

DESENVOLVIMENTO DE UM GEORRESISTIVÍMETRO AUTOMATIZADO E  
PROGRAMÁVEL

Antenor Oliveira Cruz Júnior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Geofísica.

Orientador(a): Dr Cosme Ferreira da Ponte  
Neto

Co-orientador(a): Dr André Wiermann

Rio de Janeiro  
Março de 2022

DESENVOLVIMENTO DE UM GEORRESISTIVÍMETRO AUTOMATIZADO E  
PROGRAMÁVEL

Antenor Oliveira Cruz Júnior

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
GEOFÍSICA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM GEOFÍSICA.

Examinada por:

---

Dr. Nome da Examinadora Sobrenome

---

Dr. Nome do Examinador Sobrenome

---

Dr. Nome da Examinadora Sobrenome

---

Dr. Nome do Examinador Sobrenome

---

Dr. Nome da Examinadora Sobrenome

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
MARÇO DE 2022



Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Observatório Nacional como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Geofísica.

## DESENVOLVIMENTO DE UM GEORRESISTÍMETRO AUTOMATIZADO E PROGRAMÁVEL

Antenor Oliveira Cruz Júnior

Março/2022

A eletrorresistividade é um método geométrico que consiste em estimar a resistividade elétrica para investigar a composição estrutural da subsuperfície rasa. No entanto, os equipamentos comerciais possuem alto valor de aquisição e manutenção. O objetivo dessa pesquisa, é desenvolver um instrumento medidor de resistividade elétrica (ER) multicanal, 16 eletrodos, modular, automatizado e programável, com base em alguns aspectos deficitário dos equipamentos comerciais. Para esse fim, foi construído um protótipo conceitual de um resistímetro, microcontrolado e com interface gráfica, baseada em tecnologias de *software* e *hardware* livre, como alternativa de baixo custo para aquisição dos parâmetros físicos com a mesma acurácia dos equipamentos comerciais. Os resultados demonstraram a viabilidade do projeto conceitual, concepção e representação como importante contribuição acadêmica para a pesquisa instrumental de código aberto. A implementação da tecnologia de multiplexação de eletrodos, tornou o processo mais eficiente com a comutação e quantidade reduzida de relês distribuídos ao longo do cabo, da mesma maneira que demodulação síncrona proporcionou uma eliminação dos ruídos espúrios, ruídos não correlacionados com a fonte de excitação.

Abstract of the Dissertation presented to the National Observatory's Graduate Program in Geophysics as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Geophysics.

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED GEORESISTIVOMETER AND PROGRAMMABLE

Antenor Oliveira Cruz Júnior

March/2022

Electroresistivity is a geoelectric method that consists in estimating the electrical resistivity to investigate the structural composition of the shallow subsurface. However, commercial equipment has a high acquisition and maintenance cost. The objective of this research is to develop a multichannel, 16-electrodes, modular, automated and programmable electrical resistivity (ER) measuring instrument, based on some deficient aspects of the commercial equipment. To this end, a conceptual prototype of a microcontrolled resistivity meter was built, with a graphical interface, based on free software and hardware technologies, as a low cost alternative for the acquisition of physical parameters with the same accuracy as commercial equipment. The results demonstrated the feasibility of the conceptual project, design and representation as an important academic contribution to open source instrumental research. The implementation of the electrode multiplexing technology, made the process more efficient with the switching and reduced amount of relays distributed along the cable, in the same way that synchronous demodulation provided an elimination of spurious noise, noise not correlated with the excitation source.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
3.1	Objetivo Geral . . . . .	6
3.2	Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Fundamentos Teóricos</b>	<b>8</b>
4.1	Método Geofísico de Eletroresistividade . . . . .	8
4.2	Princípios Básicos . . . . .	10
4.3	A Condutividade Elétrica das Rochas . . . . .	14
4.4	Medição da Resistividade . . . . .	17
4.5	Conceito de Resistividade Aparente . . . . .	19
4.6	Tipos de Arranjos dos Eletrodos . . . . .	20
4.6.1	Arranjo Wenner . . . . .	21
4.6.2	Arranjo Schlumberger . . . . .	21
4.6.3	Arranjo Dipolo-Dipolo . . . . .	22
4.6.4	Arranjo Pólo-Dipolo . . . . .	23
4.7	Potencial Espontâneo (SP) . . . . .	24
4.7.1	Metodologia para o Potencial Espontâneo (SP) . . . . .	26
4.8	Técnicas de Medição . . . . .	28
4.8.1	Sondagem Elétrica Vertical (SEV) . . . . .	28
4.8.2	Cortes Geoelétricos . . . . .	31
4.8.3	Profundidade de Investigação das SEVs . . . . .	33
4.8.4	Caminhamento Elétrico (CE) . . . . .	35
4.8.5	Profundidade de Investigação da CE . . . . .	36
4.9	Pseudo-Seções de Resistividade Elétrica . . . . .	37
4.9.1	Modelagem . . . . .	37
4.10	Estudo de Trabalhos Relacionados . . . . .	38
4.10.1	Registador de Resistividade de Projecções Construcionais . . . . .	38

4.10.2	Método de Resistividade Eléctrica para Caracterização do Conteúdo de Água de Solo Argiloso Não Saturado . . . . .	39
4.10.3	Um resistivímetro de baixo custo para uso em aulas práticas de geofísica aplicada . . . . .	40
4.10.4	Desenvolvimento de Resistivímetro de baixo Custo para Monitoramento Ambiental . . . . .	42
4.10.5	OhmPi: Um registador de dados de fonte aberta para aplicações dedicadas de imagens de resistividade eléctrica à escala pequena e laboratorial . . . . .	44
4.11	Georesistivímetro Comerciais . . . . .	45
4.11.1	Características Funcionais dos Comerciais . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Metodologia</b>	<b>50</b>
5.1	Projeto Mecânico e Eletrônico . . . . .	50
5.2	Unidade Computacional . . . . .	51
5.3	Unidade de Automação do Processo (Microcontrolador) . . . . .	55
5.4	Fonte Eléctrica . . . . .	57
5.5	Circuito Eletrônico . . . . .	57
5.5.1	Sensor Transdutor de Corrente . . . . .	57
5.5.2	Processamento de Sinais Digitais . . . . .	59
5.6	Interface Homem Máquina (IHM) . . . . .	62
5.6.1	Interfaces Gráficas de Usuário com Tkinter . . . . .	63
5.6.2	Layout e Características Funcionais da IHM . . . . .	63
<b>6</b>	<b>Testes e Simulações</b>	<b>67</b>
6.1	Modelo Sintético de Camadas Resistivas . . . . .	67
6.2	Leis de Kirchhoff . . . . .	68
6.3	Calibração da Malha de Camadas Resistivas . . . . .	69
6.4	Teste de Bancada . . . . .	70
6.5	Comunicação e Transferencia de Dados . . . . .	71
6.6	Simulação e Validação dos Ensaio de Laboratório . . . . .	73
6.7	Interpretação . . . . .	73
6.8	Teste de Campo . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Conclusão e Perspectivas Futuras</b>	<b>80</b>
7.1	Conclusão . . . . .	80
7.2	Perspectivas Futuras . . . . .	83
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>84</b>
	<b>Apêndice A</b>	<b>90</b>



# Lista de Figuras

1.1	O método da eletroresistividade . . . . .	2
3.1	Fases do desenvolvimento na ordem cronológica do projeto. . . . .	6
4.1	Configuração quadripolo através do contato direto no solo feito por eletrodos metálicos ou porosos. . . . .	9
4.2	Fundamentos da Lei de Ohm . . . . .	11
4.3	Cargas no condutor . . . . .	13
4.4	Polarização iônica e metálica . . . . .	16
4.5	Fluxo de corrente de um único eletrodo na superfície . . . . .	18
4.6	Esquema de campo da configuração de eletrodo usada na determinação da resistividade . . . . .	18
4.7	Algumas configurações de eletrodos quadripolo. . . . .	20
4.8	Configuração de Wenner . . . . .	21
4.9	Configuração do arranjo Schlumberger . . . . .	22
4.10	Configuração dos arranjos polo-dipolo e dipolo-dipolo . . . . .	22
4.11	Configuração do arranjo pólo-dipolo . . . . .	24
4.12	Mecanismo potencial espontâneo na pirita . . . . .	26
4.13	Metodologia para o Potencial Espontâneo (SP) . . . . .	27
4.14	Variação da resistividade aparente $\rho_a$ . . . . .	30
4.15	Sondagem elétrica vertical (SEV) mostrando resistividade aparente em função do eletrodo de corrente meia separação (AB/2). . . . .	31
4.16	Corte geoeletrico. . . . .	32
4.17	Morfologia de algumas seções geoeletricas. . . . .	32
4.18	Determinação da densidade de corrente em um semi espaço homogêneo. . . . .	33
4.19	Plotagem convencional, arranjo D-D . . . . .	37
4.20	Pseudoseção gerada com os dados . . . . .	38
4.21	Prototype do Earth Resistivity Meter (a) .Software Earth Resistivity Logger (b). . . . .	39
4.22	Os principais componentes do sistema desenvolvido. . . . .	40
4.23	Construção e teste do protótipo de um resistivimetro de baixo custo . . . . .	41
4.24	Painel frontal do resistivimetro . . . . .	43

4.25	Diagrama esquemático e unidade eletrodo . . . . .	43
4.26	Layout de medidor de resistividade OhmPi de laboratório. . . . .	44
4.27	Montagem da placa de medição e componentes necessários para a construção do OhmPi. . . . .	45
4.28	Injeção de corrente no eletrodo transmissor e leitura da diferença de potencial nos eletrodos receptores. . . . .	46
4.29	Representação do funcionamento de um instrumento que opera com um canal (a) e outro que opera com oito canais (b) em um arranjo de eletrodos dipolo-dipolo. . . . .	47
4.30	x5Xtal Power Multi-Point e SuperSting R8/IP . . . . .	48
5.1	Diagrama em blocos do resistivímetro proposto . . . . .	51
5.2	Raspberry Pi . . . . .	52
5.3	Organização da estrutura interna do instrumento . . . . .	53
5.4	O sistema operacional Raspberry Pi OS é baseado em uma distribuição GNU / Linux, especificamente no Debian, possibilitando ao usuário uma experiência desktop completa. . . . .	54
5.5	Unidade computacional rodando interface homem máquina para configuração do georesistivímetro demonstrando a captação de dados geoeletricos (a). Demonstração de implementação gráfica baseado em dados obtidos em um levantamento de campo, relacionando a resistividade aparente $\rho_a$ as aberturas dos eletrodos de injeção AB/2 (b). . . . .	54
5.6	Microcontrolador acoplamento via barra de pinos fêmea ao circuito eletrônico para facilitar uma eventual substituição da placa. . . . .	56
5.7	Circuito eletrônico do protótipo conceito . . . . .	58
5.8	Deteção de corrente por efeito <i>Hall</i> de circuito fechado . . . . .	59
5.9	O circuito de deteção e entradas de corrente e tensão. . . . .	60
5.10	Esquema dos principais componentes do circuito desenvolvido para o protótipo. . . . .	61
5.11	Diagrama em bloco básico de um PSD . . . . .	62
5.12	Interface Homem máquina IHM . . . . .	64
5.13	A tabela lista os itens encontrados no Menu . . . . .	64
5.14	Widget de opções de arranjos geoeletricos . . . . .	65
5.15	Caixa de texto para inserção do nome e localização . . . . .	65
5.16	Janela de inserção manual . . . . .	65
5.17	Botões . . . . .	66

6.1	A rede resistiva elétrica estará sendo usado em todas as etapas do desenvolvimento do projeto: na etapa inicial auxiliará na conferência dos processos de programação e automação, e na etapa final será usado na calibração do instrumento e na validação dos resultados. . . . .	68
6.2	Modelo experimental de camadas resistivas . . . . .	70
6.3	Teste de bancada feito no laboratório de eletrônica e sensores da COGEO	71
6.4	Teste de algoritmo, comunicação e transferencia de dados . . . . .	72
6.5	Modelagem direta 2D da malha . . . . .	74
6.6	Modelagem direta 2D com um dique . . . . .	74
6.7	Local do levantamento para teste do protótipo conceito. . . . .	75
6.8	Local escolhido para os teste de campo do protótipo conceito. . . . .	76
6.9	Circuito básico de bancada. . . . .	77
6.10	Equipamento Resistivimetro Geotest . . . . .	78
6.11	Curvas de resistividade aparente, em função das semi-distâncias $AB/2$ . . .	79
6.12	Resultados do teste de resistência resistividade aparente obtido na área de teste para uma sondagem elétrica vertical com o arranjo Schlumberger. . .	79
7.1	Gráfico de correlação linear que mostra os resultados de teste em laboratório da COGEO comparando as medições de tensão e corrente medidas pelo protótipo. . . . .	81
7.2	As resistividades verificadas no levantamento, se comparadas aos valores observados nos testes feitos com o GeoTest . . . . .	82
7.3	Estrutura responsável por dar a sustentação e acomodar todos os componentes eletrônicos . . . . .	92
7.4	Componentes eletrônicos . . . . .	92
7.5	Estrutura física do equipamento . . . . .	93
7.6	O conjunto de case . . . . .	93
7.7	O conjunto do materiais idealizado para o protótipo conceitual. . . . .	94



# Lista de Tabelas

4.1	Valores de resistividade dos tipos comuns de rochas . . . . .	15
4.2	Valores de resistividade dos tipos comuns de rochas . . . . .	16
4.3	As diferenças básicas entre esses arranjos Schlumberger e Wenner . . . . .	29
4.5	Tabela de comparação dos tempos de aquisição de dados do R1/IP e o R8/IP	48
4.6	Comparamos os dois modelos de resistivímetros . . . . .	49
5.1	Melhores computadores de placa única que estão disponíveis no mercado em 2020 . . . . .	55
6.1	Tabela com dados simulados virtualmente . . . . .	70
6.2	Resultados obtidos utilizando um circuito básico de bancada em ensaio de campo preliminar. . . . .	77
6.3	Resultados obtidos utilizando resistivímetro comercial Geotest. . . . .	78

# Capítulo 1

## Introdução

O avanço do conhecimento científico e tecnológico somada a velocidade da informação, fomentou o processo do desenvolvimento de mecanismos que atendam as constantes mudanças das necessidades da pesquisa em geral (SEVERO *et al.*, 2014). Esse processo se dá por meio da inovação, que segundo PEREIRA e KRUGLIANSKAS (2005), deve ser o resultado de um ambiente que fomenta a ciência de ponta e influência direta ou indiretamente inúmeros setores de pesquisa e desenvolvimento. Nessa premissa, a invocação potencializa as metodologias correlacionadas a pesquisa em diversas áreas, resultando na revolução de ferramentas cujo propósito é investigar as propriedades e aspectos objetivos pelo pesquisador.

Por esse motivo, a Geofísica se destaca por constitui-se em um conjunto de várias ferramentas de investigação, com características específicas e com aplicação, em especial, no estudo da subsuperfície, tendo em vista a inacessibilidade os estes ambientes pelos métodos convencionais (SOUZA, 2006). Neste sentido, dispõe-se de diferentes métodos, cada um com suas características e particularidades (BORTOLOZO, 2016), os quais usam, de fato, as leis de quase todos os ramos da física e os instrumentos que o pesquisador Geofísico usa para realizar observações de campo são dispositivos de física, nos quais às vezes as técnicas aplicadas são as mais modernas e sofisticadas (ORELLANA, 1972).

A investigação Geofísica envolve realizar medidas em subsuperfície ou próximo a ela, medidas essa influenciada pela distribuição interna das propriedades físicas intrínsecas do planeta Terra (KEAREY *et al.*, 2009). Esse mesmo autor, descreve que o levantamento geofísico pode ser entendido de duas maneiras: os que recorrem aos **campos naturais** oriundos do planeta, e aqueles que envolvem algum tipo de **indução gerada artificialmente**.

Os métodos de campos naturais constituem em um conjunto de métodos geofísicos que se valem da existência de campos de forças sem o controle direto do ser humano (FEITOSA *et al.*, 2008), como gravitacional, magnético e eletromagnético da Terra, que podem ser usados para investigar as perturbações localizadas que possam ser causadas por

feições geológicas (KEAREY *et al.*, 2009). Diferentemente das oriundas de fontes naturais, os métodos de fontes artificiais envolvem a geração de campos elétricos ou eletromagnéticos, ou seja, o campo físico a ser estudado é criado por equipamentos apropriados (BRAGA, 2007; KEAREY *et al.*, 2009), para se quantificar as propriedades físicas que constituem os diferentes tipos de meios geológicos, e os contrastes que estas propriedades podem apresentar (BRAGA, 2007). Ao ser produzida uma perturbação em um meio, como, por exemplo, um choque, são geradas ondas que se propagam radialmente, cuja velocidade de propagação e caminhos de transmissão através da subsuperfície são mapeados para fornecer informações sobre a distribuição dos limites geológicos em profundidade (BRAGA, 2007; FEITOSA *et al.*, 2008; KEAREY *et al.*, 2009).

*As rochas, não raramente, diferem em uma ou mais de suas propriedades, provocando variações nos campos físicos e na propagação de ondas sobre elas. Consequentemente, essas variações, ao serem detectadas, podem fornecer informações acerca dos materiais que as provocam*(LUIZ e SILVA, 1995).

Dentre os métodos que utilizam fontes artificiais está a eletrorresistividade (Figura 1.1), sendo um método consagrado para a produção do imageamento da subsuperfície pelo emprego da injeção de corrente direta artificial introduzida no solo através de eletrodos, visando medir a diferença de potencial gerado nas proximidades do fluxo de corrente (em diferentes condições de solo e com diferentes arranjos de eletrodos), influenciado pela distribuição estratigráfica do solo ou por estruturas imersas na subsuperfície (KEAREY *et al.*, 2009).

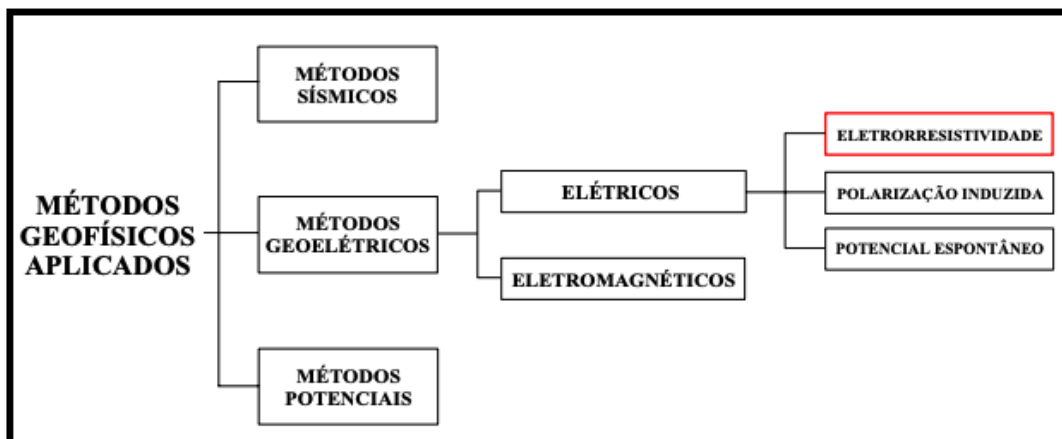


Figura 1.1: O método da eletrorresistividade no contexto dos métodos geofísicos de prospecção.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por sua composição mineralógica, textura e disposição, as rochas apresentam propriedades elétricas características, tais como resistividade, permeabilidade magnética, constante dielétrica. Em função disto, uma seção geológica pode ser classificada como um

meio, cujos materiais existentes apresentam diferentes propriedades elétricas (BRAGA, 2016).

Inúmeros autores discutem as principais teorias e práticas da eletrorresistividade. Entre eles se destacam os trabalhos de ORELLANA (1972), FEITOSA *et al.* (2008), KEAREY *et al.* (2009), BRAGA (2016), TELFORD *et al.* (1990) e (REYNOLDS, 2011).

Os primeiros trabalhos de aplicação deste método de investigação da subsuperfície datam do início do século XIX, onde o inglês Robert Fox descobriu o fenômeno da polarização espontânea, ao observar que certos minerais produzem corrente elétrica fraca que pode ser detectada da superfície (ORELLANA, 1972).

*No entanto, o primeiro sucesso corresponde ao engenheiro de minas da Alsácia Conrad Schlumberger, "pai da Prospecção Elétrica" e, sem discussão, a figura mais importante da mesma. Este pesquisador descobriu em 1913 o depósito de sulfeto de Bor (Sérvia) por polarização espontânea, a primeira descoberta Geofísica de minerais não magnéticos ORELLANA (1972).*

Nos anos 1930 – 1940, Conrad Schlumberger tentou um novo método de campo natural, o "método telúrico", baseado no registro dos potenciais vinculados a essas correntes. Deste modo o circuito emissor foi suprimido, e o que costumava ser perturbação ou "ruído" estava sendo considerado como uma nova fonte de sinal (ORELLANA, 1972).

Como resultado de estes trabalhos, atualmente o método geoeletricidade consegue produzir imagens da seção litogeológica a partir de suas propriedades elétricas distintas, com os parâmetros geométricos, como espessura, profundidade, direção, etc., que caracterizam a constituição da geologia de uma determinada área (PINTO *et al.*, 2013). Os medidores de resistividade conhecidos como resistivímetro, são equipamentos sofisticados e substancialmente caros que possuem várias aplicações em diversas áreas do conhecimento, tais como localização do nível do lençol freático, detecção de intrusão da água do mar em sistemas aquíferos, identificação de locais propícios para a perfuração de poços artesianos, exploração de recursos energéticos, delimitação da extensão de jazidas, localização de plumas contaminantes no solo, dimensionamento de aterros sanitários, pesquisa arqueológica, entre outros.

Em geral, os instrumentos medidores de resistividade são equipamentos de operação manual, mais trabalhoso exigindo uma maior dedicação do operador e não possuem software proprietário, imprescindível para o tratamento dos dados. Também existem os de operação automática, mas, possuem alto custo de aquisição e manutenção, razão pelo qual se tornando um entrave para pesquisa Geofísica.

*Os levantamentos geoeletricos são de logística simples e de baixo custo; as medidas não sofrem grande influência de ruídos eletromagnéticos, permitindo que os trabalhos sejam realizados em zonas urbanas e rurais; os le-*

*vantamentos não geram grande impacto ambiental e os equipamentos são de baixo custo (SIQUEIRA, 2018).*

Neste contexto, apresentaremos uma abordagem inovadora para testar e avaliar uma ideia conceitual de um instrumento de resistividade elétrica (ERT) modular, automatizado e programável, com objetivo de provar a viabilidade de um conceito e validá-lo, com base em alguns aspectos deficitário dos equipamentos comerciais (SILVA, 2016). Neste sentido, se tornando uma importante contribuição acadêmica de programação aberta na forma de prova de conceito, com a construção de um protótipo onde será estudada a melhor configuração, de modo a minimizar o custo e otimizar o trabalho de operação do instrumento em levantamentos geofísicos.

# Capítulo 2

## Justificativa

O advento da popularização das tecnologias de programação e automação tem se tornado um atrativo ao surgimento de soluções inovadoras para problemas cotidianos. A Geofísica como qualquer outra ciência, é impulsionada por avanços tecnológicos que possibilitam a caracterização litológica da subsuperfície terrestre por intermédio de técnicas que propiciam a partir dos estudos das propriedades físicas naturais intrínsecas aos elementos que constituem o nosso planeta.

*A cultura inovadora é essencial para o progresso e desenvolvimento da sociedade moderna. Inovar é manter a constante busca pelo conhecimento e sua transformação em benefícios à sociedade, na forma de produtos e serviços inéditos (BAGNATO et al., 2017).*

O presente trabalho apresentara o desenvolvimento de um equipamento, voltada para investigações de estruturas geológicas, com o desenvolvimento de um protótipo conceitual portátil, de baixo custo, capaz de realizar todas as funções necessárias para análise da subsuperfície através do método da eletrorresistividade. Para esse fim utilizaremos *software e hardware* livre, assim como algoritmos computacionais, para a coleta e interpretação de dados. Serão discutidos trabalhos relacionados que reforçam e justificam a relevância desse projeto para o desenvolvimento do *Know-how* da pesquisa científica e de instrumentação nacional. Nesta mesma premissa aperfeiçoar a técnica com o desenvolvimento do protótipo de um resistivímetro para o estudo e análise do método geoeletrico de prospecção geofísica.

