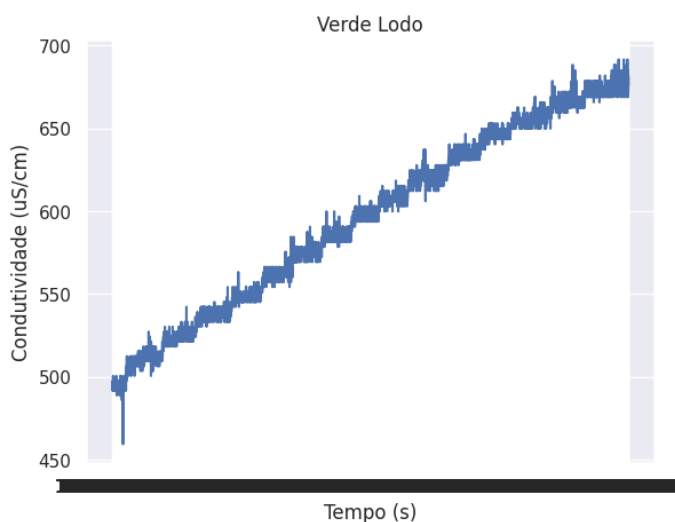
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 9: Condutividade da amostra de Bentonita RF.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 10: Condutividade da amostra de Verde Lodo.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

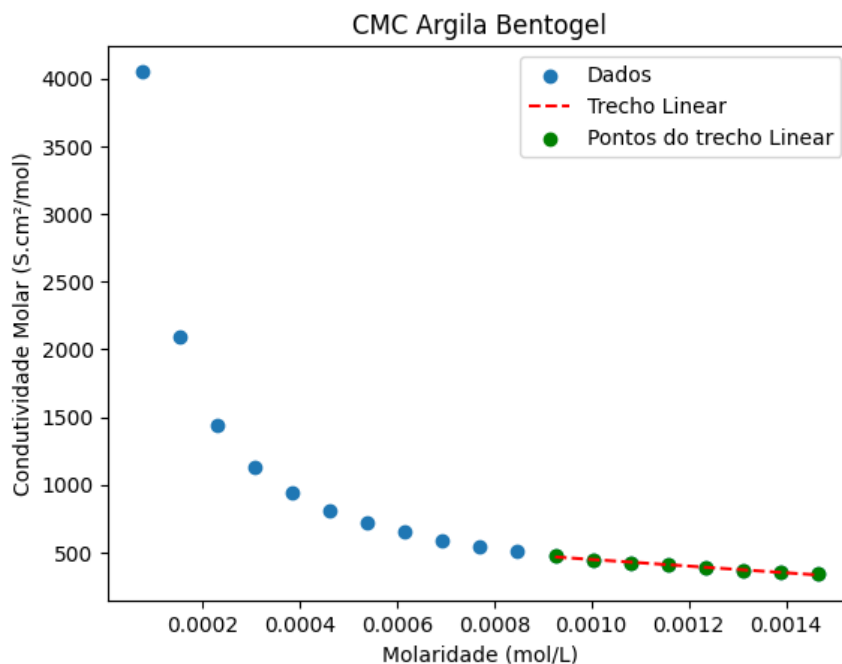
Nestes gráficos a variação da condutividade ao longo do ensaio está bem evidenciada. Esse aumento se dá pela adição periódica do tensoativo e, ainda, é possível observar degraus que marcam o momento em que uma nova quantidade foi titulada. O gráfico 10 é o que melhor evidencia esse fenômeno.

Em média, cada gráfico de condutividade x tempo apresenta 7.408 aferições, as quais: Verde Lodo (6.360), Bentogel (7.267), DASL (4.328), Chocobofo (10.450), chocolate (6.921), RF (4.175), Brasgel (9.242) e Cloisite Na⁺ (10.684). Contudo, para avaliar a Condutividade molar em função da molaridade do tensoativo, foram selecionados apenas os pontos anteriores

a cada nova titulação do tensoativo. Essa quantidade de aferições permite perceber variações de condutividade que com menos pontos medidos não seria possível.

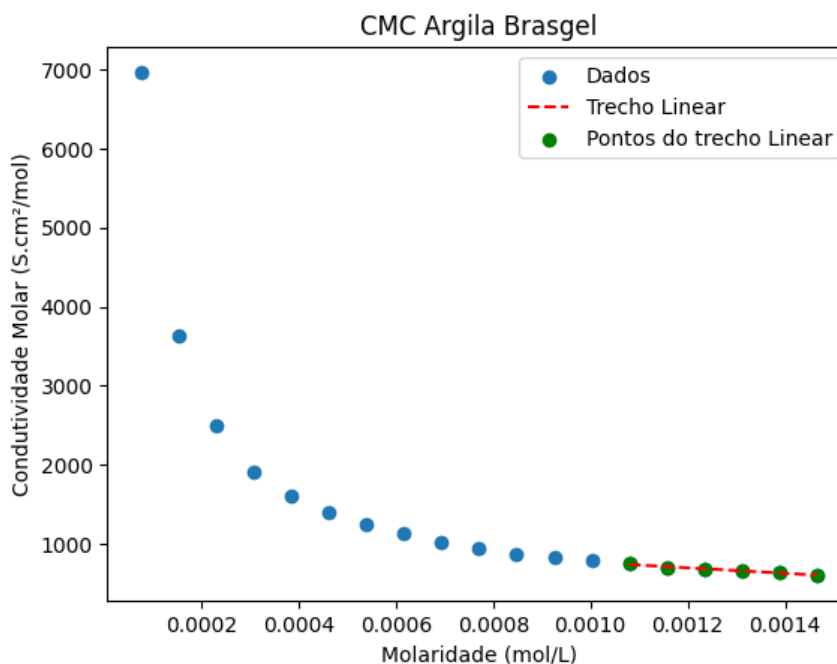
Os gráficos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam os resultados do ensaio da CMC com o tensoativo Azul de Metileno. Como escrito no tópico 4.4, após a finalização do ensaio, o equipamento emite um relatório que contém um gráfico como apresentado a seguir. No apêndice C pode ser visto o modelo do relatório gerado.

Gráfico 11: CMC da amostra de Bentogel.



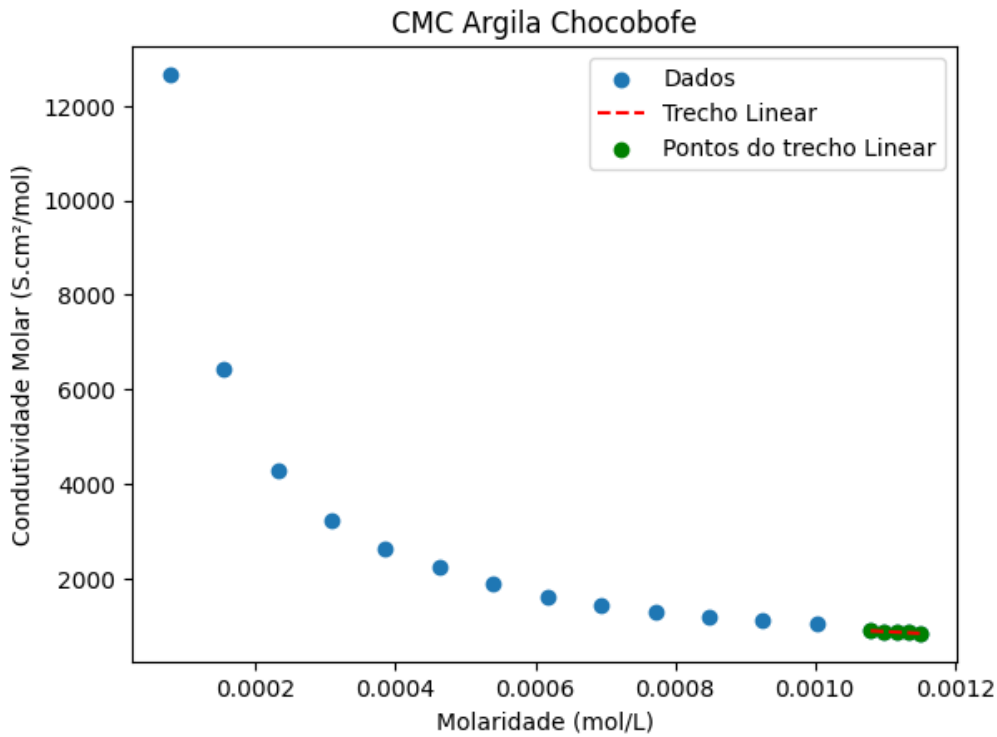
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 12: CMC da amostra de Brasgel.



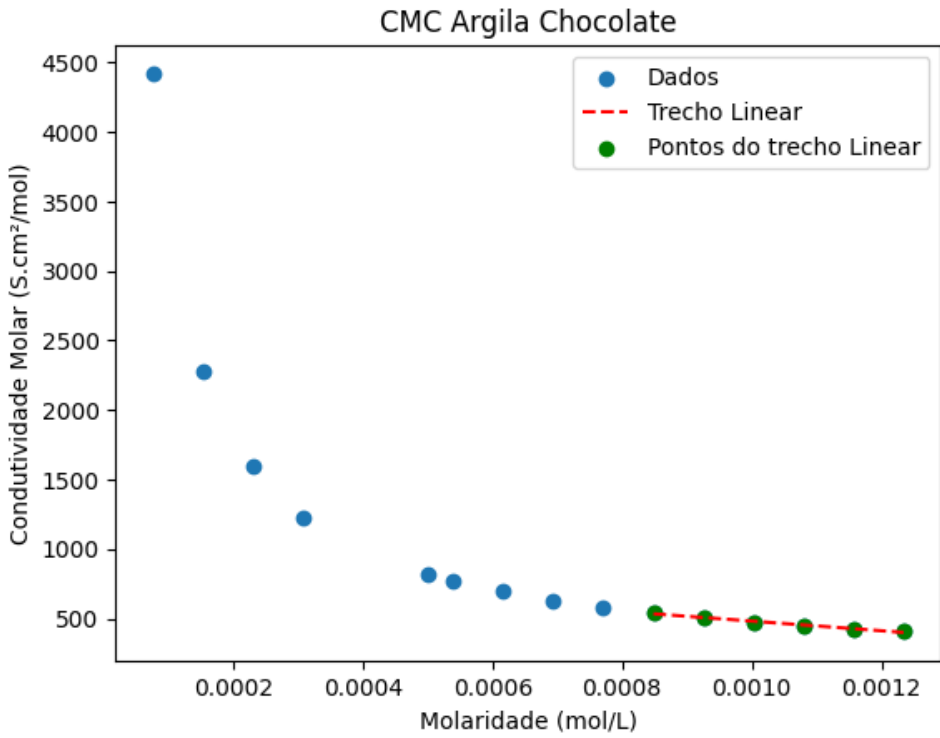
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 13: CMC da amostra de Chocobofe.



