

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Sistema de Monitoramento para
Identificação de Contaminantes
Apolares em Águas Subterrâneas via
Condutividade Elétrica

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina

como requisito para a aprovação da disciplina:

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

Nicolas Teixeira Nunes

Florianópolis, Julho de 2019

Sistema de Monitoramento para Identificação de Contaminantes Apolares em Águas Subterrâneas via Condutividade Elétrica

Nicolas Teixeira Nunes

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

e aprovada na sua forma final pelo

Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. Rodolfo César Costa Flesch

Banca Examinadora:

Eng. Marcio Roberto Schneider
Orientador na Empresa

Prof. Rodolfo César Costa Flesch
Orientador no Curso

Prof. Ricardo José Rabelo
Responsável pela disciplina

Prof. Diogo Ortiz Machado, Avaliador

Arthur Maciel Goulart de Oliveira Bertemes, Debatedor

Eduardo Campos Kneipp, Debatedor

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Rodolfo César Costa Flesch e ao Eng. Marcio Roberto Schneider pela oportunidade concedida e pelo apoio e orientação durante todo o desenvolvimento do projeto.

Agradeço a meus pais, cujo amor, apoio financeiro e a dedicação pessoal prestada desde meus primeiros passos permitiram a concretização desta etapa da minha vida acadêmica.

Agradeço por fim meus amigos, e irmãos, que nas noites dos tempos se fizeram luz, me apoiando durante todo percurso da graduação, em especial durante as noites de estudo e dias de pedal.

*“Mas vejo nos meus membros outra lei,
que batalha contra a lei do meu entendimento,
e me prende debaixo da lei do pecado
que está nos meus membros.”
(Bíblia Sagrada, Romanos 7:23)*

Resumo

Um dos grandes problemas na indústria do petróleo é a detecção de anomalias geoquímicas pela contaminação por hidrocarbonetos de petróleo e salinização de aquíferos, visto que tal detecção normalmente é efetuada laboratorialmente, utilizando equipamentos de alto custo, com análises sazonais da água subterrânea. Visando contornar tal dificuldade, este trabalho apresenta a implementação de um sistema de monitoramento que utiliza como parâmetro a condutividade elétrica da água subterrânea para detecção de anomalias geoquímicas pela presença de contaminação por derivados de petróleo ou água salgada. Como muitas das regiões de risco são situadas em áreas remotas, o sistema foi desenvolvido para ter funcionamento independente, por isso conta com alimentação por energia solar, processamento embarcado e comunicação sem fio por rede de telefonia celular entre a unidade de campo e um sistema supervisorio. Todos os dados coletados pelo sistema podem ser analisados no supervisorio, o qual conta com detalhamento dos dados por meio de gráficos e estatísticas, geração automática de relatórios e alarmes que podem ser enviados por e-mail. O sistema pode também ser programado para enviar mensagens de texto diretamente para números de celular cadastrados para atuação imediata dos envolvidos em caso de alarme crítico de contaminação. Este foi avaliado em ambiente laboratorial e atendeu o propósito do desenvolvimento de identificação da contaminação de derivados de petróleo em fase livre e água salgada, geração automática de alertas, após o sistema apresentar possível contaminação do meio, e geração de relatórios detalhados sobre todas as variáveis do sistema.

Palavras-chave: Sistema de monitoramento. Água subterrânea. Condutividade elétrica. Contaminação por hidrocarbonetos e cloreto de sódio.

Abstract

One of the major problems in the petroleum industry is the detection of geochemical anomalies due to the contamination of petroleum hydrocarbons and salinization of aquifers, since such detection is usually carried out in laboratories using high cost equipment with seasonal analyzes of groundwater. In order to overcome this difficulty, this work presents the implementation of a monitoring system that uses the electrical conductivity of groundwater for the detection of geochemical anomalies by the presence of contamination by petroleum derivatives or salt water. As many of the risk regions are located in remote areas, the system was developed to operate independently, so it has solar power, embedded processing and wireless communication by cellular telephone network between the field unit and a supervisory system . All the data collected by the system can be analyzed in the supervisory, which counts with detail of the data through graphs and statistics, automatic generation of reports and alarms that can be sent by email. The system can also be programmed to send text messages directly to registered mobile numbers for the immediate action of those involved in case of critical contamination alarm. This was evaluated in laboratory environment and met the purpose of the development of identification of the contamination of petroleum derivatives in free phase and salt water, automatic generation of alerts, after the system present possible contamination of the environment, and generation of detailed reports on all variables of the system.

Keywords: Monitoring system. Underground water. Electric conductivity. Contamination by hydrocarbons and sodium chloride.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Interação entre os íons e o eletrodo.	26
Figura 2 – Representação das células de condutividade.	27
Figura 3 – Modelos de células para medição de condutividade elétrica.	27
Figura 4 – Eletrodo indutivo.	28
Figura 5 – Modelo de poço de monitoramento padrão.	31
Figura 6 – Módulo RF Transmissor + Receptor 315 MHz AM.	33
Figura 7 – Modelo conceitual do sistema proposto.	35
Figura 8 – Caixa hermeticamente fechada.	36
Figura 9 – Painel solar.	37
Figura 10 – Bateria.	37
Figura 11 – Controlador de carga.	38
Figura 12 – Arduino UNO.	39
Figura 13 – Fluxograma do processamento no Arduino.	40
Figura 14 – Módulo de fonte de alimentação.	41
Figura 15 – Módulo de cartão SD.	41
Figura 16 – Módulo SIM800L.	42
Figura 17 – Condutivímetro de bancada (TEC-4MP).	44
Figura 18 – Divisor de tensão.	45
Figura 19 – Comparação entre curva real e aproximada.	47
Figura 20 – Comparação entre valores reais e curva aproximada da condutividade elétrica.	48
Figura 21 – Comparação entre curva real e aproximada da temperatura.	50
Figura 22 – Dados da medição do fluido de 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$	51
Figura 23 – Dados da medição do fluido de 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$	52
Figura 24 – Gráfico do sistema se estabilizando em aproximadamente 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$	52
Figura 25 – Janela de configuração da comunicação via Modbus no ScadaBR.	54
Figura 26 – Janela de configuração da comunicação via GPRS no ScadaBR.	54
Figura 27 – Planta e distribuição do sistema de monitoramento.	55
Figura 28 – Escolha manual do poço.	55
Figura 29 – Características do poço 1.	56
Figura 30 – Variáveis gerais do sistema.	57
Figura 31 – Detalhes sobre a variável selecionada.	57
Figura 32 – Exemplo de e-mail de alerta de detecção de anomalia.	58
Figura 33 – Estatísticas via relatório.	58
Figura 34 – Eventos via relatório.	58
Figura 35 – Anexos via relatório.	59

Figura 36 – Tela de login.	59
Figura 37 – Tela de variáveis gerais limitada.	59
Figura 38 – Dados obtidos pelo sistema de monitoramento para condutividade de aproximadamente 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$	62
Figura 39 – Gráficos obtidos pelo sistema de monitoramento para condutividade de aproximadamente 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$	62
Figura 40 – Gráficos obtidos pelo condutivímetro TEC-4MP da Tecnal para condutividade de aproximadamente 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$	63
Figura 41 – Gráfico obtido pelo sistema de monitoramento para condutividade de aproximadamente 3.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$	64
Figura 42 – Valores obtidos pelo condutivímetro de bancada para condutividade de aproximadamente 3.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$	64
Figura 43 – Condutividade elétrica, de aproximadamente 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, da água antes de ser contaminada por gasolina.	65
Figura 44 – Condutividade elétrica, de aproximadamente 88 $\mu\text{S}/\text{cm}$, da água depois de ser contaminada por 1 ml gasolina.	65
Figura 45 – Condutividade elétrica da água depois de ser contaminada com aproximadamente 3 ml gasolina.	66
Figura 46 – Queda brusca na condutividade elétrica com eletrodo quase totalmente imerso no contaminante.	66
Figura 47 – Eletrodo totalmente imerso na gasolina.	67
Figura 48 – Tabela de fator de correção	75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores típicos de condutividade elétrica.	30
Tabela 2 – Tensão obtida para cada temperatura.	46
Tabela 3 – Tensão obtida para cada condutividade elétrica.	47
Tabela 4 – Erros associados à curva calculada de condutividade.	49
Tabela 5 – Erros associados à curva calculada de temperatura.	50
Tabela 6 – Qualidade do sinal	73

Lista de Siglas e Abreviaturas

GPRS	Serviços gerais de pacote por rádio (do inglês <i>General Packet Radio Service</i>)
GSM	Sistema Global para Comunicações Móveis (do inglês <i>Global System for Mobile Communications</i>)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USB	Porta universal (do inglês <i>Universal Serial Bus</i>)
LED	Diodo emissor de luz (do inglês <i>Light Emitting Diode</i>)
CSV	Valores separados por vírgula (do inglês <i>Comma-Separated Values</i>)
REMA	Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente
CTC	Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
RSSI	Indicador da força do sinal recebido (do inglês <i>Received Signal Strength Indicator</i>)
SMS	Serviço de mensagens curtas (do inglês: <i>Short Message Service</i>)
RAM	Memória de acesso aleatório (do inglês <i>Random Access Memory</i>)
RTU	Unidade terminal remota (do inglês <i>Remote Terminal Unit</i>)
SD	Digital seguro (do inglês <i>Secure Digital</i>)

Lista de símbolos

V	Tensão
I	Corrente
R	Resistência
ρ	Resistividade
G	Condutância
κ	Condutividade
l	Comprimento
a	Área
K_t	Condutividade elétrica medida
$K_{t_{ref}}$	Condutividade elétrica compensada para a temperatura de referência
$K_{25^{\circ}C}$	Condutividade elétrica compensada para a temperatura de referência de $25^{\circ}C$
t	Temperatura do fluido
t_{ref}	Temperatura de referência
$f_{25(t)}$	Fator de correção para temperatura de referência de $25^{\circ}C$

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivo Geral	22
1.2	Objetivos Específicos	22
1.3	Estrutura do Documento	22
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	Condutimetria	25
2.1.1	Compensação da temperatura	28
2.1.2	Faixas de condutividade elétrica	29
2.2	Poços de monitoramento	30
2.3	Comunicação	31
2.3.1	GSM e GPRS	32
2.3.2	Modbus	32
2.3.3	Rádio-frequência	33
2.4	Supervisório	34
3	SISTEMA DE MEDIÇÃO PROPOSTO	35
3.1	Estrutura	36
3.2	Alimentação	36
3.3	Processamento e comunicação	38
3.4	Transdutor	42
3.4.1	Modelagens e ajustes	43
3.4.1.1	Coleta de dados	46
3.4.1.2	Curvas de calibração	48
3.4.1.3	Compensação da temperatura na condutividade elétrica	51
4	SISTEMA SUPERVISÓRIO	53
4.1	Comunicação	53
4.2	Interface com o usuário	54
5	VALIDAÇÃO	61
5.1	Alimentação	61
5.2	Transdutor	61
5.3	Comunicação	67
5.4	Processamento	68
5.5	Supervisório	68

6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS . . .	69
	APÊNDICE A – COMANDOS HAYES UTILIZADOS	73
	ANEXO A – TABELA DE FATOR DE CORREÇÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 Introdução

O Núcleo Ressacada de Pesquisas em Meio Ambiente (REMA) está vinculada ao Centro Tecnológico (CTC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e busca soluções integradas para problemas complexos como os associados à indústria de petróleo e seus riscos em impactos ambientais, tendo assim como objetivo catalisar ações integradas de pesquisa altamente relevantes para a sociedade. Essas soluções são desenvolvidas através de pesquisas que unem esforços de equipes multidisciplinares compostas por professores dos departamentos de Engenharia Sanitária e Ambiental, Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Engenharia Mecânica, Engenharia Elétrica, Engenharia de Controle e Automação, Fitotecnia (Centro de Ciências Agrárias), e Microbiologia, Imunologia e Parasitologia (Centro de Ciências Biológicas).

Um exemplo de esforço multidisciplinar de pesquisa está ligado aos problemas da contaminação de solos e águas subterrâneas por combustíveis derivados de petróleo e biocombustíveis, como em vazamentos de dutos e tanques de armazenamento subterrâneo de combustível, que é uma das principais fontes de contaminação do solo e de águas subterrâneas [1].

Somente no Brasil, existem aproximadamente 42 mil postos revendedores de combustíveis automotivos [2] e aproximadamente 290 bases de distribuição [3]. Estes valores crescem vertiginosamente se levarmos em consideração não somente a revenda e distribuição de combustíveis automotivos, mas também todos os ramos da indústria de petróleo. De acordo com o Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina [4], são necessários, no mínimo, laudos anuais de análise de água subterrânea nesses postos. Porém, em uma situação de vazamento, a coleta anual de amostra se torna ineficiente, já que o vazamento ocorrerá durante um longo período até ser percebido, podendo ter extrapolado os níveis aceitáveis de contaminação. Neste contexto, faz-se interessante uma alternativa de monitoramento preventivo que detecte o vazamento rapidamente, para que possam ser tomadas as ações necessárias para o controle do mesmo, evitando assim um maior dano ao ecossistema.

Atualmente, no processo de investigação da água subterrânea dois processos qualitativos são utilizados. Um deles através da utilização de medidor de interfaces [5], equipamento este que emite um alerta sonoro caso entre em contato com contaminação de hidrocarboneto, que permite uma análise rápida, com resultados imediatos, mas que é limitada a detecção de contaminante em fase livre. Outro é realizado laboratorialmente através de cromatografia gasosa [6], a qual identifica contaminantes apolares em pequenas concentrações, mas que é custoso.

A solução proposta da detecção da contaminação é um intermediário entre os

dois processos citados acima, sendo esta mais precisa que o primeiro, porém menos custosa do que o segundo. Propõe-se analisar a condutividade elétrica da água do poço de monitoramento [7,8], visto que uma substância apolar possui uma resistência elétrica elevada em comparação à água subterrânea. Dessa forma, em uma situação de contaminação da água do poço por tal substância, uma anomalia pode ser identificada na resistência elétrica medida.

1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de monitoramento que detecte e alerte a presença de anomalias geoquímicas pela contaminação, em altas concentrações, de substâncias apolares ou salinas. Detecção esta que será realizada na superfície de águas subterrâneas, região esta a qual alguns contaminantes derivados de petróleo se acumulam por serem menos densos do que a água, por meio de medição da condutividade elétrica. A ferramenta compreende o conjunto de *hardware* e *software* para detecção remota da presença de tais contaminantes, *in situ*, nos poços de monitoramento. Espera-se que a ferramenta proposta permita o acompanhamento contínuo em empreendimentos petrolíferos, assim eliminando ou ao menos reduzindo a necessidade de campanhas de monitoramento e demais análises laboratoriais de alto custo.

1.2 Objetivos Específicos

- Conceber um protótipo do sistema de monitoramento.
- Desenvolver um *software* de aquisição e tratamento dos sinais medidos para transformá-los em indicativos da presença de contaminantes.
- Elaborar um sistema supervisorio para acompanhamento dos dados adquiridos ao longo do tempo.
- Implementar o sistema de comunicação entre o equipamento de monitoramento situado em campo e o supervisorio.
- Testar o protótipo em laboratório para validação de sua eficiência visando aplicação em ambientes relevantes.

1.3 Estrutura do Documento

O capítulo 2 apresenta o *background* teórico necessário para o entendimento do trabalho como um todo, detalhando as ferramentas utilizadas e conceitos relacionados à condutimetria para aplicação correta destas ferramentas.

No capítulo 3, é apresentado as problemáticas nos sistemas atuais de análise de contaminação, bem como uma solução, a qual é baseada no sistema de medição proposto, que está descrito detalhadamente neste capítulo. O sistema supervisor é introduzido no capítulo 4. Neste, são apresentadas as funcionalidades do mesmo, bem como os resultados gráficos obtidos através dos dados coletados.

Com o sistema de monitoramento devidamente implementado, foi efetuada a validação do mesmo em laboratório, descrita no capítulo 5, para avaliar se o sistema está operando como o previsto. Com a validação efetuada, algumas considerações finais e perspectivas futuras foram descritas no capítulo 6 para discorrer sobre os resultados e dar uma análise crítica dos mesmos provendo também melhorias para o equipamento.

2 Revisão da literatura

Ao longo deste capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos sobre condutimetria necessários para o entendimento do presente trabalho, além do detalhamento das ferramentas utilizadas.

2.1 Condutimetria

A condutividade elétrica é uma importante variável para a análise da qualidade da água. Ela é utilizada em vários casos para verificação da existência de contaminantes em águas subterrâneas. Exemplos de sua utilização podem ser vistos em várias pesquisas que estudam a contaminação derivada de lixões [9], cemitérios [10, 11] e tanques sépticos [12]. A ampla faixa de utilização desta variável para a análise das mais variadas fontes de contaminação a torna uma forte candidata para o monitoramento de águas subterrâneas, podendo torna-se um auxiliar na proteção do meio ambiente.

A condutimetria consiste no método de medição da condutividade elétrica em um condutor elétrico, como resultado do deslocamento de elétrons ao longo do condutor (condução eletrônica) ou de uma solução eletrolítica, na situação em que tal condução elétrica se deve à migração de íons negativos e positivos ao ser submetida a uma corrente elétrica (condução iônica). Neste último caso, quando se é aplicado um potencial constante nas células do eletrodo, cria-se um campo elétrico que causa a movimentação dos íons nessa solução. Os íons positivos (cátions) movimentam-se em direção ao cátodo (eletrodo com polaridade negativa) e os íons negativos (ânions) movimentam-se em direção ao ânodo (eletrodo com polaridade positiva), como pode ser visto na Figura 1.