# Capítulo 3

## Objetivos

### 3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo na forma de prova de conceito de um resistivímetro com características diferenciadas (utilização de tecnologias livres, modularidade, monitoramento remoto), dos equipamentos disponíveis no mercado, tornando-se uma importante contribuição para o *know-how* do Observatório Nacional nas áreas de instrumentação, programação e automação.



Figura 3.1: Fases do desenvolvimento na ordem cronológica do projeto.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a construção dos módulos eletrônicos e das funções computacionais que se tornaram a base de investigação da técnica, serão utilizadas tecnologias livres de propriedade intelectual (open source), visando reduzir o custo de implementação do equipamento e torná-lo mais acessível, do ponto de vista da aquisição, manutenção e do seu aperfeiçoamento.

### 3.2 Objetivos Específicos

A proposta deste projeto é criar um resistivímetro multicanal como prova de conceito, utilizando em seu desenvolvimento e operação materiais *Open Source*, com intuito

de aperfeiçoamento o estudo sobre o método, sendo uma alternativa promissora para a determinação dos parâmetros necessários no estudo de geoeletricidade.



# Capítulo 4

## Fundamentos Teóricos

Nesta seção, apresentaremos os princípios físicos importantes para a pesquisa com método da eletrorresistividade, que se destaca por ser um dos métodos da Geofísica mais consagrados em estudos das estruturas geológicas da parte superior da crosta terrestre (BRAGA, 2016).

### 4.1 Método Geofísico de Eletrorresistividade

A resistividade é amplamente utilizada para exploração de mineração, em geotécnica para encontrar cavidades no subsolo ou no ambiente para o monitoramento e detecção de plumas de contaminação. Essa categoria de levantamento geofísico é conhecido como eletrorresistividade, cujo propósito é medir a dificuldade que um determinado material geológico impõe à passagem de corrente elétrica ou, o seu inverso, a facilidade com que a corrente elétrica passa através desse material (Figura 4.1). Essa resistência ou condutividade é intrínseca a todas as substâncias que formam a crosta terrestre e é mais adequado para delinear camadas horizontais e verticais. A mensuração quantitativa do método é utilizado para investigar a composição estrutural da subsuperfície rasa, por técnicas específicas nos levantamentos Geofísicos (KEAREY *et al.*, 2009; TELFORD *et al.*, 1990).

O fluxo de corrente elétrica na subsuperfície é governado primordialmente pela composição da estrutura geológica e pelas constituições das rochas ali presentes, podendo ser possível determinar a resistividade efetiva ou aparente da subsuperfície, através dos métodos elétricos, pelos resultados quantitativos obtidos (TELFORD *et al.*, 1990).

A principal desvantagem desta técnica está no aumento substancial de ruído no dado, devido a sua alta sensibilidade a pequenas variações na condutividade em regiões que se localizam próximas à superfície. Outro aspecto importante a se destacar está no volume de material necessário para a montagem do equipamento sendo uma dificuldade prática,

pois envolve arrastar vários eletrodos e fios longos através de terrenos acidentados ou arborizados. Isso tornou o método eletromagnético mais popular do que a resistividade em locais com atividade de exploração mineral (TELFORD *et al.*, 1990).

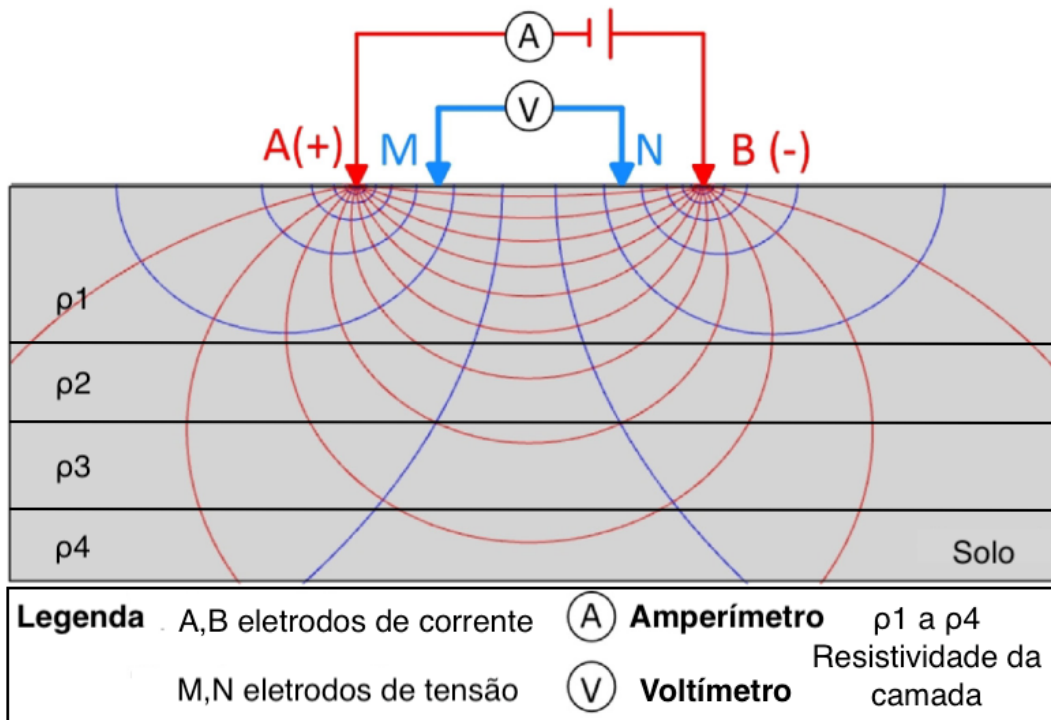


Figura 4.1: A corrente elétrica é injetada (eletrodos A e B) no solo através do contato direto feito por eletrodos metálicos ou porosos. A resposta é medida na forma de diferença de potencial (eletrodos M e N).

Fonte: Elaborado pelo autor.

*As propriedades elétricas, com os parâmetros geométricos dos materiais geológicos do meio, como espessura, profundidade, direção, etc., determinam a seção geoeletrica, que caracteriza a geologia de uma determinada área (BRAGA, 2007).*

## 4.2 Princípios Básicos

O método de eletroresistividade é basicamente definida pela Lei de Ohm, verificada experimentalmente pelo físico e matemático alemão Georg Simon Ohm em 1827. Em seu livro *The Galoanic Circuit Investigated Mathematically* ele descreve que:

*A intensidade da corrente, em um circuito voltaico, permanece constante quando a soma de todas as tensões e o seu comprimento total reduzido são variados independente se for à mesma proporção; mas aumenta, se o comprimento reduzido permanecendo o mesmo, na proporção de que a soma das tensões aumenta, e a soma das tensões permanecem constantes, proporcionalmente ao comprimento redução do comprimento do circuito (OHM, 1905).*

Matematicamente podemos interpretar essa lei como:

$$i = \left( \frac{VL}{\rho A} \right) \quad (4.1)$$

No Sistema Internacional,  $A$  é a área da seção transversal (em  $m^2$ ),  $L$  é a distância de face a face (em  $m$ ),  $V$  é diferença de potencial entre as faces (em  $V$ ),  $i$  é a intensidade de corrente (em  $A$ ) que passa através de um condutor e  $\rho$  é a resistividade que é característica do material (em  $\Omega.m$ ) (Figura 4.2).

As investigações de Ohm resultaram na lei fundamental da eletrodinâmica:

*A corrente em um circuito é diretamente proporcional à diferença de potencial entre as extremidades do circuito, para a área da seção transversal do condutor e a condutividade específica do material através do qual viaja; e é inversamente proporcional ao comprimento do fio. Ele também é responsável por mostrar que o potencial é mais alto no polo positivo e mais baixo no o polo negativo, esse potencial caindo uniformemente resistências uniformes (GEE, 1969).*

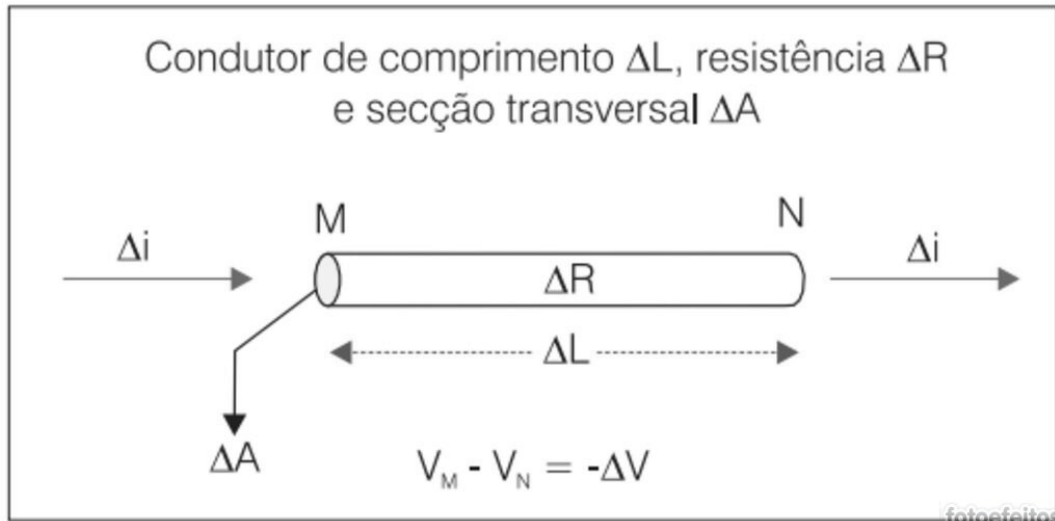


Figura 4.2: Em um condutor homogêneo podemos expressar lei como sendo a proporcionalidade direta, entre a intensidade da corrente elétrica  $\Delta i$  que percorre um condutor de comprimento  $\Delta L$  e área transversal  $\Delta A$  e a diferença de potencial  $-\Delta V$  entre os terminais desse condutor, ilustrado na Figura 4.1. O valor negativo para  $\Delta V$  e devido ao fluxo de corrente se dá no sentido dos potenciais decrescentes.

Fonte: CPRM FEITOSA *et al.* (2008).

*A proporcionalidade entre a intensidade de corrente e a diferença de potencial, verificada experimentalmente em laboratório, é transformada em igualdade pela introdução do coeficiente de proporcionalidade  $1/\Delta R$ , denominado condutância elétrica (FEITOSA et al., 2008).*

Para uma dada diferença de potencial a Lei de Ohm na forma simples (Equação 4.2), enuncia que quanto menor for a resistência maior será o fluxo de corrente.

$$\Delta i = - \left( \frac{1}{\Delta R} \right) \Delta V \quad (4.2)$$

onde,  $\Delta i$  é uma grandeza vetorial que representa a intensidade da corrente e sua unidade é o ampere (A), que pode ser tomada, como sendo a taxa de fluxo de carga por unidade de tempo,  $1/\Delta R$  é a condutância elétrica (em  $\Omega^{-1}$ ) e  $\Delta V$  é a diferença de potencial ou potencial elétrico e tem sua a unidade do SI definida como volt (V).

A partir de estudos experimentais verificou-se que a resistência elétrica do condutor alterna proporcionalmente em relação ao seu comprimento e é inversamente proporcional a área da secção (Equação 4.3).

$$\Delta R = \rho \frac{\Delta L}{\Delta A} \quad (4.3)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do material ( $\Omega.m$ ), sendo um parâmetro intrínseco e influenciado quantitativamente pela densidade, agregação de seus minerais e da forma, volume e en-

chimento (geralmente água ou ar) dos poros. Além dessas relações é conveniente estudar o efeito que a pressão e a temperatura exercem sobre essas propriedades, um efeito que pode ser muito importante em grande profundidade (ORELLANA, 1972).

*A Equação 4.3 mostra que a resistência elétrica depende das características geométricas do condutor, bem como de sua resistividade. Esta equação concorda com o que se observa experimentalmente, ou seja, condutores feitos do mesmo material, mas que diferem pelos comprimentos e pelas áreas das seções transversais apresentam diferentes resistências ao movimento dos elétrons. Também é possível verificar que apresentam maior resistência elétrica aqueles de maior comprimento  $L$ , com a mesma seção transversal (BERNARDI e PANTANO FILHO, 2012).*

Voltando agora às equações 4.2 e 4.3, percebe-se que é conveniente reunir às duas expressões numa equação única, o que resulta em:

$$\frac{\Delta i}{\Delta A} = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta V}{\Delta L} \quad (4.4)$$

Segundo FEITOSA *et al.* (2008) equação acima admite as seguintes considerações:

- O limite da razão  $\Delta i/\Delta A$  quando  $\Delta L$  tende a zero é ela própria, pois a mesma independe de  $\Delta L$ . Esta razão é chamada à temperatura constante, de densidade de corrente representada pela letra  $J$ , definida como sendo um vetor do fluxo de cargas que passa por uma seção transversal de um condutor em um certo ponto. Sua unidade expressa no SI é o  $Am^{-2}$ ;
- O termo  $(1/\rho)$  é a condutividade elétrica conhecida pela letra grega  $\sigma$  (sigma) e sua unidade é  $\Omega m$ ;
- A razão  $\Delta V/\Delta L$  representa a taxa de variação do potencial relacionado com o comprimento do condutor. O limite dessa razão, quando a variação do comprimento  $\Delta L$  se aproxima de zero, é a taxa de variação do potencial, tomada pontualmente ou, por definição, a derivada do potencial em relação à distância, cuja notação será  $-dV/dL$  (FEITOSA *et al.*, 2008). A sua unidade no Sistema Internacional (SI) é o  $V.m^{-1}$ ;
- Em um meio isotrópico,  $\rho$  e  $\sigma$  são independentes da direção do fluxo atual.

O campo elétrico  $\vec{E}$  e o potencial elétrico  $\Delta V$  (Figura 4.3), estão relacionados conforme a equação 4.5.

$$\Delta V \equiv - \int_a^b \vec{E} d\vec{s} \quad (4.5)$$

Partindo da Equação 4.5, podemos expressar infinitesimalmente a diferença de potencial  $dV$  entre dois pontos separados por uma distância  $ds$  como

$$dV = -\vec{E}d\vec{s} \quad (4.6)$$

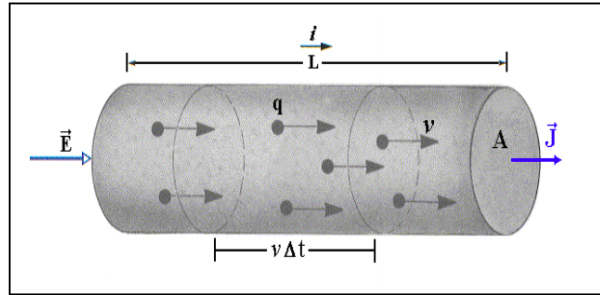


Figura 4.3: Ilustração de um condutor metálico colocado próximo a um campo eletrostático onde suas cargas rearranjam-se de modo a tornar a intensidade do campo progressivamente aumentada, conseqüentemente aumentando a intensidade da força elétrica sobre os elétrons e por conseqüência sua velocidade de migração também será aumentada.

Fonte: Adaptado de BERNARDI e PANTANO FILHO (2012)

Se o campo elétrico e a densidade de corrente têm a mesma direção e sentido então a Equação 4.10 pode ser expressa em função da componente  $x$ .

$$E_x = -\frac{dV}{dx} \quad (4.7)$$

Assim podemos reescrever a equação 4.4, que nos diz que a densidade de corrente  $\vec{J}$  em um ponto tem o a mesma direção e sentido que o campo elétrico  $\vec{E}$  no mesmo ponto, e é proporcional a ele (ORELLANA, 1972).

$$\vec{J} = -\sigma\vec{E} \quad (4.8)$$

*Esta nova apresentação da Lei de Ohm nos diz que em qualquer ponto de um condutor unidimensional, homogêneo e isotrópico, a densidade de corrente é proporcional à derivada do potencial em relação à distância, a condutividade elétrica sendo o fator de proporcionalidade, tornando-se ainda mais complexo para o meio heterogêneo e anisotrópico (FEITOSA et al., 2008).*

### 4.3 A Condutividade Elétrica das Rochas

O comportamento elétrico das rochas para aplicações Geofísicas, exige o conhecimento das propriedades eletromagnéticas, composição do mineral (DIAS, 2017; ORELLANA, 1972), e na influência que tais parâmetros têm sobre este efeito condutivo nas rochas (Tabela 4.1). Uma interpretação confiável de uma reconstrução da condutividade subterrânea depende de uma boa compreensão da geologia das áreas pesquisadas (BOYLE, 2016).

*Um mesmo tipo litológico pode apresentar uma ampla gama de variação nos valores de resistividade, pois, são inúmeros os fatores que interferem no valor da resistividade de um determinado material (BRAGA, 2007).*

As propriedades condutoras dos minerais constituintes, a estrutura da rocha e o grau de saturação da água (BOYLE, 2016; BRAGA, 2007; DIAS, 2017), formam a principal combinação para determinação do espectro característico da litoestratigrafia do subsolo, sendo estes de três tipos: **eletrolítica, eletrônica e dielétrica**.

A condutividade elétrica em rochas semelhantes à eletrolítica ou iônica se deve principalmente às soluções eletrolíticas, que preenchem os espaços capilares dos poros das rochas ou nos espaços vazios entre grãos. Esse fenômeno ocorre devido a uma reação química resultando em soluções de ácidos, bases ou sais em água, oriundo do deslocamento de íons dissociados dessas moléculas (BOYLE, 2016; FEITOSA *et al.*, 2008), e da mobilidade e concentração iônica (BOYLE, 2016), (Figura 4.4a). Podemos citar alguns dos parâmetros relacionados a este tipo de condutividade: o eletrólito (COLLETT *et al.*, 1959; FRASER, 1964, *apud* DIAS, 2017), a concentração da solução iônica.

*O potencial elétrico daí resultante atrai os íons positivos da solução para próximo da superfície de contato, resultando na formação de uma estrutura elétrica peculiar, denominada dupla camada elétrica de Helmholtz (DIAS, 2017).*

A condutividade metálica ou eletrônica ocorre em uma importância muito menor, à matriz constituída por seus grãos minerais (DIAS, 2017; FEITOSA *et al.*, 2008), com efeito, dependente da natureza do metal ou semicondutor (COLLETT *et al.*, 1959; FRASER, 1964, *apud* DIAS, 2017), do teor da mineralização metálica (FRASER, 1964; MAYPER JR, 1959, *apud* DIAS, 2017), do tamanho da partícula metálica (COLLETT *et al.*, 1959; MAYPER JR, 1959, *apud* DIAS, 2017), da textura da mineralização metálica (FRASER, 1964, *apud* DIAS, 2017). Esse comportamento metálico fornece uma distribuição uniforme dos elétrons na camada de valência disponível (BOYLE, 2016; FEITOSA *et al.*, 2008; KEAREY *et al.*, 2009), permitindo uma condutividade através da

Tabela 4.1: A tabela mostra o valor aproximado da resistividade podendo haver pouca diferença entre tipos comuns de rochas. É perceptível que existe considerável aproximação entre as diferentes tipos de rochas e, conseqüentemente, a identificação de uma rocha não ser possível apenas com base em dados de resistividade.

Material	Resistividade ( $\Omega\text{m}$ )
Sulfuretos:	
Calcopirita	$1.2 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-1}$
Pirita	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$
Pirrotita	$7.5 \times 10^{-6} - 10^{-2}$
Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$
Esfalerita	$1.5 \times 10^7$
Óxidos:	
Hematita	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$
Limonita	$10^3 - 10^7$
Magnetita	$5 \times 10^{-5} - 5.7 \times 10^3$
Ilmenita	$10^{-3} - 50$
Quartzo	$3 \times 10^2 - 10^6$
Sal-gema	$3 \times 10^1 - 10^{13}$
Antracite	$10^{-3} - 2 \times 10^5$
Linhte	$9 \times 10^0 - 200$
Granito	$3 \times 10^2 - 1.3 \times 10^6$
Granito (resistido)	$3 \times 10^1 - 5 \times 10^2$
Sienito	$10^2 - 10^6$
Diorito	$10^4 - 10^5$
Gabbro	$10^3 - 10^6$
Basalto	$1 \times 10^0 - 1.3 \times 10^7$
Xistos (calcários e mica)	$2 \times 10^1 - 10^4$
Xisto (grafite)	$1 \times 10^1 - 10^2$
Ardósias	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$
Mármore	$1 \times 10^2 - 2.5 \times 10^8$
Folhelhos consolidados	$2 \times 10^1 - 2 \times 10^3$
Conglomerados	$2 \times 10^3 - 10^4$
Arenitos	$1 \times 10^0 - 7.4 \times 10^8$
Calcários	$5 \times 10^1 - 10^7$
Dolomita	$35 \times 10^1 - 5 \times 10^3$
Marls	$3 \times 10^0 - 7 \times 10^1$
Argilas	$1 \times 10^0 - 1 \times 10^2$
Aluvião e areia	$1 \times 10^1 - 8 \times 10^2$
Moraine	$1 \times 10^1 - 5 \times 10^3$
Reservatório de hidrocarboneto	$25 \times 10^1 - 27.5 \times 10^1$
Arenito Sherwood	$1 \times 10^2 - 4 \times 10^2$
Solo (40% argila)	8
Solo (20% argila)	33
Solo superficial	$25 \times 10^1 - 17 \times 10^2$
Argila de Londres	4 - 20
Argila de Lias	10 - 15
Argila de pedregulho	15 - 35
Argila (muito seca)	50 - 150



Tabela 4.2: Continuação da tabela 4.1.

Material	Resistividade ( $\Omega\text{m}$ )
Cascalho (seco)	1400
Cascalho (saturado)	100
Areias quaternárias / recentes	50–100
Laterita	800–1500
Solo laterítico	120–750
Solo arenoso seco	80–1050
Argila areia / areia argilosa	30–215
Areia e cascalho	30–225
Aterro não saturado	30–100
Aterro saturado	15–30

migração de elétrons livres na superfície limite do corpo com características metálicas polarizando a partícula induzido pelo campo eletromagnético gerado pela corrente elétrica (Figura 4.4b).

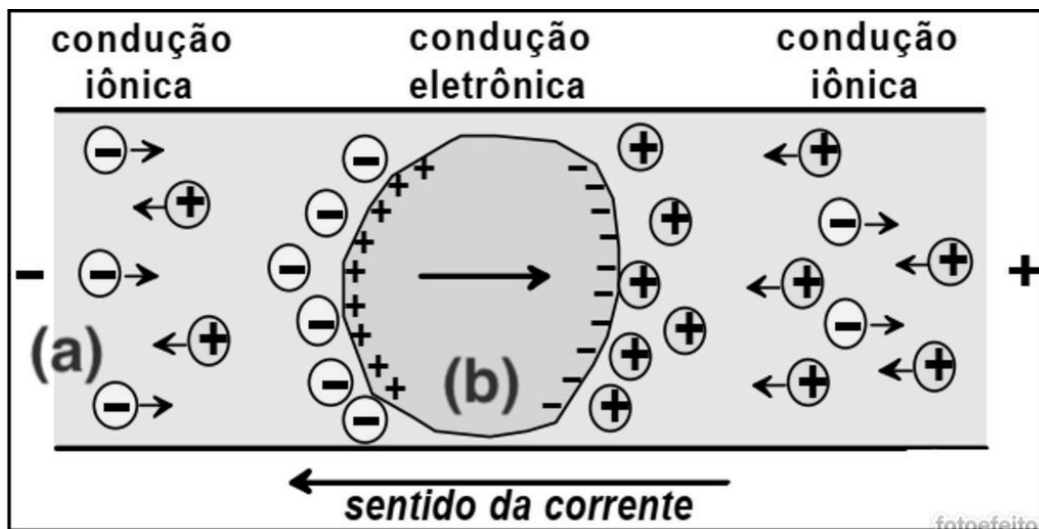


Figura 4.4: Analisando essa corrente, a distribuição dos íons se modifica e volta a seu estado inicial levando, para isto, um certo tempo, durante o qual existe uma polarização no corpo, atribuída aos efeitos observados (BRAGA, 2007). a) Polarização iônica. b) Polarização metálica.

Fonte: Modificado de BRAGA (2007).