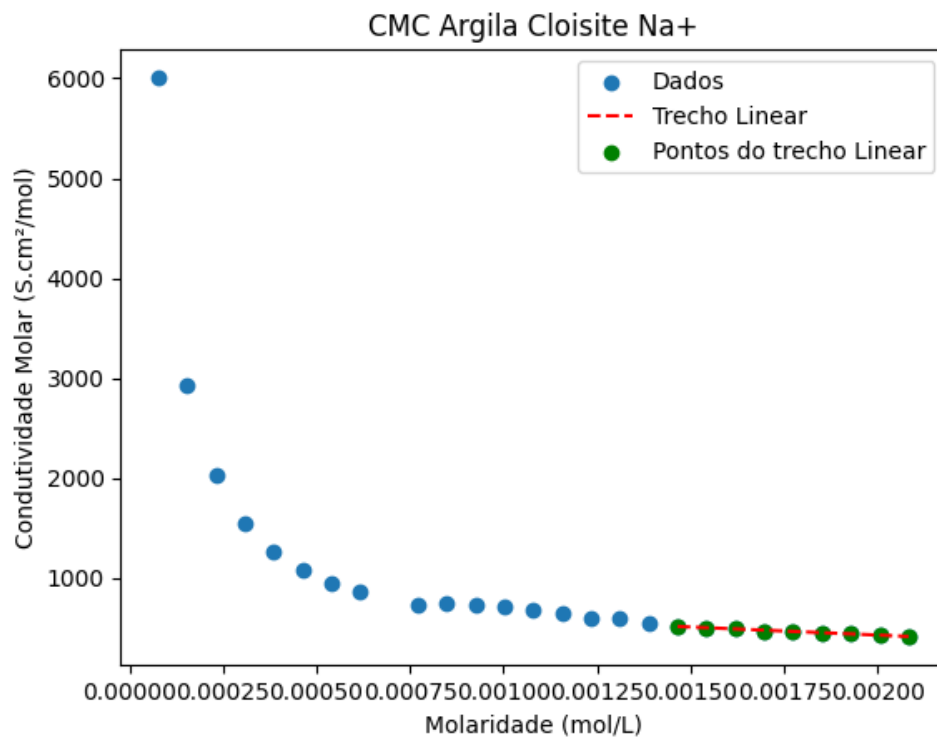
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 14: CMC da amostra de Chocolate.



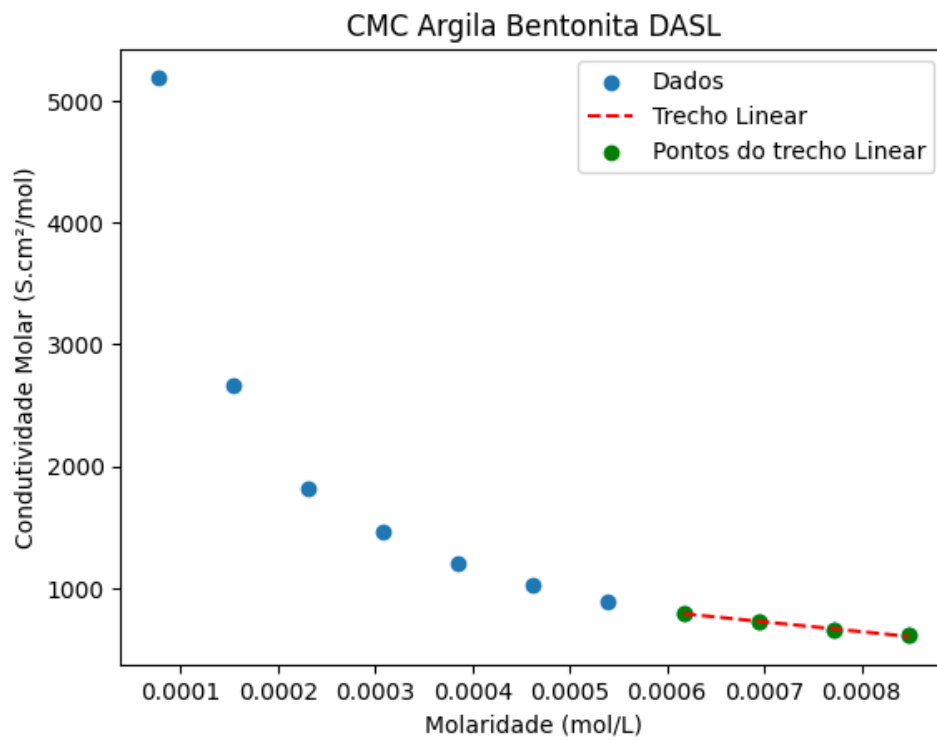
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 15: CMC da amostra de Cloisite Na+.



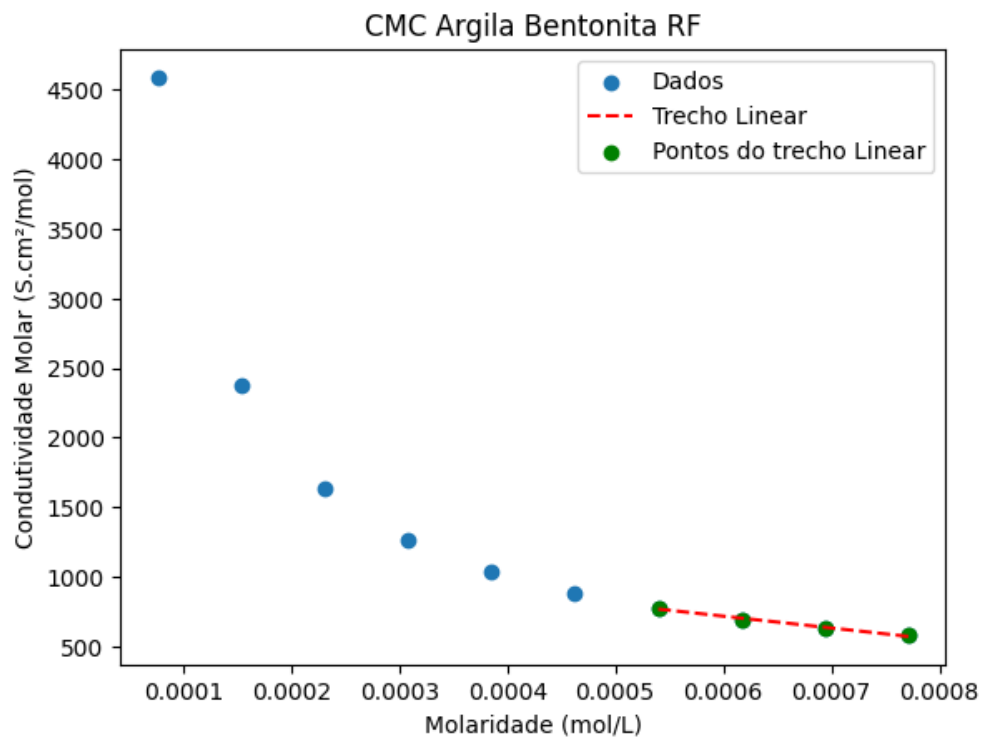
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 16: CMC da amostra de Bentonita DASL.



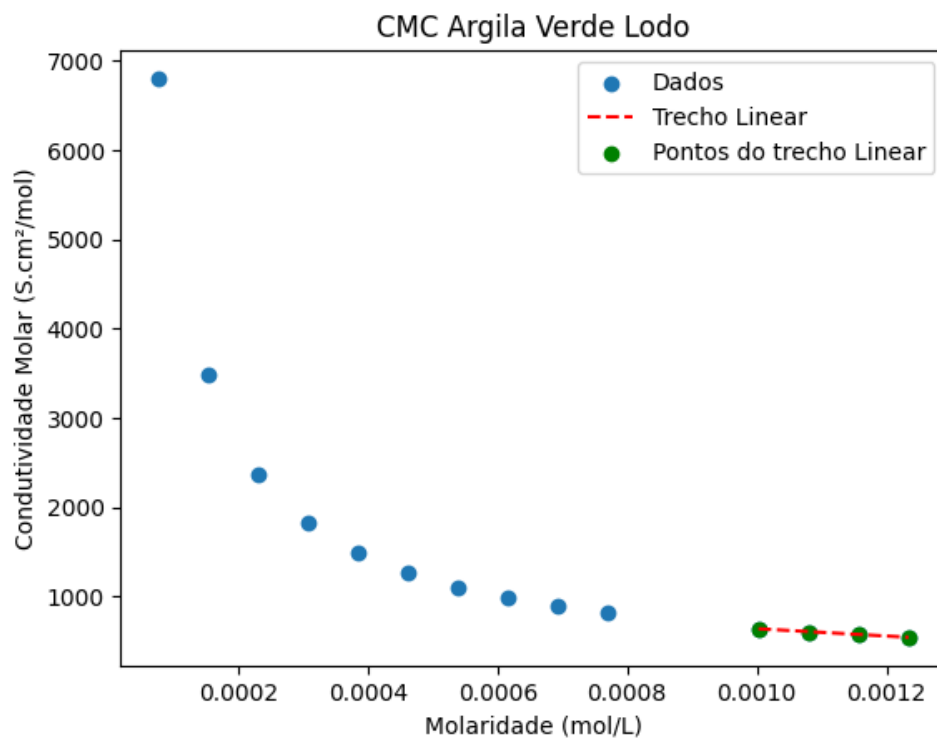
Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 17: CMC da amostra de Bentonita RF.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Gráfico 18: CMC da amostra de Verde Lodo.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

A identificação do ponto de virada é objetiva e destacada em todos os gráficos. Para identificar o trecho de comportamento linear na curva, foi usada a técnica de Regressão Linear Simples (RLS). Esse trecho é identificado automaticamente pelo algoritmo assim que as aferições são encerradas. O comportamento linear da curva de condutividade molar fica evidenciado com uma reta tracejada. No relatório gerado pelo equipamento, além de um gráfico do tipo, também é fornecido o valor da CTC e o ponto de virada. Na tabela 6 são apresentadas as variáveis para cálculo da CTC, a CTC e o valor do ponto de virada de cada amostra em mol/L.

As tabelas com todos os dados tratados e usados para formação dos gráficos da CMC podem ser vistas no apêndice B.

Tabela 6: Dados do ensaio de CMC.