Ao aplicar tal corrente no meio, pode-se identificar a resistência elétrica através da primeira lei de Ohm:

$$V = RI, \quad (2.1)$$

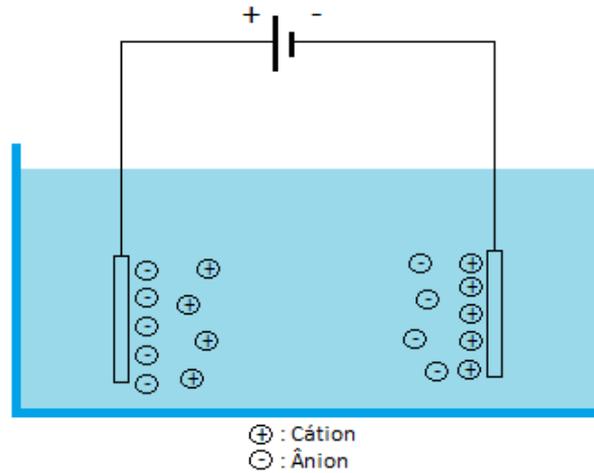
sendo a tensão (V) dada em volts, a resistência elétrica (R) dada em ohms e a corrente (I) dada em amperes. Desta resistência elétrica analisada, pode-se então definir a condutância (G) do meio como o inverso da resistência elétrica. Tem-se então como unidade da condutância o inverso de ohm, que é conhecido como siemens (com símbolo S).

Pela segunda lei de Ohm, tem-se que:

$$R = \frac{\rho l}{a}, \quad (2.2)$$

ou seja, tem-se que a resistência elétrica de um material homogêneo é dado por sua resistividade (ρ) vezes seu comprimento (l), dividido pela área da seção transversal (a).

Figura 1 – Interação entre os íons e o eletrodo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De modo análogo à condutância, tem-se que a condutividade (κ) é o inverso da resistividade. Tem-se então que:

$$\kappa = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R} \frac{l}{a} = G \frac{l}{a}, \quad (2.3)$$

sendo κ expresso na prática em Siemens por centímetro, e usualmente, quando tal medição é feita em fluidos, tem-se medições que variam entre faixas de milisiemens por centímetro, para substâncias salinas, e microsiemens por centímetro, para águas subterrâneas com pouca concentração de sais.

Para uma correta medição desta grandeza, faz-se necessária a escolha adequada da constante da célula do condutivímetro. Tal constante (K) é um fator que depende da distância entre as duas placas da célula e de sua área:

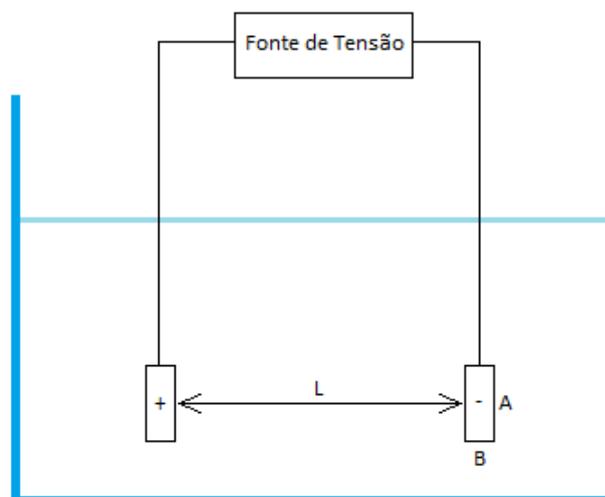
$$K = \frac{L}{a}, \quad (2.4)$$

sendo a área da placa (a) igual ao comprimento (A) vezes a largura (B), como pode ser visto na Figura 2.

A escolha da constante K deve ser realizada de forma adequada, uma vez que a mesma determina a faixa ótima de trabalho do condutivímetro em relação à condutividade do meio.

Em fluidos com elevada condutividade elétrica, a distância entre as células pode ser igual ou maior do que a área da mesma ($K \geq 1 \text{ cm}^{-1}$). Porém, para fluidos com baixa condutividade, uma grande distância entre células pode fazer com que a corrente seja praticamente nula, o que dificulta a medição. Por isso, nesses casos, é preferível uma

Figura 2 – Representação das células de condutividade.

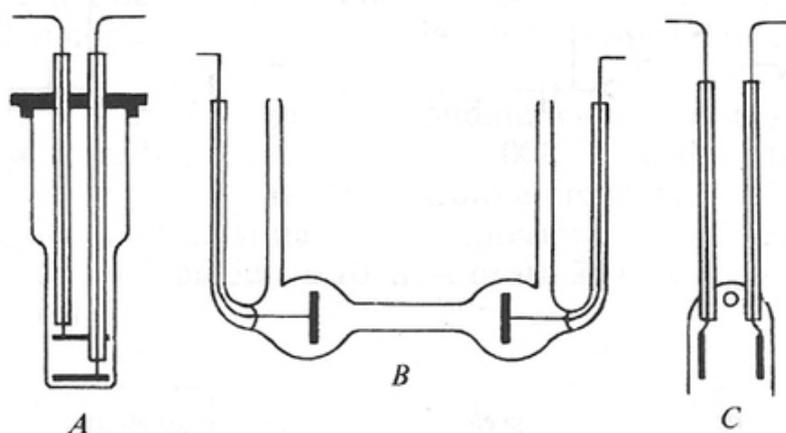


Fonte: Elaborada pelo autor.

menor distância ou uma maior área da célula. Assim, utilizam-se células com constante $K \leq 0.1 \text{ cm}^{-1}$ [13].

Para encontrar a melhor solução para cada caso, foram desenvolvidas vários tipos de células. Na Figura 3 podem ser vistas três delas: a célula A permite a variação da distância entre os eletrodos, podendo assim variar a constante da mesma; a célula B é utilizada para medições mais exatas; enquanto a célula C tem eletrodos fixos, sendo assim utilizada de forma imersa para medições em faixas fixas.

Figura 3 – Modelos de células para medição de condutividade elétrica.



Fonte: [14].

Um outro importante tipo de célula é a que trabalha com o método indutivo. Este, é baseado na medição de campos eletromagnéticos associados a correntes alternadas

induzidas em subsuperfície a partir de um campo primário [15]. Em outras palavras, o eletrodo indutivo possui duas bobinas, uma que, sob a indução de uma corrente alternada, gera um campo eletromagnético que move os elétrons; e outra que percebe a corrente gerada por essa movimentação nos elétrons do fluido [16,17].

Por este funcionamento, o eletrodo indutivo não necessita estar em contato direto com o fluido, como nos eletrodos anteriormente citados. Essa característica permite que o eletrodo possa estar encapsulado em um isolante elétrico que tenha resistência aos mais variados produtos químicos. Por isso, é ideal para medições de fluidos contaminados por substâncias ácidas, por exemplo. A desvantagem deste tipo de eletrodo, que pode ser visto na Figura 4, é a limitação da condutividade da solução que se deseja medir, pois o método é menos sensível devido ao não contato entre os eletrodos e a solução [18].

Figura 4 – Eletrodo indutivo.



Fonte: [19].

2.1.1 Compensação da temperatura

Outra característica importante na medição da condutividade elétrica é o efeito causado pela temperatura. Quanto maior a temperatura da solução, menor sua viscosidade e por consequência a mobilidade dos íons aumenta. Esta fato causa a alteração da medição do valor da condutividade com a variação da temperatura, o que pode resultar em falhas na detecção da contaminação, visto que um valor de condutividade elétrica que, para uma certa temperatura, significa uma contaminação do meio, para uma outra temperatura pode não significar. Por isso, é imprescindível a correção do valor medido baseado na temperatura que o fluido se encontra, sempre levando em consideração o quanto tal valor seria caso se encontrasse a uma temperatura fixa de 25 °C, por exemplo.

A norma D1125 da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) [20] cita que a variação da condutividade elétrica encontra-se entre 2% e 5% por kelvin para fluidos com condutividade entre 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 0.055 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Porém, como essa porcentagem varia dependendo das características do fluido, faz-se interessante utilizar equações de compensação específicas para cada conjunto de fluidos [17]. A literatura tipicamente descreve uma equação para fluidos com média e alta condutividade elétrica (fluidos com uma quantidade considerável de sais, como a água do mar) e outra para fluidos com baixa condutividade elétrica (como águas subterrâneas ou água potável).

No primeiro caso, a seguinte equação é utilizada para determinar a condutividade compensada:

$$K_{t_{ref}} = \frac{K_t}{1 + \alpha(t - t_{ref})}, \quad (2.5)$$

em que $K_{t_{ref}}$ é a condutividade elétrica compensada para a temperatura de referência, K_t é a condutividade elétrica medida pelo sensor na temperatura atual do fluido, α é o coeficiente de temperatura, que descreve a variação em porcentagem da condutividade para cada kelvin de variação em relação à referência, t é a temperatura atual do fluido, e t_{ref} é a temperatura de referência.

Porém, o valor de α é determinado empiricamente medindo a condutividade de um fluido na temperatura de referência e depois o mesmo fluido a uma temperatura diferente, sendo em seguida utilizada a seguinte equação para sua determinação:

$$\alpha = \frac{(K_{t_2} - K_{t_1})}{(t_2 - t_1)K_{t_1}}. \quad (2.6)$$

Para fluidos com baixa condutividade elétrica, a equação (2.5) não representa bem a curva de compensação, por isso é necessário utilizar a seguinte equação:

$$K_{25^\circ\text{C}} = f_{25(T)}K_t, \quad (2.7)$$

sendo $K_{25^\circ\text{C}}$ a condutividade compensada para uma temperatura de referência de 25 °C, K_t a condutividade lida na temperatura atual, e $f_{25(T)}$ o fator de correção. A tabela com os fatores de correção, retirada do guia para medição *on-line* de condutividade [17], pode ser vista no Anexo A.

2.1.2 Faixas de condutividade elétrica

Como apresentado na seção 2.1, a condutividade elétrica depende diretamente da composição do fluido - quanto mais sais no fluido, maior a condutividade [21]. Esse fato se reflete na Tabela 1, que mostra valores típicos de condutividade elétrica para algumas

substâncias. Percebe-se que a água do mar, por ter grande quantidade de sais, tem elevada condutividade; enquanto a água ultrapura, pela baixa quantidade de sais, possui baixa condutividade elétrica.

Tabela 1 – Valores típicos de condutividade elétrica.

Amostra	Condutividade típica aproximada a 25 °C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Água Tipo I (ultrapura)	0,055
Água Destilada	1
Água Potável	50
Água Mineral	200
Água do Mar	53000

Fonte: [22].

Em contraste com a água do mar, os derivados de petróleo apresentam valores extremamente baixos, menores que $1 \text{ nS}/\text{cm}$ [23]. O óleo diesel, por exemplo, necessita ter $0.25 \text{ pS}/\text{cm}$ no momento do carregamento deste fluido no reservatório, pelo produtor ou consumidor, de acordo com a resolução ANP 42-2009 [24], seguindo os padrões de medição da condutividade elétrica D2624 [25] e D4308 [26] da ASTM.

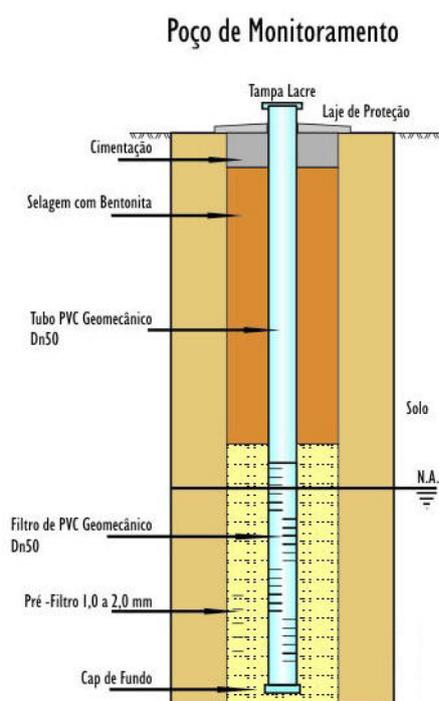
Como o sistema de monitoramento tem o objetivo de detectar substâncias salinas e substâncias derivadas de petróleo (que como visto acima, têm características opostas no que diz respeito à condutividade elétrica), é importante determinar a condutividade do fluido a ser tomado como referência - neste caso, a água subterrânea. Para águas subterrâneas, os valores típicos de condutividade elétrica variam de $30 \mu\text{S}/\text{cm}$ a $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ [27]. Entretanto, é citado que há interferência da geologia sobre a condutividade elétrica [28], podendo a condutividade assumir valores superiores a $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ [28], ou até mesmo inferiores a $13 \mu\text{S}/\text{cm}$ [29].

2.2 Poços de monitoramento

Os poços de monitoramento (PM) são utilizados para permitir a coleta de amostras de água subterrânea. Essa amostra de água passa então por processos químicos e físico-químicos para analisar sua qualidade em diversos fatores, sendo o índice de contaminação um deles.

A Figura 5 mostra o modelo de um poço de monitoramento cujo procedimento de projeto e construção seguem a NBR 15495-1/2007 [30]. A sua estrutura interna é constituída de PVC-Geomecânico ou Aço Inox e, a partir de uma certa profundidade, possui ranhuras para permitir que a água subterrânea penetre. Esta profundidade mencionada depende da variação do nível de água: o nível não pode ficar acima da região ranhurada, para evitar que fluidos menos densos que a água não sejam detectados no poço (por não ter passagem ranhurada para penetrar), nem pode ficar abaixo da região ranhurada do poço, pois nesse caso a possibilidade de coleta de água não existiria, visto que o poço estaria sempre vazio.

Figura 5 – Modelo de poço de monitoramento padrão.



Fonte: [31].

O poço também necessita ser isolado de possíveis contaminações provenientes da superfície, por isso possui tampa de ferro com cadeado, além de vários cuidados construtivos em sua entrada para garantir tal proteção.

2.3 Comunicação

Para um melhor entendimento dos protocolos de comunicação utilizados no sistema de monitoramento, bem como de outros disponíveis no mercado, são apresentadas a seguir algumas das principais tecnologias para comunicação de dados.

2.3.1 GSM e GPRS

Em um primeiro momento, a transmissão de dados no celular era feita pela tecnologia GSM (Sistema Global para Comunicações Móveis, do inglês *Global System for Mobile Communications*). Um fator importante nessa tecnologia se dava ao fato de que no momento em que a conexão entre dois aparelhos era efetuada, esta era ininterrupta, o que passou a ser diferente com o advento do GPRS (Serviços gerais de pacote por rádio, do inglês *General Packet Radio Service*) [32].

Na tecnologia GPRS, a comunicação dos dados passou a ser feita por comutação de pacotes, em que a informação é dividida em pacotes na origem e remontada no destino. Isto é possível pelo fato de que cada pacote leva consigo tanto o endereço do destino quanto a devida informação para remontagem no aparelho para o qual o pacote foi enviado. Tais pacotes são enviados pela rede de telefonia por meio de diferentes caminhos até chegar ao destino, por isso a informação para remontagem do pacote se faz importante, visto que as partes do pacote podem não chegar na sequência exata [32]. A vantagem desta tecnologia em comparação com a GSM é que os recursos da transmissão são usados apenas quando o usuário está recebendo ou enviando os dados (ao invés de criar uma comunicação ininterrupta), o que evita o uso de recursos ao longo do tempo quando não há transmissão para ser realizada. Além disto, como o canal não é dedicado apenas para um emissor e um receptor dos dados, como se dá na GSM, o canal pode ser compartilhado entre vários usuários. Esta última característica é bastante interessante para o presente trabalho, visto que possibilita a existência de vários sistemas de monitoramento ligados a um mesmo supervisor.

A comunicação via GRPS é efetuada através de comandos Hayes, também conhecidos como comandos AT (referente a atenção) [33]. Os comandos Hayes consistem em um conjunto de comandos em formato de uma série de textos curtos que são combinados para produzir comandos de operações para o equipamento, como por exemplo fazer ou atender chamadas, enviar dados a um destinatário específico, enviar SMS (Serviço de mensagens curtas, do inglês *Short Message Service*), etc. No Apêndice A são listados os comandos utilizados em algumas partes do código para efetuar as operações citadas anteriormente.

2.3.2 Modbus

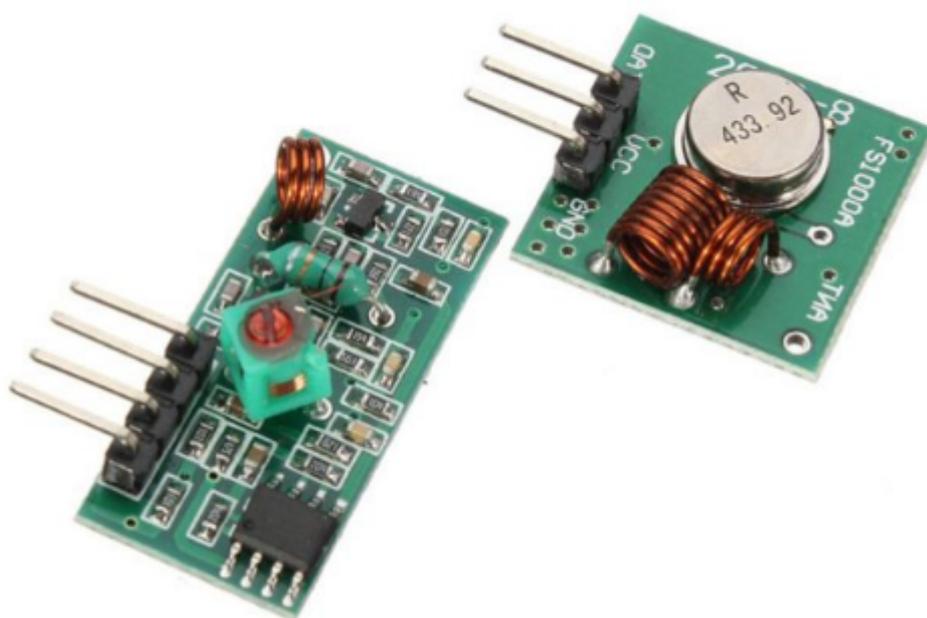
O Modbus é um protocolo de comunicação de dados amplamente difundido na automação industrial. Entre os meios físicos que o mesmo pode utilizar, neste trabalho foi aplicado o padrão de protocolo RS-232, o qual permite a troca de dados binários entre um DTE (terminal de dados, do inglês *Data Terminal Equipment*) e um DCE (comunicador de dados, do inglês *Data Communication Equipment*) [34], já que ele é usado nas portas seriais dos computadores e é o padrão de protocolo do Arduino.