## 4.4 Medição da Resistividade

Os instrumentos de pesquisa de resistividade são projetados para medir a razão ( $\Delta V / I$ ), através da injeção de corrente e do valor da diferença de potencial estabelecida. A equação 4.2 refere-se à condução eletrônica, mas pode ainda ser usada para descrever a resistividade efetiva em meio homogêneo e isotrópico (KEAREY *et al.*, 2009). Considerando um único eletrodo de corrente (Figura 4.5), posicionado na superfície de um meio de resistividade  $\rho$ . A corrente flui de forma uniforme e radial ao longo de linhas equipotenciais formando um hemisfério centralizado na fonte. O raio  $r$  entre o centro e a superfície dos semi-círculos tem área superficial de  $2\pi r^2$  e o sumidouro de corrente está a uma grande distância.

A partir da Lei de Ohm, temos que a diferença de potencial de um condutor poder ser definida para um semi-espaço de comprimento  $r$  pela equação 4.3, temos que:

$$R = \rho \frac{r}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (4.9)$$

Então podemos inserir na equação 4.4 a equação 4.9, e assim temos:

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (4.10)$$

A parti da equação 4.10, temos que a resistividade pode ser dada por:

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{i} \quad (4.11)$$

A equação 4.11 permite o cálculo da diferença de potencial em qualquer ponto na superfície ou abaixo da mesma em um semi-espaço homogêneo, isotrópico e de resistência constante, como representado na Figura 4.5 (BRAGA, 2007; KEAREY *et al.*, 2009).

Conforme a Figura 4.6, considere o caso em que o sumidouro de corrente está a uma distância próxima da fonte num arranjo de quatro eletrodos. O potencial medido em  $V_C$  num eletrodo é a soma das contribuições dos potenciais  $V_A$  e  $V_B$  da fonte de corrente em A e do sumidouro em B (KEAREY *et al.*, 2009).

$$V_C = V_A + V_B \quad (4.12)$$

Com a equação 4.10 podemos determinar o potencial resultante do campo elétrico substituindo os potenciais  $V_A$  e  $V_B$  na Equação 4.11, então temos:

$$V_C = \frac{\rho i}{2\pi} \left( \frac{1}{r_a} - \frac{1}{r_b} \right) \quad (4.13)$$

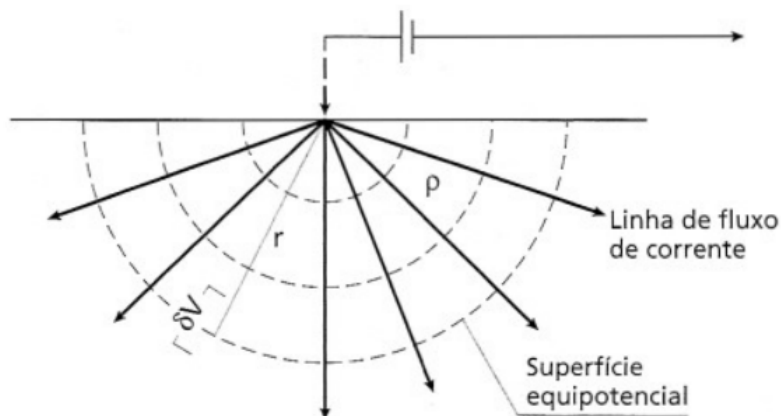


Figura 4.5: Fluxo de corrente e as linhas equipotenciais de um único eletrodo na superfície. Uma corrente flui de forma uniforme e radial causando uma queda potencial entre as extremidades das linhas equipotenciais.

Fonte: Adaptado de KEAREY *et al.* (2009).

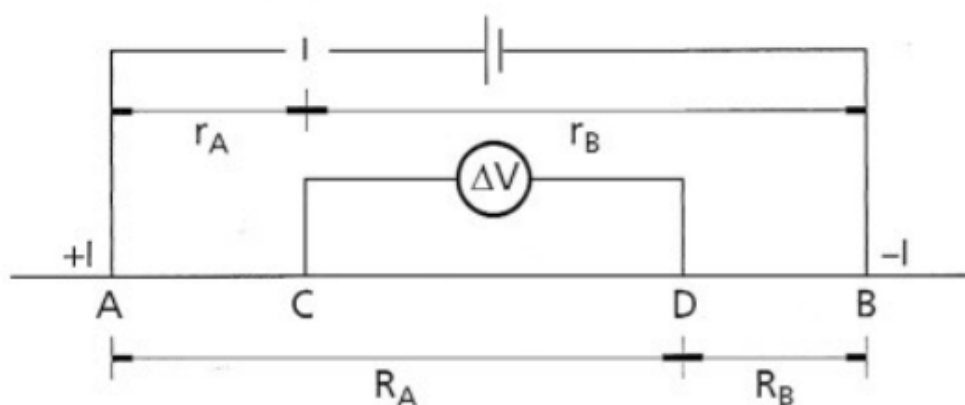


Figura 4.6: Esquema de campo da configuração de eletrodo usada na determinação da resistividade.

Fonte: Adaptado de KEAREY *et al.* (2009).

e potencial em D,

$$V_D = \frac{\rho i}{2\pi} \left( \frac{1}{R_a} - \frac{1}{R_b} \right) \quad (4.14)$$

Em que  $r_A, r_B, R_A, R_B$  são as distancias entre os eletrodos. Portanto, a diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos C e D, será.

$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \left\{ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\} \quad (4.15)$$

Assim,

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{i \left\{ \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left( \frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\}} \quad (4.16)$$

A partir da equação 4.15 e mantendo o espaçamento dos eletrodos constante, obtêm-se dados sobre a resistividade onde o solo for uniforme. Para subsuperfície heterogêneas a diferença de potencial obtida diferirá da registrada sobre um meio homogêneo a medida que variar as posições dos eletrodos (BRAGA, 2007; KEAREY *et al.*, 2009; TELFORD *et al.*, 1990).

No próximo tópico trataremos sobre o conceito de resistividade aparente onde adoto A, B como os eletrodos de corrente e M, N as sondas potenciais.

## 4.5 Conceito de Resistividade Aparente

Se realizarmos as medições pertinentes e trazermos os dados e como na prática o fluxo de corrente em uma estrutura geológica da subsuperfície não se comporta como em um meio homogêneo, isso resultará em uma resistividade fictícia  $\rho_a$ , que comumente, não será igual a  $\rho_1$  e nem  $\rho_2$ , mas vai depender de  $\rho_1, \rho_1, \rho_3$  e  $\rho_4$  (Figura 4.1), e das distâncias que separam os eletrodos. Esta resistividade não pode ser da mesma maneira que média ou como média ponderada das quatro resistividades presentes, podendo ocorrer até que seja maior ou menor que todas elas. Esta resistividade fictícia  $\rho$  obtida pela aplicação aos dados auferidos em um meio heterogênea, a expressão correspondente a um meio homogêneo é conhecida como **resistividade aparente**, ou seja, esse valor calculado representa a resistividade elétrica aparente de um meio homogêneo que, substituído por um meio heterogêneo, provocaria as mesmas reações elétricas observadas nas mesmas condições geométricas dos eletrodos A, B, M e N (SATO e MOONEY, 1960).

Como queremos detectar a presença de condutividade anômala em várias formas, como amontoados de corpos, diques, falhas e contatos verticais ou horizontais entre as camadas, a equação 4.16 é a fórmula básica para o cálculo da resistividade aparente para qualquer tipo de arranjos de eletrodos com sua unidade de medida em ( $\Omega m$ ).

*Resistividade aparente é definida como resistividade verdadeira de um homogêneo fictício médio. Quando a resposta de um solo não homogênea é a mesma que a de um meio homogêneo fictício (ROY, 2007).*

Podemos então, reescrever a equação 4.16 para o cálculo da resistividade aparente em uma expressão em função do fator geométrica ( $K$ ).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{i} \quad (4.17)$$

onde:

$$K = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (4.18)$$

As diferentes disposições dos eletrodos de injeção e recepção recebem o nome de arranjo apresentando características peculiares, vantagens e desvantagens uns em relação aos outros,(GANDOLFO e GALLAS, 2007) e tem relação direta com o valor numérico do fator geométrico cuja dimensão é dado em metro ( $m$ ).

Os valores de resistividade aparente são calculados a partir das medidas de resistência usando-se a fórmula relevante para a configuração de eletrodos em uso (KEAREY *et al.*, 2009) .

## 4.6 Tipos de Arranjos dos Eletrodos

A literatura especializada descreve inúmeras configurações de arranjos para os eletrodos empregados em levantamentos de campo mais utilizadas no desenvolvimento dos métodos geoeletricos. Em consequência da pesquisa de laboratório tem sido realizada desde então, visando analisar a sua influência sobre vários parâmetros intrínsecos ao método. Dentre os variados tipos, vamos nos limitar aos quatro mais empregados nos estudos de campo da prospecção geofísica: Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, pólo-dipolo e pólo-pólo (GANDOLFO e GALLAS, 2007).

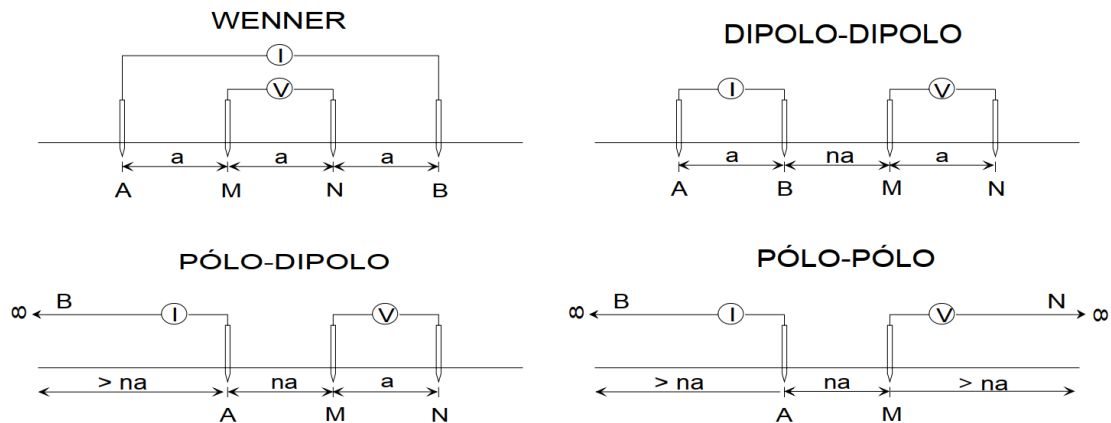


Figura 4.7: Algumas configurações de eletrodo.

Fonte: Adaptado de PARASNIS (2012).

O fator geométrico K (equação 4.18) pode também ser expressa pela seguinte forma genérica. A constante G, independe do espaçamento entre eletrodos sendo função apenas do fator de separação dos mesmos.

$$K = 2\pi Ga \quad (4.19)$$

### 4.6.1 Arranjo Wenner

O arranjo Wenner (Figura 4.8), é o mais simples, já que a corrente e os eletrodos de potencial são mantidos a um mesmo espaçamento crescente e constante simultaneamente, mantendo sempre a relação  $a$  durante todo o desenvolvimento do ensaio, e calculada através da equação 4.20.

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{i} \quad (4.20)$$

onde  $2\pi a$  é o fator geométrico.

É uma configuração de eletrodos básica, a mais utilizado para estratificação de solos e dimensionamentos de malhas de aterramento bem estabelecida na literatura, em que é utilizado um quadripolo de eletrodos (BORJA, 2018).

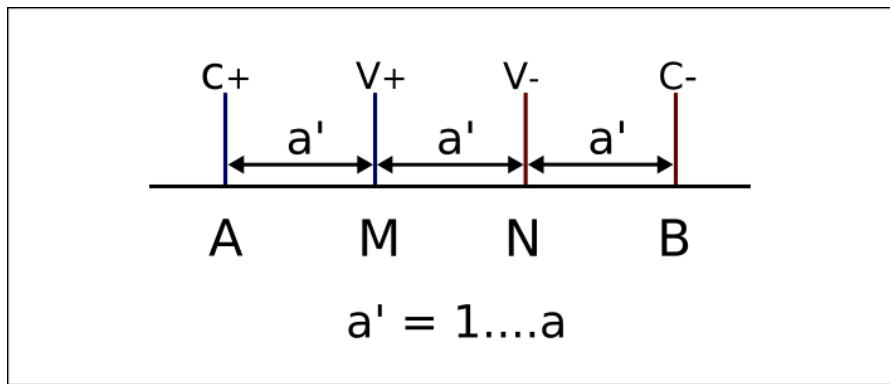


Figura 4.8: Configuração de Wenner. A corrente é introduzida através dos eletrodos A e B, enquanto a diferença de potencial elétrico entre os eletrodos M e N.

Fonte: Adaptado de COCKETT *et al.* (2015).

### 4.6.2 Arranjo Schlumberger

Para o arranjo de eletrodos Schlumberger os quatro eletrodos também são dispostos colinearmente. Porém, a resistividade aparente calcula pela equação 4.21 onde eletrodos de potencial permanecem fixos e os eletrodos de corrente são expandidos simetricamente ao redor do centro do arranjo (KEAREY *et al.*, 2009), fazendo com que a distância  $a$ , que separa os eletrodos MN colocados simetricamente no centro (Figura 4.9), tenda a zero em relação à distância crescente entre os eletrodos AB.

A resistividade aparente para esse arranjo é obtida usando a equação 4.21.

$$\rho_a = \frac{\pi}{2L} \left( \frac{L^2 - x^2}{L^2 + x^2} \right) \frac{\Delta V}{i} \quad (4.21)$$

*O erro produzido por esse tipo de arranjo, que se reflete nos dados de campo (em função dos ajustes necessários nas equações gerais básicas) pode ser*

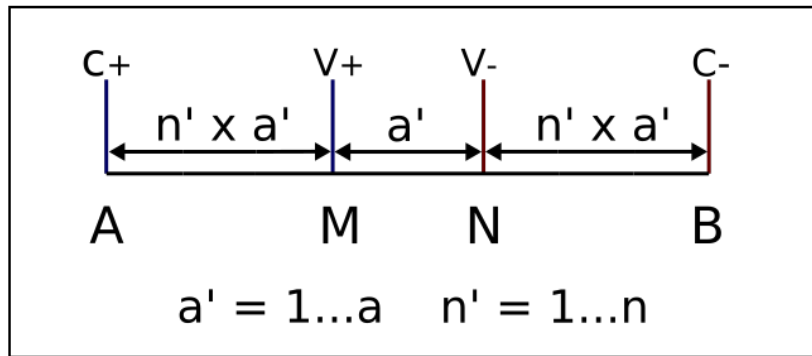


Figura 4.9: Configuração do arranjo Schlumberger.  
 Fonte: Adaptado de COCKETT *et al.* (2015).

*considerado insignificante, não se traduzindo em desvantagem (visando minimizar este erro, adota-se a relação:  $MN \leq AB/5$  (BRAGA, 2016)).*

### 4.6.3 Arranjo Dipolo-Dipolo

Sendo amplamente difundida entre diversas aplicações na prospecção geofísica (BRAGA, 2016; GALLAS, 2000; GANDOLFO e GALLAS, 2007), o arranjo dipolo-dipolo os eletrodos de corrente A, B e as sondas potenciais M, N (Figura 4.10), são alinhados em uma mesma direção e permanecem fixo durante todo o levantamento, sendo esta abertura definida conforme o objetivo do trabalho.

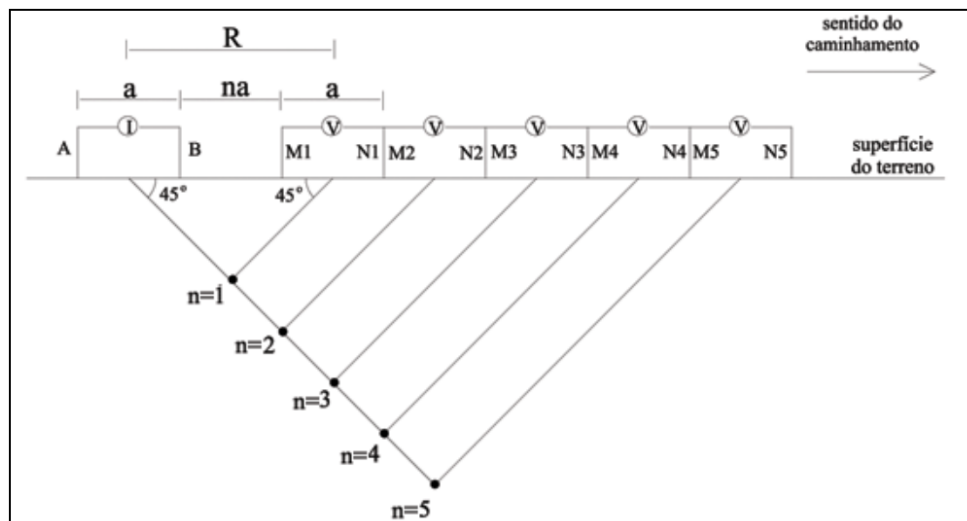


Figura 4.10: Configuração do arranjo dipolo-dipolo. O espaçamento ou abertura entre eletrodos de corrente (AB) e/ou potencial (MN), fixo durante todo o levantamento, é denominado  $a$ . O fator de separação entre eletrodos, variável, é designado por  $n$ . As leituras são projeções de  $45^\circ$  a partir dos centros dos dipolos AB e MN até o ponto médio entre os centros desses dipolos.

Fonte: Adaptado de GANDOLFO e GALLAS (2007).

*Cada dipolo MN corresponde a um nível de investigação, podendo, a depender do caráter do trabalho, estudar as variações horizontais de um parâmetro geoeétrico ao longo de um perfil com um ou mais dipolos, atingindo várias profundidades de investigação (BRAGA, 2016).*

O fator geométrico  $K$ , pode ser calculado através da equação 4.22:

$$k = 2\pi Ga \quad (4.22)$$

onde a constante  $G$ , assume distintos valores conforme o arranjo em função do fator geométrico e do número de níveis ( $n$ ) definidos para o levantamento.

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (4.23)$$

O arranjo dipolo-dipolo apresenta muitas vantagens, como uma interpretação qualitativa da pseudo-seção, facilidade operacional em campo e o correto posicionamento de uma anomalia (GALLAS, 2000; GANDOLFO e GALLAS, 2007) observadas podem, entretanto, ser fortemente influenciadas por irregularidades da cobertura superficial.

#### 4.6.4 Arranjo Pólo-Dipolo

O arranjo pólo-dipolo consiste em três eletrodos móveis (Figura 4.11), e outro eletrodo de corrente que fecha o circuito, B, mantido fixo a uma distância suficientemente grande (GALLAS, 2000; KELLER e FRISCHKNECHT, 1966; TELFORD *et al.*, 1990), ao longo do perfil de caminamento. Após a sequência de leituras, os três eletrodos são deslocados a uma distância fixa igual a  $a$  aumentando a profundidade e conseqüentemente os níveis de investigação.

O cálculo da resistividade aparente para uma arranjo do tipo Dipolo-Polo como mostrado na equação 4.24

$$\rho_a = 2\pi an(n+1) \frac{V}{I} \quad (4.24)$$

O cálculo da resistividade dá-se da mesma forma que aquela utilizada para o arranjo dipolo-dipolo e o fator  $G$  é expresso por:

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}} \quad (4.25)$$

Os níveis de profundidade são construídos de forma análoga ao dipolo-dipolo, partindo do polo (A) e o centro do dipolo (MN) formando um ângulo de 45°.



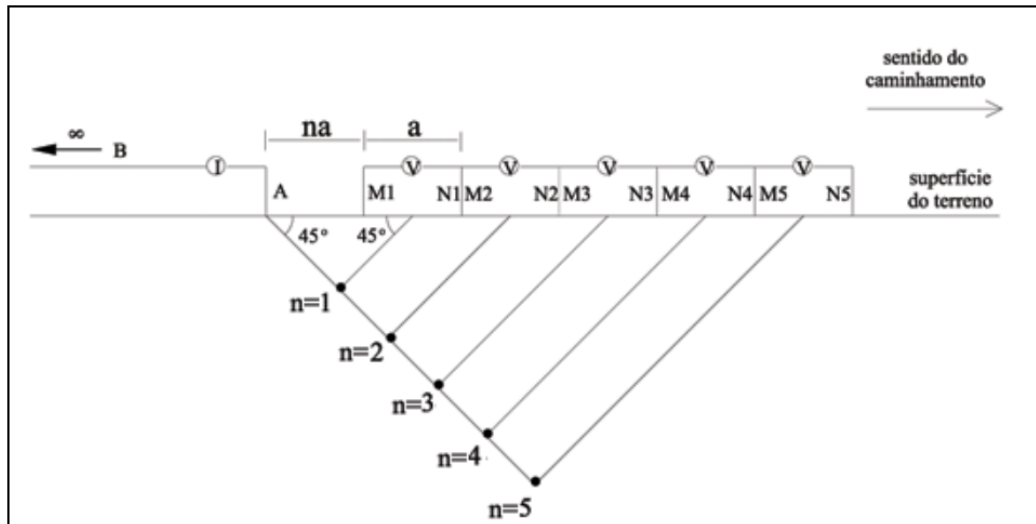


Figura 4.11: Configuração do arranjo pólo-dipolo em que a corrente (A) e os dois de potencial (MN) cujo espaçamento ( $a = MN$ ) permanece constante e outro eletrodo de corrente que fecha o circuito, B, a uma distância tendendo a infinito que corresponde de dez a vinte vezes a maior abertura entre os eletrodos.

Fonte: Adaptado de GANDOLFO e GALLAS (2007).

## 4.7 Potencial Espontâneo (SP)

Em contraste com os métodos prospectivos que serão abordados do decorrer deste trabalho, o potencial espontâneo ou potencial natural, e causado por atividade eletroquímica ou mecânica sendo a água subterrânea o agente mais importante no mecanismo de geração de SP (BRAGA, 2007; GALLAS, 2005; ORELLANA, 1972; TELFORD *et al.*, 1990).

*O inglês Robert Fox descobriu em 1815 o fenômeno da polarização espontânea, que consiste no fato de que depósitos de certos minerais produzem correntes elétricas fracas que podem ser vistas da superfície (ORELLANA, 1972).*

O método SP baseia-se no fato de que na ausência de um campo elétrico criado artificialmente e em determinadas condições, heterogeneidades condutoras do subsolo, é possível mensurar uma d.d.p. entre dois eletrodos introduzidos no solo, que se polarizam, convertendo-se em verdadeiras pilhas elétricas que originam, no subsolo, correntes elétricas (BRAGA, 2007; GALLAS, 2005; ORELLANA, 1972).

Essa ocorrência natural produz uma distribuição observável de potenciais na superfície do solo, devido à presença de bons condutores (sulfetos maciços, preenchimento de fraturas com argilas saturadas, tubulações metálicas), podendo atingir em alguns casos centenas de milivolts (GALLAS, 2005; ORELLANA, 1972).

*Estas reações localizam-se em duas diferentes posições da interface mineralização/rocha encaixante, uma acima e outra abaixo do lençol freático, funcionando o corpo sulfatado como uma ligação elétrica entre estas posições/reações. As substâncias dissolvidas na região próxima à parte superior do corpo sofrem redução, tomando elétrons provenientes do corpo mineralizado. Por outro lado, as substâncias em solução situadas nas porções inferiores do corpo sulfatado se oxidam, cedendo elétrons a este, que funciona como uma ponte para os elétrons GALLAS (2005).*

Essa reação eletroquímica produz corrente elétrica (reações de oxirredução), estando os agentes oxidantes próximos à superfície e a oxidação de agentes redutores abaixo do lençol freático (Figura 4.13). O corpo mineralizado não participa diretamente de nenhuma das reações, servindo apenas como ponte para transferência de elétrons. A teoria atualmente mais aceita para esclarecer os motivos que causam as anomalias SP associadas a mineralizações sulfatadas foi proposta por SATO e MOONEY (1960). Algumas décadas depois o autor GALLAS (2005), em um estudo que integra e sintetiza as principais bibliografias que tratam do método SP, compilou as seguintes conclusões:

- Os minerais que produzem fortes anomalias de autopotencial mais consistentemente são pirita e pirrotita. Outros minerais que conseguem produzir fortes anomalias incluem calcopirita, calcocita, covelita, grafita e formigueiro.
- Os corpos mineralizados associados a anomalias SP são bons condutores eletrônicos, com continuidade elétrica em seu interior.
- As anomalias de autopotencial parecem ser predominantemente negativas nas proximidades da porção superior do corpo de minério.
- Pelo menos parte do corpo de minério deve estar em uma zona de oxidação ativa.
- O fenômeno do autopotencial é relativamente estável no tempo.
- Autopotenciais associados com grafite e galena apresentam um problema especial para qualquer teoria proposta. A grafite é o único não-sulfeto que produz mais do que anomalias de autopotencial ocasionais comparáveis em magnitude às dos sulfetos, e não sofre normalmente uma oxidação significativa. Por outro lado, a galena raramente produz anomalias mensuráveis, embora seja um sulfeto, um excelente condutor elétrico, e oxide mais facilmente do que a maioria dos sulfetos.
- A região acima do lençol freático próximo aos corpos de minério de sulfeto é geralmente caracterizada por alta acidez ( $\text{pH} = 2-5$ ) e uma abundância de oxigênio livre. Abaixo do lençol freático, o oxigênio livre está virtualmente ausente e a água geralmente é ligeiramente básica ( $\text{pH} = 7-9$ ).