Bentonita	V (ml)	C (N)	m (g)	CTC (mEq/100g)	CMC (mol/L)	$\Omega_i - \Omega$ (%)
RF	14	0,01	0,5	28,00	0,000539836	10,6
DASL	16	0,01	0,5007	31,96	0,000616956	8,6
Chocolate	22	0,01	0,503	43,74	0,000848314	7,0
Verde Lodo	26	0,01	0,5025	51,74	0,001002553	5,3
Chocobofo	28	0,01	0,5	56,00	0,001079673	1,8
Bentogel	24	0,01	0,5013	47,88	0,00027763	5,5
Brasgel	28	0,01	0,5024	67,68	0,000323902	5,8
Cloisite Na ⁺	40	0,01	0,5	80,00	0,000462717	2,5

Fonte: Produzido pelo autor (2023).

O critério que Brasileiro (2016) estabeleceu para reduzir a subjetividade do ponto de virada não se aplicou à Bentonita DASL, pois ocorreu acima de 10% de diferença da aferição anterior. Isso demonstra que podem haver a possibilidade de alguma amostra fugir dessa regra. Na tabela 7 foi feita a comparação dos valores de CTC para os dois métodos realizados neste trabalho.

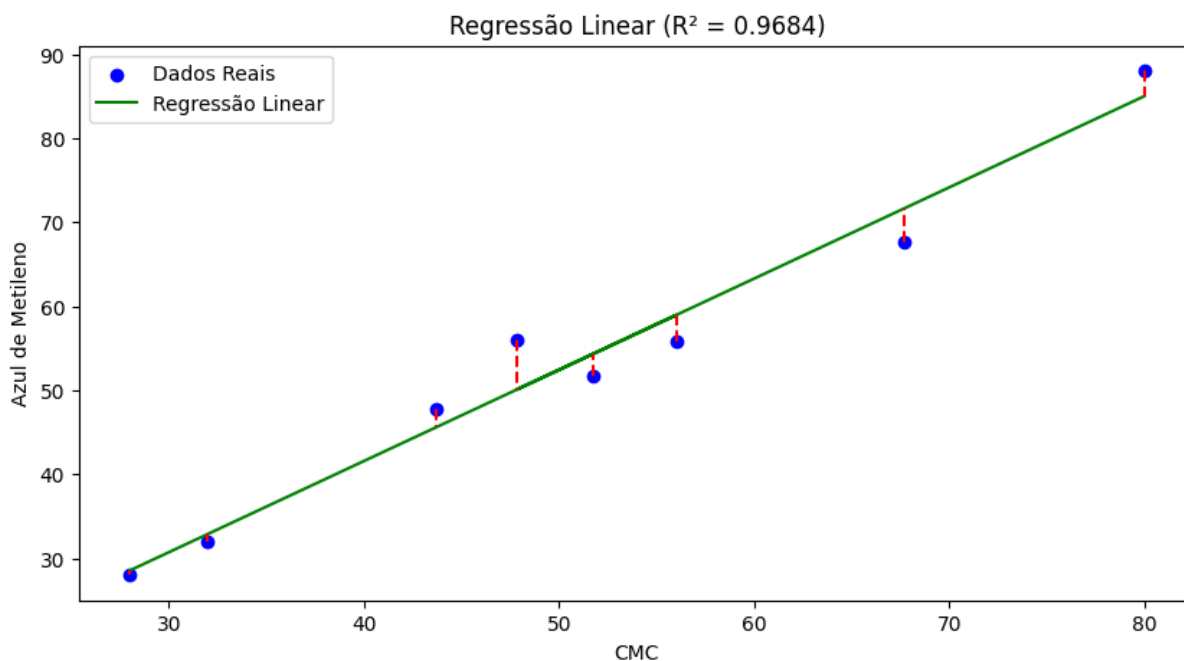
Tabela 7: Comparação dos valores de CTC em mEq/100g para os dois métodos.

Bentonita	CTC (mEq/100g)	
	CMC	Azul de metileno
RF	28,00	28,00
DASL	31,96	31,96
Chocolate	43,74	47,71
Verde Lodo	51,74	51,74
Chocobofo	56,00	55,85
Bentogel	47,88	56,00
Brasgel	67,68	67,68
Cloisite Na ⁺	80,00	88,00

Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Das oito amostras ensaiadas, quatro tiveram o mesmo valor (RF, DASL, Verde Lodo e Brasgel), uma teve uma diferença ínfima (Chocobofo) e três tiveram diferenças relativamente pequenas, mas não fogem das faixas de CTC vistas na literatura. Por fim, no gráfico 19 é possível observar que há uma correlação fortíssima entre os métodos de calcular CTC através da CMC e o tradicional usando azul de metileno. A linha tracejada vermelha no gráfico marca a distância da tendência calcula.

Gráfico 19: Tendência e regressão linear entre os métodos para calcular CTC.



Fonte: Produzido pelo autor (2023).

Com base no valor calculado da correlação (98,41%) e no coeficiente de determinação (96,84%) e uma linha de tendência positiva implica que os dados são diretamente proporcionais. Pela proximidade de 1, pode-se classificar essa correlação como muito forte. Interpretando a informação como um todo, conclui-se que 96,84% da variação da CMC é explicada pela CTC por azul de metileno. Ou seja, existe uma forte relação entre ambos os métodos. Os outros 3,16% pode ser explicado por erros de operação e subjetividade na avaliação.

Em síntese aos resultados descobertos pela pesquisa, constatou-se que uma das principais limitações identificadas neste processo manual pode ser erros de leitura do operador devido à necessidade de concentração e ao tempo prolongado de execução sem intervalos. Além disso, a subjetividade no resultado do ensaio, influenciada pela experiência do operador, levou à busca por uma solução de automatização. A automatização proposta, seguindo o princípio USA, concentrou-se na etapa final do processo, envolvendo a medição da condutividade elétrica. O Arduino Nano desempenhou um papel crucial na conversão analógica para serial do sensor de condutividade, possibilitando a coleta de dados precisos. A conexão simplificada entre esses componentes garantiu que o fluxo de informações ocorresse sem interrupções. O enclausuramento dos componentes eletrônicos oferece segurança contra líquidos e poeira, garantindo a durabilidade e a confiabilidade do protótipo. A utilização da manufatura aditiva para fabricar a caixa agilizou o processo de desenvolvimento, e a montagem bem-sucedida dos componentes eletrônicos na estrutura confirma a funcionalidade do sistema. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que o algoritmo de calibração automática desenvolvido para o sensor demonstrou eficácia, garantindo uma excelente correlação com o instrumento de bancada de referência, tanto nas medições realizadas com a solução de calibração da Hanna Instruments como nas aferições com NaCl solubilizado em água destilada. A perfeita correlação evidenciada no gráfico 2 destaca a confiabilidade e precisão do protótipo do sensor, validando sua aplicabilidade para medições de condutividade. Esse resultado reforça a viabilidade da utilização do sensor automatizado em aplicações práticas, fornecendo medidas confiáveis e respaldando seu potencial impacto na área de monitoramento e análise de condutividade em diversos cenários. A interface de monitoramento do processo, desenvolvida no Scilab representa um elemento essencial deste projeto. Seu design intuitivo e a gama de funcionalidades oferecidas, como a capacidade de exibir gráficos, armazenar dados, gerar relatórios e realizar aquisições de informações, contribuem para uma operação eficiente do equipamento. A automatização do processo de determinação da CTC foi fundamental para obter resultados mais precisos, reduzir erros operacionais e aumentar a eficiência da aferição. Os gráficos de condutividade ao longo do tempo evidenciam a variação da condutividade em resposta à adição periódica do tensoativo, com degraus marcando cada nova titulação, conforme exposto na literatura. Ademais, o cálculo da CTC usando o Azul de Metileno como tensoativo já pode fornecer os valores na unidade comumente usada de mEq/100g. Isso não apenas proporciona segurança, mas também promove a padronização do processo e a geração de resultados mais confiáveis. Isso é corroborado pelo resultado da CTC fornecido de forma totalmente objetiva, baseado em critérios perfeitamente embasados na literatura, como apontados nos gráficos 11 a 18. Por fim, a correlação muito forte entre os métodos de caracterização demonstra a confiabilidade na automação do processo.

Portanto, o desenvolvimento deste equipamento automatizado representa um avanço significativo na determinação da CTC não só de argilas bentoníticas, mas de quaisquer análises

que levem essa propriedade em consideração. Inclusive, cita-se seus benefícios para mineradoras de bentonita que realizam o ensaio com azul de metileno diariamente para expedir lotes de produção. Além de tornar o processo mais eficaz, ele oferece a possibilidade de maior controle e precisão, promovendo a otimização da produção e a redução de custos. Compatível com a filosofia de código aberto, este trabalho contribui para a democratização do acesso à tecnologia e a independência de fornecedores, beneficiando a indústria e a comunidade acadêmica. A automatição do processo abre caminho para novas pesquisas e aplicações, e o equipamento resultante deste trabalho tem potencial para se tornar uma ferramenta valiosa em laboratórios e indústrias que lidam com argilas bentoníticas e outras substâncias que necessitem caracterizar sua CTC, pois dão mais celeridade e precisão às suas caracterizações.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos propostos para o presente trabalho, conclui-se que:

Esta pesquisa obteve êxito em desenvolver e construir um equipamento que realize a medição da CTC através da CMC do tensoativo usado de forma automatizada, fornecendo uma abordagem alternativa precisa, mais rápida e objetiva aos métodos tradicionais para sua determinação. Este método se mostrou superior ao método do azul de metileno, pois eliminou a subjetividade na escolha do ponto de virada com a automatização do monitoramento e cálculos.

A adoção de *software* e *hardware* livres como parte do desenvolvimento deste sistema destaca-se como uma escolha competente, reduzindo custos, aumentando a flexibilidade e permitindo a integração com sistemas já existentes, uma vez que os dados gerados podem ser exportados. Essa abordagem também reflete os benefícios do uso de tecnologias de código aberto, promovendo autonomia tecnológica, independência de fornecedores e democracia no acesso à informação.

Foi possível equiparar o desempenho de um instrumento de bancada confiável com o sensor adotado para aferição da condutividade através do algoritmo de monitoramento. Isso se deu, principalmente pela escolha de um fornecedor que disponibilizou livremente todas as informações do seu *hardware*, como a modelagem matemática do componente usada para elaboração do algoritmo de calibração automática.

A aplicação da técnica de Regressão Linear Simples (RLS) para identificar o trecho de comportamento linear na curva da condutividade molar permitiu a determinação precisa da Concentração Micelar Crítica (CMC), corroborando com o exposto na revisão bibliográfica sobre o ponto de virada de um tensoativo.