Este protocolo permite a comunicação entre vários equipamentos conectados em uma mesma rede, e tem como característica a comunicação do tipo mestre-escravo. Neste protocolo, o escravo não inicia a comunicação enquanto não for solicitado pelo mestre. Um dos modos de transmissão de dados da rede serial baseada no RS-232 é o RTU (Unidade terminal remota, do inglês *Remote Terminal Unit*), o qual endereços dos escravos e dados são representados em formato binário, identificando assim de qual equipamento a mensagem foi enviada, bem como o valor do dado.

2.3.3 Rádio-frequência

A faixa de frequência das ondas de rádio, que abrange aproximadamente de 3 khz até 300 Ghz, é chamada de rádio-frequência [35]. Alguns equipamentos de comunicação utilizam sinais de rádio-frequência como meio de operação, como por exemplo o módulo de rádio-frequência transmissor e receptor visto na Figura 6. Seu transmissor pode ser conectado ao processador contendo os dados a serem enviados e o receptor ao equipamento o qual se deseja receber os dados (como o equipamento em que o supervisor está instalado) - permitindo assim a comunicação entre os dois pontos.

Figura 6 – Módulo RF Transmissor + Receptor 315 MHz AM.



Fonte: [36].

2.4 Supervisório

Com o avanço da eletrônica e o surgimento dos microprocessadores (em meados das décadas de 1970 e 1980, respectivamente), os computadores passaram a ser ferramentas indispensáveis na indústria. Com isso, surgiram também os primeiros supervisórios [37].

Supervisórios são sistemas usados para controlar ativos geograficamente dispersos que podem estar espalhados por milhares de quilômetros quadrados, onde a aquisição e o controle centralizado de dados são essenciais para o funcionamento do sistema [38].

Os supervisórios são utilizados para a aquisição e o controle centralizado de dados de sistemas como, por exemplo, distribuição de água, redes de energia elétrica, oleodutos e gasodutos, dentre outros [38]. Além da aquisição e controle do sistema, o supervisório é utilizado também para monitoramento de alarmes e dados de estado do processo. Os dados recebidos são provenientes de estações remotas, orientados pelo operador, dispositivos de campo, dentre outros [38], e podem ser armazenados em banco de dados para auxílio nas análises do processo, como na construção de gráficos e relatórios. Os alarmes do sistema podem ser pré-programados baseados em eventos, seja algum sensor de segurança acionado, ou uma variável que passou de seu limite de operação.

Alguns exemplos de supervisório em destaque no mercado são [37]:

- **Elipse** da Elipse software
- **FactoryTalk View SE** da Rockwell Automation
- **iFIX** da General Electric
- **InduSoft Web Studio** da InduSoft
- **ProcessView** da SMAR
- **ScadaBR** (Código aberto) da MCA Sistemas
- **SIMATIC Wincc** da Siemens
- **Vijeo Citect** da Schneider Electric
- **Wondeware inTouch** da Invensys

Dentre estas, vale se destacar o ScadaBR, que começou a ser desenvolvido em 2006 por uma empresa de Florianópolis (a atual Sensorweb), que, em parceria com empresas da região, Fundação CERTI, e Universidade Federal de Santa Catarina, desenvolveu um supervisório gratuito desenhado para empresas de pequeno porte.

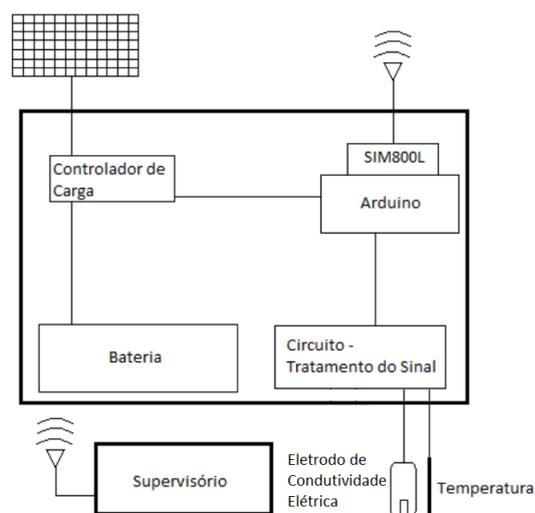
3 Sistema de medição proposto

Pensando na gravidade da contaminação de aquíferos, tanto por substâncias apolares quanto salinas, e pensando também nas dificuldades existentes no processo de análise de contaminação, como por exemplo, a necessidade do deslocamento de pessoal, coleta da água subterrânea de poços de monitoramento, e análise da amostra em laboratório, foi proposto como solução um sistema de monitoramento da contaminação de forma remota e de baixo custo.

Este equipamento é fixado em campo, no local onde se deseja a contínua verificação da existência de contaminação. A energia necessária para o correto funcionamento do equipamento é coletada por meio de um sistema de alimentação utilizando um painel solar que carrega uma bateria durante o dia, garantindo que o sistema também possa funcionar em período noturno. O equipamento coleta, três vezes ao dia, dados da condutividade elétrica da água subterrânea e temperatura, enviando-os para um supervisor via comunicação GPRS ou Modbus.

Para um melhor entendimento do sistema, que pode ser visto resumidamente no modelo conceitual mostrado na Figura 7, ele foi dividido em quatro módulos principais: estrutura, alimentação, transdutor e processamento dos dados, junto de sua comunicação.

Figura 7 – Modelo conceitual do sistema proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Estrutura

As condições climáticas do campo podem se tornar um grande problema quando se tratando de componentes elétricos sensíveis à umidade, temperatura e demais fatores que invariavelmente irão se tornar presentes na exposição à natureza. Em situações como essa, faz-se importante uma estrutura que consiga diminuir ao máximo os efeitos das intempéries. A estrutura necessita isolar o equipamento elétrico da chuva, e da exposição direta do sol, por isso um módulo estrutural fez-se significativo para o projeto.

O módulo estrutural compreende a caixa hermeticamente fechada, que pode ser vista na Figura 8, para isolamento do equipamento em relação às condições climáticas do campo, bem como estrutura metálica para fixação da caixa hermética e painel solar em campo.

Figura 8 – Caixa hermeticamente fechada.



Fonte: [39].

Com tal estrutura bem consolidada e servindo de suporte para o equipamento, foi projetado o sistema de alimentação, descrito a seguir.

3.2 Alimentação

O posicionamento de um sistema em campo gera complicações não somente no que diz respeito às condições climáticas, mas também à logística de como utilizar um equipamento eletrônico distante de sistemas de alimentação elétrica. Em certos casos, o cabeamento se torna inviável devido às distâncias entre o sistema de monitoramento e

a fonte de alimentação. Pensando nesta dificuldade, foi adicionado ao equipamento um sistema de alimentação próprio para que não dependesse de energia cabeada.

O conjunto de alimentação necessário para entregar a energia para o sistema em um ambiente remoto (sem viabilidade de energia elétrica cabeada) é composto por um painel solar com potência máxima de 30 W, bateria de 12 V e 7 Ah, e controlador de carga para regular a tensão enviada para a bateria e para o sistema de processamento. Estes equipamentos podem ser vistos nas Figuras 9, 10, e 11, respectivamente.

Figura 9 – Painel solar.



Fonte: [40].

Figura 10 – Bateria.



Fonte: [41].

Como a intenção ao desenvolver o equipamento eletrônico do sistema de monitoramento é de que seja utilizado apenas algumas vezes ao dia (economizando assim energia durante o restante do período), tal conjunto de alimentação é suficiente. Este fato ocorre visto que o painel solar de 30 W de potência máxima pode entregar até 1.59 A

Figura 11 – Controlador de carga.



Fonte: [42].

para o circuito de acordo com o fabricante, porém, já que todo o circuito utiliza apenas aproximadamente 200 mA, durante a coleta e envio dos dados, tal potência é mais do que suficiente. Porém, um painel solar com tal potência foi adquirido pensando em futuras modificações para o sistema, como por exemplo a possibilidade de introduzir mais sensores ou sistemas de comunicação ao equipamento.

Tendo sido montado o sistema de alimentação na estrutura citada anteriormente, o sistema de processamento e comunicação passou a ser implementado.

3.3 Processamento e comunicação

Da mesma forma que o sistema de alimentação foi pensado para não necessitar de cabeamento, o sistema de comunicação e processamento também segue a mesma lógica. Ambos necessitam de algumas estratégias para contornar esta dificuldade. O sistema de processamento deve estar embarcado no sistema (ele está também localizado dentro da estrutura isolante em campo), por isso algumas estratégias precisam ser elaboradas tomando em conta que o sistema estará em local remoto, como uma comunicação que permita enviar os dados coletados via rede sem fio, bem como medidas ligadas a situações de falha do sistema desta comunicação.

Para efetuar o processamento embarcado, foi utilizado um Arduino UNO, que pode ser visto na figura 12. Este efetua a leitura dos sinais enviados pelo transdutor e configura os protocolos de comunicação para o correto envio desses dados em valores de tensão, lidos pela porta analógica. O Arduino foi também utilizado para extrair da rede, via GPRS, a data e horário atual, bem como a intensidade do sinal da rede e enviar esses dados tanto para o supervisor, quanto para o módulo do cartão SD (digital seguro, do inglês *Secure Digital*). A estratégia de salvar fisicamente essas informações, e demais dados do transdutor, foi utilizada para prevenção em uma situação de falha do sistema supervisor, para se ter assim todos os dados salvos independentemente do ScadaBR. Além disto, o Arduino foi usado para enviar um SMS, via comunicação GSM, para os

usuários previamente cadastrados, em caso de contaminação grave da água subterrânea, para rápida atuação. O fluxograma visto na Figura 13 demonstra os passos efetuados no código do programa para o correto funcionamento do processamento.

Figura 12 – Arduino UNO.



Fonte: [43].

Apesar de ser um equipamento de menor custo comparado a outros equipamentos mais robustos, sua resolução de 10 bits e a quantidade de portas analógicas e digitais são suficientes para esta versão do equipamento. O Arduino UNO possui saída de tensão de 3.3 V e 5 V, que foi utilizado para alimentação de alguns equipamentos do sistema.

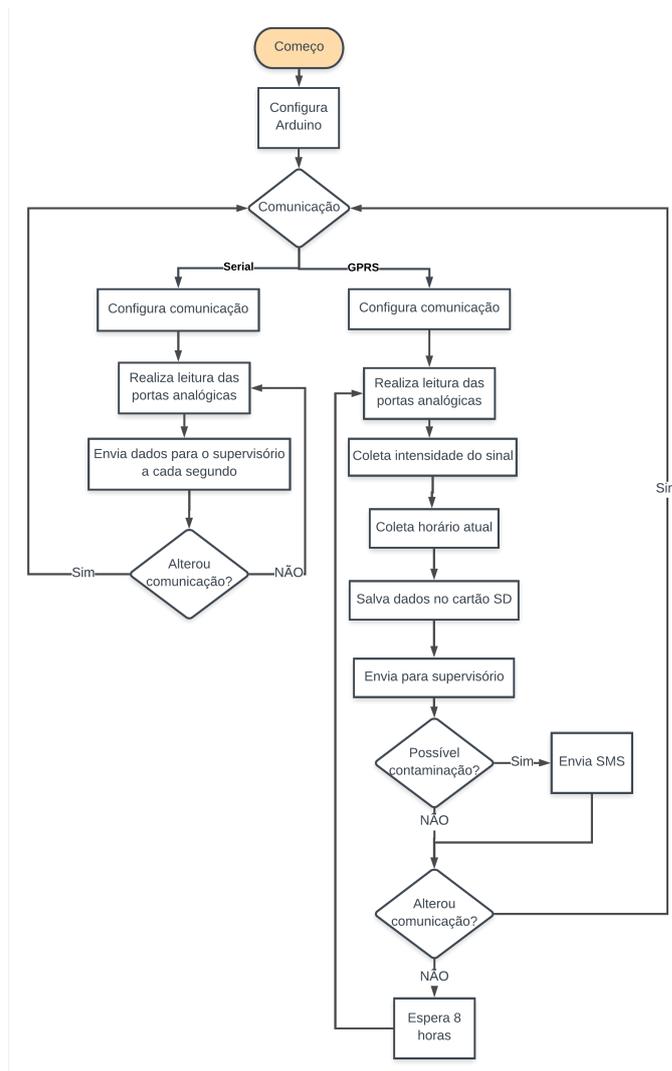
Em paralelo a esta alimentação do Arduino, foi também utilizado um módulo de fonte de alimentação, que pode ser visto na Figura 14, para alimentar os sensores com 5 V podendo entregar até 700 mA. O acréscimo ao projeto foi efetuado visto que pretende-se, futuramente, conectar mais equipamentos ao sistema. Como o Arduino tem limite de saída de corrente de 50 mA por cada porta digital, sendo o limite seguro para cada porta apenas 20 mA, ou 200 mA ao todo, tal adição fez-se necessária para permitir a utilização de um maior conjunto de cargas.

O Arduino UNO possui microcontrolador ATMEGA328 com 14 pinos digitais que podem ser utilizados como entrada ou saída, bem como 6 entradas analógicas cada uma com a resolução de 10 bits citada acima. A leitura dos dados pela entrada analógica do Arduino consiste na recepção do sinal em formato de tensão na faixa de 0 V até 5 V, a qual é dividida em 1024 partes referentes à resolução da entrada analógica do microcontrolador que é de 10 bits. Neste caso, a menor variação de tensão lida pelo Arduino é de 0.0048 V. Este dado referente à tensão é então enviado ao devido trecho do código relacionado à comunicação, para então ser enviado ao supervisor.

Para garantir que os dados coletados não sejam perdidos no caso de alguma falha na comunicação, adicionou-se um *datalogger* com cartão SD ligado ao Arduino para deixar todos os dados fisicamente salvos. Este módulo de cartão SD pode ser visto na Figura 15.

Como são realizadas apenas 3 coletas ao dia, foi escolhido um cartão SD de 8 GB

Figura 13 – Fluxograma do processamento no Arduino.



Fonte: Elaborado pelo autor.

para guardar os dados coletados, o que é suficiente visto que são utilizados apenas 80 bytes a cada coleta, o que permite tempo indeterminado de utilização deste cartão se levar em consideração apenas o espaço de armazenamento. Nesta linha de texto são inseridos o horário e data em que aquela coleta de dados foi realizada, o valor da condutividade elétrica e temperatura da água subterrânea, bem como valores referentes ao funcionamento da comunicação GSM e GPRS, como a intensidade do sinal, a qual tem seus valores de intensidade mais detalhados no Apêndice A, e a identificação da tentativa de envio dos dados. Este último valor é importante para analisar se estão existindo falhas na comunicação, já que o valor é incrementado em 1 a cada tentativa de envio - se houver saltos entre os valores, significa que existiram falhas no envio dos dados via GPRS.

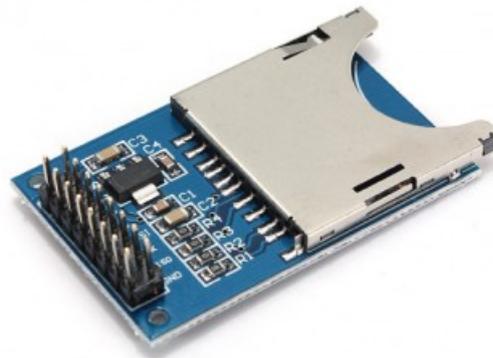
Por fim, a comunicação que foi implementada utilizando GSM/GPRS, e Modbus, tem como dispositivo de escolha de qual utilizar um *switch* no circuito do sistema. Para a

Figura 14 – Módulo de fonte de alimentação.



Fonte: [44].

Figura 15 – Módulo de cartão SD.



Fonte: [45].

comunicação via GSM/GPRS operar, foi utilizado o módulo SIM900L visto na Figura 16, o qual opera através de um chip de celular, possibilitando assim as funcionalidades básicas de um celular no equipamento (enviar SMS, via GSM, conectar-se na internet, via GPRS, entre outras).

Os comandos Hayes, referentes à comunicação via GSM/GPRS, foram implementados na programação para garantir que a rede retornará para o Arduino os dados de sinal e data, além da rede receber do Arduino os dados do transdutor. Estes dados coletados tanto do transdutor quanto da rede são então gravados no cartão SD e, caso a tensão recebida do transdutor exceda limites pre-estabelecidos, o equipamento envia uma mensagem SMS avisando sobre o ocorrido. Maiores detalhes destes comandos podem ser vistos no Apêndice A.

A comunicação que se dá entre o processador do Arduino e supervisor ScadaBR via Modbus, por sua vez, é efetuada através de conexão direta ligando o USB do computador

Figura 16 – Módulo SIM800L.



Fonte: [46].

à entrada USB do Arduino. Tal conexão tem foco em operações de manutenção: caso ocorra alguma falha na comunicação via GPRS, o operador pode ir ao campo e ligar o notebook diretamente no sistema para verificar o motivo da falha, por exemplo.