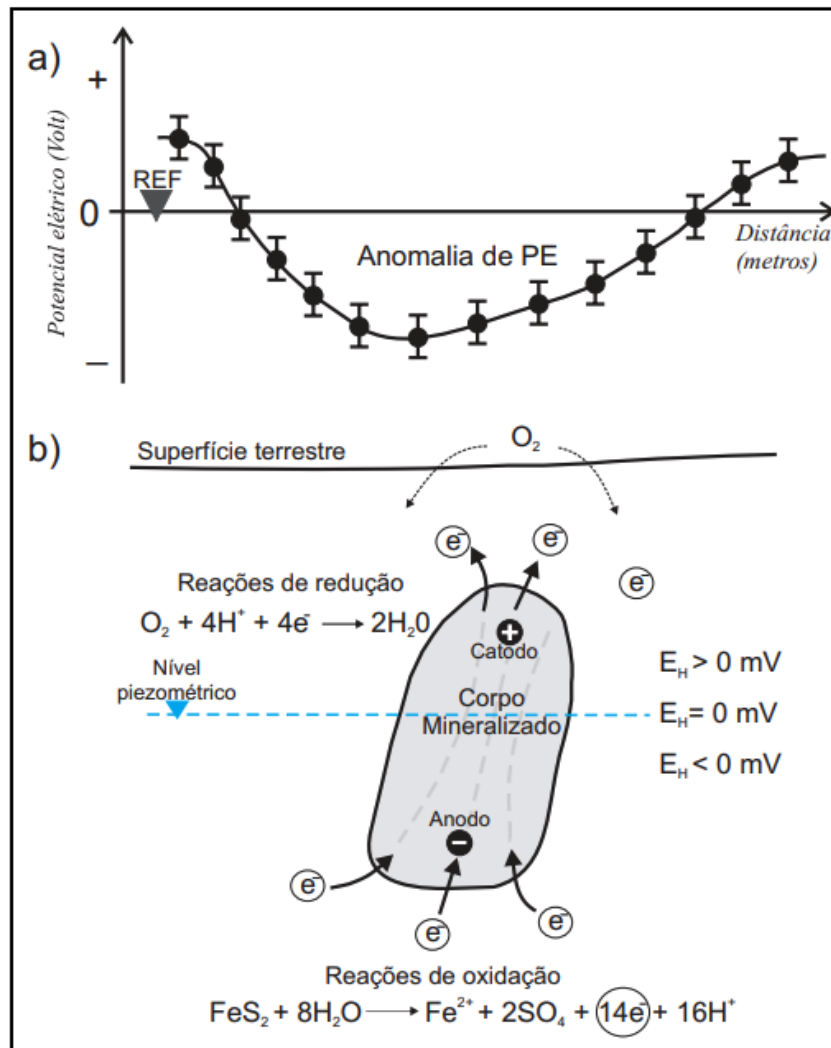


Figura 4.12: Modelo de geobateria: a) Anomalia negativa de potencial espontâneo associada a corpo mineral condutivo; b) a parte superior do corpo mineral funciona como catodo, a parte inferior como anodo.

Fonte: Modificado de FACHIN (2019)

#### 4.7.1 Metodologia para o Potencial Espontâneo (SP)

Processo de aquisição de SP é muito simples, dependendo apenas de um voltímetro (Figura 4.14a) com alta impedância (preferencialmente maior que  $10^8 \Omega$ ), com precisão de pelo menos 1 mV, capacidade de realizar medidas entre -5 a 5 V e medir resistências de contato dois eletrodos impolarizáveis, cabo (com bom isolamento), e um carretel. Esses eletrodos impolarizáveis, são em sua maioria confeccionado em PVC com uma base feita em cerâmica porosa (Figura 4.14c). A porosidade é necessária para uma passagem lenta e suave da solução saturada de um sal da própria da barra de metal de Cu em  $CuSO_4$  ou Ag em  $AgCl$ , estabelecendo-se o contato adotando-se o uso de apenas um par de eletrodos para o trabalho, no sentido de minimizar o erro cumulativo (GALLAS, 2005;

ORELLANA, 1972).

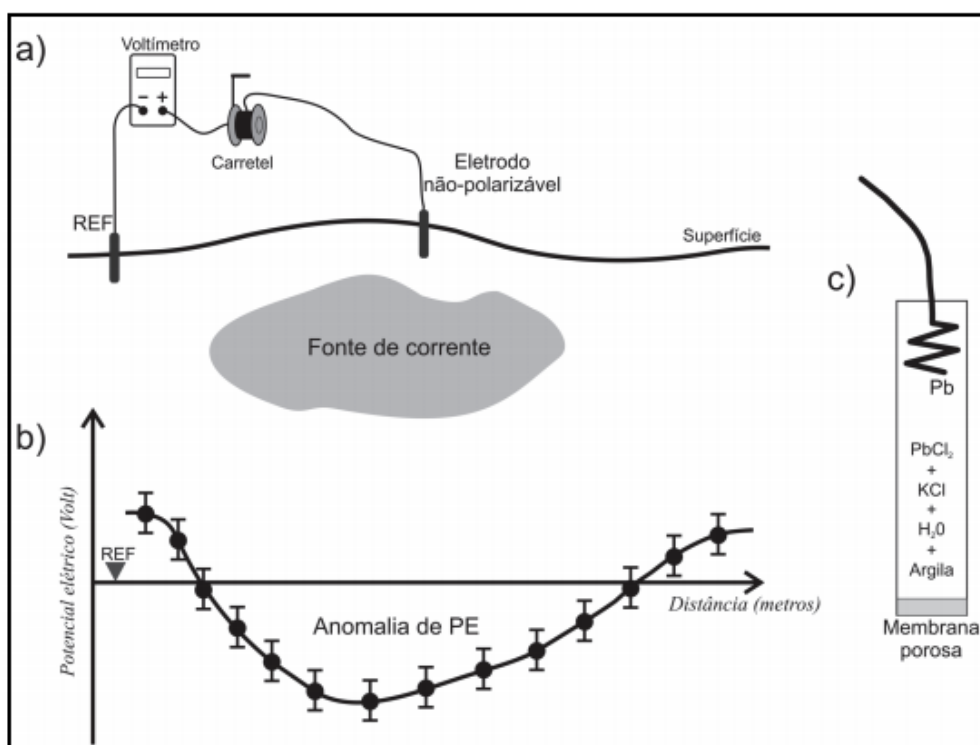


Figura 4.13: Aquisição de dados de potencial espontâneo: a) Par de eletrodos não polarizáveis enterrados no solo e conectados a um voltímetro de alta impedância. Um eletrodo faz a função de estação base, o outro, denominado eletrodo itinerante, mede o potencial ao longo do perfil; b) Erros de medida são estimados por meio do monitoramento do sinal por alguns minutos e determinando a média e desvio padrão das medidas. Na interpretação quantitativa, os dados são utilizados para determinar a distribuição de corrente que gera a anomalia; c) Esquema construtivo de um eletrodo não-polarizável: o contato com o solo é feito através de um meio poroso (cerâmica ou madeira), com elemento metálico em contato com solução eletrolítica do mesmo sal.

Fonte: Adaptada de SATO e MOONEY (1960)

Os dados obtidos em um levantamento SP são geralmente apresentados sob a forma de perfis, mapas ou bloco diagrama 3-D, e podem ser interpretados qualitativa ou quantitativamente, embora de forma bastante imprecisa e aproximada, mas que no pior dos casos fornecem orientações úteis sobre as características do organismo investigado (GALLAS, 2005; ORELLANA, 1972).

## 4.8 Técnicas de Medição

De acordo com BRAGA (2016); FEITOSA *et al.* (2008); KEAREY *et al.* (2009); ORELLANA (1972); REYNOLDS (2011); TELFORD *et al.* (1990), existem variadas técnicas de medição da resistividade aparente na subsuperfície. Segundo esses autores, existem diferenças entre essas técnicas, de fundamental escolha para a metodologia correta e objetivos do trabalho de campo. Neste trabalho, abordaremos às duas técnicas mais usuais: **Sondagem Elétrica Vertical (SEV)** e **Caminhamento Elétrico (CE)**.

### 4.8.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A SEV é uma investigação pontual que examina a variação da resistividade de um determinado ponto até uma determinada profundidade, de acordo com distância entre a fonte elétrica e os eletrodos de medição é aumentada. Segundo ORELLANA (1972), essa técnica de medição pode ser usada de duas maneiras: usando um arranjo em que a configuração do eletrodo sempre permanece geometricamente semelhante, o caso do arranjo **Wenner** (Figura 4.8), ou com o arranjo **Schlumberger** (Figura 4.9), que diferente ao primeiro arranjo citado, realiza-se uma série de medições de resistividade aparente, aumentando-se o espaçamento AB a cada nova medição (FEITOSA *et al.*, 2008), simetricamente em relação à distância MN que tende a zero enquanto a distância AB se torna muito grande (Figura 4.1). Isso pode ser melhor compreendido ao analisamos um arranjo Wenner (Figura 4.18), em que, quando a separação de eletrodos é pequena, a maior parte da corrente flui na camada superior, com a consequência de que a resistividade aparente tende a  $\rho_1$ . A medida que a distância entre os eletrodos de injeção aumenta, a profundidade em que a corrente penetra é aumentada e mais corrente flui dentro da camada inferior, e a resistividade aparente, então, tende a  $\rho_2$  (KEAREY *et al.*, 2009; REYNOLDS, 2011).

Nessa seção, vamos lidar exclusivamente com o arranjo Schlumberger, que além de ser mais prático no campo, por ser apenas necessário o deslocamento apenas dos eletrodos de injeção, também se mostra menos sujeito a ruídos indesejáveis, tais como, potenciais artificiais produzidos por cabos e estações de alta tensão (BRAGA, 2016). Caso necessário pode-se aumentar a distância entre os eletrodos de potencial MN para diminuir os efeitos da relação sinal/ruído, tornando possível medir a variação vertical de resistividade aparente da subsuperfície em vários níveis de profundidade ORELLANA (1972).

Em consequências de tal levantamento geoeletricos, são plotados graficamente a resistividade aparente  $\rho_a$  em associação aos valores logarítmicos da meia separação do eletrodo de injeção ( $AB/2$ ), respectivamente permitindo assim obter uma curva que é a representação gráfica da resistividade aparente ou diagrama elétrico, ou, simplesmente, sondagem elétrica vertical SEV (Figura 4.18). Tais sondagens elétricas, tornam possível correlatar a sequência elétrica à sequência litológica e obter por modelos matemáticos

estimativas das resistividades verdadeiras dos diferentes horizontes elétricos.(FEITOSA *et al.*, 2008).

Tabela 4.3: As diferenças básicas entre esses arranjos, podem ser sintetizadas de acordo com FEITOSA *et al.* (2008).

Schlumberger - Vantagens
Os pequenos espaçamentos MN tornam a razão $\Delta V/MN$ mais próxima do campo elétrico teórico no centro do dispositivo.
Esses pequenos espaçamentos MN captam menores potenciais parasitas, maximizando a razão sinal/ruído
A possibilidade de fazer medições de resistividade aparente para várias distâncias AB, mantendo a distância MN fixa, aliada à repetição de medições para o mesmo AB e distâncias MN diferentes (“embreagens”), possibilita distinguir entre efeitos profundos e efeitos superficiais. Estes últimos ocorrem quando os eletrodos de corrente e, particularmente, os de potencial, passam por descontinuidades superficiais.
A imobilidade do par MN durante várias medições de resistividade, bem como sua menor dimensão relativa, nas grandes linhas AB, agilizam as operações de campo

Schlumberger - Desvantagem
Os pequenos espaçamentos MN acarretam menores diferenças de potencial e, conseqüentemente, tornam mais difíceis e menos precisas suas medições. Esta desvantagem avulta em presença de recobrimentos muito resistivos como areias secas por exemplo, em decorrência da diminuição da sensibilidade do potenciômetro.

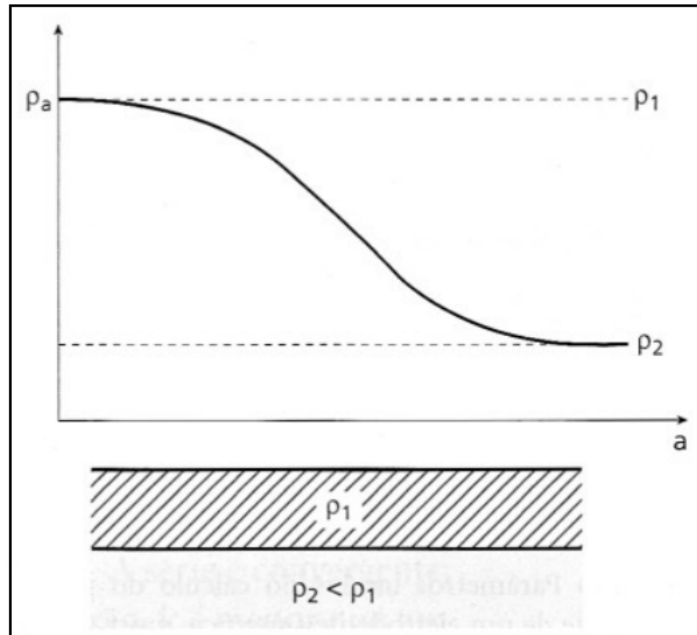


Figura 4.14: A variação da resistividade aparente  $\rho_a$  com separação de eletrodo sobre uma interface horizontal única, entre meios com resistividades  $\rho_1$  e  $\rho_2$

Fonte: Adaptada de KEAREY *et al.* (2009).

*A maior eficiência do método corresponde ao caso em que as SEVs são realizadas em um terreno composto por camadas lateralmente homogêneas com relação à resistividade, e delimitadas por planos paralelos à superfície do solo (meio estratificado). Experimentos mostram que os resultados teóricos obtidos para média desta classe, eles são razoavelmente válidos para inclinações de até cerca de 30°(ORELLANA, 1972).*

A profundidade máxima de investigação de uma SEV é governada, principalmente, pelo espaçamento entre os eletrodos de injeção AB que nos fornece informações sobre a **profundidade teórica investigada**  $AB/4$  (BRAGA, 2016; ORELLANA, 1972). Trataremos desse assunto com mais embasamento nas próximas seções sobre corte geoeletricos e profundidade de investigação.

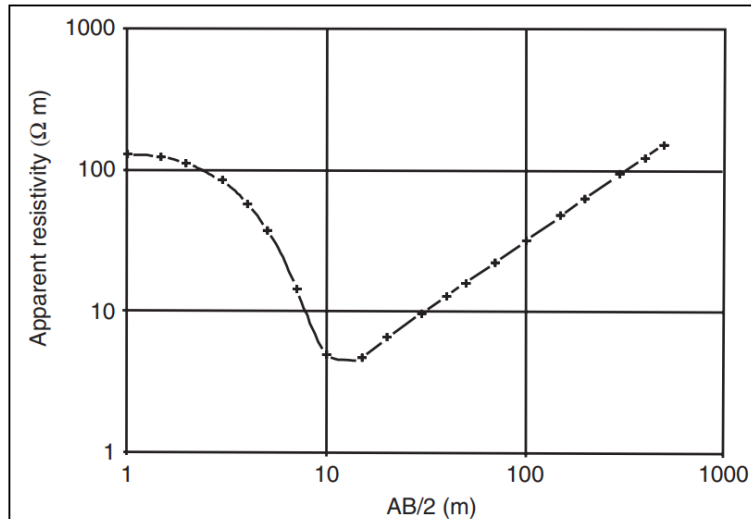


Figura 4.15: SEV mostrando resistividade aparente em função do eletrodo de corrente meia separação ( $AB/2$ ). Chamamos a atenção para que a cada par ( $AB/2$ ,  $MN$ ) corresponde um valor da constante geométrico  $K$ .

Fonte: Adaptada de REYNOLDS (2011).

## 4.8.2 Cortes Geoelétricos

Segundo ORELLANA (1972), podemos caracterizar cada meio estratificado, denominado corte geoelétrico que simboliza as espessuras e resistividades das diferentes camadas elétricas presentes de cada meio parcial isotrópico (Figura 4.19). Dessa forma, um certo corte geoelétrico é de “duas camadas, do tipo resistivo/condutoivo”, que significa dizer que a resistividade da primeira camada é maior que a resistividade da segunda (FEITOSA *et al.*, 2008).

Nesta circunstância, o número de camadas identificadas e das variações de resistividades podem ser consideradas segundo seu número de camadas geoelétricas (Figura 4.19), isto é, duas, três, quatro camadas, etc.

- Para duas camadas: ascendente  $\rho_1 < \rho_2$  ou descendente  $\rho_1 > \rho_2$  .
- Para três camadas:

$$K (\rho_1 < \rho_2 > \rho_3) - H (\rho_1 > \rho_2 < \rho_3)$$

$$A (\rho_1 < \rho_2 < \rho_3) - Q (\rho_1 > \rho_2 > \rho_3)$$

- Para quatro camadas:

$$KH (\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4), QH (\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4), \text{ etc}$$

A investigação morfológica, institui-se na etapa mais significativa da interpretação das SEV's (BRAGA, 2016), após a coleta dos dados de campo, as curvas podem ser submetidas a um método comparativo, cujo objetivo é realizar uma análise preliminar da SEV,



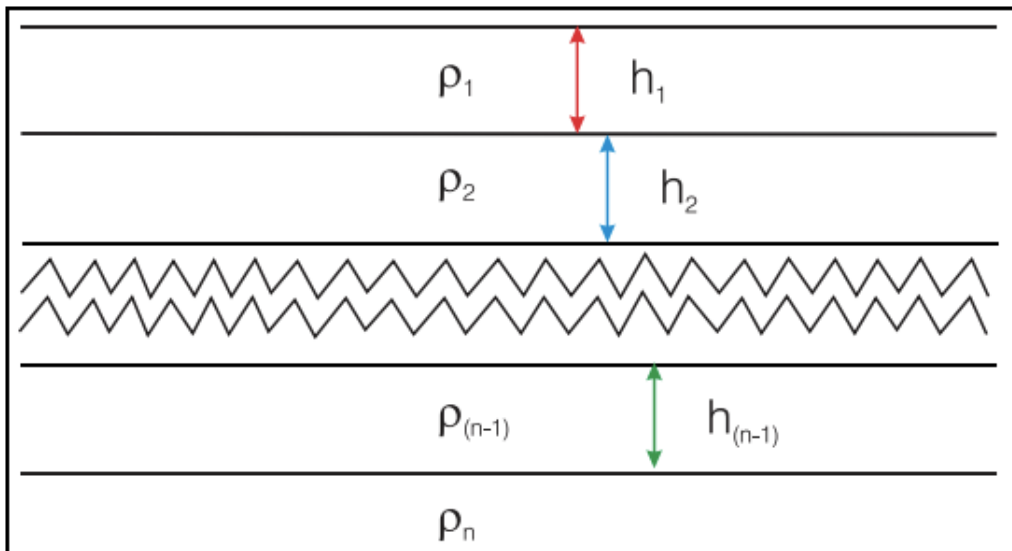


Figura 4.16: Os cortes geoeletricos podem ser classificados segundo o número de camadas que apresentam, e subordinadamente, segundo a relação entre os valores das resistividades verdadeiras das camadas.

Fonte: Adaptada de FEITOSA *et al.* (2008).

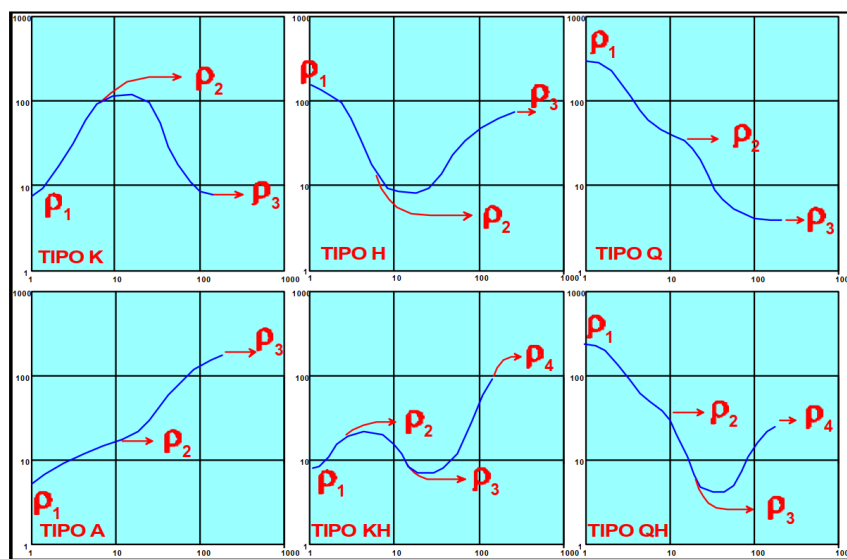


Figura 4.17: Morfologia de algumas seções geoeletricas.

Fonte: Adaptada de BRAGA (2007).

propiciando assim, um modelo teórico inicial (Figura 4.20), referentes cortes geoeletricos. Entretanto, segundo (FEITOSA *et al.*, 2008) com o avanço computacional, já estão disponíveis modelos analíticos que calculam instantaneamente as curvas teóricas de sondagem elétrica. O autor considera, assim, que esses modelos substituem com enormes vantagens, naturalmente, os antigos métodos que envolvem a comparação de perfis de campo com curvas características denominadas ábacos.

*O que se chama ábacos são coleções de curvas teóricas de sondagem elé-*

trica, que foram muito utilizadas no passado recente como padrões ou referenciais para análise das curvas experimentais de campo, visando definir o número de camadas elétricas do subsolo estudado e avaliar as espessuras e resistividades dessas camadas (FEITOSA et al., 2008).

### 4.8.3 Profundidade de Investigação das SEVs

Em concordância com GANDOLFO (2007), a profundidade de investigação é uma concepção relevante a qualquer método ou técnica geofísica rasa empregada para ser estabelecida uma relação, entre o espaçamento de eletrodos na superfície e uma determinada profundidade efetiva, numa tentativa de mensurar a distribuição do estratificado do subsolo a partir de sua constituição de camadas resistivas. Neste contexto, devemos primeiro nos preocupar se isso pode ser estipulado de modo claro e inequívoco, sobre as informações oriundas de uma SEV (ORELLANA, 1972).

Dessa forma, para esclarecer a questão abordada acima, vamos considerar dois eletrodos A e B localizados na superfície (Figura 4.21), de um subsolo homogêneo de resistividade  $\rho$ . Por consequência, iremos deduzir como a densidade de corrente pode variar em função da profundidade  $z$  ao longo da linha reta, perpendicular à superfície, passando pelo centro O do segmento AB (ORELLANA, 1972).