Os resultados da CTC das amostras ensaiadas do processo automatizado e do manual possuem uma forte correlação, demonstrando que a variação da CMC do azul de metileno pode ser usada para medição da CTC obtida pelo método de adsorção do azul de metileno.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fabricar clipe que prenda a sonda ao becker de vidro;
- Usar bateria recarregável para que se torne mais portátil;
- Criar inicialização automática da interface de monitoramento;
- Realizar novos testes titulando quantidades menores de tensoativo para observar os fenômenos decorrentes, além de fomentar um banco de dados mais rico;
- Usar conversor A/D de 12bits ou 14bits para melhor resolução do sensor;
- Usar um conversor dedicado e dispensar o uso do arduino;
- Mensurar temperatura junto com a condutividade, assim, reduzindo erros.
- Reescrever as bibliotecas usadas e criar APIs para facilitar e modularizar as etapas do processo, facilitando sua manutenção e inserção de novas funções;
- Reescrever o código usando o conceito de máquina de estados Finita;
- Realizar novos testes com diferentes tipos de tensoativo para observar o comportamento deles e afim de encontrar um que seja o ideal para medição de CTC usando este método;
- Automatizar operação de titulação do tensoativo;
- Desenvolver uma metodologia no tratamento dos dados para que os valores calculados com base nas aferições em tempo real sejam organizados e apresentados de forma mais objetiva e prática;
- Avaliar a possibilidade de inferir outras propriedades das amostras ensaiadas através da condutividade elétrica;
- Avaliar o uso de redes neurais para prever características das amostras ensaiadas, uma vez que quanto mais ensaios, maior será o banco de dados para treinar a máquina.
- Avaliar a possibilidade de inferir as propriedades reológicas dos materiais ensaiados, visto que a mensuração de temperatura e condutividade serão feitas simultaneamente.

REFERÊNCIAS

- ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica, 2023. **Informações técnicas - Definição e Classificação**. Disponível em: <<https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>>. Acesso em 30 de jul. 2023.
- ALMEIDA, Isabela A.; STUCCHI, Giovana; REIS, Antonio G. P.; TORO, Bruna F.; BICA, Marcos R. R. **Desenvolvimento de dispositivo de medição de condutividade elétrica da água**. Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia - COBICET, IV, 2023, Cidade. Anais.p.
- ARDUINO. **Language Reference**. 2023. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- ARDUINO. **Nano**. 2023. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/hardware/nano>>. Acesso em 19 set. 2023.
- ATMEL. Datasheet: **Atmel Atmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V**. 2014. Disponível em: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-Atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2023.
- BARONI, M. P. M. A.; TEIXEIRA, S. R.; DIXON, J. B.; WHITE, G. N. **Aplicação de programa de análise de imagens na interpretação de fotomicrografias de alta resolução de argilominerais**. Cerâmica, v. 52, p. 179-184, 2006.
- BIZELLO, S., RUSCHEL, R. **Estudo de CAD livre para implementação de ferramenta de projeto**. Gestão & Tecnologia de Projetos, São Carlos, v. 6, n. 1, maio. 2011. Disponível em: <<http://www.iau.usp.br/posgrad/gestaodeprojetos/index.php/gestaodeprojetos/article/view/171>>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- BRANDON, David; KAPLAN, Wayne D. **Microstructural characterization of materials**. John Wiley & Sons, 2013.
- BRASILEIRO, C. T. **Estudo de Correlação entre Métodos de Determinação de Troca de Cátions (CTC) de Argilas Bentoníticas**; Monografia (Curso de Graduação em Engenharia de Materiais). Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2016.
- CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10th ed. Wiley: Hoboken-NJ, 2018.
- CAMPANA, g. a.; OPLUSTIL, C. P. **Conceitos de automação na medicina laboratorial: revisão de literatura**. J Bras Patol Med Lab. v. 47, n. 2, p. 119-127, abril 2011.
- CHRISTIAN, Yhan. **Controle PID de temperatura com Arduino e Scilab**. Disponível em: <<http://engenheirocaicara.com/projeto-do-mes-parte-1-controle-pid-de-temperatura-com-arduino-e-scilab/>>. Acesso em 20 jun 2023.
- CUNHA, Alessandro F. **O que são sistemas embarcados**. 2010. Disponível em: <http://files.comunidades.net/mutcom/ARTIGO_SIST_EMB.pdf>. Acesso em 20 jul. 2021.
- DALTIN, D. **Tensoativos: Química, Propriedades e Aplicações**. Editora Blucher, 2011.

DEBRAY, Yann; SCILAB ENTERPRISES. **Temperature monitoring tutorial with Scilab/Xcos and arduino**. Disponível em: <<https://www.scilab.org/community/news/Scilab-Arduino-low-cost-data-acquisition>>. Acesso em: 22 mai. 2021.

EISING, Renato et al. **Formação de micelas mistas entre o sal biliar colato de sódio e o surfactante aniônico dodecanoato de sódio**. Química Nova, v. 31, p. 2065-2070, 2008.

ELIPSE. **Soluções da Elipse**. 2015. Disponível em: <<https://www.elipse.com.br/case/solucoes-da-elipse-garantem-um-melhor-desempenho-ao-cenpes/>>. Acesso em 19 set. 2023.

ESTEVES, Gabriela M.; TAMASHIRO, Jacqueline R.; FERRAZ, Fabiana C. M.; SEMAAN, Felipe S.; MAGDALENA, Aroldo; KINOSHITA, Angela; PINTO, Edilson M. **Funcionalização da argila bentonita para adsorção de compostos orgânicos**. Exatas Online, Jequié-BA, v. 11, n. 2, p. 114-125, dez. 2020. Disponível em: <http://www2.uesb.br/exatasonline/index.php/v11n2>. Acesso em: 30 jul. 2023

EUGÊNIO, Mykaleem S. F.; COGO, F. D.; SOUSA, L. L.; MESSIAS, A. S. R.; OLIVEIRA, E. P. **Estudo da utilização de materiais cerâmicos avançados nas indústrias petroquímicas**. Intercursos Revista Científica, v. 18, n. 1, p.91-110, 2019. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/intercursosrevistacientifica/article/view/3730>. Acesso em: 24 jul. 2023.

FAN, Jinhui; LU, Xiaoyan; CAO, Wenwu. **Computer-aided characterization of ferroelectric phase transitions and domain structures using polarizing light microscopy**. Applied Physics Letters, v. 120, n. 7, 2022.

FERNANDES, Elaine F. S.; AGUIAR, E. S.; LIMA, E. K. A.; ALVES, K. E. S.; FARIAS, J. R. S.; ALMEIDA, Y., B. A.; SILVA, .H. J. B.; BRAGA, A. N. S.; SANTOS, V. B. **Argila bentonita: uma breve revisão das propriedades e aplicações**. Research, Society and Development, v. 12, n. 2, p. e7912239917-e7912239917, 2023.

FERREIRA, H.S. **Otimização do Processo de Organofilização Visando seu Uso em Fluidos de Perfuração de Base Não Aquosa**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2009.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaios de Materiais**. 2. ed. LTC. Rio de Janeiro, 2012.

GARNICA, A. I. C.; CURBELO, F. D. da S.; MAGALHÃES, R. R.; DE SOUSA, R. P. F. **Efeitos de surfactantes na organofilização de argilas bentoníticas para uso em fluidos de perfuração de base microemulsionada**. HOLOS, [S. l.], v. 4, p. 89–105, 2018. DOI: 10.15628/holos.2018.7089. Disponível em: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7089>. Acesso em: 19 set. 2023.

GROOVER, Mikell P. **Automação Industrial e Sistemas de Manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

Impropriatório: o mundo do software livre. Direção: Jota Rodrigo. Roteiro, pesquisa, entrevistas e imagens: Daniel Pereira Bianchi e Jota Rodrigo. Osasco-SP, 2008. Documentário, 32'04". Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=MKDn9quw5sc>>. Acesso em: 25 fev. 2014.

IONASHIRO, M. **Giolito: Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: Giz Editorial, 2004.

LENG, Yang. **Materials characterization: introduction to microscopic and spectroscopic methods**. John Wiley & Sons, 2013.

LOPES, M. A. M. **A importância dos sistemas supervisórios no controle de processos industriais**. 49f. Monografia (Curso de Controle e Automação) – UFOP, Ouro Preto, 2009.

LUZ, Adão B.; OLIVEIRA, Cristiano H. **Rochas & minerais industriais: usos e especificações**. Cap. 11: Argila – Bentonita. 2ed. CETEM: Rio de Janeiro, 2008. p. 239-253.

MACIEL, Francisco. **O que é Linux Embarcado**. 2014. Disponível em: <<http://softwarelivre.blog.br/2014/05/24/o-que-e-linux-embarcado/>>. Acesso em 24 jul. 2022.

MECATRÔNICA ATUAL. **O linux na indústria**. 2011. Disponível em: <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/903-o-linux-na-industria>>. Acesso em: 10 mar. 2021.

MENEZES, R. R.; ÁVILA JÚNIOR, M. M.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. **Comportamento de expansão de argilas bentoníticas organofílicas do estado da Paraíba**. Cerâmica, v. 54, p. 152-159, 2008.

MENEZES, R. R.; FERREIRA, H. S. ; NEVES, G. A. ; FERREIRA, H. C. . **Estudo do Comportamento Reológico das Argilas Bentoníticas de Cubati, Paraíba, Brasil**. In: II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, 2010, Campina Grande. Anais do II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste. Campina Grande, 2010. p. 59-68.

MOLLOY, Derek. **Exploring Raspberry Pi(R) - Interfacing to the real world with embedded linux**. Indianapolis: Wiley, 2016.

MORAES, Solange Leite de; REZENDE, Maria Olímpia Oliveira. **Determinação da concentração micelar crítica de ácidos húmicos por medidas de condutividade e espectroscopia**. Química Nova, v. 27, p. 701-705, 2004.

NOERGAARD, Tammy. **Embedded Systems Architecture: A Comprehensive Guide for Engineers and Programmers**. Newnes: Burlington, 2005.

OSIER-MIXON, Jeffrey M. **Hardware Aberto: Como e Quando Funciona: aplicando conceitos de software livre à objetos físicos**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibm.com/developerworks/br/library/os-openhardware/>> Acesso em: 17 ago. 2022.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich. **Projeto na Engenharia: Fundamentos do Desenvolvimento Eficaz de Produtos, Métodos e Aplicações**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

PAREDE, Ismael M.; GOMES, Luiz E. L; HORTA, Edson. **Eletrônica: Automação Industrial**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

PIO, I.; VERA, N.; GOMES, Érico; LUZ, F. .; LEITE, R.; BRANDIM, A. **Caracterização dos materiais aplicada às suas propriedades, microestrutura e seu processamento** . Concilium, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 684–696, 2022. DOI: 10.53660/CLM-253-228. Disponível em: <https://clium.org/index.php/edicoes/article/view/253>. Acesso em: 24 set. 2023.