Percebe-se então que o processador embarcado lida com a coleta dos dados, memorização destes, envio dos dados, e alerta via SMS. Uma complicação encontrada no desenvolvimento destas tarefas realizadas pelo microprocessador foi sua memória RAM (Memória de acesso aleatório, do inglês Random Access Memory) limitada, a qual tem apenas 2KB. Quando se trabalha com variáveis numéricas e poucas *strings*, a memória RAM é suficiente. Porém quando o processamento envolve a utilização de várias *strings*, como no caso das utilizadas nos comandos Hayes, essa quantidade se esgota rapidamente. Para contornar esta complicação, os comandos em formato de texto foram alocados para a memória flash, que possui 32KB, evitando assim com que a RAM se esgotasse. Com isto, atualmente está sendo utilizado aproximadamente 70% de sua memória, o que é satisfatório, visto que antes a memória RAM não estava sendo suficiente para executar o programa.

Com a comunicação operando corretamente, passou-se então a trabalhar com o transdutor do sistema.

3.4 Transdutor

Com os módulos de estrutura, alimentação e processamento com comunicação implementados, formou-se um ambiente propício para a construção do transdutor, visto que o sistema já possui uma entrada de sinal e ambiente computacional para desenvolvimento dos cálculos através do processador, bem como uma interface de usuário, através do

ScadaBR, que facilita a visualização do comportamento do sinal do transdutor através de gráficos.

Para tal, fez-se necessário primeiramente ter como base os aspectos do meio em que o mesmo seria posicionado. O primeiro deles, mais importante, foi analisar a faixa de condutividade elétrica a qual o sensor teria como foco. Como citado na seção 2.1.2, a faixa de trabalho do sensor imerso em águas subterrâneas pode variar entre valores inferiores a $13 \mu\text{S}/\text{cm}$, e valores superiores a $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Por este motivo, o sensor teve como foco essa faixa. Contudo, como a intenção do mesmo é analisar a existência da contaminação na superfície da água subterrânea, visto que esta área apresenta a fase livre (ocorrência de substância ou produto em fase separada e imiscível quando em contato com a água) do contaminante, faixas menores ou maiores necessitaram também ser percebidas. Todavia, neste primeiro protótipo, em uma ocorrência de contaminação, o foco do transdutor esteve apenas na identificação de uma variação significativa na condutividade do poço, não sendo necessária a identificação da solução contaminante - com exceção de reconhecer se a mesma tem característica condutiva, como o caso de um fluido salino, ou resistiva, como no caso de uma contaminação por derivados de petróleo, para que assim o sistema de monitoramento envie alerta de possível contaminação.

Como consequência do fato de que neste primeiro protótipo o objetivo não é o de identificação do fluido contaminante, a medição efetuada pelo transdutor não necessitou de filtros para diminuição dos erros envolvidos na medição.

Como a ideia do REMA para essa primeira versão do equipamento era o uso de poucos recursos para construção, além de se saber que a empresa já havia um conjunto de sensores de condutividade elétrica e temperatura em um equipamento de bancada, estes foram utilizados como os sensores do projeto. Porém, como o condutivímetro de bancada da marca TECNAL, modelo TEC-4MP, visto na Figura 17, não possui um *datasheet* informando as curvas de funcionamento dos sensores, foi necessária a construção das curvas de calibração destes sensores, processo este que é descrito na seção 3.4.1 a seguir.

3.4.1 Modelagens e ajustes

Como descrito na seção 2.1, alguns sensores de condutividade elétrica funcionam a partir da imposição de uma tensão fixa em um de seus eletrodos e, quanto maior a resistência elétrica do fluido do qual os eletrodos estão imersos, maior a queda de tensão entre os dois eletrodos. Esta queda será percebida pelo segundo eletrodo do sensor, o qual estará ligado a porta analógica do microcontrolador. O sensor de temperatura por sua vez, foi retirado de um equipamento já existente no REMA o qual não fornecia informações sobre o mesmo, por isso foram realizadas análises neste e evidenciou-se que quanto menor a temperatura, maior é a queda de tensão. Porém, em ambos os casos, os valores lidos pela porta analógica do Arduino são em termos de tensão, contudo, necessita-se de resultados em

Figura 17 – Condutivímetro de bancada (TEC-4MP).



Fonte: [47].

valores de condutividade elétrica e temperatura, não em tensão. Por isso, faz-se necessário a construção de suas curvas de calibração, para que a tensão lida nas portas analógicas sejam transformadas nas unidades que nos interessam.

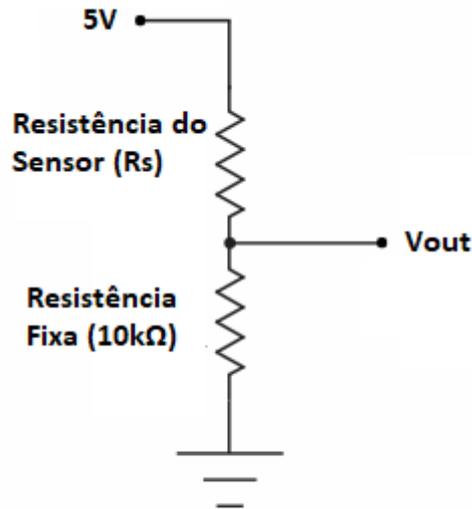
Para essa tarefa, foi montado um divisor de tensão para o sensor de condutividade elétrica e outro para o de temperatura - ambos com resistência fixa de $10\,000\,\Omega$, visto que esta resistência se aproxima do valor da resistência elétrica do sensor em sua faixa de operação escolhida. A representação do divisor de tensão pode ser visto na Figura 18.

Conhecendo então que a resistência fixa tem $10\,000\,\Omega$ e que as correntes que passam pelos dois resistores são praticamente idênticas (já que a corrente que passa por V_{out} é mínima devido ao fato de que o circuito na entrada analógica do Arduino tem resistência muito maior do que as do circuito), pode-se então descobrir a resistência do meio em que o sensor está imerso. Para isso, utiliza-se a primeira lei de Ohm, apresentada anteriormente na equação (2.1).

Como há uma queda de tensão no resistor, a corrente que passa pelo fluido em que o sensor está imerso é dada por:

$$I = \frac{5 - V_{out}}{R_s}. \quad (3.1)$$

Figura 18 – Divisor de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma análoga, a corrente que passa pela resistência fixa é dada por:

$$I = \frac{V_{out} - 0}{10^3}. \quad (3.2)$$

Porém, como as correntes que passam pelas resistências são praticamente iguais, tem-se que:

$$\frac{5 - V_{out}}{R_s} = \frac{V_{out} - 0}{10^3}. \quad (3.3)$$

Em outras palavras, a resistência fixa é dada por:

$$R_s = \frac{(5 - V_{out})10^3}{V_{out}}. \quad (3.4)$$

Com a resistência elétrica do meio definida, sabendo que a condutividade é o inverso da resistência elétrica (condutância) vezes a constante da célula, pode-se então construir a curva de condutividade a partir da coleta da resistência elétrica lida em fluidos de calibração com condutividade elétrica bem definida. Os fluidos de calibração foram preparados no laboratório de química do próprio núcleo de pesquisa utilizando uma solução de água ultra pura e cloreto de potássio.

Para construir a curva de calibração do sensor de temperatura, foi utilizada a equação (3.4) para relacionar a tensão medida com a temperatura. Para coletar os dados de resistência elétrica, os valores de temperatura que foram utilizados para comparar com

a resistência obtida foram obtidos com uso do equipamento de bancada TEC-4MP citado anteriormente.

3.4.1.1 Coleta de dados

Para a construção da curva de calibração do transdutor de temperatura foram coletadas amostras de tensão lidas pelo Arduino em diferentes temperaturas. O valor da temperatura foi retirado de um transdutor de temperatura comercial calibrado. Esta coleta resultou nos valores vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Tensão obtida para cada temperatura.

Tensão (V)	Temperatura (°C)
2,707	16,1
2,746	17,7
2,827	21,7
2,844	22,6
3,048	31,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso do transdutor de condutividade elétrica, para coletar a amostra, seguiu-se o padrão de posicionar o sensor dentro da amostra e aguardar 5 minutos para o assentamento do valor de tensão medido. Esse processo foi repetido uma vez para cada fluido de calibração e cada coleta foi feita em uma mesma temperatura (20°C) para isolar seu o efeito na curva de calibração da condutividade. Tal coleta resultou nos valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tensão obtida para cada condutividade elétrica.

Tensão (V)	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
1,900	71,8
2,174	143,6
2,257	215,4
2,329	287,2
2,375	359,0
2,392	430,8
2,419	502,6
2,431	574,4
2,443	646,2
2,467	718,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ambas as coletas foram efetuadas utilizando como suporte gráficos implementados no sistema supervisor ScadaBR, obtidos a partir da média dos dados coletados em um período de um minuto. Esta funcionalidade que foi implementada utilizando ferramentas do ScadaBR para geração do gráfico, que pode ser visto na Figura 19, se mostrou de grande ajuda, visto que ruídos do sistema e interferências foram atenuados com sua utilização.

Figura 19 – Comparação entre curva real e aproximada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a análise dos dados coletados a cada um segundo pôde ser utilizada como fonte de avaliação para definir quando a curva havia assentado, visto que, além de visualmente perceptível pelo gráfico, o supervisor apresenta a média dos valores do último minuto, reduzindo sua variação após a curva ter assentado.

3.4.1.2 Curvas de calibração

Com os dados da condutividade elétrica coletados, pôde-se construir uma curva que aproximasse a dinâmica real do sistema. Essa dinâmica se assemelha a uma exponencial, por isso foi escolhida uma equação que representasse essa exponencial, multiplicando uma constante a pela tensão medida elevada a uma constante b , e por fim, foi adicionada uma parcela linear para ajustes, como pode ser visto na equação (3.5).

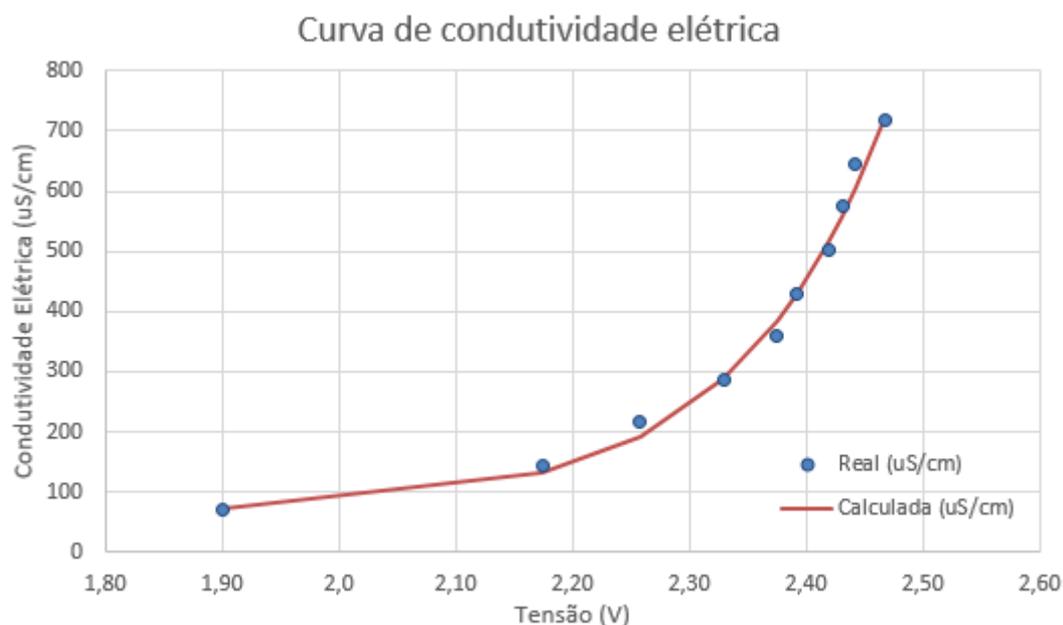
$$y = ax^b + cx, \quad (3.5)$$

em que x é a tensão lida pelo Arduino, y a condutividade elétrica e a , b e c valores a serem determinados. Estes valores de a , b e c foram encontrados utilizando regressão por mínimos quadrados em um software matemático, resultando assim na equação a seguir.

$$y = 0,0000138591x^{19,5232} + 35,7704x. \quad (3.6)$$

O gráfico de comparação entre a dinâmica real e a curva gerada pela equação (3.6) pode ser vista na Figura 20.

Figura 20 – Comparação entre valores reais e curva aproximada da condutividade elétrica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como no processamento foi utilizada a curva calculada e não a real, a condutividade resultante dos cálculos no processador conteve erros. Alguns destes podem ser vistos na Tabela 4, que mostra a tensão lida pelo microprocessador, a condutividade real de cada fluido de calibração, o valor da condutividade calculada com emprego da equação (3.6), e os erros entre o valor calculado e o valor real.

Tabela 4 – Erros associados à curva calculada de condutividade.

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Real	CE Calculada ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Erro ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Erro Relativo (%)
	71,8	71,8	0,0	0,0
	143,6	131,0	-12,6	8,8
	215,4	191,7	-23,6	11,0
	287,2	288,4	1,2	0,4
	359	384,1	25,2	7,0
	430,8	429,7	-1,1	0,2
	502,6	514,6	12,0	2,4
	574,4	558,5	-15,9	2,8
	646,2	605,2	-41,0	6,3
	718	718	0,0	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

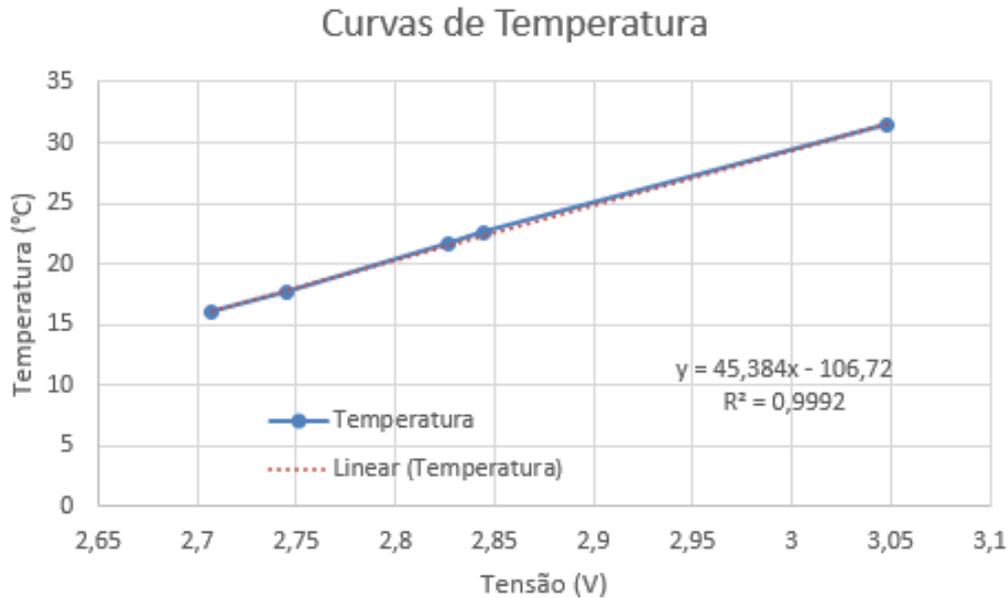
O maior erro foi de $-41 \mu\text{S}/\text{cm}$, no fluido de condutividade $646.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ e o menor foi aproximadamente nulo nos fluidos de condutividade $71.8 \mu\text{S}/\text{cm}$ e $718 \mu\text{S}/\text{cm}$. Em termos relativos, o maior erro foi de 11% para o fluido de condutividade $215.4 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Como não foi possível utilizar o *datasheet* do sensor de temperatura, visto que foi utilizado um que já havia na empresa e fazia parte de um equipamento que não disponibilizava informações sobre este sensor, a sua curva necessitou ser implementada. No caso da curva da temperatura, como a dinâmica real do sistema é bastante linear na faixa das amostras coletadas, a mesma foi aproximada pela equação linear:

$$t = 45,384x - 106,72, \quad (3.7)$$

em que x é a tensão lida pelo Arduino e t a temperatura. O gráfico de comparação entre a dinâmica real e a curva gerada pela equação (3.7) pode ser vista na Figura 20.

Figura 21 – Comparação entre curva real e aproximada da temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de temperatura resultantes dos cálculos realizados pelo processador conteve erros, visto que foi utilizada a curva de temperatura aproximada e não a real. Neste caso a curva linear aproximada apresentou respostas muito semelhantes aos valores reais. A Figura 5 mostra a tensão lida pelo microprocessador, a temperatura real de cada fluido de calibração, o valor da temperatura calculada através da equação (3.7), e os erros entre o valor calculado e o valor real.

Tabela 5 – Erros associados à curva calculada de temperatura.

Temperatura Real ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura Calculada ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Erro ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Erro Relativo (%)
16,1	16,1	0,04	0,27
17,7	17,9	0,19	1,05
21,7	21,6	-0,11	0,50
22,6	22,4	-0,23	1,01
31,5	31,6	0,11	0,35

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, o maior erro analisado, proveniente a erros de ajuste, é de -0.23°C , para a temperatura de 22.6°C e o menor é de 0.04°C para a temperatura de 16.1°C . Por outro lado, o maior erro relativo é de 1.05% para a temperatura de 17.7°C e o menor é de 0.27% para a temperatura de 16.1°C .

3.4.1.3 Compensação da temperatura na condutividade elétrica

Com as curvas bem definidas, foram tomadas como base as referências vistas na revisão bibliográfica [17, 20] para descrever a compensação da temperatura. Foi utilizada a equação (2.6), com o seu coeficiente de temperatura definido como 2%, valor este que foi encontrado empiricamente para essa faixa de condutividade. A verificação da compensação da temperatura foi efetuada variando a temperatura do fluido para um valor superior e outro inferior ao da temperatura de referência, 20 °C.

Com o fluido de calibração, com condutividade elétrica de 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à temperatura de aproximadamente 17.2 °C, o valor da condutividade compensada foi de aproximadamente 355.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como pode ser visto na Figura 22, sendo a variável **TemperaturaMedia** a temperatura do fluido no momento da coleta, a variável **Condutividade** a condutividade elétrica sem a compensação da temperatura, e a variável **Condutividade_Compensada** a condutividade elétrica compensada. As variáveis **a**, **b** e **Temp_comp** são respectivamente auxiliares para alteração da variável a e c da equação (3.5), e valor de α da equação (2.5), ou seja, a porcentagem de variação da condutividade por cada kelvin.