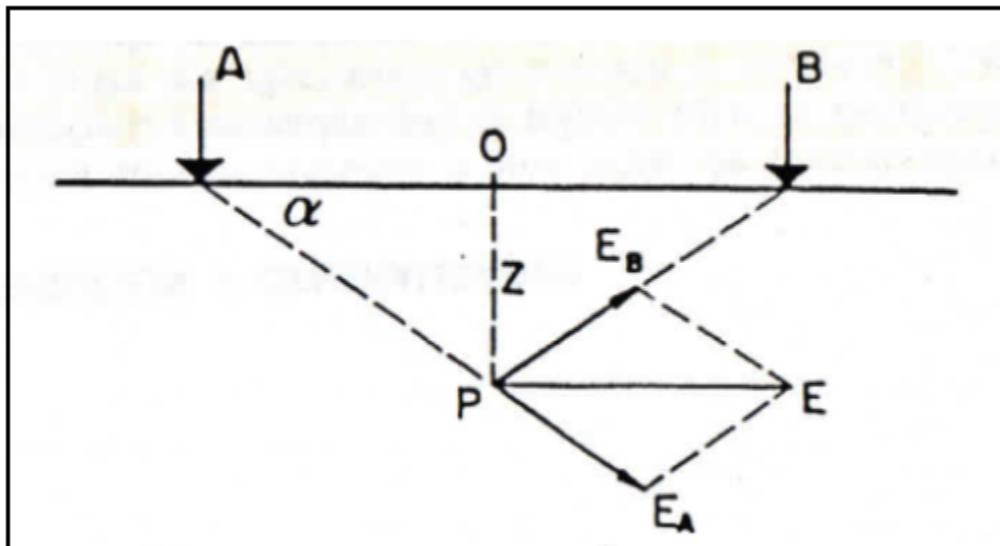


Figura 4.18: Determinação da densidade de corrente em um semi-espaço homogêneo.  
Fonte: Adaptada de ORELLANA (1972).

O módulo do campo elétrico  $\vec{E}$  devido ao eletrodo A, será válido no ponto P de profundidade  $z$ .

$$\vec{E}_a = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{(l^2 + z^2)} \quad (4.26)$$

De forma análoga,

$$\vec{E}_b = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{(l^2 + z^2)} = \vec{E}_a \quad (4.27)$$

Pela inspeção da figura é fácil demonstrar, em razão da simetria, que às duas componentes verticais do campo são análogos e opostas, enquanto as componentes horizontais são iguais e na mesma direção, como A e B de polaridade dessemelhante. Portanto, o campo total  $\vec{E}$  será

$$\vec{E} = 2\vec{E}_a \cos\alpha = \frac{I\rho}{\pi} \frac{\cos\alpha}{(l^2 + z^2)} \quad (4.28)$$

sendo

$$\cos\alpha = \frac{l}{(l^2 + z^2)^{1/2}} \quad (4.29)$$

a densidade de corrente (equação 4.8) na profundidade  $z$ , é reescrita matematicamente como

$$J_x = \frac{\vec{E}}{\rho} = \frac{l}{\pi} \frac{l}{(l^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{l}{\pi} \frac{1}{l^2 \left(1 + \frac{z^2}{l^2}\right)^{3/2}} \quad (4.30)$$

A equação 4.33 acima admite que em um meio homogêneo, a densidade de corrente diminui gradativamente com a profundidade, no eixo vertical do dispositivo de dois eletrodos.

Agora, suponha que o ponto P esteja deslocado a uma distância  $y$  perpendicular ao plano do desenho. Então reorganizando a equação 4.33 substituindo  $z^2$  por  $z^2 + y^2$ , onde teremos

$$J_{x,y} = \frac{l}{\pi} \frac{1}{l^2 \left(1 + \frac{z^2 + y^2}{l^2}\right)^{3/2}} \quad (4.31)$$

Podemos agora calcular a fração  $F$  da corrente total que circula acima de qualquer profundidade  $Z_0$ , para a qual haverá para realizar uma integração dupla:

$$F = \frac{1}{\pi} \int_0^{z_0} \int_{-\infty}^{\infty} J_{x,y} dudz = \frac{1}{\pi l^2} \int_0^{z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dydz}{\left(1 + \frac{z^2+y^2}{l^2}\right)^{3/2}} \quad (4.32)$$

Por conveniência, consideremos  $l$  como uma unidade de comprimento, colocando  $z' = z/l$ ;  $y' = y/l$ . Então

$$F = \frac{1}{\pi} \int_0^{z_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dy' dz'}{(1 + z'^2 + y'^2)^{3/2}} = \frac{2}{\pi} \int_0^{z_0} \frac{dz'}{(1 + z'^2)} = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} z'_0 = \frac{2}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \frac{z_0}{l} \quad (4.33)$$

Da fórmula segue-se que metade da corrente ( $l$ ) circula acima da profundidade  $z = l$  e 70,6% da corrente passa acima da profundidade  $z = 2l = AB$  (ORELLANA, 1972).

Obviamente, as regiões mais profundas terão menos interferência no potencial observado na superfície, pois a densidade de corrente é menor. No entanto, não é possível definir uma profundidade limite abaixo da qual o subsolo não seja influenciada pela SEV, dado que a densidade de corrente diminui suave e gradualmente, sem nunca se cancelar.

As fórmulas apresentadas anteriores só são válidas para subsolo homogêneo. Em um meio heterogêneo, a densidade de corrente irá variar de acordo com uma lei diferente em cada caso, então a penetração vai depender da distribuição de resistividades no subsolo ORELLANA (1972). Em estudos nessa área ROY e APPARAO (1971) propuseram que a profundidade de investigação em SEVs denotaria de 0,125 da distância entre eletrodos posicionados nos extremos do arranjo. Na prática, a um consenso de adotar a quarta parte da distância máxima alcançada pelos eletrodos como a profundidade de alcance teórica BRAGA (2016).

#### 4.8.4 Caminhamento Elétrico (CE)

A técnica do Caminhamento Elétrico ou Perfilagem Elétrica Horizontal é utilizada para realizar investigações laterais e verticais da resistividade em subsuperfície rasa, de um parâmetro físico ao longo de uma seção, ou seja, sua variação na horizontal, permitindo investigar o subsolo lateralmente a uma profundidade constante, por uma série de medições da resistividade aparente do subsolo realizada por meio deslocamento de um quadripolo a cada nova medição. (BRAGA, 2007; FEITOSA *et al.*, 2008). Existem diferentes arranjos que podem ser feitos no CE, como **Dipolo-dipolo**, **Polo-dipolo** e **Gradiente**.

As CEs apareceram como decorrência das dificuldades de SEVs em levantamentos profundos devido à grande extensão das linhas necessárias para pesquisa de descontinui-

dades verticais, tais como falhas em regiões sedimentares e zonas fraturadas em regiões cristalinas (FEITOSA *et al.*, 2008; ORELLANA, 1972).

Diferencialmente a SEV, a CE tem operação mais lentas e complexas, mas esse tipo de levantamento se justifica pela importância da obtenção da informação e pela sua acurácia. Os dados de campo obtidos em CE são geralmente apresentados sob a forma de pseudo-seções (Figura 4.23), sendo bastante difundido para interpretação de dados obtidos por levantamentos de campo.

*Esse método é empregado em prospecção mineral para localizar falhas ou zonas de cisalhamento e para detectar corpos localizados de condutividade anômala. É também usado em levantamentos geotécnicos para determinar variações na profundidade do embasamento e a presença de descontinuidades abruptas (KEAREY et al., 2009).*

A Figura 4.22 ilustra a organização inicial ao longo de uma linha a ser investigada. Pode-se observar, vários dipolos de recepção (MN) instalados na superfície do terreno. Cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, representa um nível de investigação (profundidade teórica investigada). Portanto, quanto, mais dipolos de MN forem instalados, maior será a profundidade de investigação (BRAGA, 2007). O valor da resistividade elétrica aparente é disposto a um ponto em subsuperfície, localizado no cruzamento de duas retas a  $45^\circ$  partindo do centro dos dipolos AB e MN. A projeção deste ponto no eixo das abscissas corresponde ao ponto médio do arranjo, considerando os eletrodos extremos do mesmo (A e N) (GANDOLFO, 2007).

#### **4.8.5 Profundidade de Investigação da CE**

Conforme ELIS *et al.* (2008); GANDOLFO (2007); ORELLANA (1972); TELFORD *et al.* (1990), quanto maior for a distância da linha em um levantamento CE, maior será profundidade atingida pela investigação embora seja sujeita a interferência indesejável de ruído.

O mapeamento litológico para a avaliação e exploração dos recursos subterrâneos é governada pela distância R (Figura 4.22), entre os centros dos dipolos AB e MN, e pode ser tomada como sendo a profundidade teórica de investigação ajuizado de  $R/2$  (BRAGA, 2007).

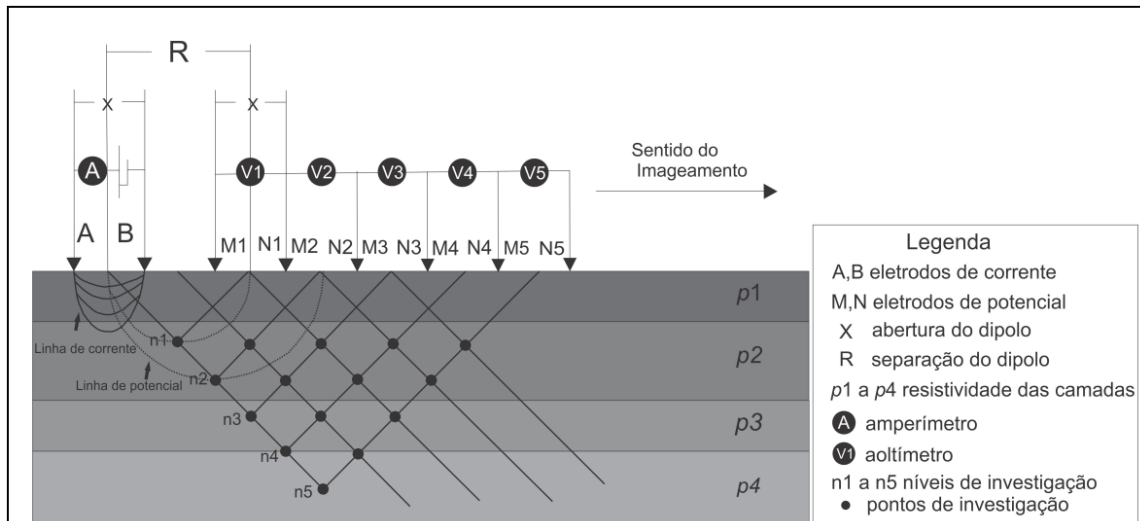


Figura 4.19: Mostra a configuração dipolo-dipolo colinear, em que os pares de eletrodos de corrente e potencial estão na mesma linha. O termo adequado, para este tipo de seção, é denominado pseudo-seção de resistividade aparente, com a profundidade plotadas em níveis (n) correspondem a profundidade teórica. Plotagem convencional, arranjo D-D, proposta por HALLOF (1957).

Fonte: Adaptada de CANATA *et al.* (2018).

## 4.9 Pseudo-Seções de Resistividade Elétrica

Os dados de campo obtidos em um sondagem elétrica vertical (SEV) ou em um caminhamentos elétricos (CE), são utilizados para detectar e mapear o traço de descontinuidade vertical ou lateral apresentados sob a forma de resistividade elétrica aparente (GANDOLFO, 2007).

*Geralmente, o que você obtém é a distribuição da resistividade no subsolo. Quando tal distribuição é traçada fisicamente na forma de um corte vertical, esta representação é chamada corte geoeletrico (ORELLANA, 1972).*

### 4.9.1 Modelagem

A localização, mapeamento e obtenção, de maneira não invasiva, das feições geológicas de uma região, como, por exemplo, fraturas e afundamentos de solo SILVA (2010 p 14, apud GALLAS (1999) p 103), que estejam imersos na subsuperfície, são normalmente resultados da análise de um conjunto de dados obtidos por levantamentos de campo. A modelagem direta de elementos finitos pode ser realizada usando software disponível comercialmente ou por algoritmos desenvolvidos para esse propósito. O resultado dessa abordagem é um modelo bidimensional na forma de uma pseudo-seção para comparação

com os dados de campo originais e o grau de desajuste é dado em porcentagem de erro RMS (Figura 4.23). Esta abordagem tem por finalidade ajudar a gerar as geometrias de subsuperfície interessar-se interpretar a técnica de tomografia elétrica (ERT), de seções de resistividade pela profundidade.

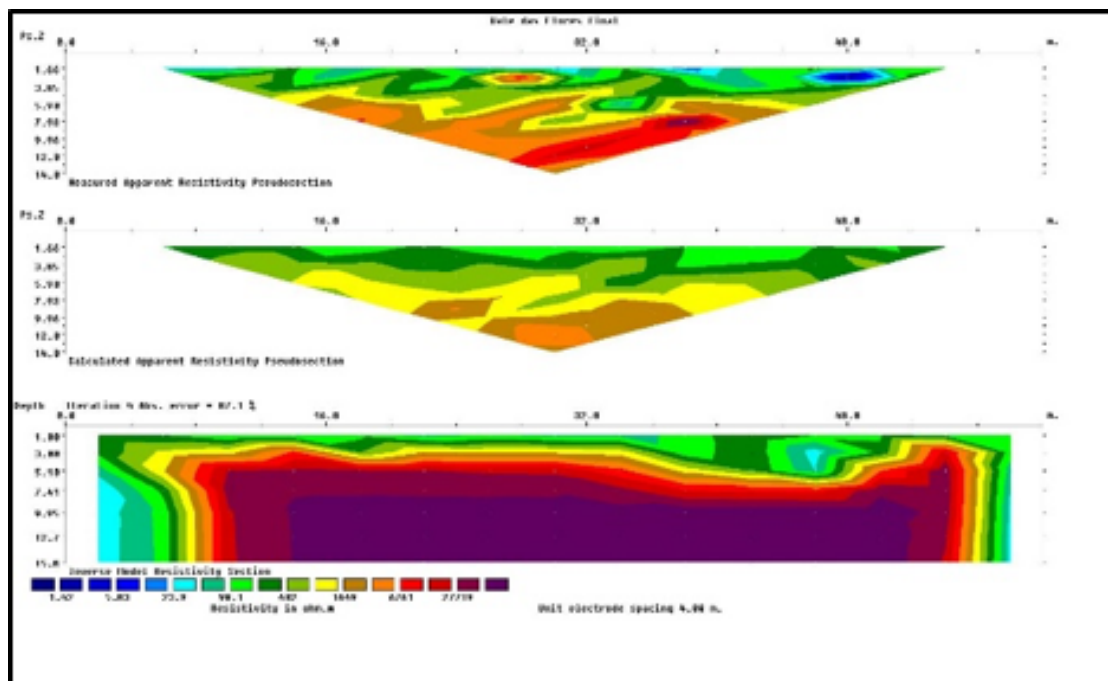


Figura 4.20: Método geoeétrico em um estudo de contaminação por necro chorume com a utilização de um caminhamento elétrico. Pseudoseção gerada com os dados a linha localizada antes da área de sepultamento que corroboram para caracterizar a presença de materiais mais resistivos com horizontes areno-argilosos de baixa umidade ou menos resistivos que podem representar focos de contaminação por necro chorume.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.10 Estudo de Trabalhos Relacionados

Este capítulo discute os trabalhos relacionados que reforçam e justificam a relevância desse projeto para o desenvolvimento da pesquisa científica e instrumentação nacional.

### 4.10.1 Registador de Resistividade de Projecções Construcionais

Em 1997 Robert Beck, construiu um *Earth Resistivity Meter* (ERM), uma ferramenta para pesquisas arqueológicas amadoras usado em seus trabalhos de campo. Mesmo o autor não sendo um arqueólogo ele abordou esse projeto como um problema de eletrônico a ser resolvido: transmitir um sinal, recupere-lo a uma distância e armazene-o para análise posterior (BECKER, 2003a). Seu equipamento possui um circuito de processamento

controlador de interface periférica *PIC* (microcontrolador), fabricado pela Microchip.

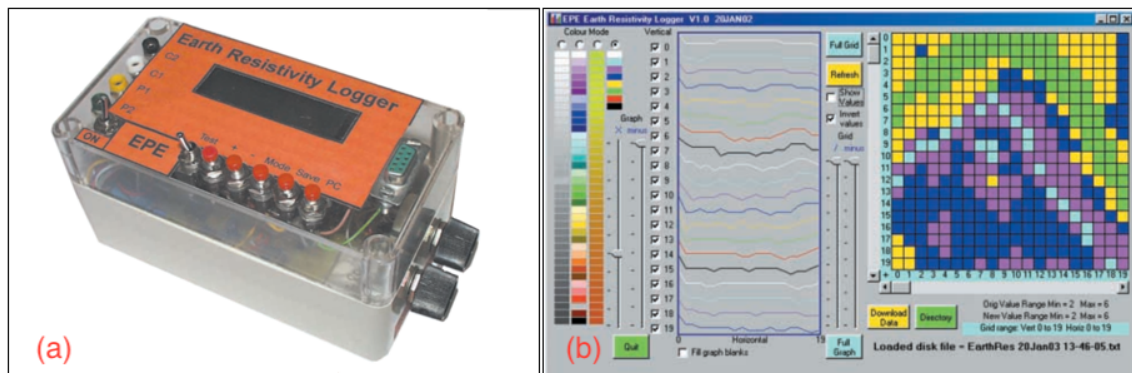


Figura 4.21: Protótipo do Earth Resistivity Meter (a) .Software Earth Resistivity Logger (b).

Fonte: Adaptado de BECKER (2003b).

Esse microcontrolador tem a função de gerar um sinal de transmissão e penetração no solo de onda quadrada de 137 Hz, e posteriormente converte esse sinal analógico recebido e amplificado, em um valor digital de 10 bits armazenando cada valor convertido em sua memória não volátil (EEPROM).

O equipamento também possuía uma tela de cristal líquido (LCD) que exibe continuamente os dados em tempo real imediatos e coordenadas em caracteres alfanuméricos (Figura 4.21-a). Esses dados então, eram transmitidos ao um computador por uma porta serial, para um processamento com a utilização de um software também desenvolvido para o projeto chamado *Earth Resistivity Logger* (ERL)(BECKER, 2003b). Os gráficos eram exibidos na formas de onda e valores relacionados a valores quadrados de grade coloridos ou em escala de cinza (Figura 4.21-b).

#### 4.10.2 Método de Resistividade Eléctrica para Caracterização do Conteúdo de Água de Solo Argiloso Não Saturado

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema automatizado de resistividade multi eletrodo para investigações sobre o teor de água do solo argiloso não saturado e seus efeitos sobre o fluxo de corrente eléctrica injetados sobre o solo. Esse sistema possui o potencial de controla até 64 eletrodos em um procedimento totalmente automatizado, oferecendo dados contínuos com aquisição em tempo real, um dos recentes avanços na técnica em campanhas de eletrresistividade.

O equipamento utiliza um módulo *Measurement Systems Ltd* (MSL) da série Datascan 7220 conectada a um computador via cabo RS-232 para comunicação contínua dos dados (Figura 4.22).



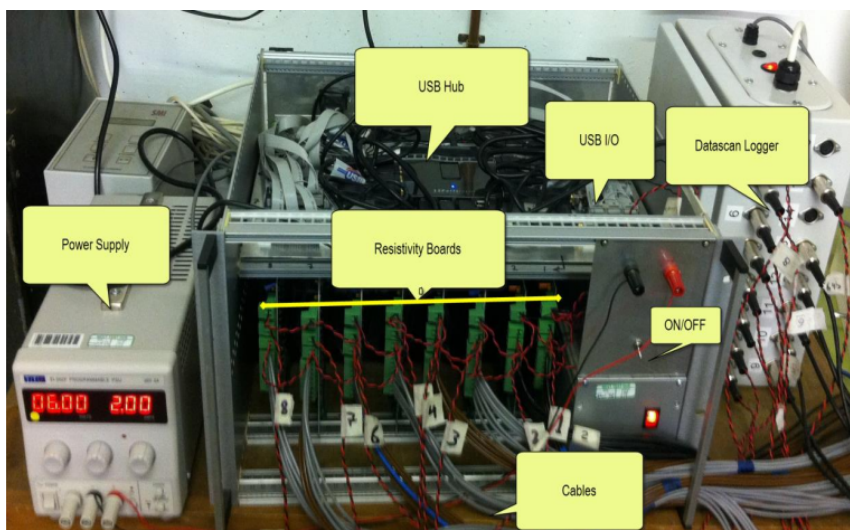


Figura 4.22: Os principais componentes do sistema desenvolvido.  
 Fonte: Adaptado de HASSAN *et al.* (2014).

Ao nível de teste de bancada, esse protótipo foi submetido a uma ampla variedade de resistores de referência de alta precisão, assim como, avaliado com comparativos feitos com o uso de instrumentos comerciais.

Para trazer uma maior funcionalidade ao projeto foi desenvolvido um software de controle e aquisição, de manejo facilitado chamado **RESIST**, para integrar o hardware e controlar todos os processos gerais de operação do instrumento. Com o RESIST foi possível implementar funções remotas para controlar a fonte de alimentação: definir tensão, corrente, saída On / Off e adquirir dados através do *data logger*, possibilitando a leitura da corrente e tensão, oferecendo assim um procedimento de controle totalmente automatizado (HASSAN *et al.*, 2014).

### 4.10.3 Um resistivímetro de baixo custo para uso em aulas práticas de geofísica aplicada

Esse trabalho desenvolvido por pesquisadores da Universidade Federal de Sergipe (UFS), objetivou em construir e testar um resistivímetro de baixo custo, simples e eficiente, concebido para ser utilizado em aulas práticas de Geofísica Aplicada. O dispositivo foi projetado para cobrir uma ampla gama de resistividade aparente para facilitar a explicação dos conceitos físicos envolvidos em seu uso.

Para trazer uma maior funcionalidade ao projeto foi desenvolvido um software de controle e aquisição, de manejo facilitado chamado **RESIST**, para integrar o hardware e controlar todos os processos gerais de operação do instrumento. Com o RESIST foi possível implementar funções remotas para controlar a fonte de alimentação, possibilitando a leitura da corrente e tensão, oferecendo assim um procedimento de controle totalmente

automatizado

Embora fosse um instrumento básico que consistia de um voltímetro, amperímetro (dois multímetros de baixo custo Foxlux FX-MD, LCD de 3-1 / 2 dígitos) e uma fonte de alimentação capaz de fornecer uma ampla gama de tensões de saída (FOLLY e SENRA, 2016) (Figura 4.23).

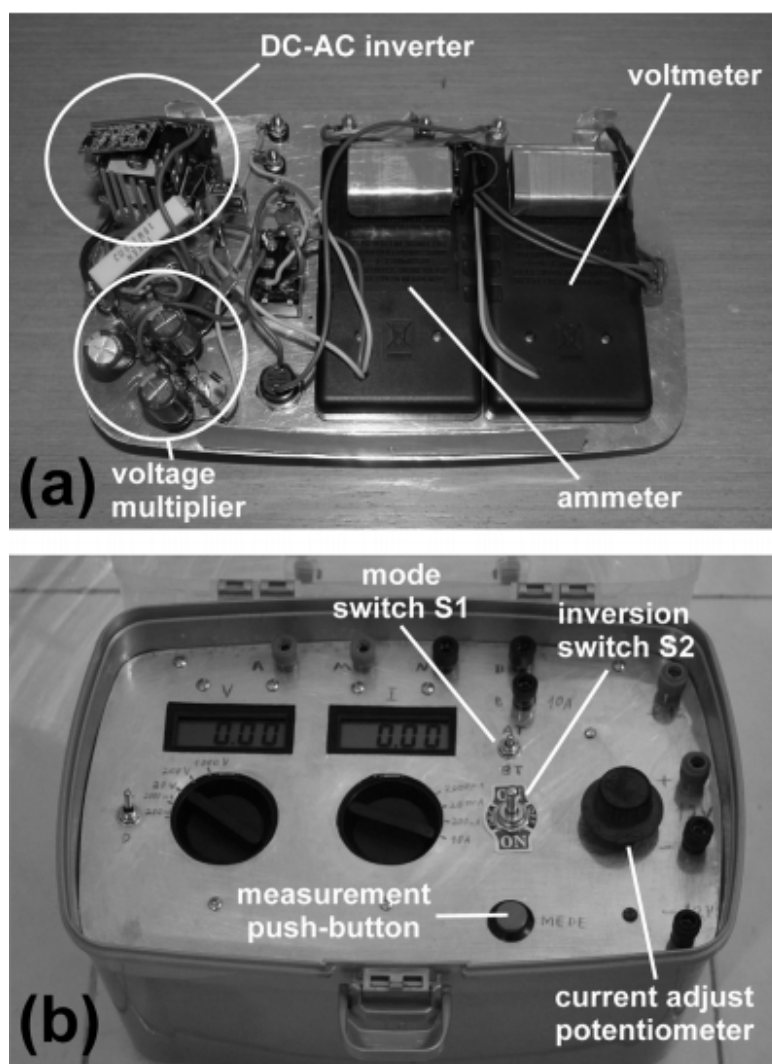


Figura 4.23: Construção e teste do protótipo de um resistivímetro de baixo custo. A disposição final dos principais dispositivos no chassi (a). Observe o circuito do inversor DC-CA, o multiplicador de tensão e os medidores. A caixa plástica do resistivímetro e seus principais controles e chaves são mostrados em (b).