RAGHAVAN, P.; LAD, Amol; NEELAKANDAN, Sriram. **Embedded Linux System Design and Development**. Boca Raton: Auerbach Publications, 2006.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi Touch Display**. Disponível em <<https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/display.html>>. Acesso em 19 set. 2023.

SANTOS, Willian Alves dos. **A influência do comprimento da cadeia alquila de álcoois no comportamento reológico da fase nemática calamítica liotrópica**. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá, p. 61. 2020.

SCADABR (2012). **Manual do software**. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

SCILAB ENTERPRISES. **Scilab for very beginnners**. Disponível em: <https://www.scilab.org/sites/default/files/Scilab_beginners_0.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2023.

SCILAB. **About Scilab**. 2021. Disponível em: <<http://www.scilab.org/scilab/about>>. Acesso em 22 jan 2023.

SCILAB. **ATOMS: Serial Communication Toolbox details**. Disponível em: <<https://atoms.scilab.org/toolboxes/serial>>. Acesso em 25 fev 2023.

SILVA, A. R. V; FERREIRA, H. C., **Argilas bentoníticas: conceitos, estruturas, propriedades, usos industriais, reservas, produção e 105 produtores/fornecedores nacionais e internacionais**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.3.2, 26-35. 2008.

SILVA, Darcieley Lindalva. **Estudo da sorção de tensoativos orgânicos e argilas bentoníticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais_ - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, p.120. 2013.

SILVA, E. M., CUNHA, J. P. V. S. **SCILAB, SCICOS e RLTOOL: Softwares Livres no Ensino de Engenharia Elétrica**. Anais do Congresso Brasileiro de Automática, XVI, 2006. Salvador, Brasil, pp. 1620-1625

SILVA, J. V. N.; SCHEIBLER, J. R.; RODRIGUES, M. G. **Avaliação de argila bentonita do tipo chocobofo na adsorção de zinco em sistema de banho finito**. In: 58 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2014, Bento Gonçalves/RS. anais do 58 Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2014.

SILVEIRA. Sérgio Amadeu. **Software Livre: a luta pela liberdade do conhecimento**. São Paulo: Editora Fundação Perseu Abramo, 2004.

SOFTTEX. **Software livre: tendências, oportunidades e desafios**. Campinas: Softex, 2014. Disponível em: <<http://www.softex.br/download/71029>>. Acesso em: 20 dez. 2016.

SOFTTEX; UNICAMP; Ministério da Ciência e Tecnologia. **O Impacto do Software Livre e de Código Aberto na Indústria de Software do Brasil**. Campinas: Softex, 2005. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8690.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2014.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. Editora Edgard Blucher, São Paulo: 1989.

SOUZA SANTOS, Pécio. **Ciência e Tecnologia de Argilas vol. 1**. 2 Ed., São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1989.

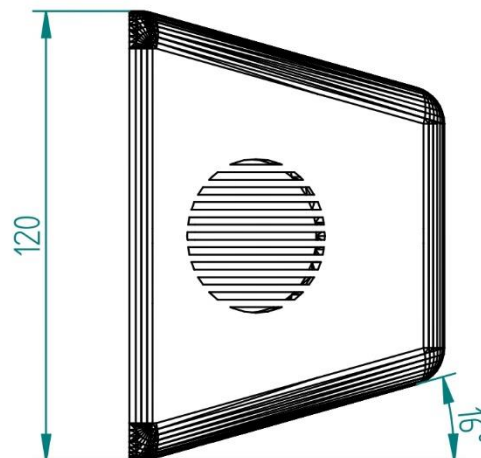
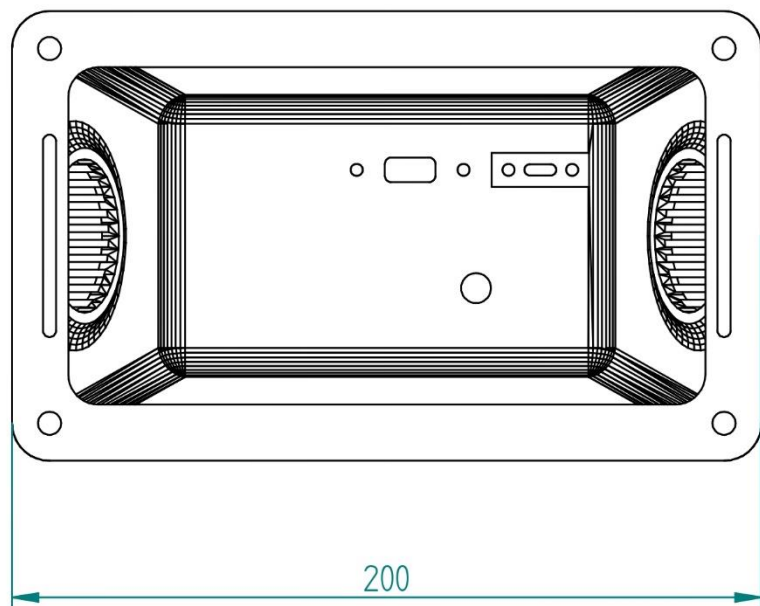
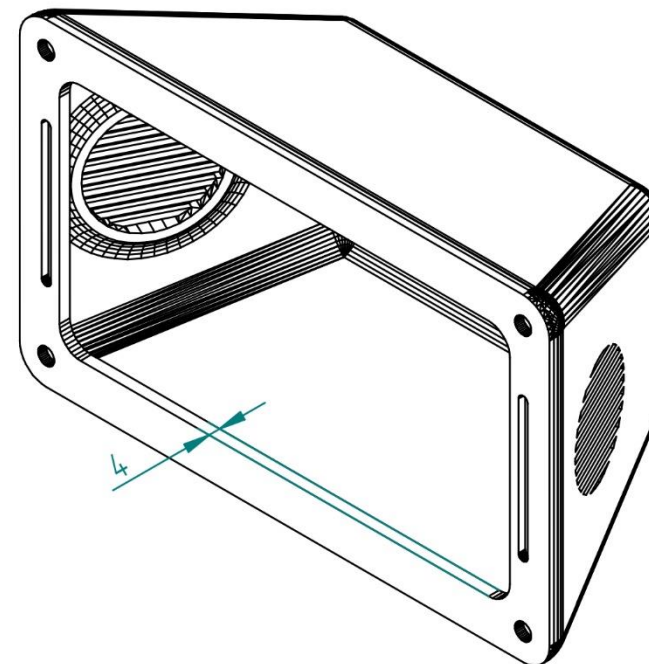
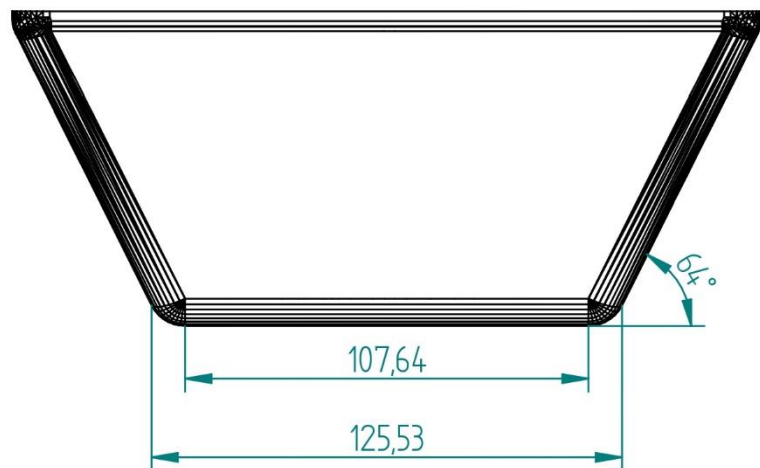
SOUZA SANTOS, Pésio. **Ciência e Tecnologia de Argilas vol. 3.** 2 Ed., São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1992.

SOUZA, A. F.; ULBRICH, C. B. L. **Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC - Princípios de Aplicações.** Artliber, 2009.

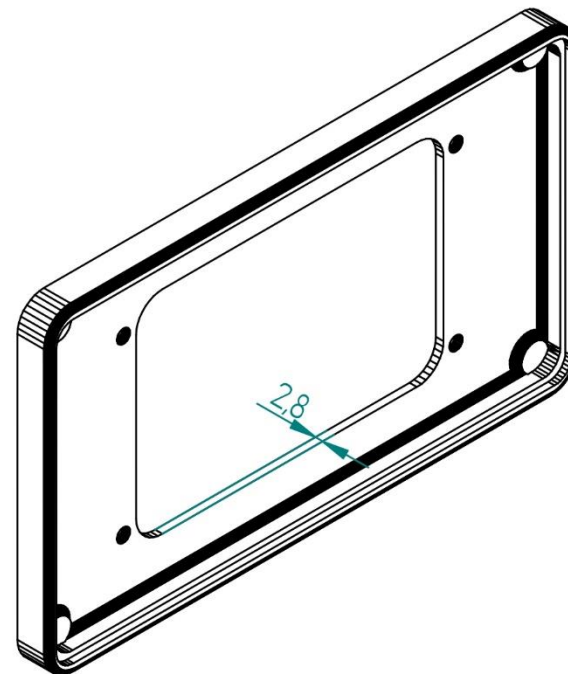
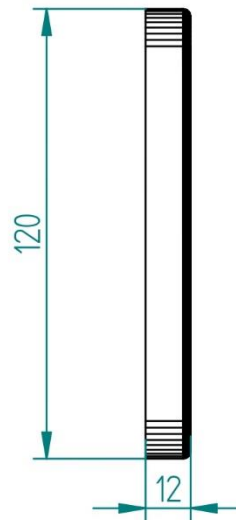
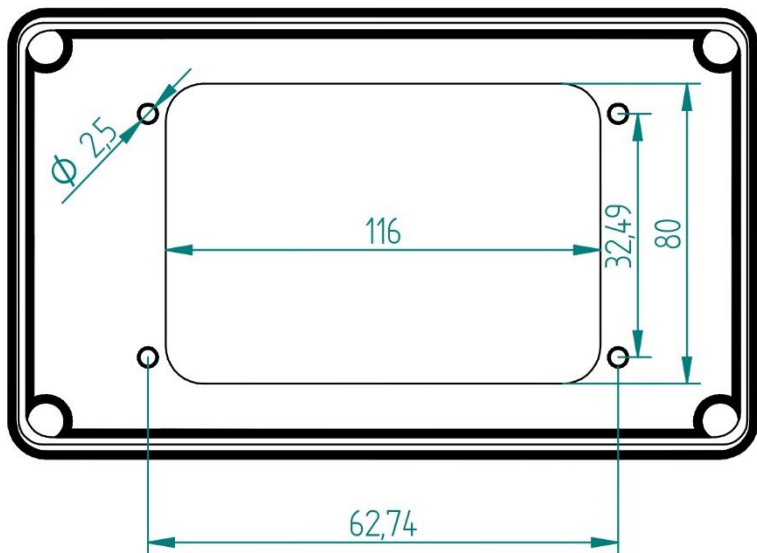
TEIXEIRA-NETO, E.; TEIXEIRA-NETO, A. A. **Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado.** Química Nova, v. 32, n. 3, p. 809-817, 2009.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência dos materiais.** Editora Blucher, 1970.