Figura 22 – Dados da medição do fluido de 359 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Watch list 	
 Auxiliar - a	2.91041E-5
 Auxiliar - b	35.7704
 Auxiliar - Temp_comp	0.02
Scripts - TemperaturaMedia	17,21°C
Scripts - tensao_media	2,2666V
teste - Condutividade	333,17 $\mu\text{S}/\text{cm}$
teste - Condutividade_Compensada	355,94 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para analisar a influência da temperatura em um fluido com condutividade inferior, o mesmo foi feito para a solução com condutividade elétrica de 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à temperatura de aproximadamente 17.4 °C, o valor da condutividade compensada foi de aproximadamente 71.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$, como pode ser visto na Figura 23.

O gráfico apresentado na Figura 24, retirado do supervisor, mostra a curva da condutividade elétrica se assentando, após 5 minutos, no valor mostrado anteriormente. A linha vermelha mostra a curva de condutividade medida pelo sensor sem compensação e a azul mostra a medida compensada.

Figura 23 – Dados da medição do fluido de 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Watch list 	
 Auxiliar - a	2.91041E-5
 Auxiliar - b	35.7704
 Auxiliar - Temp_comp	0.02
Scripts - TemperaturaMedia	17,41°C
Scripts - tensao_media	1,7982V
teste - Condutividade	67,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$
teste - Condutividade_Compensada	71,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

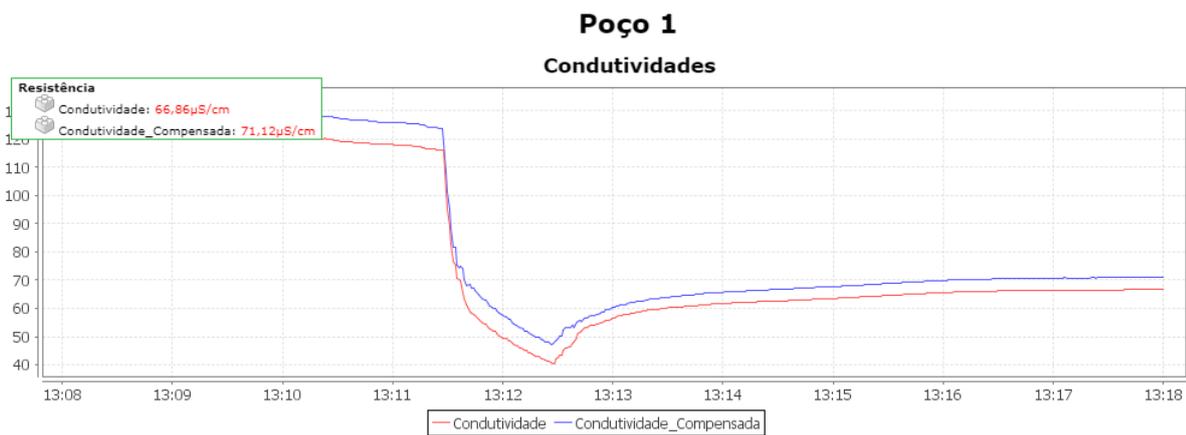


Figura 24 – Gráfico do sistema se estabilizando em aproximadamente 71 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que o erro na leitura causado pelo efeito da temperatura foi corrigido para ambos os fluidos utilizando a mesma porcentagem de 2% na compensação da temperatura - ambos com erros causados tanto pelos erros inerentes da curva de condutividade calculada quanto pelo erro na compensação da temperatura. Mesmo assim, constata-se que a equação da compensação da temperatura gerou bons resultados.

4 Sistema supervisório

Para simplificar a utilização do sistema de medição, optou-se pela utilização do ScadaBR, no qual foi implementado a configuração dos protocolos de comunicação para a correta recepção dos dados enviados pelo Arduino, a tradução das tensões lidas em valores de condutividade elétrica e temperatura, apresentação destes dados para o usuário de forma amigável, e envio de alertas e relatórios.

4.1 Comunicação

Para o presente trabalho foram utilizados Modbus com RS232 e GPRS. O Modbus via RS232 possibilita uma rápida transferência dos dados, por isto este foi pensado principalmente para ser utilizado no processo de desenvolvimento do protótipo e futuras análises rotineiras em campo, visto que o mesmo tem a limitação de ser um sistema cabeado, o que para um sistema posto em campo pode se tornar inviável. Além do Modbus via RS232 foi utilizado também o GPRS o qual permitiu uma comunicação não cabeada entre o processador e o supervisório, viabilizando assim que o equipamento ficasse isolado em campo independentemente da distância entre processador e supervisório.

O ScadaBR já possui uma janela de configuração tanto para o Modbus serial quanto para o GPRS. Para o primeiro caso, o supervisório conta com a seguinte janela de configuração vista na Figura 25.

As principais configurações existentes nesta janela de propriedades do Modbus serial que devem ser configuradas são: escolher codificação RTU para o Modbus através da seleção desta informação na janela; configurar o período de atualização dos dados da comunicação serial, ou seja, o período entre os pedidos de envio de dados para o Arduino, que no caso do sistema de monitoramento ficou configurado como 1 segundo; a porta USB do computador ao qual o equipamento está ligado, bem como as características desta comunicação, como *baud rate*, paridade entre outros.

Já a configuração da comunicação via GPRS no ScadaBR, é bem mais simplificada, como pode ser visto na Figura 26, necessitando apenas a identificação dos IPs dos quais ela irá receber os dados, configuração esta que é importante por motivos de segurança, para que nenhum IP distinto envie valores incorretos para o supervisório. Porém na execução dos testes em laboratório, esta configuração foi ajustada para permissão de todos os IPs para simplificação do processo.

Por fim, as equações são realizadas através de *scripts* no próprio supervisório, resultando nas variáveis mencionadas na seção 3.4.

Figura 25 – Janela de configuração da comunicação via Modbus no ScadaBR.

Propriedades do modbus serial

Nome:

Export ID (XID):

Período de atualização:

Quantificação:

Timeout (ms):

Tentativas:

Apenas quantidades contínuas:

Criar pontos de monitor de escravo:

Máxima contagem de leitura de bits:

Máxima contagem de leitura de registradores:

Máxima contagem de escrita de registradores:

Porta:

Baud rate:

Controle de fluxo de entrada:

Controle de fluxo de saída:

Data bits:

Stop bits:

Parity:

Codificação:

Echo:

Simultaneidade:

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Janela de configuração da comunicação via GPRS no ScadaBR.

Propriedades do receptor HTTP

Nome:

Export ID (XID):

Lista branca de IP remotos:
 ..*.*

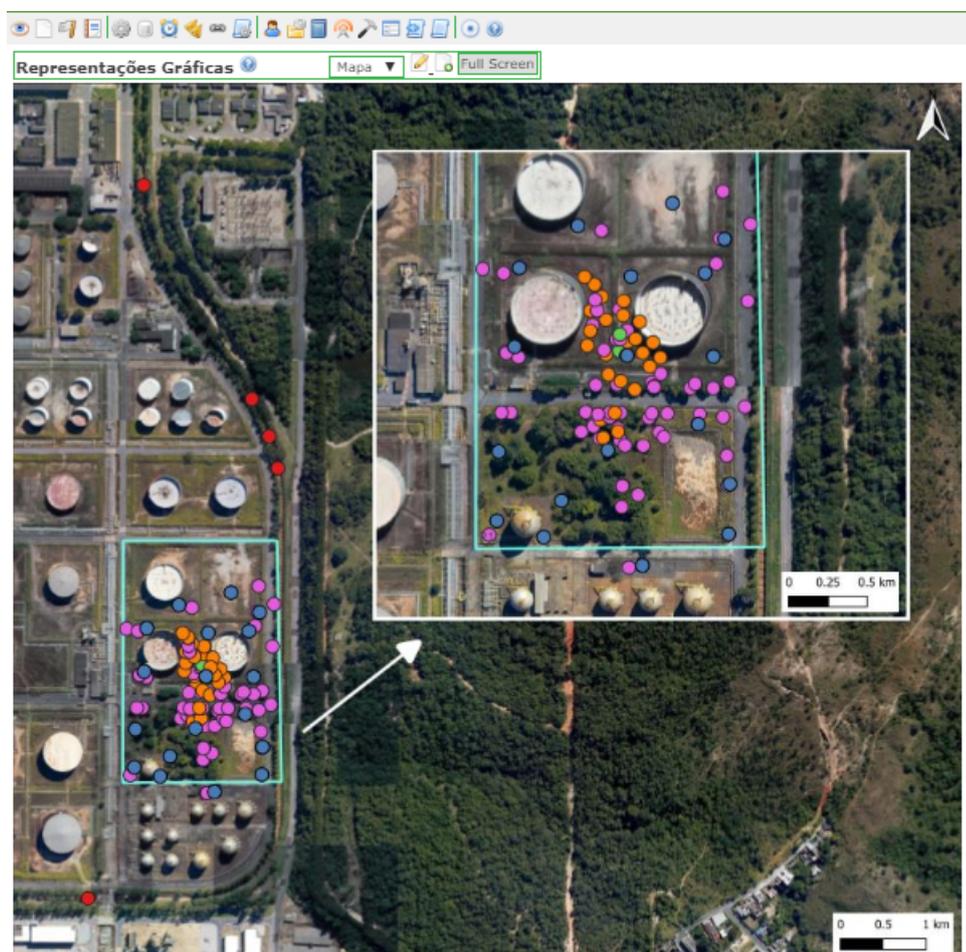
Lista branca de ID de dispositivos:
 *

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Interface com o usuário

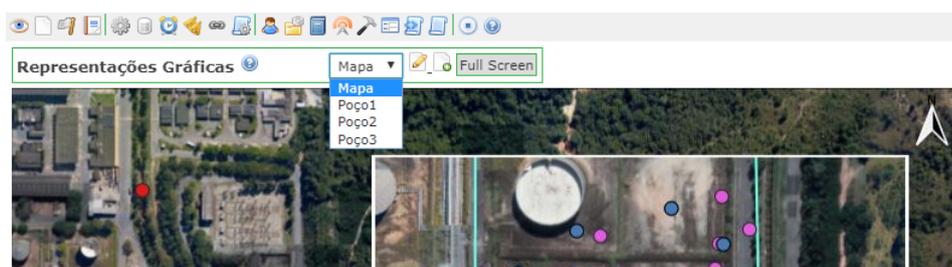
Para facilitar a utilização do usuário, e pensando na possibilidade de ter mais de um sistema de monitoramento em uma mesma área, foi criada uma tela com uma imagem obtida por satélite de uma área com diversos poços, como pode ser visto na Figura 27. Assim, permite-se que usuário apenas clique no círculo referente à posição do poço, ou se preferir, escolha o nome do poço manualmente pela caixa de seleção, como pode ser visto na Figura 28.

Figura 27 – Planta e distribuição do sistema de monitoramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

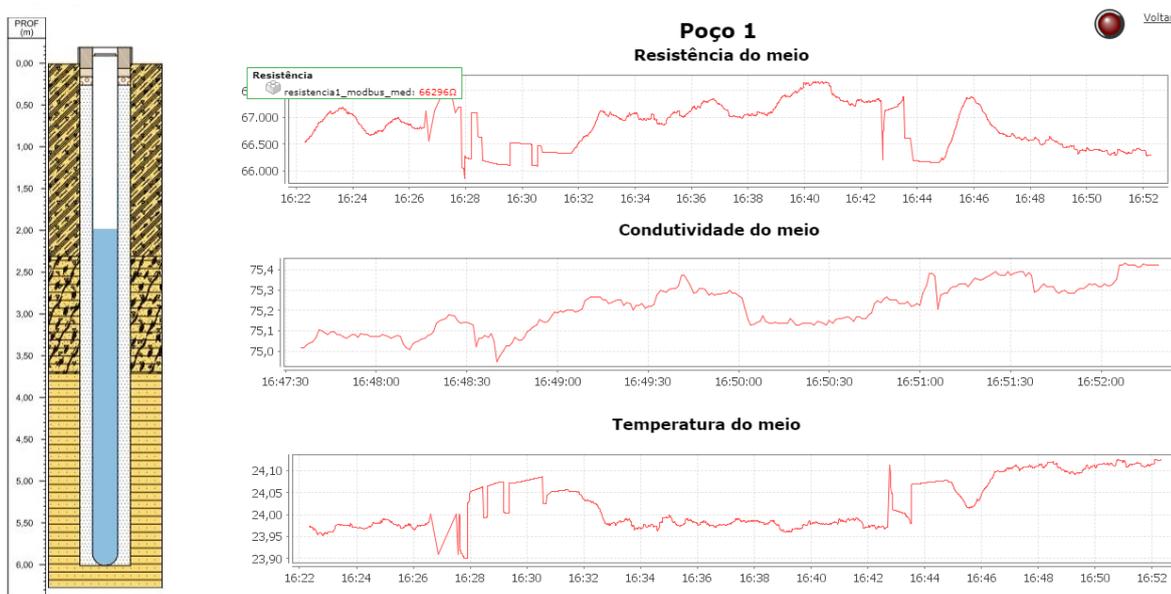
Figura 28 – Escolha manual do poço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O usuário pode então selecionar o poço que deseja analisar e então o *software* o encaminha para uma tela com gráficos das principais variáveis do sistema, como nível do aquífero naquele poço (que ainda não foi implementado fisicamente), resistência elétrica e condutividade elétrica, bem como a temperatura da água subterrânea na qual o sistema está imerso. Além de tais gráficos, o sistema apresenta um ícone de LED (Diodo Emissor de Luz, do inglês *Light Emitting Diode*) o qual pisca continuamente caso o sistema apresente algum alerta de contaminação. A tela em questão pode ser vista na Figura 29.

Figura 29 – Características do poço 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Caso se deseje alguma informação mais exata sobre alguma variável em específico, pode-se abrir a tela “*Watch List*” que contém todas as variáveis do sistema, sejam eles *scripts*, auxiliares ou ainda valores provenientes diretamente da comunicação via Modbus ou GPRS, como pode ser visto na Figura 30.

Se o usuário desejar analisar uma variável com maiores detalhes, é possível entrar na tela específica da mesma, contendo dados pontuais, como o valor medido no horário da coleta, gráfico ao longo do tempo e algumas estatísticas como valores máximos, mínimos e média em um intervalo de tempo especificado. Um exemplo de tal tela é apresentado na Figura 31

O supervisorio também possui um sistema de envio de dados para um conjunto de e-mails previamente cadastrados. O sistema pode enviar alertas previamente detalhados, como no exemplo de contaminação do aquífero por substâncias apolares ou salinas. Um exemplo de tal alerta via e-mail pode ser visto na Figura 32.

Além de alertas, o sistema pode também enviar relatórios detalhados sobre uma variável. Como exemplo, foi enviado um relatório da variável “*resistencia1_modbus_med*”,

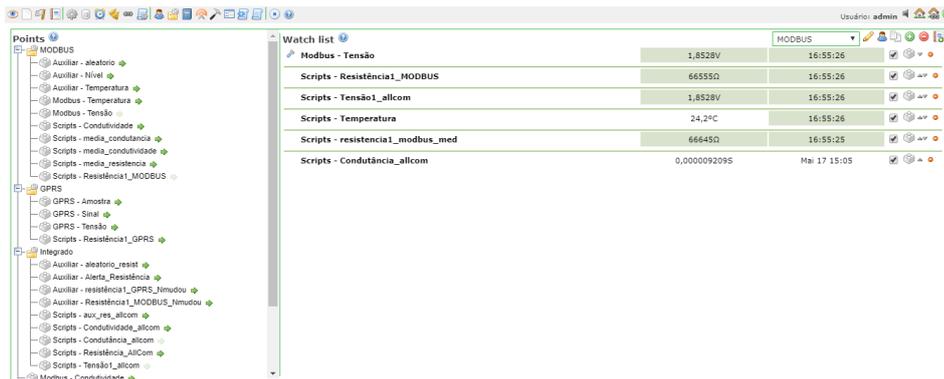
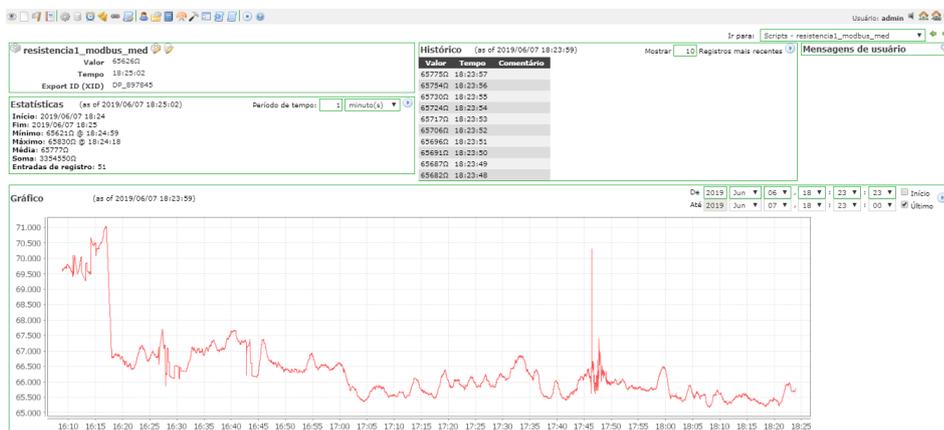


Figura 30 – Variáveis gerais do sistema.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 – Detalhes sobre a variável selecionada.