Fonte: Adaptado de FOLLY e SENRA (2016).

O projeto visou desenvolver um equipamento de fácil operação e conseguiu gerar resultados convincentes, apesar de sua simplicidade. Do ponto de vista pedagógico, esse equipamento permite aulas práticas para estudantes de geofísica aplicada a um custo muito baixo. De forma, o uso de tal dispositivo melhora a motivação dos alunos em cursos que normalmente envolvem apenas conteúdo teórico sem qualquer tipo de trabalho de campo associado. Uma versão mais sofisticada do dispositivo está sendo desenvolvida,

e incorporará recursos automatizados para cancelar o efeitos de correntes naturais e potenciais de eletrodos durante as medições, assim como conseguir operar vários eletrodos com comutação eletrônica integrada e dados computadorizados para pesquisa aquisição de resistividade 2-D e 3-D (FOLLY e SENRA, 2016).

#### **4.10.4 Desenvolvimento de Resistivimetro de baixo Custo para Monitoramento Ambiental**

A ideia desde projeto é construir um resistivimetro multi-eletrodo portátil de baixo custo capaz de realizar todas as funções necessárias, para analisar as propriedades elétricas dos materiais em subsuperfície com aplicação direta no monitoramento ambiental (SANTOS, 2014).

O instrumento (Figura 4.24), tem uma unidade central (unidade mestre) para programação, controle e armazenamento dos dados, e em cada um dos 24 eletrodos podendo ser ampliado para até 64 eletrodos (Figura 4.25-a). Possui um sensor receptor em cada eletrodo (unidade escravo), responsável por adquirir os dados e transmitir para a unidade central. Essas unidades receptoras possibilitam a diminuição do número de cabos utilizados bastando ligar os sensores acoplados em cada eletrodo, em paralelo (Figura 4.25-b) facilitando a montagem do arranjo. Esse protótipo possui um sistema programável contando com um ecrã, botões direcionais (para cima, para baixo e enter) e numéricos usados para edição do programa e navegação.

Foram feitos teste de campo comparando os resultados obtidos com um resistivimetro comercial modelo Syscal-Pro da empresa Iris.

Os resultados então obtidos com o equipamento em ensaios mostraram uma variação de 17% entre em comparação a resistivimetro comercial, evidenciando o bom funcionamento do equipamento desenvolvido (SANTOS, 2014).



Figura 4.24: Painel frontal do resistivímetro montado em uma caixa light de passagem.  
 Fonte: Adaptado de SANTOS (2014).

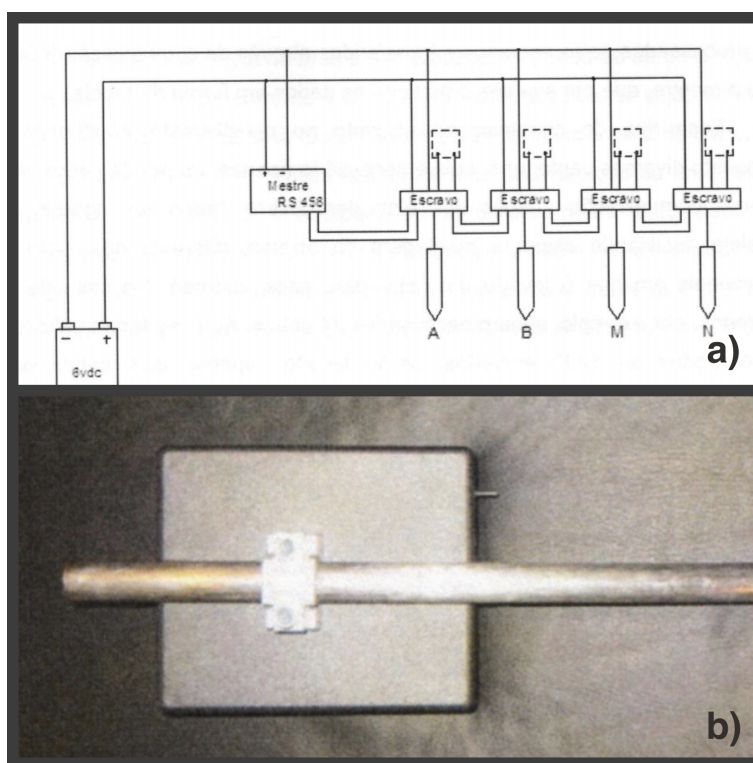


Figura 4.25: a) Diagrama esquemático da arquitetura básica do sistema desenvolvido, com a unidade mestre e as unidades escravo ligadas em um arranjo dipolo com 4 eletrodos. b) Sensor (unidade escravo) fixado a haste eletrodo ligados em série.  
 Fonte: Adaptado de SANTOS (2014).

#### 4.10.5 OhmPi: Um registrador de dados de fonte aberta para aplicações dedicadas de imagens de resistividade eléctrica à escala pequena e laboratorial

Esse é o trabalho mais recente e mais próximo conceitualmente que aborda esse tema de desenvolveu um medidor de resistividade de *hardware* e *software* aberto de baixo custo, para divulgar o método a parti de uma ferramenta robusta e flexível em experimentos em pequena escala. O projeto recebeu o nome de **OhmPi** (Figura 4.26), por usar a *singler board computer* Raspberry py em seu Hardware, associadas a um multiplexador que permite realizar medições automáticas com até 32 eletrodos.

O pensamento do Ohmpi é disponibilizar um novo medidor de resistividade multieletrodo com 64 eletrodos, que pode ser atualizado para 128 eletrodos. É limitado a injeção de baixa corrente, mas adequado para pequenos experimentos de laboratório e monitoramento de lapso de tempo de campo pequeno. Ohmpi, é desenvolvido por uma equipa que procura partilhar toda a sua experiência e pretende melhorar e oferecer uma ferramenta cada vez mais robusta à comunidade (CLEMENT *et al.*, 2020b).

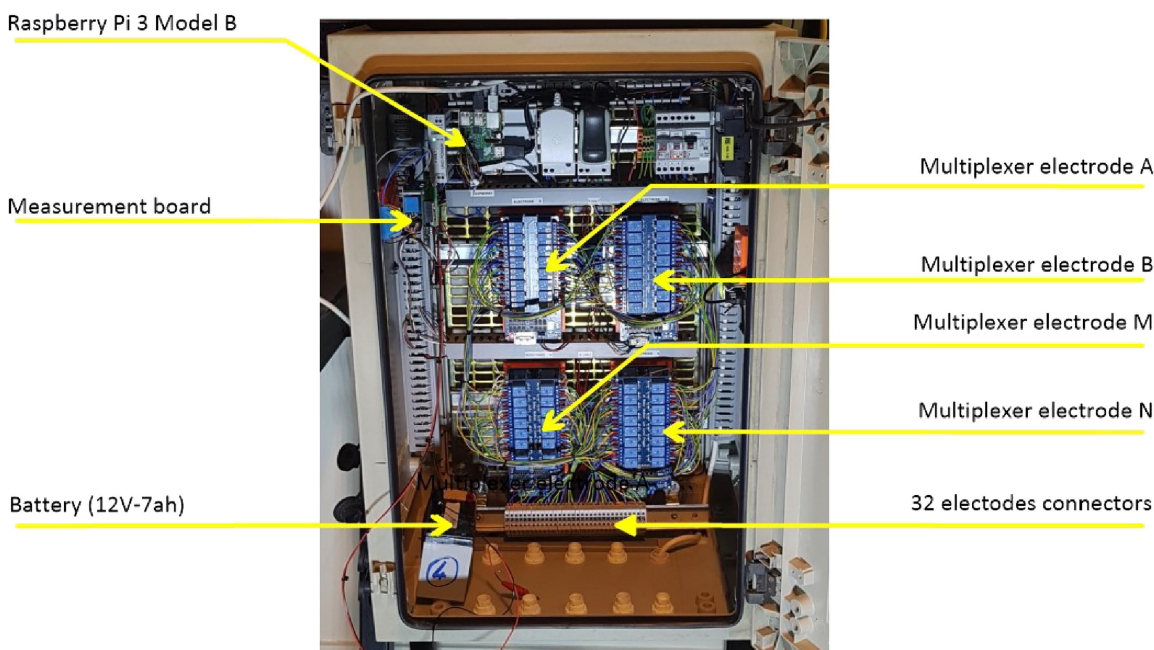


Figura 4.26: Layout de medidor de resistividade OhmPi de laboratório.

Fonte: Adaptado de CLEMENT *et al.* (2020a).

Como a proposta é divulgar esse projeto, o autor também desenvolveu uma página web com a descrição detalhada da lista de materiais e a forma de construção e montagem do projeto (Figura 4.27). OhmPi é apenas uma primeira etapa no processo geral de desenvolvimento que o autor buscou realizar. Novos avanços com o instrumento estão previstos para futuras versões que contaram no desenvolvimento de uma placa com 64 relés para



limitar a fiação e simplificar a montagem de um eletrodo de 64 medidor de resistividade.

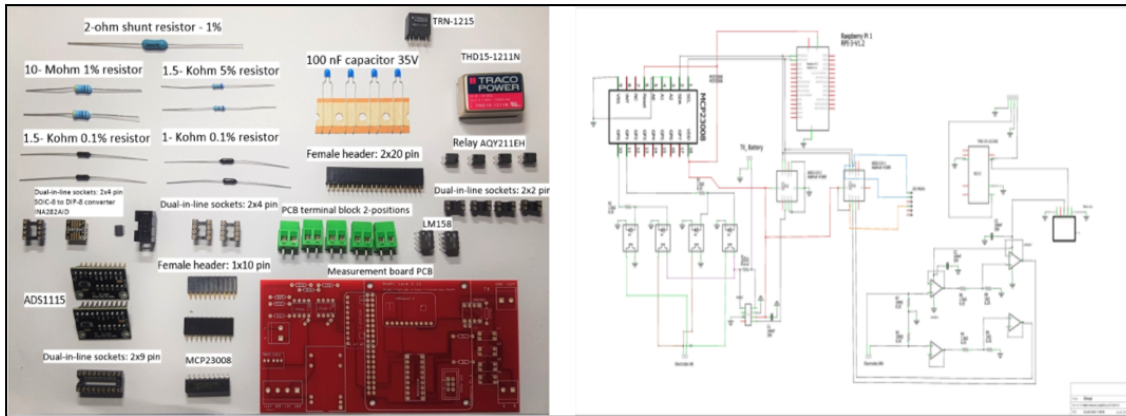


Figura 4.27: Montagem da placa de medição e componentes necessários. Todos os componentes necessários para construção do projeto e a forma de montagem estão disponíveis no site.

Fonte: Adaptado de CLEMENT *et al.* (2020b).

## 4.11 Georesistivimetro Comerciais

Os medidor de resistividade de nível profissional usado para realizar pesquisas de tomografia de resistividade elétrica (ERT) conhecidos como resistivimetro, são equipamentos sofisticados e substancialmente caros que possuem várias aplicações em diversas áreas do conhecimento, tais como: exploração de recursos energéticos, detecção de intrusão da água do mar em sistemas aquíferos, investigação de recursos minerais metálicos e não metálicos, águas subterrâneas, mapeamento e pesquisa geológica, detecção de poluentes subterrâneos, pesquisa arqueológica, monitoramento em tempo real de deslizamentos de terra e barragens de rejeitos, estudo para projetos de engenharia urbana, levantamentos de superfície ou subaquáticos, exploração de cavernas e alicerces.

O princípio de funcionamento do equipamento (Figura 4.28), e o mesmo para todos os modelos disponíveis no mercado, ou seja, uma fonte de injeção de corrente, eletrodo transmissor, eletrodo receptor, leitura da diferença de potencial nos eletrodos receptores, cabo e bobinas TELFORD *et al.* (1990). Como fonte alimentação utiliza bateria de automóvel ou mesmo gerador de tensão.

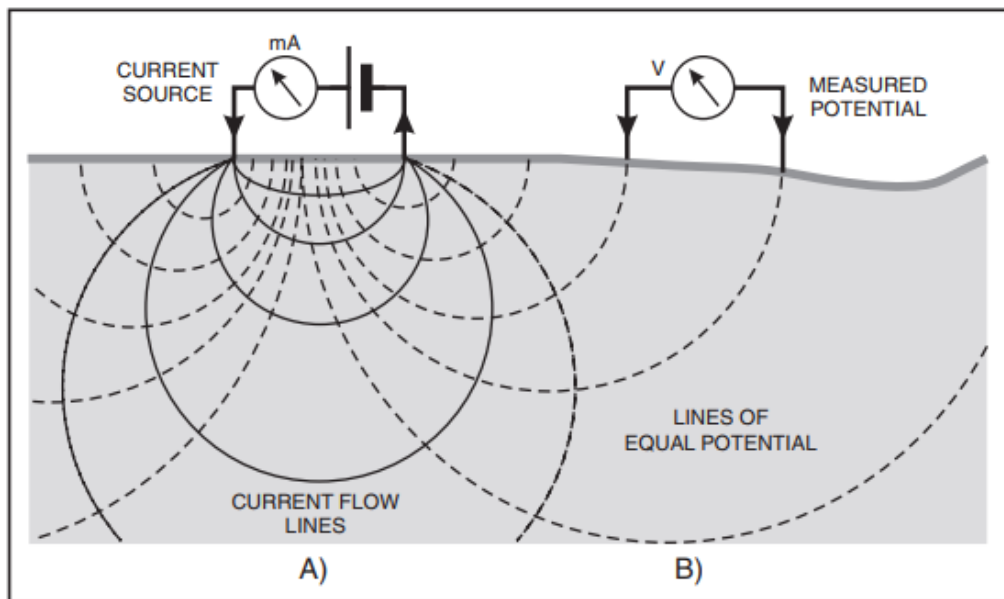


Figura 4.28: Injeção de corrente no eletrodo transmissor e leitura da diferença de potencial nos eletrodos receptores.

Fonte: Modificado de BECKER (2003a).

#### 4.11.1 Características Funcionais dos Comerciais

A maioria dos instrumentos medidores de resistividade utilizam corrente alternada de baixa frequência, preferencialmente aos de corrente contínua, por duas principais razões KEAREY *et al.* (2009).

- A corrente contínua propiciará um aumento do acúmulo ânions ao redor do eletrodo negativo e cátions ao redor do eletrodo positivo, ocasionando uma polarização eletrolítica KEAREY *et al.* (2009). Para evitar os efeitos da polarização eletrolítica causada por corrente unidirecional, a polaridade deve ser revertido periodicamente TELFORD *et al.* (1990). O uso de corrente alternada anula esses efeitos;
- A utilização de corrente alternada combate o efeito causado por correntes elétricas telúricas que possuem tem uma frequência extremamente baixa e propagam-se em grandes áreas ou perto da superfície da Terra.

A maioria dos instrumentos de resistividade multi-eleto do são instrumentos de um canal e, fazem uma leitura para cada injeção de corrente (Figura 4.29a). Quanto mais canais possuir o instrumento maior o número de leituras (Figura 4.29b), para cada injeção de corrente, portanto, diminuindo substancialmente o tempo para aquisição de dados em campo.

Além das pesquisas normais realizadas com os eletrodos na superfície também é possível realizar pesquisas subaquáticas e em poços de perfilagem. O equipamento é apenas

uma ferramenta do processo, depende de um software de inversão para calcular os valores da resistividade das mesmas estruturas geológicas em subsuperfície. O software interpreta por métodos numéricos (diferenças finitas e elementos finitos) os dados do levantamento topográfico, para gerar o imageamento transversal da região em estudo.

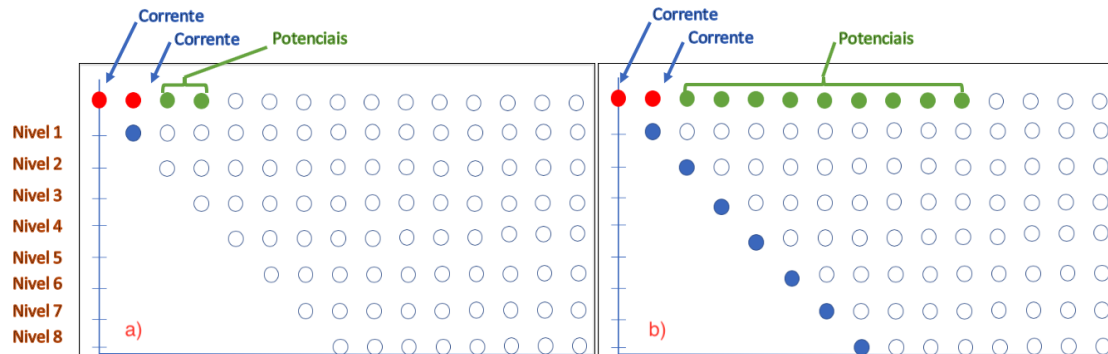


Figura 4.29: Representação do funcionamento de um instrumento que opera com um canal (a) e outro que opera com oito canais (b) em um arranjo de eletrodos dipolo-dipolo.  
 Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma dos equipamentos mais populares da fabricante norte-americana *Advanced Geosciences Inc* (AGI) é o **SuperSting R8** (Figura 4.30-b). Segundo (INC, 2019), esse instrumento consegue adquirir dados de perfil ou sondagens de resistividade empregando o uso de múltiplo eletrodo programável capaz de adquirir 1000 de leituras com uma única configuração de arranjo. É um sistema formado por 84 eletrodos de modo duplo ativo com espaçamento de 5,25 metros pode atingir 100 metros de profundidade. O mesmo sistema pode ser configurado para detalhar representação de resistividade elétrica 3-D da subsuperfície, em função de um software proprietário muito completo. A unidade é programável para múltiplas configurações de arranjo, como Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Pólo-Dipolo, Pólo-Pólo ou definido pelo usuário.

Em concorrência aos instrumentos importados a fabricante nacional Auto Energia, localizada na cidade Alvinópolis M.G., fabrica equipamentos de Geofísica, robustos e voltados a trabalho em campo. São vários modelos fabricados, dentre esse o X7XTAL 500 MULTPOINT 16 (Figura 4.30-a), embora não possua uma sofisticação comparado ao SuperSting da AGI, tem a proposta de ser mais acessível e robusto. Possui um sistema de operação manual possibilitando a critério do operador em campo para escolher as combinações necessárias ao seu método de trabalho. implementação de qualquer tipo de arranjo. Vem em uma versão com 16 ou 32 eletrodos.

Os instrumentos para aquisição de dados por meio da eletrorresistividade podem ser divididos em duas categorias **Operação manual:**

- Mais trabalhosos exigindo uma maior dedicação do operador;





Figura 4.30: a) Modelo X7XTAL 500 MULTPOINT 16 da Alto Energia. b) SuperSting R8/IP.

Fonte: Elaborado pelo auto.

Tabela 4.5: Tempo de medições calculado utilizando os resistivímetros da AGI modelos R1/IP opera um canal e o R8/IP que opera oito canais.

Configuração	28 Eletrodos			56 Eletrodos		
	Pontos	R1/IP	R8/IP	N de pontos	R1/IP	R8/IP
Wenner	117	18 min	18min	495	1.3hr	1.3hr
Schlumberger	171	27min	9min	842	2.2hr	37min
Dipolo-dipolo	237	37min	7min	762	2.0hr	26min
Polo-dipolo	378	59min	9min	1540	4.0hr	34min

Fonte:AGIINC (2019).

- Impossibilitando aquisição de um grande número de dados por causa do tempo gasto no manejo do equipamento;
- Não possuem software para tratamento dos dados;
- Seu preço é normalmente os mais baixos que qualquer instrumento usado em estudos de prospecção.

#### Operação automática:

- São totalmente configuráveis;
- Maior volume de dados por tempo de trabalho;
- Geralmente possuem software proprietário, exige um operador especialista para operar o equipamento;

- São muito mais caros que o equipamento manual.

Tabela 4.6: Comparamos dois instrumentos muito utilizados no Brasil, o modelo X7XTAL 500 MULTPOINT 16 da empresa nacional fabricante de equipamentos de automação industrial AutoEnergia e o SuperSting R8/IP da empresa americana Advanced Geosciences, Inc. (AGI)

Resistivímetro	X7XTAL 500	SuperSting R8/IP
Operação	Manual	Automático
Espaçamento selecionável	Configuração manual	Programável
Roll-along embutido	Não possui	Programável
Desativa eletrodos	Configuração manual	Programável
Acesso remoto	Não possui	Por PC
Transferencia dos dados	Manual	Via USB ou serial
Número de canais	Um canal	Opera 8 canais
Software	Não possui	AGI Soft.
Custo em 2019	R\$ 61.000	R\$ 550.000

Fonte: AGI e AutoEnergia,2019.

A análise comparativa foca em aspectos operacionais que são o motivo dessa dissertação. Cada resistivímetro exposto acima se mostraram qualificados para empregos no levantamentos geoeletricos pela qualidade das medidas obtidas. No próximo tópico descreveremos a metodologia adotada para o desenvolvimento desse projeto.

# Capítulo 5

## Metodologia

O principal impasse para o uso de resistivímetro comerciais nas mais plurais frentes de pesquisas, está no custo do equipamento, considerando que muitos equipamentos são importados, torna-se plausível a iniciativa de pesquisadores de desenvolver essas mesmas ferramentas manufaturados artesanalmente para a obtenção, precisão e conformidade satisfatório comparados aos equipamentos comerciais (OLIVEIRA, 2017).

Outra questão além de seu custo, envolve ao acesso de suas especificações e parâmetros de implementação, o que significa na impossibilidade de manutenção fora do fabricante ou personalização de hardware e software (OLIVEIRA, 2017).

Tendo em vista os diversos benefícios, detalharemos neste capítulo a utilização de **tecnologias livres** para o desenvolvimento do protótipo conceitual, apresentando os requisitos a serem implementados, tais como o uso de componentes *open source*, que possibilitem a adaptação e padronização de interfaces de usuário, integração com outros *softwares*, resultando em uma flexibilidade e redução de custos, pois outros *softwares* podem ser reusados e algoritmos específicos de usuários ou aplicações podem ser integradas, viabilizando a construção do instrumento compatível com equipamentos comerciais (OLIVEIRA, 2017).

### 5.1 Projeto Mecânico e Eletrônico

A concepção básica deste projeto é desenvolver um equipamento capaz de realizar todas as funções necessárias para análise e interpretação de um parâmetro físico, através do método da eletrorresistividade. Para isso, o projeto introduzirá o conceito de hardware **modular**, composto por um **Single Board Computer, Microcontrolador e Circuito Eletrônico** (Figura 5.2), em sua organização estrutural, proporcionando uma implementação generalizada de tecnologias, facilitando a aquisição, manutenção e personalização

do equipamento. Dessa forma, buscando maximizar o desempenho enquanto permanece nas restrições de custo, consumo de energia, disponibilidade de componentes.