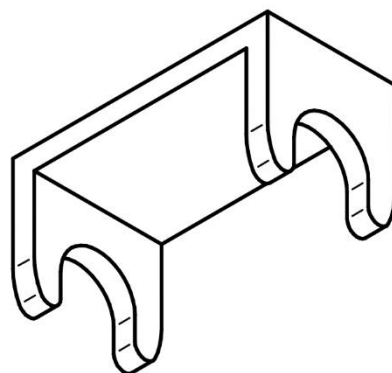
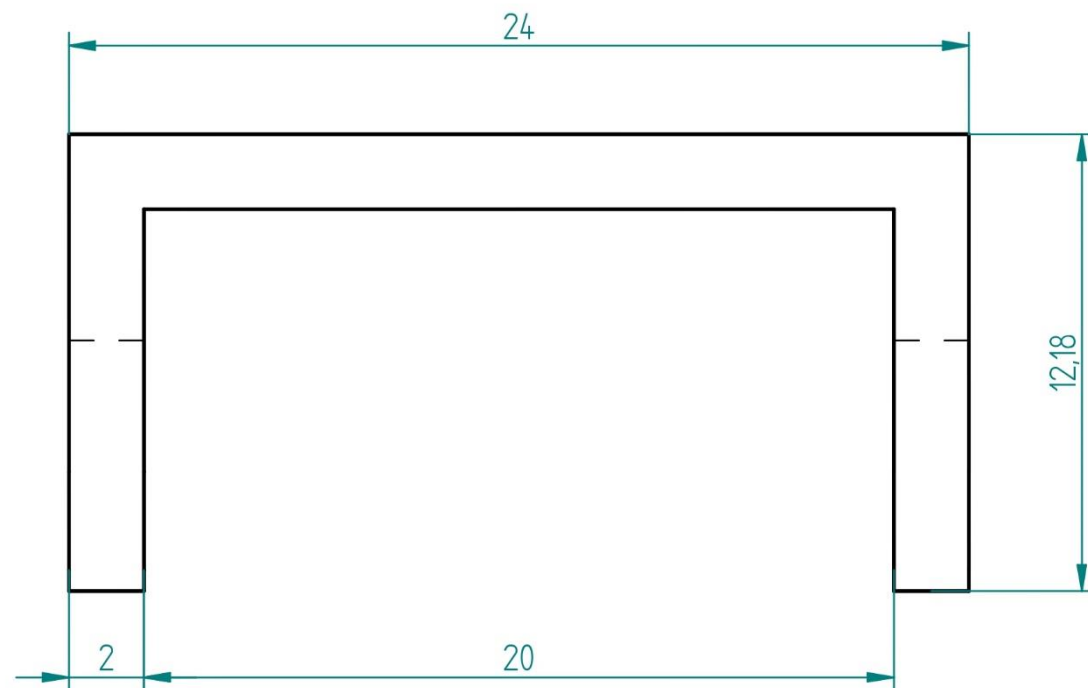
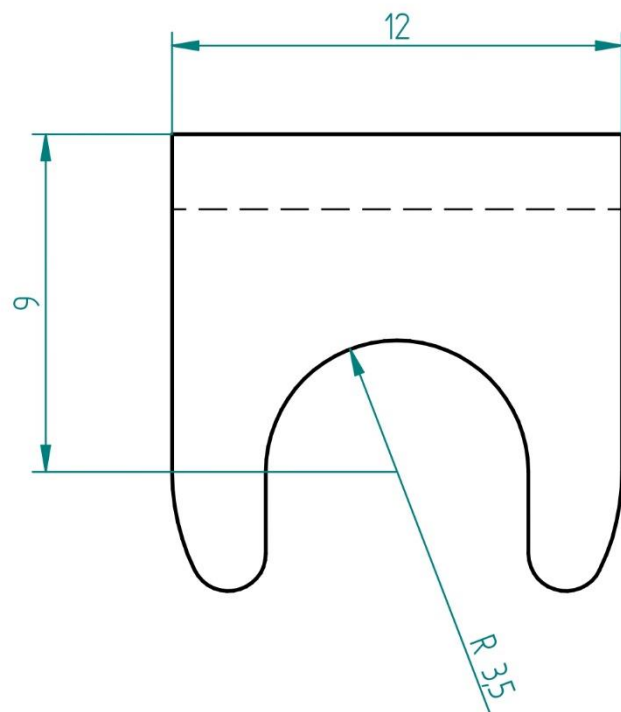
APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DA ESTRUTURA E ESQUEMA ELÉTRICO



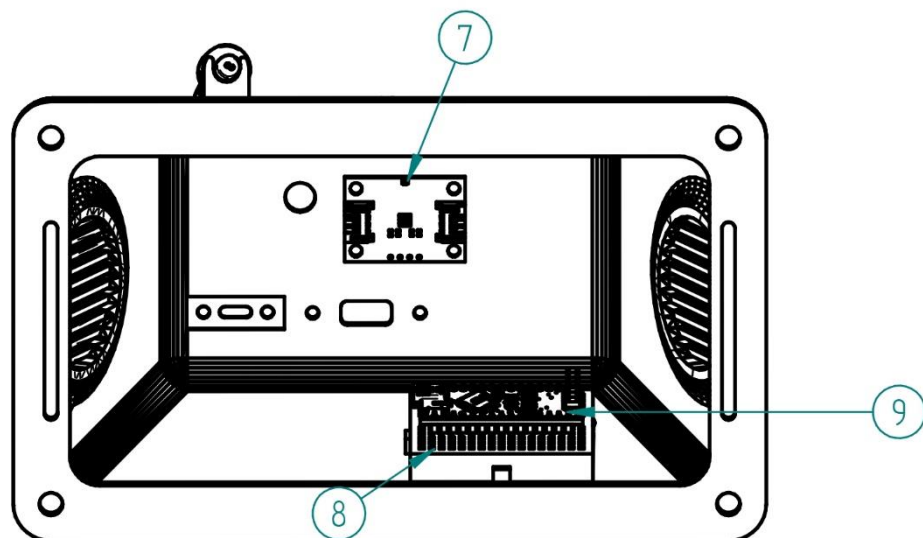
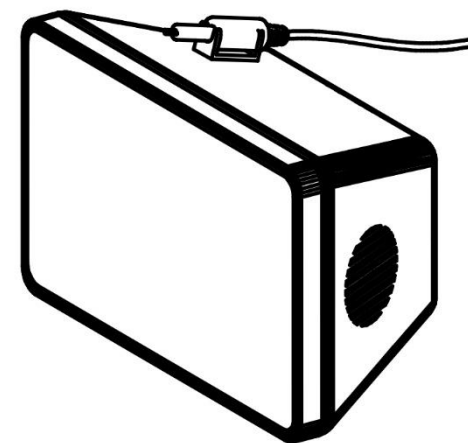
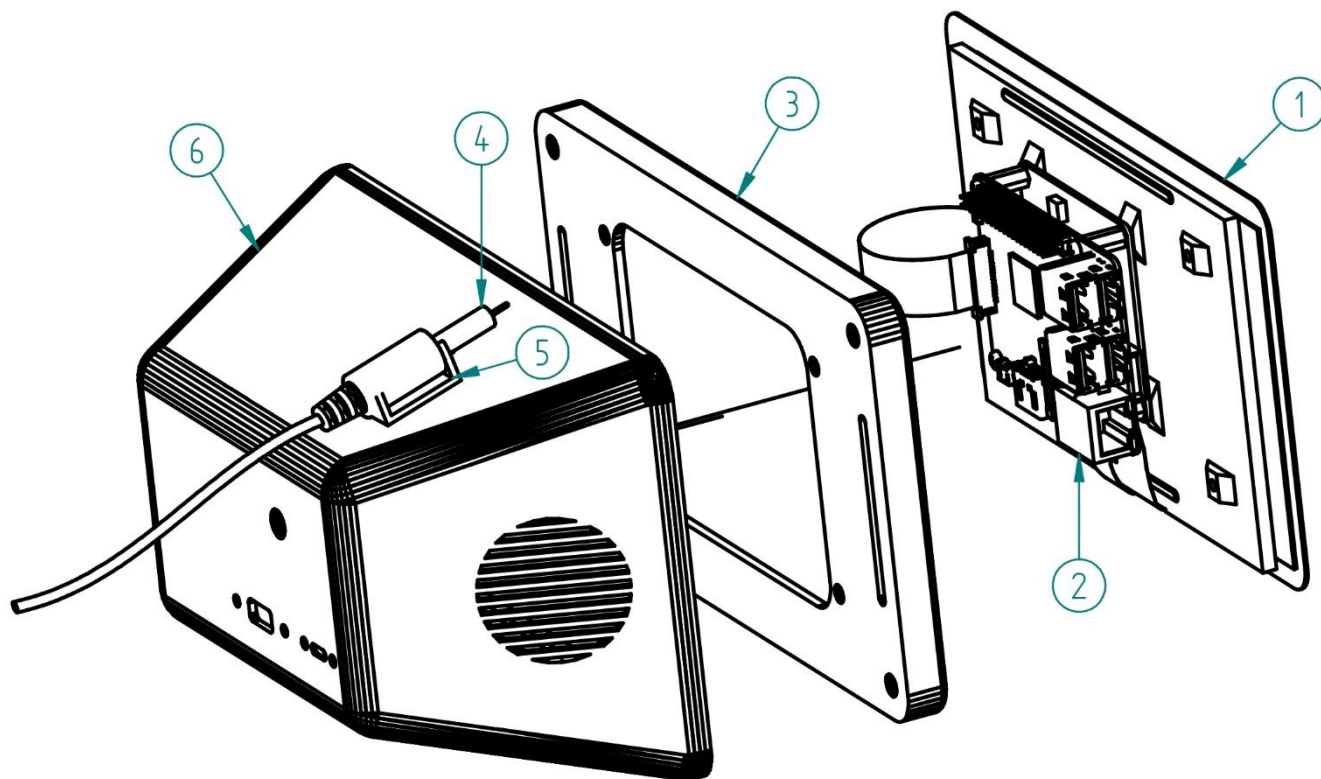
Projeto			
Protótipo de equipamento automatizado para medição de CTC			
Peça			
Caixa para montagem dos componentes			
Formato	Projetista		Revisão
A4	João Antonio da Silva Neto		00
Data de criação	Norma	Escala	Folha/nº folhas
10/05/2023		1 : 2	1 de 5
Observações			
Fabricada em PLA por manufatura aditiva (FDM)			