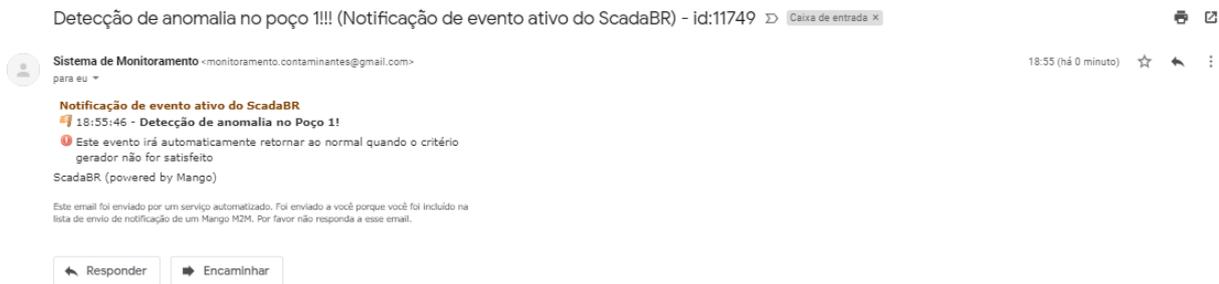
Fonte: Elaborado pelo autor.

o que gerou o seguinte e-mail com algumas estatísticas, eventos de alertas e anexos contendo a tabela de valores em formato CSV (Valor separado por vírgula, do inglês *Comma-Separated Values*). O e-mail pode ser visto nas Figuras 33, 34 e 35.

O sistema de monitoramento possui também estrutura de login para proteger as informações coletadas, como pode ser visto na figura 36.

As telas mostradas anteriormente contendo todas as variáveis do sistema pertenciam ao administrador, que pode não somente visualizar todos os itens como também alterá-los, porém existem outros usuários no sistema que possuem apenas permissão para ver algumas variáveis, sem a possibilidade de alterá-las. Neste caso uma tela “*Watch List*” de exemplo pode ser visto na Figura 37, que mostra apenas as três principais variáveis do sistema que são permitidas ao usuário ver. Além desta limitação na visualização das variáveis do sistema, o usuário também não é permitido a fazer alterações na parte gráfica, podendo assim apenas visualizar.

Figura 32 – Exemplo de e-mail de alerta de detecção de anomalia.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 – Estatísticas via relatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

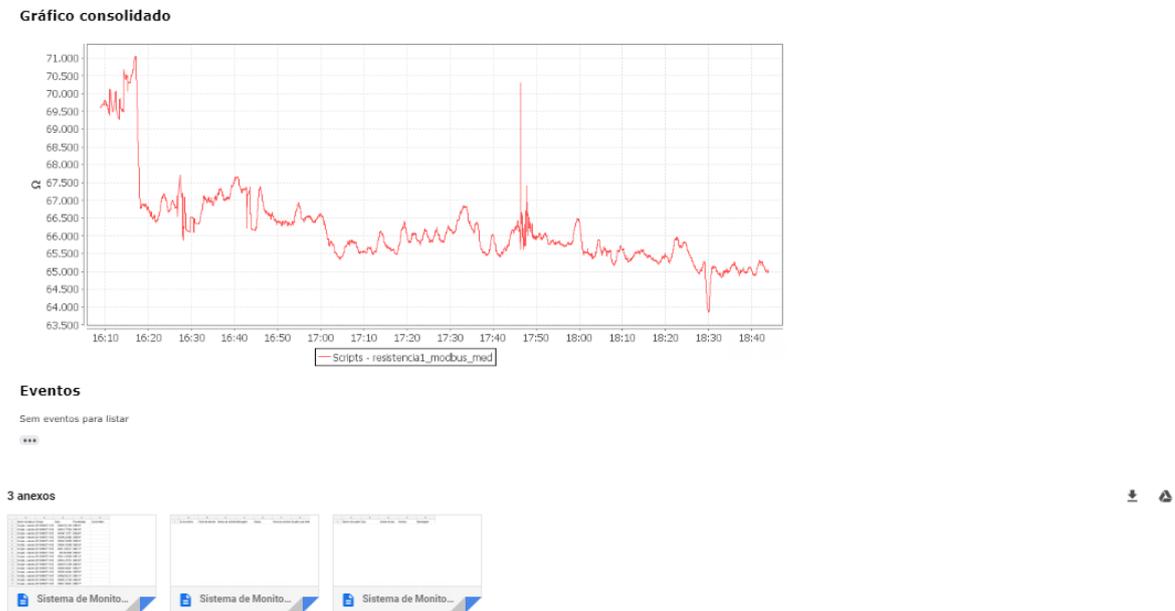
Figura 34 – Eventos via relatório.

Eventos

Id do evento	Nível de alarme	Tempo de atividade	Mensagem	Status	Reconhecido
10855	🔔	2019/05/02 08:44:52	Deteção de Anomalia	2019/05/02 08:51:34 - Retornou ao normal	2019/05/02 10:18:49
10884	🔔	2019/05/02 09:10:04	Deteção de Anomalia	2019/05/02 09:17:55 - Retornou ao normal	2019/05/02 10:18:49
10888	🔔	2019/05/02 09:18:24	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:04:57 - Data point desativado	2019/05/02 10:18:49
10903	🔔	2019/05/02 10:04:58	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:11:19 - Data point desativado	2019/05/02 10:18:49
10914	🔔	2019/05/02 10:11:20	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:13:39 - Retornou ao normal	2019/05/02 10:18:49
10920	🔔	2019/05/02 10:14:05	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:14:29 - Retornou ao normal	2019/05/02 10:18:49
10923	🔔	2019/05/02 10:14:31	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:15:28 - Retornou ao normal	2019/05/02 10:18:49
10926	🔔	2019/05/02 10:15:30	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:22:54 - Retornou ao normal	2019/05/02 10:18:49
10936	🔔	2019/05/02 10:23:02	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:30:12 - Retornou ao normal	2019/05/06 15:53:12
10942	🔔	2019/05/02 10:30:21	Deteção de Anomalia	2019/05/02 10:37:36 - Retornou ao normal	2019/05/06 15:53:12
10946	🔔	2019/05/02 10:38:16	Deteção de Anomalia	2019/05/02 12:03:55 - Retornou ao normal	2019/05/06 15:53:12
10957	🔔	2019/05/02 12:04:26	Deteção de Anomalia	2019/05/02 12:09:04 - Retornou ao normal	2019/05/06 15:53:12
10960	🔔	2019/05/02 12:09:22	Deteção de Anomalia	2019/05/02 12:24:17 - Retornou ao normal	2019/05/06 15:53:12
10989	🔔	2019/05/02 13:08:02	Deteção de Anomalia	2019/05/02 13:08:24 - Retornou ao normal	2019/05/06 15:53:12

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 – Anexos via relatório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 – Tela de login.

User id

Password

Chrome 74 on Windows
Este browser é suportado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 – Tela de variáveis gerais limitada.

Watch list	Value	Time
Scripts - resistencia1_modbus_med	64419Ω	20:59:42
Scripts - TemperaturaMedia	24.561716841222403	20:59:43
Scripts - media_condutividade	77,6217µS/cm	20:59:43

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 Validação

Este capítulo apresenta a validação do sistema de monitoramento, a qual foi inicialmente efetuada em cada módulo separadamente, e posteriormente de forma integrada, para análises de possíveis falhas no decorrer desta integração. Para o detalhamento deste processo de validação, está descrito a seguir a avaliação realizada com foco em cada módulo separadamente, porém utilizando como auxiliar os demais.

5.1 Alimentação

Para validar o módulo de alimentação, os demais módulos foram ligados no controlador de carga conectado ao painel solar e à bateria. Como o controlador já possui duas saídas de 5 V por duas portas USB, a alimentação do processador e do transdutor foi simplificada pela falta de necessidade de um circuito extra de controle da tensão enviada para estes módulos.

O sistema, ligado à alimentação, ficou durante um dia funcionando corretamente, utilizando a comunicação GSM/GPRS. Como as medições são efetuadas apenas algumas vezes ao dia, o sistema de alimentação mostrou-se suficiente para esta utilização, dado que os demais módulos não consomem demasiada energia elétrica. Porém faz-se necessário a sua utilização por um período mais longo para identificar possíveis falhas causadas por efeito do tempo.

5.2 Transdutor

O processo de validação do transdutor começou a ser efetuado desde o início de sua concepção, visto que durante a concepção das curvas, bem como da compensação da temperatura, vários ensaios foram realizados para verificar o correto funcionamento do transdutor, como apresentado na seção 3.4. Contudo, como o foco da seção 3.4 era o de desenvolver o transdutor para o correto funcionamento em uma determinada faixa de operação, não foram analisados neste primeiro momento valores de condutividade que excediam esta região.

Por isso, objetivando a característica de que o transdutor poderá ser exposto a uma condutividade inferior ao encontrado em águas subterrâneas, no caso de contaminação por derivados de petróleo, foi realizada a validação em baixa condutividade elétrica e com temperatura diferente ao de referência, como descrito a seguir.

Para validar os valores de condutividade elétrica lidos pelo sistema de monitora-

mento, foi utilizado o condutivímetro digital de bancada TEC-4MP da Tecnal, que pode ser visto na figura 17, para comparar os resultados obtidos.

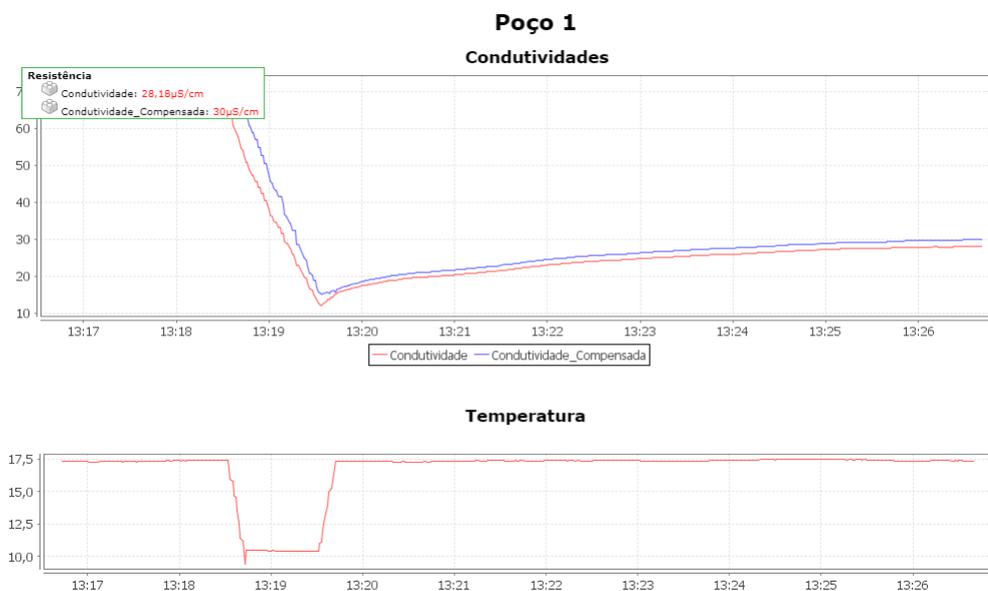
Na primeira verificação, foi utilizado um fluido com aproximadamente $31 \mu\text{S}/\text{cm}$, para representar a água subterrânea com baixa condutividade elétrica. No sistema de monitoramento, os resultados da medição podem ser vistos nas Figuras 38 e 39, que mostram os valores de condutividade elétrica medidos e compensados, bem como a temperatura no momento da coleta.

Figura 38 – Dados obtidos pelo sistema de monitoramento para condutividade de aproximadamente $31 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Watch list 	
 Auxiliar - a	2.91041E-5
 Auxiliar - b	35.7704
 Auxiliar - Temp_comp	0.02
Scripts - TemperaturaMedia	17,39°C
Scripts - tensao_media	0,7892V
teste - Condutividade	28,23 $\mu\text{S}/\text{cm}$
teste - Condutividade_Compensada	30,03 $\mu\text{S}/\text{cm}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

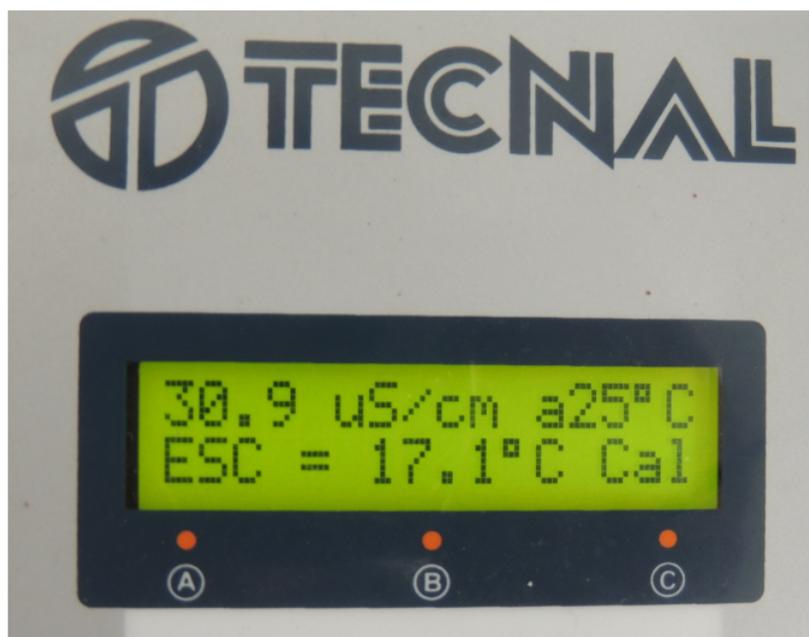
Figura 39 – Gráficos obtidos pelo sistema de monitoramento para condutividade de aproximadamente $31 \mu\text{S}/\text{cm}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após esta medição efetuada pelo sistema de monitoramento, foi realizada uma medição no mesmo fluido com o condutivímetro TEC-4MP, o que resultou nos valores vistos na figura 40.

Figura 40 – Gráficos obtidos pelo condutivímetro TEC-4MP da Tecnal para condutividade de aproximadamente 31 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

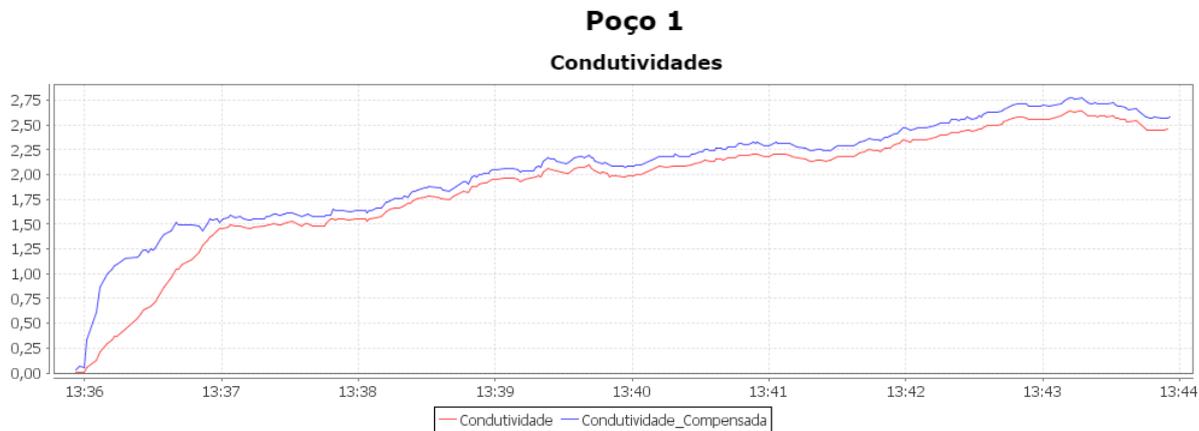
Percebe-se que os valores obtidos pelo sistema de monitoramento se assemelham aos obtidos pelo condutivímetro de bancada. A diferença entre o valor da condutividade elétrica deve-se ao erro na construção da curva de condutividade do sistema de monitoramento, enquanto que o erro na temperatura deve-se principalmente a sua variação durante o intervalo das medições.

Após esta primeira validação, utilizando um valor de condutividade inferior à faixa utilizada para construir a curva de condutividade do sistema, o sistema foi utilizado para a medição de um valor aproximadamente dez vezes menor do que o último, com o intuito de avaliar se o sistema comportaria a medição de valores tão baixos.

O sistema de monitoramento, como pode ser visto na figura 41, encontrou dificuldades para fazer a medição, já que a curva do sistema ficou irregular, demonstrando a presença de ruídos não tratados pelo sistema, apresentando enfim uma leitura de aproximadamente 2.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

O condutivímetro de bancada por sua vez, apresentou como resposta 3.44 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como pode ser visto na figura 42.

Figura 41 – Gráfico obtido pelo sistema de monitoramento para condutividade de aproximadamente $3.4 \mu\text{S}/\text{cm}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

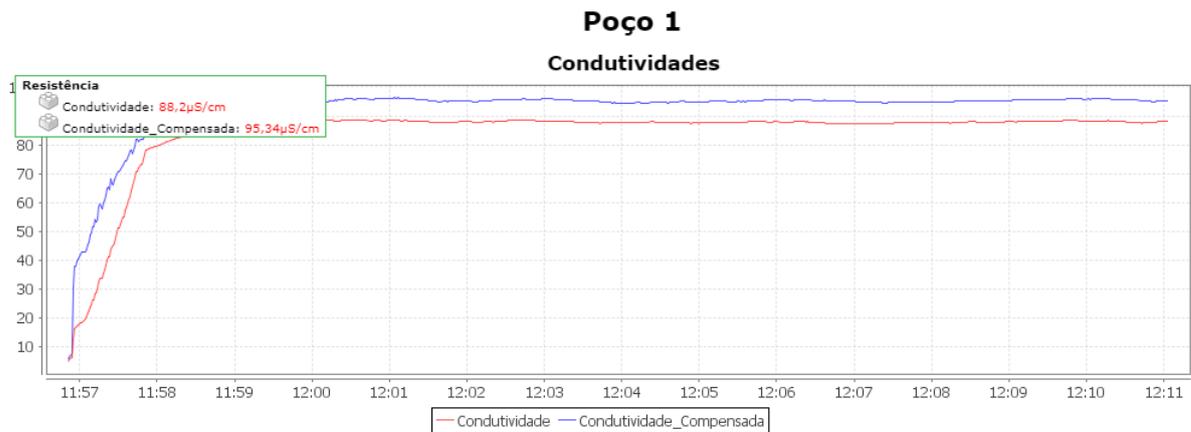
Figura 42 – Valores obtidos pelo condutivímetro de bancada para condutividade de aproximadamente $3.4 \mu\text{S}/\text{cm}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado que um dos focos do trabalho é a contaminação por derivados de petróleo, foram realizados testes utilizando a gasolina como contaminante. Para tal, o sensor de condutividade elétrica e temperatura foram colocados em 500 ml de água com a finalidade de, após fazer a medição da condutividade dela, contaminar gradativamente para analisar os efeitos da gasolina na condutividade elétrica do meio. A Figura 43 mostra a condutividade elétrica medida da água.