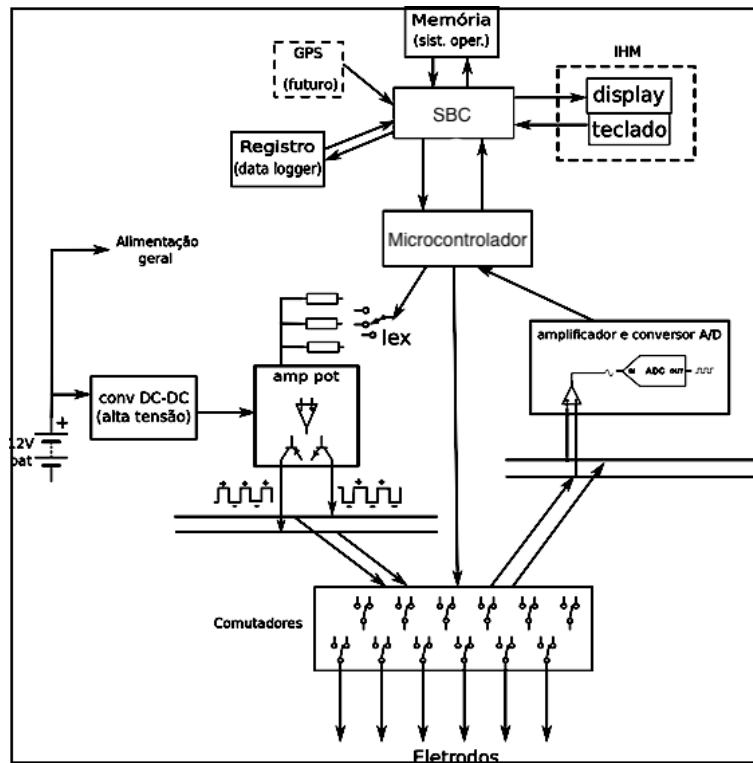


Figura 5.1: Diagrama em blocos do resistivímetro proposto  
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.2 Unidade Computacional

Com o avanço da microcomputação tornou-se possível introduzir tecnologias que tivessem as características citadas acima, fornecendo confiabilidade, desempenho e pouco consumo de energia. O propósito de utilizar esse componente está na possibilidade de desenvolver uma interface gráfica que possibilite uma interação completa entre o instrumento e o usuário, como será demonstrado mais adiante.

Neste sentido, utilizaremos uma *Single Board Computer* (SBC), sistemas inteiros em um circuito integrado, que integra em um circuito a *Central Process Unit* (CPU), *Graphics Processing Unit* (GPU), Memória, entrada / saída (E/S) e outros recursos necessários para um microcomputador (GREAVES, 2011). Essencialmente são dispositivos dedicados a executar aplicações específicas ou desempenhar múltiplas tarefas semelhante aos computadores domésticos com a vantagem de possuir baixíssimo consumo de energia, tamanho reduzido, custo e boa desempenho, e uma grande variedade de modelos que estão disponíveis no mercado em 2020 (Tabela 6.1).

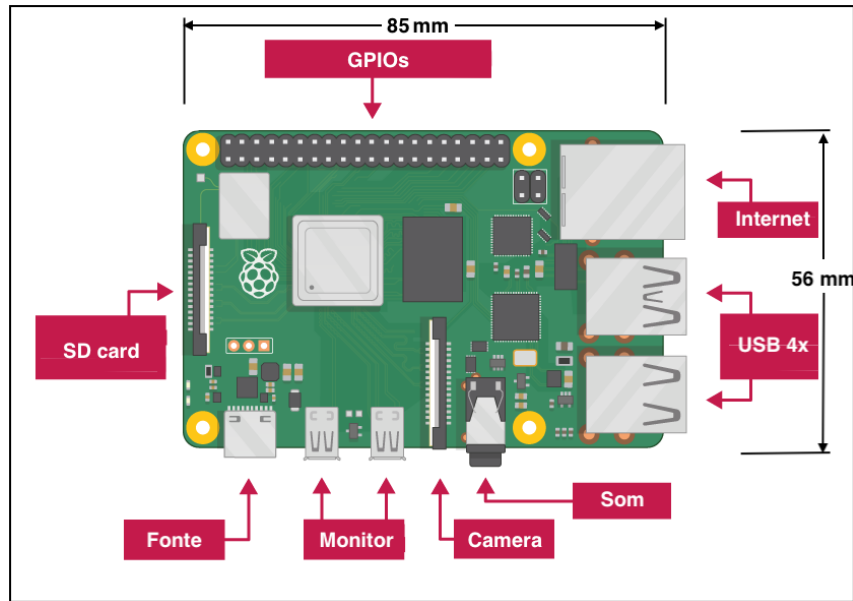


Figura 5.2: Esquema de uma SBC Raspberry Pi modelo 4 baseada na arquitetura ARM SoC de baixo consumo e bom desempenho e operação igual a de um computador doméstico. Ela tem um leitor de cartão onde o sistema operacional está instalado e várias portas USB. Possui também um grande número de conectores GPIO para poder desenvolver um grande número de projetos.

Fonte: Adaptado de NAVAS (2020).

Dentre os vários modelos de SBC, selecionou-se a Raspberry Pi 4 (RPi), por possuir todas as características necessárias para realização do projeto. Conforme o Raspberry Pi Foundation, a SBC da empresa fornece uma experiência de *desktop* completa, ou seja, pode editar documentos, navegar na web, planilhas ou apresentação. Para conseguir realizar tantas atividades, o RPi possui um sistema operacional baseado no Kernel do Linux e utiliza um microprocessador BCM2711 ARM cortex A72 quad-core 1,5 Ghz, e alimentação de 5V DC (3A).

Uma das características mais poderosa da RPi é a barra de GPIO<sup>3</sup> de entrada/saída que permitem a comunicação entre dispositivos eletrônicos ligados à placa RPi, como ecrã LCD, sensores diversos, automação e periféricos (Apêndice B, Figura 7.2). Dentre as interfaces de comunicação serial mais importantes, pode-se enumerar:

- **I2C (Inter-Integrated Circuit):** esse tipo de comunicação permite se conectar e conversar com dispositivos de baixa velocidade, como microcontroladores, conversores A/D e D/A, sensores. Sua comunicação é feita entre um dispositivo que comanda o barramento e um dispositivo que responde a um comando enviado pelo mestre ligados a um barramento de 2 fios (HEMMANUR, 2009).
- **SPI (Serial Peripheral Interface Bus):** os dispositivos se comunicam no modo mestre ou escravo, onde o dispositivo mestre inicia o quadro de dados de comu-

<sup>3</sup>GPIOs: são os pinos gerais de entrada e saída. O nível de saída é de 3.3V e um máximo de 50mA.

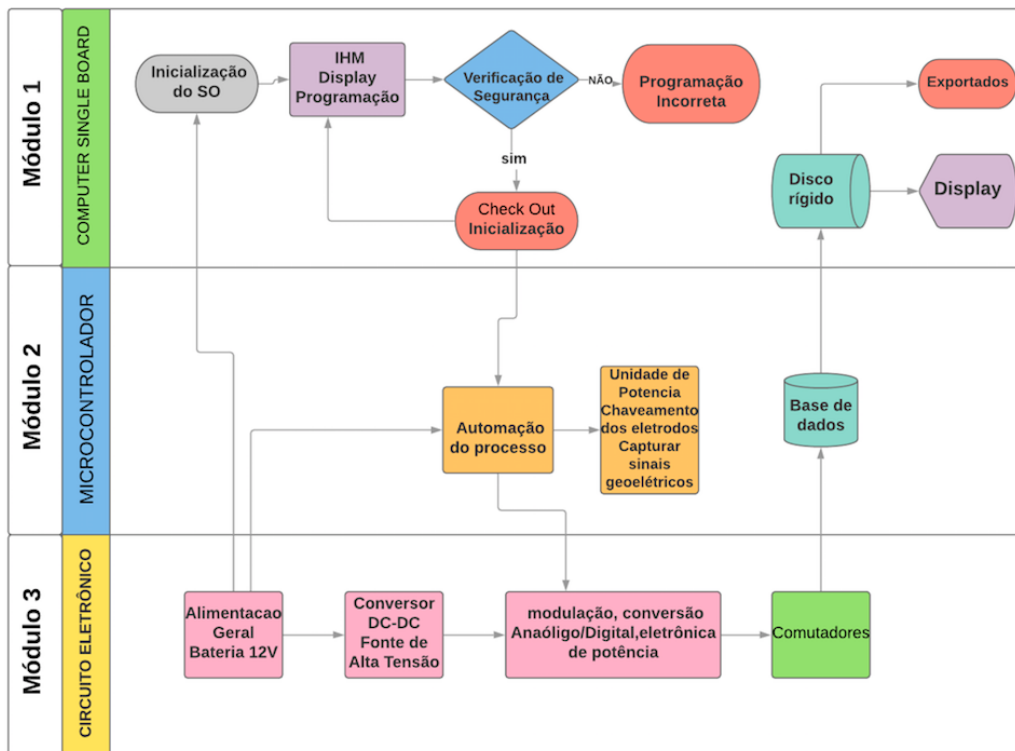


Figura 5.3: Organização da estrutura interna do instrumento de tomografia de resistividade elétrica. Módulo 1 - Processamento dos Dados: responsável pelo processamento dos dados, cujas funções são desempenhadas por um SBC (*Single Board Computer*), responsável pela inicialização do sistema, interface homem máquina (IHM), configuração, verificação de segurança, acionamento, visualização, mecanismos de E/S, integração com outros sensores e pré-processamento dos sinais geoeletricos. Módulo 2 - Automação do processo: controlado por um microcontrolador responsável pela unidade de potência, rotina do arranjo definida no módulo 1, chaveamento dos eletrodos, captura dos sinais geoeletricos, base de dados temporário. Módulo 3 - Esta unidade conterá: circuitos de chaveamento eletromecânico, demodulação, conversão analógico/digital, eletrônica de potência e fonte de alta-tensão. Estes circuitos permitirão definir as diferentes frequências das tensões AC aplicados nos eletrodos e a forma destas ondas da tensão AC. Esta unidade será conectada ao módulo 2, à fonte de energia e aos eletrodos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

nicação, tornando-se um barramento de interface comumente usados para comunicação com memória *flash*, sensores, relógios em tempo real (RTCs), conversores analógico-digital e muito mais (EWA, 2020).

- **UART (Universal Asynchronous Receiver/Trasmitter):** é um protocolo de comunicação de *hardware* que usa comunicação serial assíncrona com velocidade configurável. Assíncrono significa não haver sinal de *clock* para sincronizar os *bits* de saída do dispositivo de transmissão que vai para a extremidade de recepção. Apenas dois fios são necessários para transmitir dados entre dois *UARTs*. Os dados fluem do pino Tx do UART de transmissão para o pino Rx do UART receptor (GUPTA, 2019).

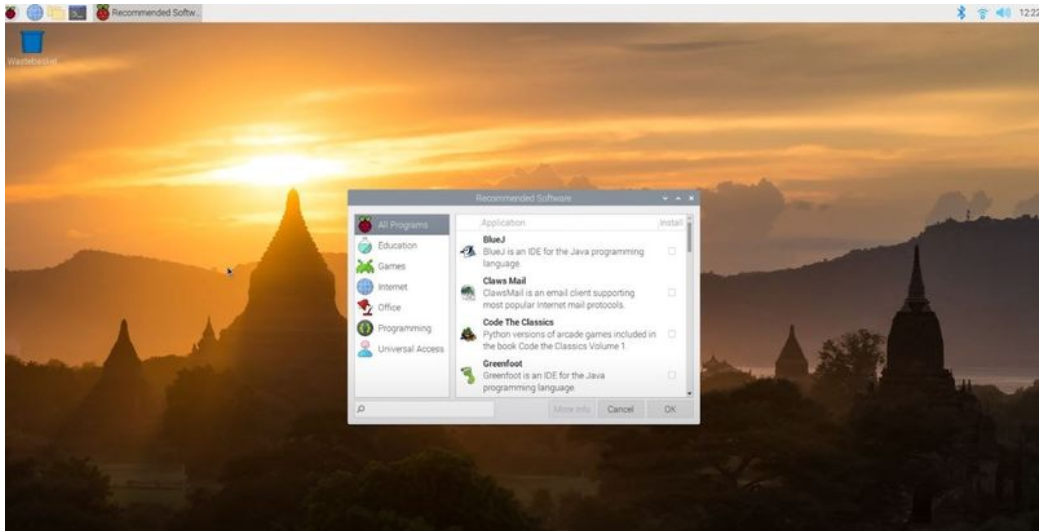


Figura 5.4: O sistema operacional Raspberry Pi OS é baseado em uma distribuição GNU / Linux, especificamente no Debian, possibilitando ao usuário uma experiência desktop completa.

Fonte: Adaptado de NAVAS (2020).

Para essa plataforma proposta, a SBC será o principal sistema que possibilitará aos desenvolvedores implementarem inúmeras funcionalidades ao instrumento, além de propiciar integração de outros sensores e dispositivos ao equipamento. Outro aspecto promissor desse protótipo está em sua interface homem máquina (IHM) ou interface do usuário (Figura 5.5-a), dirigente da entrada e saída de informações no sistema. Essa IHM possibilita ao usuário pode configurar o sistema e visualizar os dados sem a necessidade de um computador auxiliar (Figura 5.5-b).

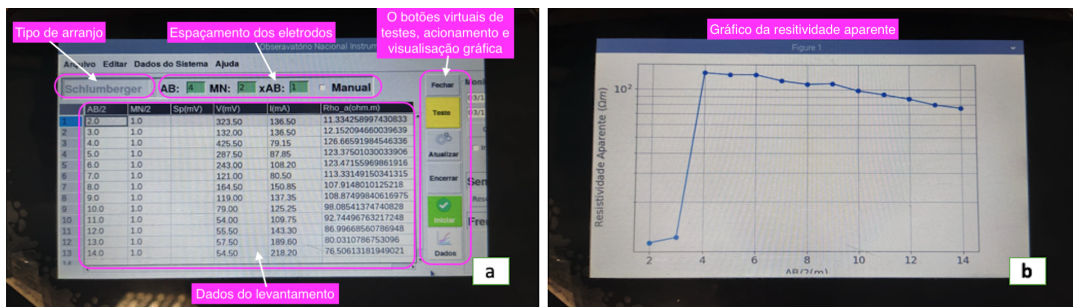


Figura 5.5: Unidade computacional rodando interface homem máquina para configuração do georesistivímetro demonstrando a captação de dados geoeletricos (a). Demonstração de implementação gráfica baseado em dados obtidos em um levantamento de campo, relacionando a resistividade aparente  $\rho_a$  as aberturas dos eletrodos de injeção AB/2 (b).

Tabela 5.1: Melhores computadores de placa única que estão disponíveis no mercado em 2020.

SBC	Processador	Memória	Preço
Rock64 Media Board	Rockchip RK3328 (4x Cortex-A53 @ 1.5GHz)	1GB, 2GB, or 4GB	\$ 25
Rock Pi 4 Modelo B	Rockchip RK3399	64bit dual channel	\$ 35
Raspberry Pi Zero W	Broadcom BCM2835	512 MB SDRAM	\$ 10
PocketBeagle	Octavo Systems	512MB RAM	\$ 25
Pine A64-LTS	4 x Cortex-A53 a 1,2 GHz)	2 GB DDR3	\$ 50
Orange Pi Plus2	Cortex-A7 a 1.6GHz	2GB DDR3	\$ 67
Onion Omega2Plus	580 MHz MIPS	128 MB	\$13
LattePanda	Quad Core 1.8GHz	2GB DDR3	\$119

Fonte: Adaptado de 3D (2019).

### 5.3 Unidade de Automação do Processo (Microcontrolador)

De acordo com VIDAL (2008), um microcontrolador (Figura 5.6), é um pequeno componente eletrônico, dotado de uma “inteligência” programável, utilizado no controle de processos lógicos, integrados capazes de receber dados, interpretá-los e enviar os resultados a saídas pré-definidas (SILVA *et al.*, 2013).

É a unidade responsável pela automatização integrado ao circuito como um subsistema inter-relacionado com o SBC, para desempenhar atividades singulares (atividades de controle que não precisam ser muito rápidas, nem tampouco ter um conjunto de instruções extensas e um grande desempenho), como o controle dos dispositivos de entrada e saída de informações, por possuir elementos adicionais que o integram, como memória de leitura e escrita para armazenamento de dados (SANTOS, 2014). A grande vantagem deste componente está na possibilidade do desenvolvimento rápido de sistemas eletrônicos com o emprego de um pequeno número de componentes (LIMA e VILLAÇA, 2012).

Dessa forma, o microcontrolador será responsável pela lógica e armazenamento temporário do sinal geoeletrico (SANTOS, 2014), por um algoritmo desenvolvido especificamente para essa função. Outra atividade exclusiva desse componente será o controle da unidade de potência, rotina do arranjo, chaveamento dos eletrodos, circuitos de chaveamento eletromecânico, demodulação, eletrônica de potência, fonte de alta-tensão e enviar/recebe as informações via comunicação serial para a SBC (Módulo 2). A automatização dos comutadores controlara as ações, que têm que trabalhar em tempo real utilizando relés eletromecânicos que vão direcionar a passagem de corrente nos eletrodos tanto de injeção, retornando o sinal geoeletrico ao conversor digital analógico.



*Graças à sua versatilidade e baixo custo, os microcontroladores programáveis são muito utilizados em indústrias para diversas categorias de controles, pois possibilitam várias configurações, podendo trabalhar com entradas digitais, entradas analógicas, saídas digitais, saídas analógicas etc (SANTOS, 2014).*

O microcontrolador utilizado para desenvolvimento desse projeto foi o ATmega328 por ser compacto e apresentar uma memória *flash* maior comparado aos microcontroladores AVR com o mesmo número de pinos (LIMA e VILLAÇA, 2012). As principais características do ATmega328 são: microcontrolador de baixa potência, 32 kbytes de memória de programa flash de auto programação In-System, 1 kbytes de memória EEPROM, 2 kbytes de memória SRAM, ciclos de escrita e apagamento: memória flash 10 mil vezes, EEPROM 100 mil vezes, 23 entradas e saídas (I/Os) programáveis, 6 canais PWM, 8 canais AD com resolução de 10 bits na versão TQFP (Thin profile plastic Quad Flat Package) e 6 canais na versão PDIP (Plastic Dual Inline Package), Interface serial, compatível com o protocolo I2C, USART, SPI Master/Slave, 6 modos de Sleep: Idle, Redução de ruído do ADC, Power-down, Powersave, Standby e Extended Standby, tensão de operação: 1,8 - 5,5 V, o barramento de dados é de 8 bits, caracterizando o número de bits do microcontrolador.

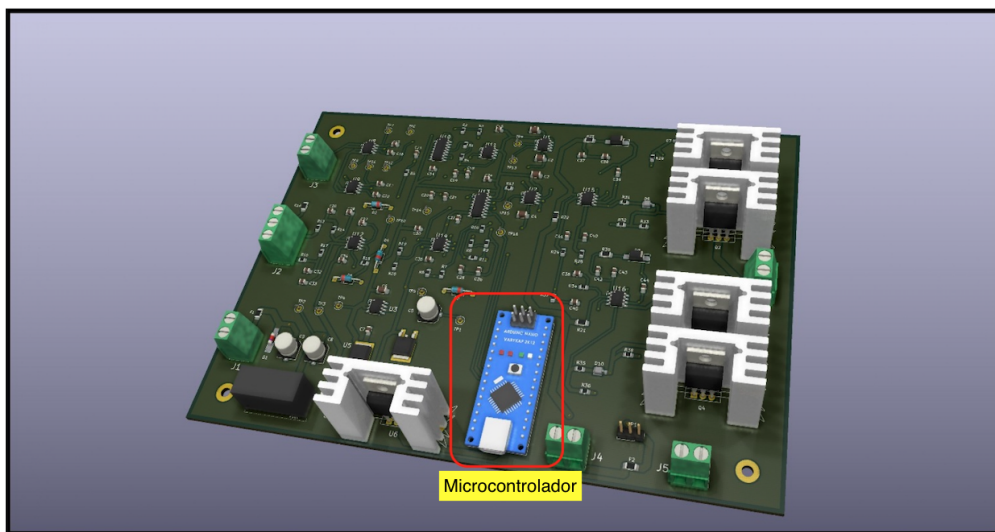


Figura 5.6: Microcontrolador acoplamento via barra de pinos fêmea ao circuito eletrônico para facilitar uma eventual substituição da placa.

## 5.4 Fonte Elétrica

Além do processamento de dados (SBC) e operacionalidade de todos os componentes do instrumento (microcontrolador), o método de eletrorresistividade que é um procedimento de injeção de corrente elétrica seguido pelo registro da leitura da d.d.p medido no solo (sinal analógico gerado), dependendo de uma fonte elétrica, neste contexto, para a montagem da plataforma está sendo utilizado uma bateria de 12V com 7,2Ah, como fonte de energia para alimentação do instrumento e tensão para os eletrodos de injeção de corrente. No caso do resistivímetro, a corrente elétrica vai ser controlada variando-se a tensão com um variador de potência programável podendo gerar uma potência de saída de até 400W. Essa seleção é feita na conjectura da área investigada, pelo equipamento automaticamente para detectar possíveis problemas de conexão com os eletrodos e também pré-estabelecer os níveis de corrente a serem utilizados (SANTOS, 2014).

## 5.5 Circuito Eletrônico

O esquema do circuito eletrônico (Figura 5.7), desempenhará toda a dinâmica funcional do protótipo. Ao ser inicializado o microcontrolador gera dois sinais de sincronismo I-sync e V-sync, responsável pela temporização dos circuitos que processam as informações para a transmissão do sinal de tensão e corrente associados ao **processo de demodulação do sinal portador da informação original**, que segundo HAYKIN e MOHER (2011), o receptor recria o sinal da mensagem original a partir de uma versão degradada do sinal, transmitido depois da propagação.

O propósito é empregar um sinal de mensagem da fonte, estando fonte e o usuário fisicamente separado, em um formato perceptível ao usuário destinatário, utilizando-se um processo conhecido como demodulação, o qual é o inverso do processo é a modulação. Entretanto, devido à inevitável presença de ruído e distorção do sinal recebido, temos que considera que o sinal recriado não se iguala ao sinal original dependendo da influência pelo tipo de esquema de modulação utilizada.

### 5.5.1 Sensor Transdutor de Corrente

A mensuração da corrente injetada no solo foi inicialmente feita pelo transdutor ACS712, mas devido à sua sensibilidade que em teste de bancada reproduziu uma forte ruído em correntes muito baixas, optamos pelo LTS 9-NP transdutor *multirange* de loop fechado que usa a tecnologia de efeito *Hall* para a medição eletrônica de correntes (DC, AC, pulsada, mista) numa faixa ampla de frequência (vários formatos de onda) e com to-

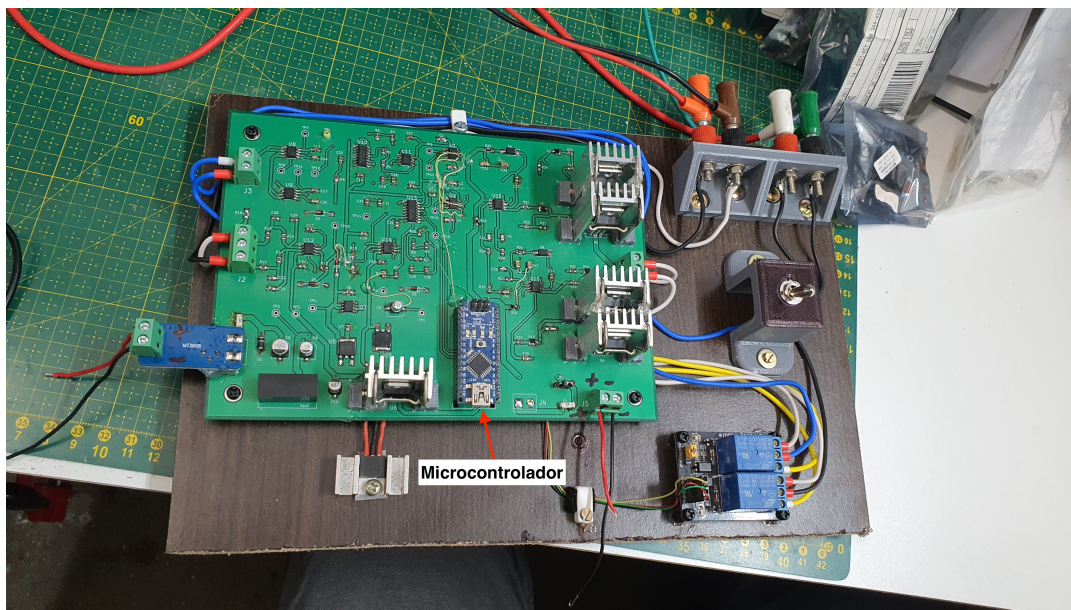


Figura 5.7: Circuito eletrônico do protótipo conceito.

tal isolamento galvânico entre o circuito primário e o circuito secundário. Esse transdutor usa uma fonte de tensão unipolar de 0 a 5 V, mantendo 2,5 V constante, ou seja, quando a um aumento da corrente expandido a tensão para 5 V e quando a corrente desse ele vai para 0 V. Na Figura 5.9-d o circuito dos transdutores foi colocado um ao contrário do outro de maneira que quando a corrente subir no primeiro transdutor, provocara a ocorrência de decaimento no segundo transdutor, ao mesmo passo do processo inverso.