Projeto			
Protótipo de equipamento automatizado para medição de CTC			
Peça			
Suporte de fixação da tela de 7"			
Formato	Projetista		Revisão
A4	João Antonio da Silva Neto		00
Data de criação	Norma	Escala	Folha/nº folhas
10/05/2023		1 : 2	2 de 5
Observações			
Fabricada em PLA por manufatura aditiva (FDM)			



Projeto			
Protótipo de equipamento automatizado para medição de CTC			
Peça			
Suporte do sensor de condutividade			
Formato	Projetista	Revisão	
A4	João Antonio da Silva Neto	00	
Data de criação	Norma	Escala	Folha/nº folhas
10/05/2023		5 : 1	3 de 5
Observações			
Fabricada em PLA por manufatura aditiva (FDM)			



ITEM	QTDE	PEÇA	DESCRIÇÃO
1	1	Tela de 7"	
2	1	Raspberry Pi 3B+	
3	1	Suporte para tela	
4	1	Sonda do sensor	
5	1	Suporte da sonda	
6	1	Caixa	
7	1	Placa do sensor	
8	1	Protoboard	
9	1	Arduino Nano	

Projeto

**Protótipo de equipamento
automatizado para medição de CTC**

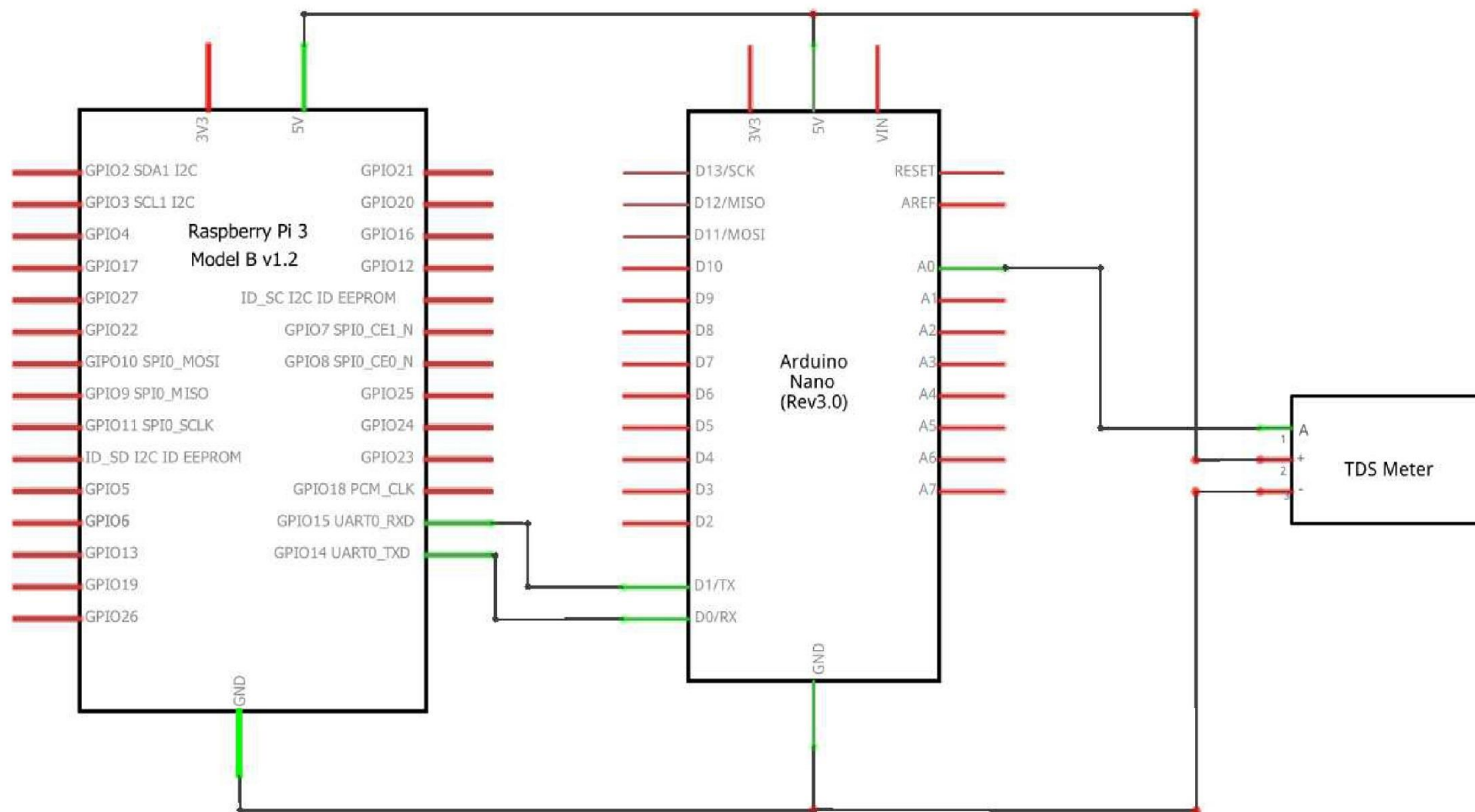
Peça

Vista explodida do protótipo

Formato	Projetista	Revisão	
A4	João Antonio da Silva Neto	00	
Data de criação	Norma	Escala	Folha/nº folhas
10/05/2023		1 : 2	4 de 5

Observações

Montagem dos componentes eletrônicos



Projeto	Protótipo de equipamento automatizado para medição de CTC			Formato	Projeta	Revisão
				A4	João Antonio da Silva Neto	00
				Data de criação	Norma	Folha/nº folhas
Circuito	Esquema de ligação simplificado			10/05/2023	ABNT 5410	5 de 5
				Observações		

APÊNDICE B1 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BRASGEL

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00052131		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00053698	6962,961608	7,71194831E-05	319,85	47,8%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00056037	3633,128605	0,000154239	319,85	31,5%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,0005759	2489,211014	0,000231358	319,85	23,0%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00059139	1917,122549	0,000308478	319,85	15,8%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,0006222	1613,600027	0,000385597	319,85	13,6%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,0006452	1394,373108	0,000462717	319,85	10,3%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,000675	1250,378861	0,000539836	319,85	9,5%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00069848	1132,139331	0,000616956	319,85	9,2%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,00071362	1028,159266	0,000694075	319,85	8,7%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00072372	938,4399	0,000771195	319,85	6,6%	0,000231358
22	3,7	0,0814	0,3	0,00074379	876,7858655	0,000848314	319,85	5,6%	0,000254494
24	3,7	0,0888	0,3	0,00076634	828,0873277	0,000925434	319,85	5,0%	0,00027763
26	3,7	0,0962	0,3	0,00078881	786,8010764	0,001002553	319,85	4,5%	0,000300766
28	3,7	0,1036	0,3	0,00081122	751,3572886	0,001079673	319,85	5,8%	0,000323902
30	3,7	0,111	0,3	0,00081868	707,7156703	0,001156792	319,85	3,7%	0,000347038
32	3,7	0,1184	0,3	0,00084102	681,5884637	0,001233912	319,85	3,4%	0,000370174
34	3,7	0,1258	0,3	0,00086331	658,4969082	0,001311031	319,85	3,1%	0,000393309
36	3,7	0,1332	0,3	0,00088556	637,9422658	0,001388151	319,85	4,5%	0,000416445
38	3,7	0,1406	0,3	0,00089297	609,4234449	0,00146527	319,85	-	0,000439581

APÊNDICE B2 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BENTOGEL

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00030895		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00031252	4052,413054	7,71194831E-05	319,85	48,3%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00032319	2095,384895	0,000154239	319,85	31,1%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00033381	1442,826061	0,000231358	319,85	21,8%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00034793	1127,892674	0,000308478	319,85	16,8%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,00036198	938,7511054	0,000385597	319,85	13,4%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,00037598	812,5486689	0,000462717	319,85	11,1%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,00038993	722,3114508	0,000539836	319,85	10,2%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00040036	648,9281047	0,000616956	319,85	8,8%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,00041078	591,8377613	0,000694075	319,85	7,7%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00042117	546,1265858	0,000771195	319,85	7,6%	0,000231358
22	3,7	0,0814	0,3	0,00042809	504,6360682	0,000848314	319,85	6,1%	0,000254494
24	3,7	0,0888	0,3	0,00043846	473,7886182	0,000925434	319,85	5,5%	0,00027763
26	3,7	0,0962	0,3	0,00044882	447,6769553	0,001002553	319,85	5,0%	0,000300766
28	3,7	0,1036	0,3	0,00045916	425,2770058	0,001079673	319,85	5,3%	0,000323902
30	3,7	0,111	0,3	0,00046606	402,8899757	0,001156792	319,85	4,9%	0,000347038
32	3,7	0,1184	0,3	0,00047295	383,29322	0,001233912	319,85	4,5%	0,000370174
34	3,7	0,1258	0,3	0,00047984	366,001965	0,001311031	319,85	3,5%	0,000393309
36	3,7	0,1332	0,3	0,00049018	353,1172815	0,001388151	319,85	3,3%	0,000416445
38	3,7	0,1406	0,3	0,00050051	341,5820558	0,00146527	319,85	-	0,000439581

APÊNDICE B3 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BENTONITA RF

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00033886		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00035382	4587,945689	7,71194831E-05	319,85	48,3%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00036575	2371,320355	0,000154239	319,85	31,2%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00037766	1632,358797	0,000231358	319,85	22,6%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00038956	1262,845601	0,000308478	319,85	18,2%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,00039847	1033,383482	0,000385597	319,85	14,2%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,00041034	886,8057365	0,000462717	319,85	12,4%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,00041924	776,6056795	0,000539836	319,85	10,6%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00042815	693,9718454	0,000616956	319,85	8,6%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,00044002	633,9657523	0,000694075	319,85	8,8%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00044596	578,2715108	0,000771195	319,85	-	0,000231358

APÊNDICE B4 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA BENTONITA DASL