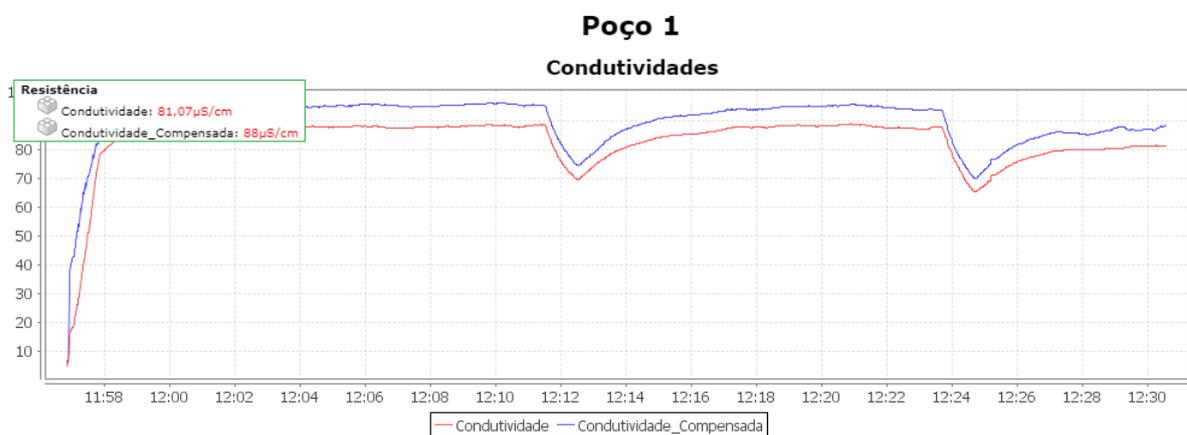
Figura 43 – Condutividade elétrica, de aproximadamente $100 \mu\text{S}/\text{cm}$, da água antes de ser contaminada por gasolina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi então adicionado 1 ml de gasolina no frasco e o resultado da variação na condutividade elétrica pode ser visto na Figura 44 a seguir.

Figura 44 – Condutividade elétrica, de aproximadamente $88 \mu\text{S}/\text{cm}$, da água depois de ser contaminada por 1 ml gasolina.

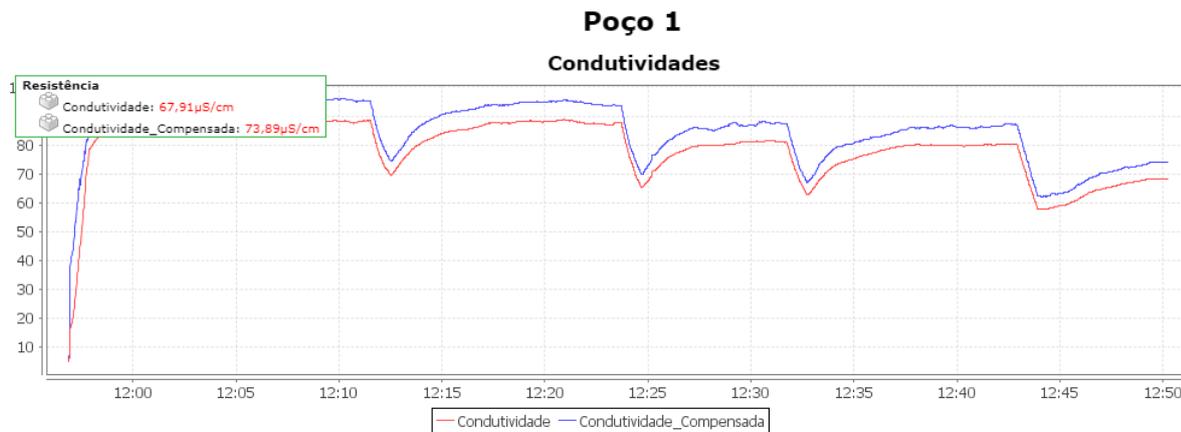


Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que houve um decréscimo de aproximadamente $10 \mu\text{S}/\text{cm}$. O processo foi então repetido algumas vezes, resultando em variações aproximadas a esta última, como pode ser visto na Figura 45

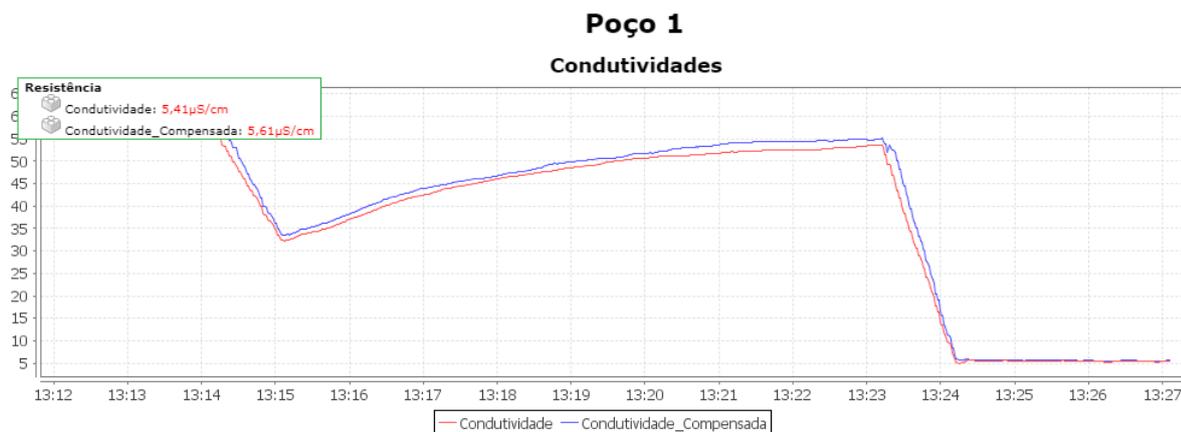
Após o processo de contaminação se repetir algumas vezes, como a gasolina é menos densa do que a água, o eletrodo começou a ficar quase totalmente imerso no contaminante. Neste estado, a condutividade apresentou uma queda brusca, como pode ser visto na Figura 46.

Figura 45 – Condutividade elétrica da água depois de ser contaminada com aproximadamente 3 ml gasolina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 – Queda brusca na condutividade elétrica com eletrodo quase totalmente imerso no contaminante.

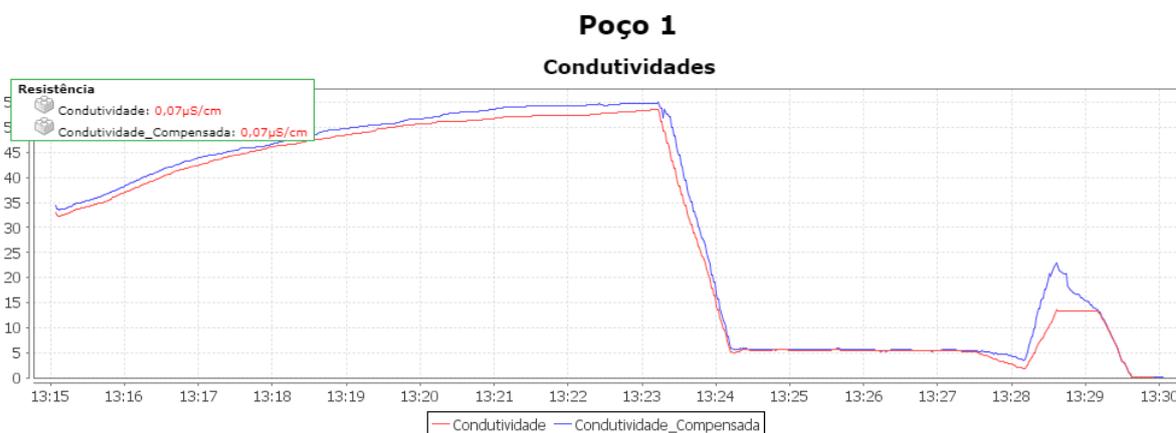


Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, o eletrodo foi totalmente imerso na gasolina, o que resultou em uma medição de aproximadamente $0.07 \mu\text{S}/\text{cm}$, como pode ser visto na Figura 47.

Após essas análises, que levaram o sistema não somente para fora da faixa de atuação da curva desenvolvida, mas também, paralelamente, com a temperatura diferente da referência, verificou-se que os resultados foram satisfatórios. Este fato se dá principalmente pela razão de que o transdutor foi implementado para identificar contaminação de derivados de petróleo em fase livre ou água do mar, ambos com condutividade elétrica extremamente diferentes das encontradas em águas subterrâneas. Sendo assim, em caso de contaminação, haveria uma mudança brusca na condutividade lida pelo transdutor. Com isto, os erros da leitura se tornariam insignificantes comparados à variação gerada pela contaminação.

Figura 47 – Eletrodo totalmente imerso na gasolina.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Comunicação

A validação do sistema de comunicação foi efetuada primeiramente avaliando a mesma pelo Modbus e posteriormente utilizando GSM/GPRS.

A comunicação entre o processador e supervisor pelo Modbus ocorreu adequadamente, não apresentando demais complicações, permitindo apresentar os dados no ScadaBR a cada 1 segundo de intervalo, período este delimitado como valor mínimo pelo supervisor. Esta facilidade do Modbus se dá devido ao fato de que este é efetutado através da conexão direta cabeada entre processador e computador servidor do supervisor.

A comunicação efetuada pelo GSM/GPRS apresentou uma importante complicação: o fato de que ela é limitada pela intensidade do sinal da telefonia na região em que o sistema está posicionado. Isto pode ser um grande limitador visto que as áreas remotas em que o sistema estará posicionado poderão não ter cobertura da telefonia, o que inviabilizaria o sistema, em seu estado atual, de ser implementado no local, a não ser que o mesmo estivesse ligado via Modbus.

Outra característica evidenciada pela validação da comunicação via GSM/GPRS foi o período necessário para o envio dos dados. Verificou-se que o processo completo de conexão e coleta de dados da rede, como horário e intensidade do sinal, e envio para o supervisor demora entre 1 min e 2 min. A princípio esta característica não influencia negativamente o sistema, uma vez que este atua apenas algumas vezes ao dia, sendo alguns minutos de comunicação insignificantes comparado ao intervalo entre as medições, porém se faz interessante perceber esta característica como limite de tempo entre as coletas.

Salvo as limitações citadas, a comunicação do sistema funcionou adequadamente tanto pelo Modbus, quanto pelo GSM/GPRS.

5.4 Processamento

Com as características evidenciadas na seção 3.3 de trabalho com a memória, e do processamento das equações das curvas sendo efetuadas pelo supervisor, o processamento atuou corretamente, sem demais falhas. Todavia, o sistema atual está limitado ao que já está implementado, visto que a memória utilizada atualmente é de 70% do que o microprocessador suporta. Um dos motivos do alto consumo da memória ocorre devido a utilização de várias *strings* no envio dos comandos Hayes para a rede. Com isto, para implementação de novas funcionalidades no sistema, que necessitasse de maior utilização da memória, o Arduino UNO já não seria suficiente.

Como visto na seção 3.4, a resolução do Arduino UNO foi suficiente para o objetivo proposto. Porém, para comportar maior exatidão nas medições, o Arduino UNO por si só já não seria suficiente, necessitando assim de pelo menos um conversor A/D externo.

5.5 Supervisor

Duas características principais foram analisadas para validação do sistema supervisor. A primeira foi o processamento dos dados via equações das curvas de condutividade e temperatura, além das equações de compensação da temperatura e demais processamentos dos *scripts*. Neste primeiro caso, o processamento via supervisor foi satisfatório, efetuando o processamento de todas as equações e *scripts* a cada segundo sem dificuldade.

A segunda característica avaliada foi se o supervisor ScadaBR conseguiu ser amigável o suficiente, fazendo com que o processo de adaptação da utilização pelo usuário fosse rápido e intuitivo. Para esta análise foram chamados alguns integrantes do núcleo de pesquisas para verificar se haveria alguma dificuldade de utilização. Após a utilização, foi avaliado que o sistema é intuitivo, de fácil utilização.

Neste processo de verificação do supervisor foi evidenciada uma característica que poderá ser problemática. No processo de exportação e importação do supervisor para outras máquinas, processo este que será realizado sempre que se fizer presente a necessidade de instalar em outro servidor, como no caso de implementação do sistema para diferentes clientes, foram evidenciadas falhas. Estas falhas consistem na perda de informações previamente estabelecidas no supervisor, como imagens por exemplo. Uma solução para este problema é a criação de um instalador que adicione, na pasta principal do ScadaBR, todos os arquivos do sistema de monitoramento necessários, como as imagens por exemplo, contornando assim tal falha de importação.

6 Considerações finais e perspectivas futuras

Este trabalho objetivou a implementação de um sistema de monitoramento capaz de identificar e alertar a existência de anomalias geoquímicas em águas subterrâneas sobre a presença de substâncias apolares e salinas através da medição da condutividade elétrica. Neste contexto foi desenvolvido um dispositivo que coleta informações da água subterrânea em poços de monitoramento, três vezes por dia, salva estes dados em um cartão SD e os envia para o supervisor. As informações são tratadas e, caso uma possível anomalia seja detectada, são enviados alertas por e-mail e SMS para os usuários cadastrados. O equipamento foi implementado visando sua instalação em campo, por isso o mesmo conta com estrutura que isola das intempéries do clima, além de ter alimentação e comunicação desenvolvidas para não necessitar de cabeados, podendo assim ser posicionado em ambientes isolados.

O sistema atendeu seu propósito de detecção da contaminação de hidrocarbonetos em fase livre, bem como água salinizada, por meio da condutividade elétrica. Todavia, devido a simplicidade do circuito do transdutor, apresentou ineficiência na detecção de contaminações por hidrocarbonetos em baixa concentração, visto que a variação da condutividade elétrica neste caso pode ser confundida com ruídos da medição.

A comunicação via Modbus atendeu seu propósito sem maiores dificuldades. A comunicação via GSM atuou corretamente no envio de alertas via SMS e o GPRS no envio dos dados para o supervisor, porém ambos apresentaram mau funcionamento quando a intensidade do sinal da rede de celular está baixa, o que pode vir a impossibilitar tal comunicação em certas regiões com pouca cobertura da rede.

O Arduino UNO e ScadaBR efetuaram os objetivos de coleta de dados e transformação destes dados de tensão para valores de condutividade elétrica e temperatura, apresentação destes dados de forma amigável pelo supervisor, e envio de alertas e geração de relatórios.

Conclui-se que, desta maneira, o trabalho obteve êxito em atingir os objetivos propostos, permitindo o aperfeiçoamento do método manual de análise da existência de contaminação, possibilitando assim uma rápida resposta a uma situação de contaminação e, como consequência, a melhora na efetividade dos métodos de remediação, por serem iniciados com maior brevidade.

O processo de implementação deste sistema trabalhou com variadas linhas de conhecimento, como programação de sistemas embarcados, redes de computadores, sistemas supervisor, metrologia, dentre outros. Dessa forma, são propostos trabalhos futuros com algumas perspectivas de melhorias do sistema em diferentes áreas do conhecimento.

O sistema eletrônico de medição foi bem isolado pela estrutura, necessitando ainda de um maior tempo de exposição para análises mais realistas. Além disto, foi constatada a necessidade de uma estrutura cônica, feita em uma impressora 3D, para servir de boia e suporte para o sensor, que precisará estar sempre na superfície da água subterrânea do poço. Esta estrutura se faz importante devido às flutuações no nível do aquífero, visto que, como as substâncias apolares são menos densas que a água subterrânea, elas tendem a se concentrar na superfície, tornando assim essa região um ponto estratégico de posicionamento do sensor.

Na comunicação do sistema com o supervisor também foram avaliadas algumas possibilidades de implementação. Devido à dificuldade citada no documento a respeito da intensidade do sinal, faz-se interessante uma alternativa que possa ser utilizada nestes casos. Uma destas alternativas é a adição da comunicação via rádio-frequência. Para implementação desta solução, algumas características demandariam demais estudos em relação à localidade a ser implantada, visto que barreiras físicas, como construções e ruídos de máquinas elétricas de grande porte, poderiam afetar o sinal desta comunicação.

Para este primeiro momento, o Arduino UNO mostrou-se suficiente tanto no que diz respeito à resolução quanto ao processamento. Porém, faz-se interessante a substituição do Arduino por um processador com melhor resolução e que comporte maior número de portas analógicas e digitais, além de um microprocessador mais robusto. Estas características adicionais impactariam diretamente em futuras alterações do sistema. Com uma maior resolução, por exemplo, o equipamento possibilitaria melhores leituras dos transdutores, podendo assim adicionar um transdutor de condutividade elétrica mais exato para identificação de contaminação fora da fase livre e, com isso, o leque de uso poderia ser aumentado. Além disso, o aumento no número de portas analógicas permitiria a implantação de uma maior modularidade.