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00040384		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00040036	5191,424838	7,71194831E-05	319,85	48,7%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00041078	2663,269926	0,000154239	319,85	31,6%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00042117	1820,421953	0,000231358	319,85	19,5%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00045227	1466,134049	0,000308478	319,85	18,2%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,00046261	1199,722772	0,000385597	319,85	14,8%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,00047295	1022,115253	0,000462717	319,85	12,4%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,00048329	895,2527403	0,000539836	319,85	11,3%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00049018	794,5138834	0,000616956	319,85	8,6%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,00050396	726,0883153	0,000694075	319,85	9,4%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00050741	657,9530615	0,000771195	319,85	7,2%	0,000231358
22	3,7	0,0814	0,3	0,00051775	610,3280252	0,000848314	319,85	-	0,000254494

APÊNDICE B5 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA CHOCOLATE

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00033028		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00034088	4420,154108	7,71194831E-05	319,85	48,4%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00035145	2278,607078	0,000154239	319,85	30,1%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00036848	1592,680108	0,000231358	319,85	23,5%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00037598	1218,823003	0,000308478	319,85	33,3%	9,25434E-05
13	3,7	0,0481	0,3	0,00040731	812,5453441	0,000501277	319,85	5,6%	0,000150383
14	3,7	0,0518	0,3	0,00041424	767,3436139	0,000539836	319,85	9,6%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00042809	693,8745938	0,000616956	319,85	9,7%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,000435	626,7331081	0,000694075	319,85	7,1%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00044882	581,9800419	0,000771195	319,85	7,0%	0,000231358
22	3,7	0,0814	0,3	0,00045916	541,2616437	0,000848314	319,85	7,0%	0,000254494
24	3,7	0,0888	0,3	0,00046606	503,6124696	0,000925434	319,85	5,6%	0,00027763
26	3,7	0,0962	0,3	0,0004764	475,1867152	0,001002553	319,85	5,8%	0,000300766
28	3,7	0,1036	0,3	0,00048329	447,6263702	0,001079673	319,85	4,7%	0,000323902
30	3,7	0,111	0,3	0,00049362	426,7144784	0,001156792	319,85	4,9%	0,000347038
32	3,7	0,1184	0,3	0,00050051	405,6286913	0,001233912	319,85	-	0,000370174

APÊNDICE B6– CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA CHOCOBOFE

Volume titulado	Concentração azul de metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00092098	-	0	319,85	-	0
2	3,7	0,0074	0,3	0,00097684	12666,57868	7,71194831E-05	319,85	49,3%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00099	6418,611486	0,000154239	319,85	33,0%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00099442	4298,178878	0,000231358	319,85	24,7%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00099884	3237,962574	0,000308478	319,85	19,3%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,00100773	2613,425193	0,000385597	319,85	13,7%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,00104379	2255,785348	0,000462717	319,85	15,8%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,00102565	1899,927524	0,000539836	319,85	16,3%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00098121	1590,405499	0,000616956	319,85	9,9%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,00099442	1432,726293	0,000694075	319,85	8,8%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00100773	1306,712597	0,000771195	319,85	8,3%	0,000231358
22	3,7	0,0814	0,3	0,00101666	1198,447301	0,000848314	319,85	7,9%	0,000254494
24	3,7	0,0888	0,3	0,00102115	1103,428471	0,000925434	319,85	6,1%	0,00027763
26	3,7	0,0962	0,3	0,00103923	1036,583312	0,001002553	319,85	14,3%	0,000300766
28	3,7	0,1036	0,3	0,00095945	888,6488875	0,001079673	319,85	1,8%	0,000323902
28,5	3,7	0,10545	0,3	0,00095945	873,0585562	0,001098953	319,85	1,7%	0,000329686
29	3,7	0,1073	0,3	0,00095945	858,0058225	0,001118233	319,85	0,5%	0,00033547
29,5	3,7	0,10915	0,3	0,00096812	853,7461347	0,001133967	320,85	2,2%	0,00034019
30	3,7	0,111	0,3	0,00095945	834,5918446	0,001149604	321,85	-	0,000344881

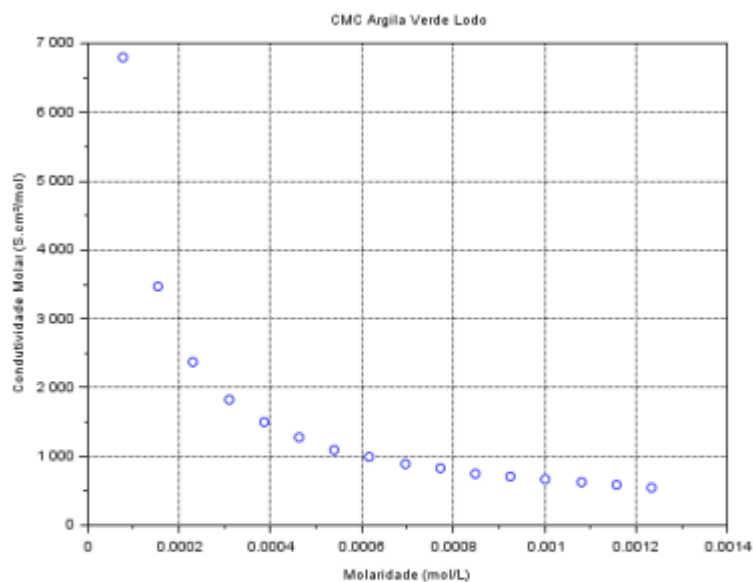
APÊNDICE B7 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA VERDE LODO

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo(g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00049464		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00052428	6798,282081	7,71194831E-05	319,85	48,9%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00053622	3476,553385	0,000154239	319,85	31,8%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00054822	2369,569824	0,000231358	319,85	22,5%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00056632	1835,852554	0,000308478	319,85	18,7%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,00057542	1492,281786	0,000385597	319,85	14,9%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,00058763	1269,95578	0,000462717	319,85	12,9%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,00059683	1105,575727	0,000539836	319,85	9,8%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00061537	997,4295329	0,000616956	319,85	10,7%	0,000185087
18	3,7	0,0666	0,3	0,00061848	891,0848108	0,000694075	319,85	6,8%	0,000208223
20	3,7	0,074	0,3	0,00064041	830,4127236	0,000771195	319,85	22,7%	0,000231358
26	3,7	0,0962	0,3	0,00064356	641,9209958	0,001002553	319,85	5,3%	0,000300766
28	3,7	0,1036	0,3	0,00065625	607,8230574	0,001079673	319,85	4,4%	0,000323902
30	3,7	0,111	0,3	0,00067225	581,1328716	0,001156792	319,85	6,3%	0,000347038
32	3,7	0,1184	0,3	0,00067225	544,8120671	0,001233912	319,85	-	0,000370174

APÊNDICE B8 – CÁLCULOS DO ENSAIO DA CMC PARA ARGILA CLOISITE NA⁺

Volume titulado	Concentração azul metileno (g/L)	Massa tensoativo (g)	Volume (L)	Condutividade (S/cm)	Ω (S.cm ² /mol)	C (mol/L)	MM (g/mol)	$\Omega_i - \Omega$ (%)	mols
0	3,7	0	0,3	0,00045452		0	319,85	-	
2	3,7	0,0074	0,3	0,00046342	6009,117041	7,71194831E-05	319,85	51,4%	2,31358E-05
4	3,7	0,0148	0,3	0,00045036	2919,884716	0,000154239	319,85	30,8%	4,62717E-05
6	3,7	0,0222	0,3	0,00046777	2021,841007	0,000231358	319,85	23,6%	6,94075E-05
8	3,7	0,0296	0,3	0,00047646	1544,551328	0,000308478	319,85	18,5%	9,25434E-05
10	3,7	0,037	0,3	0,00048513	1258,125653	0,000385597	319,85	14,4%	0,000115679
12	3,7	0,0444	0,3	0,00049811	1076,489753	0,000462717	319,85	11,3%	0,000138815
14	3,7	0,0518	0,3	0,00051538	954,6966776	0,000539836	319,85	9,6%	0,000161951
16	3,7	0,0592	0,3	0,00053261	863,2870363	0,000616956	319,85	16,1%	0,000185087
20	3,7	0,074	0,3	0,00055839	724,0582764	0,000771195	319,85	-4,2%	0,000231358
22	3,7	0,0814	0,3	0,00063986	754,2723133	0,000848314	319,85	2,2%	0,000254494
24	3,7	0,0888	0,3	0,00068283	737,8485659	0,000925434	319,85	3,6%	0,00027763
26	3,7	0,0962	0,3	0,00071303	711,2140712	0,001002553	319,85	4,9%	0,000300766
28	3,7	0,1036	0,3	0,00073035	676,4549638	0,001079673	319,85	5,0%	0,000323902
30	3,7	0,111	0,3	0,00074337	642,6132284	0,001156792	319,85	7,3%	0,000347038
32	3,7	0,1184	0,3	0,00073468	595,4072584	0,001233912	319,85	-0,9%	0,000370174
34	3,7	0,1258	0,3	0,00078765	600,7866117	0,001311031	319,85	8,8%	0,000393309
36	3,7	0,1332	0,3	0,00076079	548,0600935	0,001388151	319,85	5,3%	0,000416445
38	3,7	0,1406	0,3	0,00076079	519,2148254	0,00146527	319,85	3,4%	0,000439581
40	3,7	0,148	0,3	0,00077327	501,3454247	0,00154239	319,85	2,5%	0,000462717
42	3,7	0,1554	0,3	0,00079144	488,6912819	0,001619509	319,85	3,5%	0,000485853
44	3,7	0,1628	0,3	0,000800247	471,6689244	0,001696629	319,85	1,2%	0,000508989
46	3,7	0,1702	0,3	0,00082678	466,1202991	0,001773748	319,85	3,1%	0,000532124
48	3,7	0,1776	0,3	0,00083567	451,5017728	0,001850868	319,85	2,5%	0,00055526
50	3,7	0,185	0,3	0,00084905	440,3815824	0,001927987	319,85	2,8%	0,000578396
52	3,7	0,1924	0,3	0,00085801	427,9124197	0,002005107	319,85	2,7%	0,000601532
54	3,7	0,1998	0,3	0,00086699	416,3765038	0,002082226	319,85	-	0,000624668

APÊNDICE C – EXEMPLO DE RELATÓRIO CRIADO PELO DISPOSITIVO DE MONITORAMENTO



Último trecho linear identificado:

x = [0.000848314, 0.000925434, 0.001002553, 0.001079673, 0.001156792, 0.001233912]

y = [758.6339042, 709.1269003, 670.5379288, 622.6423625, 581.1328716, 544.8120671]

CTC da amostra: 51.74 mEq/100g