Dessa forma, seria possível a implementação prévia no equipamento de diversos protocolos de comunicação. O equipamento embarcado contaria com entradas para módulos de comunicação, como o módulo GSM/GPRS SIM800L utilizado atualmente. Após conectar o módulo ao processador seria definido, via supervisor ou *switch*, qual módulo está conectado, e o sistema efetuaria a comunicação utilizando o protocolo padrão do módulo. Tal característica já é utilizada atualmente apenas com um *switch*, para escolha entre o Modbus e GSM/GPRS, todavia com a adição de vários novos protocolos, o usuário necessitaria apenas escolher o que melhor se adapta ao contexto e conectar o módulo de preferência. Esta modularidade suportaria também a adição de novos sensores. Da mesma forma que os módulos de comunicação, os sensores seriam tratados como módulos que utilizariam as entradas analógicas do processador e, após o usuário definir o tipo de transdutor que estaria sendo utilizado, o processador iria trabalhar com a tensão recebida na porta analógica como uma informação referente ao sensor especificado.

O número de adições a um sistema tão amplo seria limitada apenas pela criatividade do projetista, porém foram apresentadas algumas importantes modificações que teriam peso imediato à capacidade do equipamento e que ampliariam consideravelmente o horizonte de utilização.

APÊNDICE A – Comandos Hayes Utilizados

No trecho do código que tem como funcionalidade a coleta da força do sinal do GPRS, foi utilizado o comando “AT+CSQ”, o qual retorna a força do sinal com os valores da tabela 6, a qual mostra o valor retornado em resposta ao comando, o RSSI (Indicador da Força do Sinal Recebido, do inglês *Received Signal Strength Indicator*) em dBm (decibel-miliwatts) e o significado de tal valor em termos de qualidade do sinal.

Tabela 6 – Qualidade do sinal

Valor	RSSI	Qualidade do Sinal
2	-109	Ruim
3	-107	Ruim
4	-105	Ruim
5	-103	Ruim
6	-101	Ruim
7	-99	Ruim
8	-97	Ruim
9	-95	Ruim
10	-93	OK
11	-91	OK
12	-89	OK
13	-87	OK
14	-85	OK
15	-83	Bom
16	-81	Bom
17	-79	Bom
18	-77	Bom
19	-75	Bom
20	-73	Excelente
21	-71	Excelente
22	-69	Excelente
23	-67	Excelente
24	-65	Excelente
25	-63	Excelente
26	-61	Excelente
27	-59	Excelente

Continua na próxima página

Tabela 6 – Continuação da página anterior

Valor	RSSI	Qualidade do Sinal
28	-57	Excelente
29	-55	Excelente
30	-53	Excelente

Tal valor é então enviado ao supervisor, além de ser salvo no cartão SD, para análise de viabilidade da comunicação via GSM/GPRS naquela área, visto que, caso o sistema esteja informando que a qualidade do sinal é ruim, muito provavelmente o sistema passará a ter uma alta quantidade de perdas de pacotes na comunicação, podendo assim inviabilizar a mesma.

Caso o sistema esteja em uma área de qualidade do sinal suficiente, faz-se necessário em seguida coletar a informação do horário em que os dados foram coletados. Tal informação é adquirida automaticamente pelo supervisor no momento em que os dados são enviados para o mesmo, porém, para garantir que tal horário será salvo no cartão SD, utilizou-se o comando “AT+CCLK?” o qual tem como retorno tanto a data quanto o horário.

Os dados do sistema são então coletados e, caso seja detectado alguma anomalia nas leituras que possam indicar contaminação, é então enviado um SMS para algum número especificado. Para isto, foi utilizado o comando “AT+CMGS='número de destino do sms’”, a rede então espera a mensagem a ser enviada, o que neste caso é um alerta descrevendo em qual poço se encontra a anomalia.

Por fim, o sistema inicia uma conexão TCP com o comando “AT+CIPSTART=”, acompanhado de “TCP’,’remaufsc.ddns.net’,8351”, sendo tais constantes a indicação do tipo de conexão, o link e a porta. Caso a conexão seja efetuada, é enviado o valor das variáveis com o seguinte comando “AT+CIPSEND=”, sendo este acompanhado do nome e valor das variáveis.

ANEXO A – Tabela de Fator de Correção

°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	1.918	1.912	1.906	1.899	1.893	1.887	1.881	1.875	1.869	1.863
1	1.857	1.851	1.845	1.840	1.834	1.829	1.822	1.817	1.811	1.805
2	1.800	1.794	1.788	1.783	1.777	1.772	1.766	1.761	1.756	1.750
3	1.745	1.740	1.734	1.729	1.724	1.719	1.713	1.708	1.703	1.698
4	1.693	1.688	1.683	1.678	1.673	1.668	1.663	1.658	1.653	1.648
5	1.643	1.638	1.634	1.629	1.624	1.619	1.615	1.610	1.605	1.601
6	1.596	1.591	1.587	1.582	1.578	1.573	1.569	1.564	1.560	1.555
7	1.551	1.547	1.542	1.538	1.534	1.529	1.525	1.521	1.516	1.512
8	1.508	1.504	1.500	1.496	1.491	1.487	1.483	1.479	1.475	1.471
9	1.467	1.463	1.459	1.455	1.451	1.447	1.443	1.439	1.436	1.432
10	1.428	1.424	1.420	1.416	1.413	1.409	1.405	1.401	1.398	1.384
11	1.390	1.387	1.383	1.379	1.376	1.372	1.369	1.365	1.362	1.358
12	1.354	1.351	1.347	1.344	1.341	1.337	1.334	1.330	1.327	1.323
13	1.320	1.317	1.313	1.310	1.307	1.303	1.300	1.297	1.294	1.290
14	1.287	1.284	1.281	1.278	1.274	1.271	1.268	1.265	1.262	1.259
15	1.256	1.253	1.249	1.246	1.243	1.240	1.237	1.234	1.231	1.228
16	1.225	1.222	1.219	1.216	1.214	1.211	1.208	1.205	1.202	1.199
17	1.196	1.193	1.191	1.188	1.185	1.182	1.179	1.177	1.174	1.171
18	1.168	1.166	1.163	1.160	1.157	1.155	1.152	1.149	1.147	1.144
19	1.141	1.139	1.136	1.134	1.131	1.128	1.126	1.123	1.121	1.118
20	1.116	1.113	1.111	1.108	1.105	1.103	1.101	1.098	1.096	1.093
21	1.091	1.088	1.086	1.083	1.081	1.079	1.076	1.074	1.071	1.069
22	1.067	1.064	1.062	1.060	1.057	1.055	1.053	1.051	1.048	1.046
23	1.044	1.041	1.039	1.037	1.035	1.032	1.030	1.028	1.026	1.024
24	1.021	1.019	1.017	1.015	1.013	1.011	1.008	1.006	1.004	1.002
25	1.000	0.998	0.996	0.994	0.992	0.990	0.987	0.985	0.983	0.981
26	0.979	0.977	0.975	0.973	0.971	0.969	0.967	0.965	0.963	0.961
27	0.959	0.957	0.955	0.953	0.952	0.950	0.948	0.946	0.944	0.942
28	0.940	0.938	0.936	0.934	0.933	0.931	0.929	0.927	0.925	0.923
29	0.921	0.920	0.918	0.916	0.914	0.912	0.911	0.909	0.907	0.905
30	0.903	0.902	0.900	0.898	0.896	0.895	0.893	0.891	0.889	0.888
31	0.886	0.884	0.883	0.881	0.879	0.877	0.876	0.874	0.872	0.871
32	0.869	0.867	0.866	0.864	0.863	0.861	0.859	0.858	0.856	0.854
33	0.853	0.851	0.850	0.848	0.846	0.845	0.843	0.842	0.840	0.839
34	0.837	0.835	0.834	0.832	0.831	0.829	0.828	0.826	0.825	0.823
35	0.822	0.820	0.819	0.817	0.816	0.814	0.813	0.811	0.810	0.808

Figura 48 – Tabela de fator de correção

Referências

- 1 SUGIMOTO, L. Pesquisadores do iq desenvolvem equipamentos simples e baratos que indicam presença de hidrocarbonetos. *Jornal da UNICAMP*, São Paulo, p. 11, 2004. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/jornalPDF/ju274pag11.pdf>. Acesso em: 11 de Março de 2019. Citado na página 21.
- 2 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Tabela de quantidade de postos revendedores de combustíveis automotivos, por bandeira, segundo grandes regiões e unidades da Federação*. Disponível em: <www.anp.gov.br/images/publicacoes/anuario-estatistico/2018/tabelas/T3.17.xls>. Acesso em: 11 de Março 2019. Citado na página 21.
- 3 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *Tabela de quantidade de bases de distribuição de derivados de petróleo e biocombustíveis, segundo grandes regiões e unidades da Federação*. Disponível em: <www.anp.gov.br/images/publicacoes/anuario-estatistico/2018/tabelas/T3.1.xls>. Acesso em: 19 de Março 2019. Citado na página 21.
- 4 INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA. *IN 01: Comércio de combustíveis líquidos e gasosos em postos revendedores, postos flutuantes e instalações de sistema retalhista, com ou sem lavagem ou lubrificação de veículos*. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/ins/01/IN%2001_Agosto%202017.pdf>. Acesso em: 16 de junho 2019. Citado na página 21.
- 5 MONITORAMENTO Ambiental. Disponível em: <<http://www.bvsde.ops-oms.org/tutorial1/p/Monimedi/>>. Acesso em: 30 de junho 2019. Citado na página 21.
- 6 SILVA, R. L. B. et al. Estudo da contaminação de poços rasos por combustíveis orgânicos e possíveis conseqüências para a saúde pública no município de itaguaí, rio de janeiro, brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, SciELO Public Health, v. 18, p. 1599–1607, 2002. Citado na página 21.
- 7 BENSON, A. K.; PAYNE, K. L.; STUBBEN, M. A. Mapping groundwater contamination using dc resistivity and vlf geophysical methods—a case study. *Geophysics*, Society of Exploration Geophysicists, v. 62, n. 1, p. 80–86, 1997. Citado na página 22.
- 8 ATEKWANA, E. A. et al. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, Elsevier, v. 56, n. 4, p. 281–294, 2004. Citado na página 22.
- 9 JÚNIOR, G. B. A. et al. Efeito do antigo lixão do roger, João Pessoa, Brasil, na qualidade da água subterrânea local. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, Universidade de Taubaté, v. 4, n. 1, 2009. Citado na página 25.
- 10 SILVA, R. W. d. C.; MALAGUTTIFILHO, W.; MOREIRA, C. A. Emprego do método da eletrorresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 27, n. 3, p. 389–399, 2009. Citado na página 25.

- 11 ALMEIDA, A. d.; MACÊDO, J. d. Parâmetros físico-químicos de caracterização da contaminação do lençol freático por necrochorume. *Seminário de Gestão Ambiental*, v. 1, 2005. Citado na página 25.
- 12 VARNIER, C.; HIRATA, R. Contaminação da água subterrânea por nitrato no parque ecologico do tietê-são paulo, brasil. *Águas Subterrâneas*, 2000. Citado na página 25.
- 13 CÉLULAS de Condutividade. <<https://www.analyser.com.br/celulas-condutividade>>. Acesso em: 28 de junho de 2019. Citado na página 27.
- 14 ÁGUA - Um olhar integrado. <<http://www.c2o.pro.br/>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 27.
- 15 SHARMA, P. V. *Geophysical methods in geology*. [S.l.]: Elsevier; 2nd edition, 1986. Citado na página 28.
- 16 INDUCTIVE conductivity measurement in industrial metrology. <<https://www.ibt.kit.edu/english/1210.php>>. Acesso em: 28 de junho de 2019. Citado na página 28.
- 17 METTLER TOLEDO. *A Guide to On-line Conductivity Measurement*. Disponível em: <https://www.mt.com/dam/non-indexed/po/pro/pdf/guides/generic/GD_OnLine_Conductivity_Measurement_en_58087060_Mar16.pdf>. Acesso em: 23 de junho 2019. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 51.
- 18 SILVA, P. D. d. Projeto de medidor de condutividade para soluções eletrolíticas utilizando o método de quatro pontas de van der pauw. 2017. Monografia (Bacharel em Engenharia Física), UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, Brazil. Citado na página 28.
- 19 SENSOR de Condutividade Toroidal SE 655. <<https://www.knick-international.com/export/media/2907.pdf>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 28.
- 20 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. *ASTM D1125-14, Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water*. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D1125-14>>. Acesso em: 23 de junho 2019. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 51.
- 21 NETO, M. L. Q. et al. Análise da qualidade da água subterrânea utilizada no abastecimento urbano: um estudo de caso em poços tubulares no município de são rafael/rn. In: *VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campina Grande/PB*. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 29.
- 22 VARIÁVEIS Físicas. <http://quimlab.com.br/guidoselementos/variaveis_fisicas.htm>. Acesso em: 28 de junho de 2019. Citado na página 30.
- 23 ROCHA, J. *Investigação das propriedades elétricas em petróleo por espectroscopia de impedância*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2017. Citado na página 30.
- 24 AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. *RESOLUÇÃO ANP Nº 42, DE 16.12.2009*. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2009/dezembro&item=ranp-42--2009&export=pdf>>. Acesso em: 28 de junho 2019. Citado na página 30.

- 25 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods for Electrical Conductivity of Aviation and Distillate Fuels*. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D2624.htm>>. Acesso em: 28 de junho 2019. Citado na página 30.
- 26 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Electrical Conductivity of Liquid Hydrocarbons by Precision Meter*. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D4308.htm>>. Acesso em: 28 de junho 2019. Citado na página 30.
- 27 ELECTRICAL Conductivity (EC). <<http://www.aqion.de/site/130>>. Acesso em: 28 de junho de 2019. Citado na página 30.
- 28 SILVA, E. da et al. Características físico-químicas das águas subterrâneas do aquífero serra grande na mesorregião sudesde piauiense. In: IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, GOIÂNIA. NOVAS *Embrapa Meio Ambiente-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. [S.l.], 2003. Citado na página 30.
- 29 CAMPOS, J. C. V.; MORAIS, P. R. C.; SCANDOLARA, J. E. Diagnóstico preliminar da qualidade da água subterrânea através da condutividade elétrica e ph–municípios de campo novo e buritis, estado de rondônia, brasil. *Águas Subterrâneas*, 2000. Citado na página 30.
- 30 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15495: Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados. Parte 1: Projeto e construção*. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40214>>. Acesso em: 30 de junho 2019. Citado na página 31.
- 31 MEIO Ambiente - Poços de monitoramento. <<http://www.investgeo.com.br/po%C3%A7os.htm>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 31.
- 32 SABE como funciona o sistema GSM e GPRS? <<https://www.smartinstec.com.br/sabe-como-funciona-o-sistema-gsm-e-gprs>>. Acesso em: 28 de junho de 2019. Citado na página 32.
- 33 SIERRA WIRELESS. *AT Command Reference*. Disponível em: <https://www.sierrawireless.com/resources/documents/MP/2130309_MP7xx_AT_Command_Reference.pdf>. Acesso em: 30 de junho 2019. Citado na página 32.
- 34 CAMI RESEARCH INC. *The RS232 Standard*. Disponível em: <https://www.camiresearch.com/Data_Com_Basics/RS232_standard.html#anchor1154232>. Acesso em: 02 de junho 2019. Citado na página 32.
- 35 RODITI, I. *Dicionário Houaiss de Física*. Objetiva, 2005. 192 p. ISBN 9788573026948. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HP75GYQ5J8YC>>. Citado na página 33.
- 36 TRANSMISSOR e Receptor RF 433MHz. <<http://www.baudaeletronica.com.br/transmissor-e-receptor-rf-433mhz.html>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 33.
- 37 AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. *O que são Sistemas Supervisórios?* Disponível em: <<https://www.automacaoindustrial.info/o-que-sao-sistemas-supervisorios/>>. Acesso em: 24 de junho 2019. Citado na página 34.

- 38 STOUFFER, K.; FALCO, J. *Guide to supervisory control and data acquisition (SCADA) and industrial control systems security*. [S.l.]: National institute of standards and technology, 2006. Citado na página 34.
- 39 CAIXA 600x500x200 Paineleletrico Quadro Comando Hermetica. <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-899581787-caixa-600x500x200-painel-eletrico-quadro-comando-hermetica-_JM>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 36.
- 40 PAINEL Solar - RSM36-6-150P. <<https://www.minhacasasolar.com.br/produto/painel-solar-150w-risen-solar-rsm36-6-150p-79224#trustvox-reviews>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 37.
- 41 BATERIA 12v 7ah Para SegurançUp1270seg - Unipower. <<https://www.americanas.com.br/produto/9145041/bateria-12v-7ah-para-seguranca-up1270seg-unipower>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 37.
- 42 CONTROLADOR de painelsolar 20A. <<https://lojabrasilrobotics.blogspot.com/2019/01/controlador-de-painel-solar-20a-r5200.html>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 38.
- 43 ARDUINO UNO. <<https://www.makerlab-electronics.com/product/arduino-uno-r3-atmega328p-ch340g/>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 39.
- 44 MÓDULO Fonte De Alimentação 3.3v 5v Proto-board - Arduino. <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1019479031-modulo-fonte-de-alimentaco-33v-5v-protoboard-arduino-_JM>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 41.
- 45 MÓDULO Cartão SD Card. <<http://www.baudaeletronica.com.br/modulo-sd-card.html>>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 41.
- 46 MÓDULO Gprs Gsm - Arduino Sim800l. <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1067008769-modulo-gprs-gsm-arduino-sim800l-_JM>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 42.
- 47 CONDUTIVIMETRO Digital. <http://tecnal.com.br/pt-BR/produtos/detalhes/3670_condutivimetro_digital>. Acesso em: 05 de julho de 2019. Citado na página 44.