As vantagens de usar o sensor de efeito *Hall* em medição de corrente está na capacidade para medir correntes DC e AC e, além disso, é muito confiável e fornece isolamento elétrico para o circuito de medição para segurança na operação (DRAFTS, 1996).

Como o método geométrico é um procedimento de injeção de corrente elétrica seguido pelo registro da medição, esse sinal será armazenado temporariamente na memória do microcontrolador. Para captar esse sinal o circuito eletrônico emprega dois circuitos integrados conversores analógico digital (Figura 5.10-b). A plataforma utiliza uma bateria veicular de 12 volts como fonte e está permitirá alimentação de todas as tensões necessárias para o funcionamento do sistema.

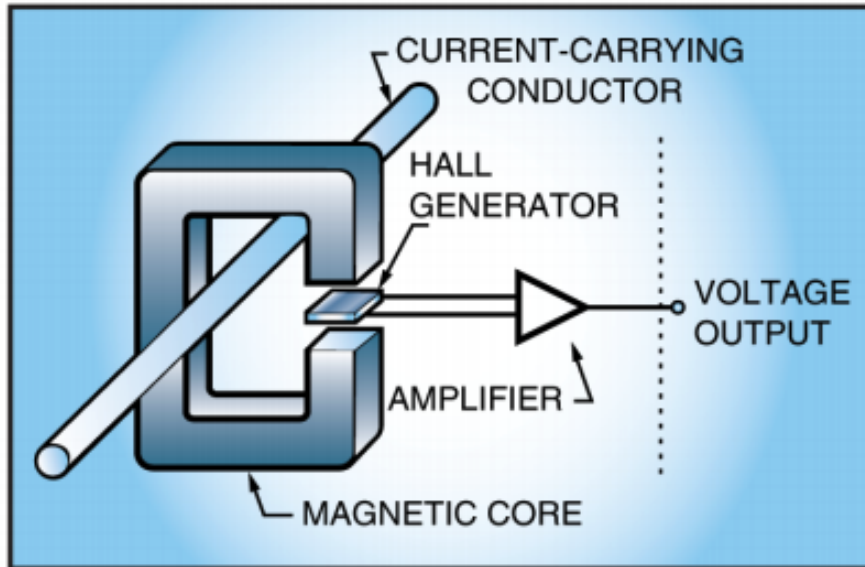


Figura 5.8: Na detecção de corrente por efeito *Hall* de circuito fechado, o circuito do driver conduz a bobina enrolada em oposição em série com o núcleo magnético, que mais tarde produzirá um campo opositor ao campo magnético produzido pela corrente. A saída do sensor é aterrada através de um resistor de detecção para completar o circuito. Isto opera o núcleo em fluxo quase zero, o que efetivamente elimina a dependência de linearidade do *Hall* gerador e núcleo magnético. A saída do sensor é proporcional ao número de voltas da bobina magnética essencial (LIU *et al.*, 2015).

Fonte: Adaptado de DRAFTS (1996).

### 5.5.2 Processamento de Sinais Digitais

Além do processamento, automação, armazenamento e emissão de corrente, também foi necessário um subsistema receptor do potencial entre os eletrodos de leitura. Para essa medição foi utilizado um sistema de processamento de sinais digitais (PSD), será responsável por converter sinais geoeletricos (carregam a informação), que estejam originalmente na forma analógica para a forma digital (Figura 5.11). O processo de transformação do sinal original deve ser aplicado para a remoção de interferência, ruído e outros componentes indesejáveis nos dados inerentes ao sinal medido (FLOYD, 2009; SMITH, 1997).

Em concordância com FLOYD (2009), um sistema de processamento de sinais digitais traduz um sinal analógico (sinal geoeletrico), que varia continuamente em uma série de níveis discretos. Essa série de níveis segue a variação do sinal analógico.

Em seguida, a aproximação é mensurada em códigos binários que representam cada degrau discreto da escada por um processo denominado conversão **analógico-digital** (A/D), aplicado em seguida em um DSP (processador de sinais digitais), que converte para um sinal digital. Para essa medição foi utilizado o MCP3550 (ADC) delta-sigma de 22 bits, de 2,7 V a 5,5 V de baixa potência e ruído de saída tão baixo quanto 2,5  $\mu$ VRMS, com um total erro não ajustado de 10 ppm. O ADC enviará os dados via protocolo SPI ao

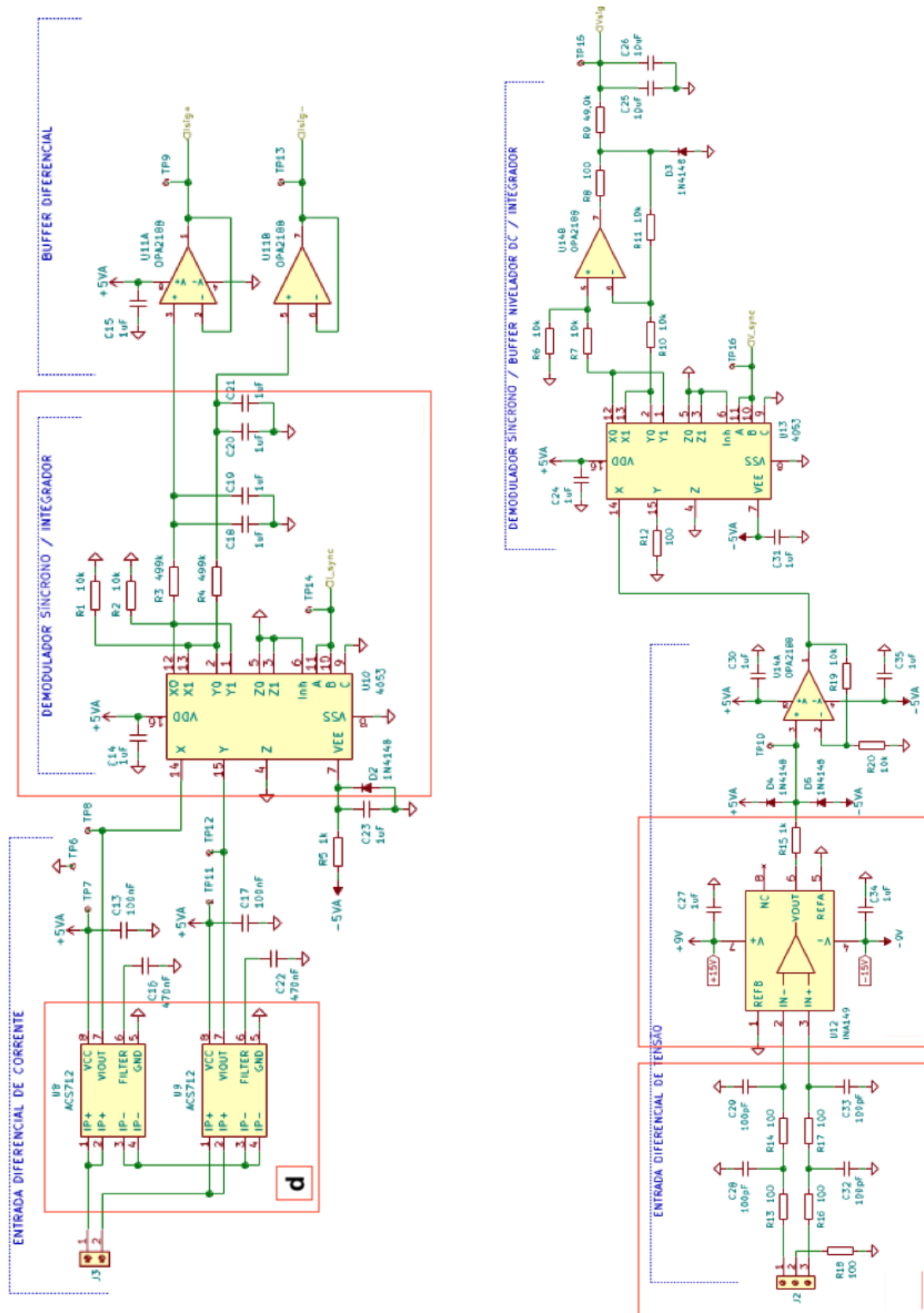


Figura 5.9: O circuito de detecção e entradas de corrente e tensão.

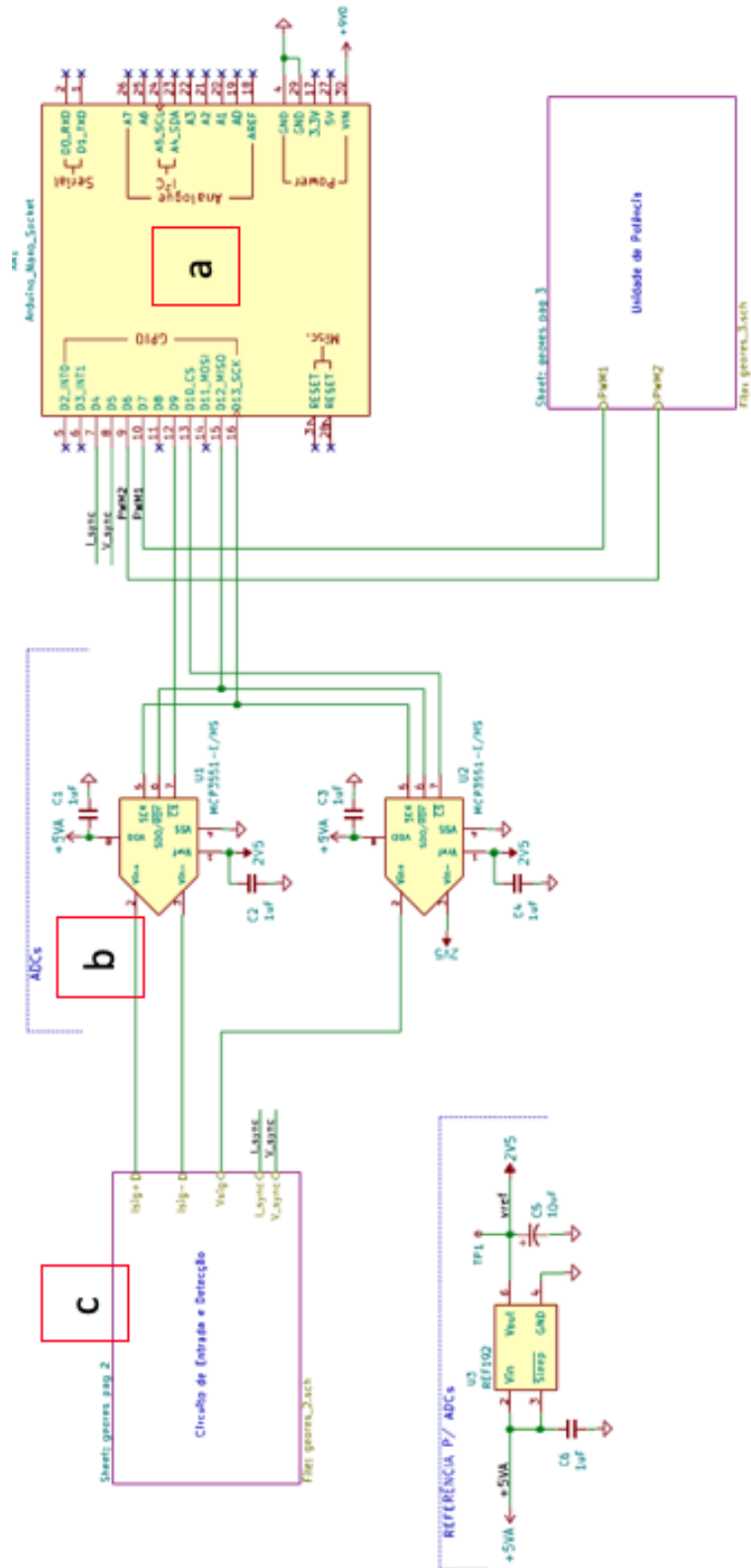


Figura 5.10: Esquema dos principais componentes do circuito desenvolvido para o protótipo. (a) microcontrolador, (b) conversores A/D e (c) circuito de entrada e detecção



microcontrolador que após o fim da rotina programada transfere os dados para o SBC.



Figura 5.11: Diagrama em bloco básico de um PSD. O segundo bloco anti-aliasing necessária para remover todas as componentes de frequência (harmônicas) do sinal analógico que excedem à frequência de Nyquist que é uma condição indesejada conhecida como aliasing. A amostragem, é imprescindível para o ADC ter tempo de processar aquisição de um número suficiente de valores discretos. A conversão analógico-digital pode ser feita usando um valor constante o qual corresponde ao tempo entre os pulsos de amostragem, sendo convertido para o formato codificado em binário, e em seguida aplicado em um PSD (FLOYD, 2009; SMITH, 1997).

Fonte: Adaptado de DRAFTS (1996).

## 5.6 Interface Homem Máquina (IHM)

A interface homem máquina ou interface do usuário é o responsável pela entrada e saída de informações no sistema. Essa interação também chamada *human-computer interaction* (HCI), proporcionou a popularização dos micro computadores nos mais diversos seguimentos da sociedade.

*A interface do usuário é a parte mais importante qualquer sistema de computador. Por quê? O sistema para a maioria dos usuários pode ser visto, pode ser ouvido e pode ser tocado. As pilhas de código de software são invisíveis, escondidos atrás de telas, teclados e do mouse. Os objetivos do design de interface são simples: tornar o trabalho com um computador fácil, produtivo e agradável (GALITZ, 2007).*

O planejamento do IHM é tão importante quanto a própria função do sistema, pois está diretamente relacionada com a usabilidade e a produtividade com que o usuário trabalha com computador. Podemos criar várias categorias de ferramenta que permitam ao usuário interagir com um programa desenvolvido a partir de uma linguagem de programação, como, por exemplo, o Java, PHP, Python, entre outras. Para o projeto do resistivímetro será desenvolvida uma IHM com a linguagem de programação *Python* na sua terceira versão.

*Python*<sup>3</sup> é uma linguagem de altíssimo nível (em inglês, *Very High Level Language*) orientada a objeto, de tipagem dinâmica e forte, interpretada e inte-

<sup>3</sup>Página oficial: <http://www.python.org/>.

*rativa. É um software de código aberto (com licença compatível com a General Public License<sup>4</sup> (GPL), porém menos restritiva, permitindo que o Python seja inclusive incorporado em produtos proprietários (BORGES, 2014).*

### **5.6.1 Interfaces Gráficas de Usuário com Tkinter**

A linguagem *Python* oferece várias bibliotecas disponíveis para o desenvolvimento *Web*, *Data Science*, IHM, usadas em aplicações modernas que requerem uma interação constante com o usuário. A linguagem inclui diversas estruturas de alto nível (listas, dicionários, data / hora, complexos e outras) e uma vasta coleção de módulos prontos para uso, além de *frameworks* de terceiros que podem ser adicionados (BORGES, 2014), ao código pelo programador facilitando a implementação e automatização de tarefas, como funções matemáticas, gráficos, tabelas, entre outras funcionalidades.

Alguns dos *frameworks* são:

- Desenvolvimento Web: Django, TurboGears, Zope e web2py.
- Interface gráfica: wxPython, PyGTK, PyQt e Tkinter.
- Processamento científico: Pandas, NumPy e SciPy.
- Processamento de imagens: PIL.
- Gráficos, visualizações estáticas, animadas e interativas: Matplotlib e SVGFig.

O *Tkinter* é uma biblioteca muito popular para o desenvolvimento de interfaces gráficas, pois proporciona ao programador a possibilidade de criar projetos com maior usabilidade do que interfaces textuais (linhas de códigos), podendo ser desenvolvidas aplicações com uma ou mais janelas, com elementos gráficos que servem para comandar ações, especificar parâmetros, desenhar e exibir gráficos.

Neste sentido foi desenvolvida um IHM utilizando o *Tkinter* como mostrado na Figura 5.12, baseados na experiência da utilização de outros equipamentos de soldagem geométrica, buscado reunir funcionalidades essenciais para programação e automação do protótipo conceito do resistivímetro. No próximo tópico trataremos das funcionalidades da interface.

### **5.6.2 Layout e Características Funcionais da IHM**

---

<sup>4</sup>General Public License: é a designação da licença de software para software idealizada por Richard Matthew Stallman em 1989, no âmbito do projeto GNU da Free Software Foundation.



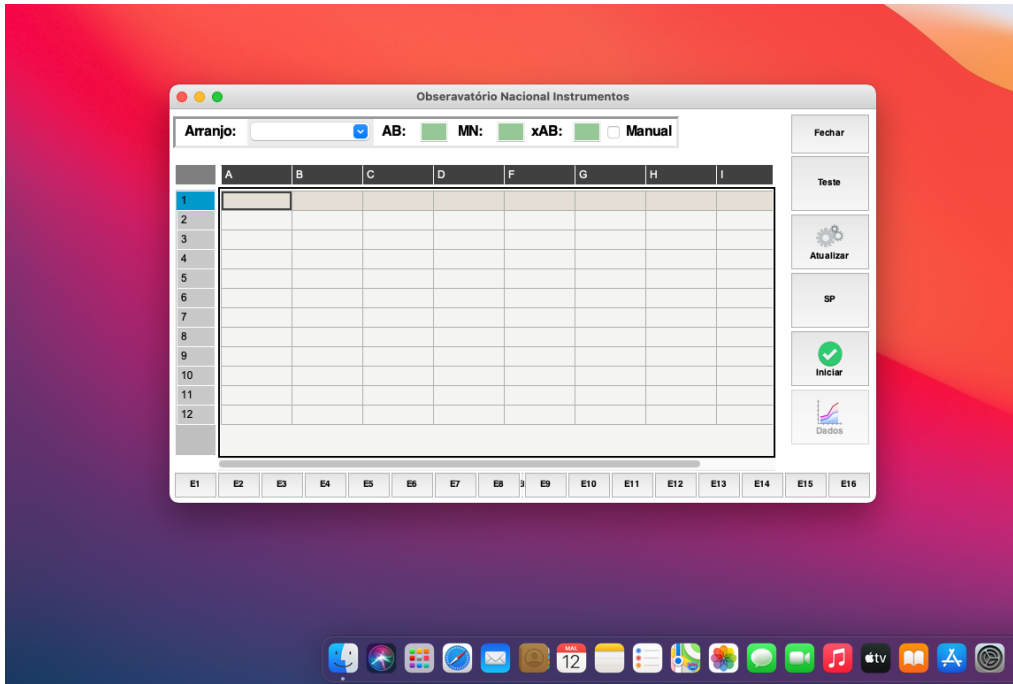


Figura 5.12: Interface Homem máquina desenvolvida para configuração do georesistivímetro.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A barra de ferramentas é um item comum e está presente em quase todas as IHM, serve para uma execução rápida das funções usadas com mais frequência. Contém botões funcionais como pode ser visto na Figura 5.12. A baixo da barra de ferramentas são mostrados os elementos de interação tal como *Combobox*, Caixa de Entrada e os botões teste, arranjo, iniciar, dados e fechar.








Arquivo		Abrir novo arquivo
		Abrir arquivo de dados já salvo no equipamento
		Salvar dados no equipamento ou exportar para um dispositivo
Dados do sistema		Coordenados de GPS do equipamento
		Monitor de temperatura da CPU
		Teclado virtual
Ajuda		Informações sobre o equipamento e ajuda

Figura 5.13: A tabela lista os itens encontrados no menu com suas funções correspondentes.

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Combobox:** é uma combinação de *Listbox* e um campo de entrada, que neste caso

lista os itens para que o usuário possa escolher qual tipo de arranjo entre os quatro disponíveis (Dipolo-Dipolo, Wenner, Schlumberger e Pólo-Dipolo), como mostrada na Figura 5.14, ao qual será utilizado na investigação geoeétrica.

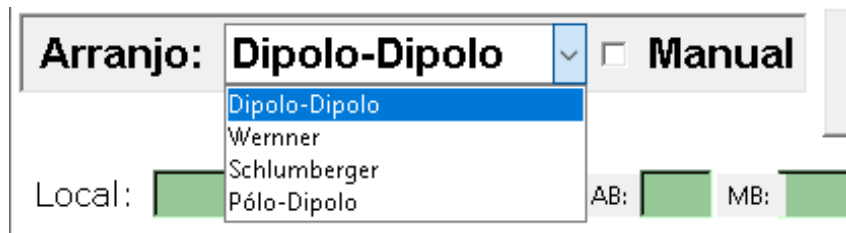


Figura 5.14: *Widget* fornecer ao usuário um conjunto de opções de arranjos geoeétricos já programados.

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Caixa de Entrada:** O usuário deve digitar o nome do **local** da investigação (entrada de texto e números), o valor de **AB** e **MB** (entrada somente de números) do espaçamento entre eletrodos. O algoritmo irá calcular mediante estas informações o distanciamento da localização dos eletrodos automaticamente. Caso o usuário deseje entrar com a localização dos eletrodos de forma manual basta deixar marcada a opção **Manual**, que interface abrirá uma nova janela Figura 5.15, onde o usuário poderá inserir o valor da distância entre os eletrodos de acordo a marcação na caixa de entrada. O esquema gráfico da localização dos eletrodos será tratado mais à frente.



Figura 5.15: Caixa de texto para inserção do nome e localização dos elétrodos dispostos na linha de investigação. O valor inserido na caixa de texto AB e MB, corresponde a espaçamento entre o eletrodo A e o B, M e o B.

Fonte: Elaborada pelo autor.

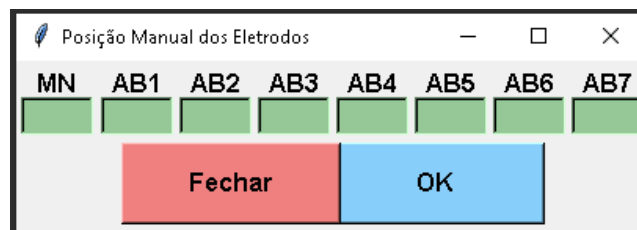


Figura 5.16: Janela de inserção manual da localização dos eletrodos, que nesta casa demonstra como exemplo para um arranjo Schlumberger com 16 eletrodos.

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Botão Teste:** realiza um teste de conectividade em cada eletrodo presente. O intuito deste teste é localizar algum eletrodo mal conectado ao equipamento ou ao solo, antes do início do levantamento.



Figura 5.17: Botões.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

*Uma questão importante diz respeito à fixação dos eletrodos de corrente e recepção no solo. Devido a resistências de contato elevadas, o trabalho pode até ser inviabilizado. Estas resistências afetam, tanto o circuito de emissão de corrente, como o circuito de recepção de potencial (BRAGA, 2007).*

**Botão Arranjo:** esse botão tem a função de plotar um gráfico com a representação esquemática da distribuição do espaço entre eletrodos na linha de levantamento geoeletricidade. O correto posicionamento dos eletrodos implicação direta nos cálculos da resistividade aparente e posteriormente no pré-processamento dos dados obtidos na sondagem elétrica.

**Botão Iniciar:** é responsável pelo acionamento do dispositivo, após o término do progresso é mostrado na planilha todas as informações oriundas da atual sondagem: os dados inseridos da posição dos eletrodos na linha (A,B,M,N), as medições da voltagem V(mV) e corrente elétrica I(mA) e a resistividade aparente (ohms.m).

Outro evento que acontece também ao final, é o auto salvamento dos dados obtido na linha investigada. Esse arquivo é um relatório de campo no formato *.doc*, que reúne todas as informações inseridas e geradas (nome da linha, dados de GPS do equipamento, posição dos eletrodos, os gráficos e os dados da planilha), salvas com o nome da linha, data e hora.

**Botão Dados:** tem a função de gerar um gráfico de pré-tratamento com a inversão dos dados obtidos em campo, possibilitando a usuário ter uma prévia da interpretação dos resultados.

**Botão Fechar:** encerra a IHM tornando a ação mais rápida e fácil.

# Capítulo 6

## Testes e Simulações

O principal objetivo deste capítulo é analisar os resultados de acordo com os experimentos realizados, apresentando os testes e simulações indispensáveis para a comprovação e calibração dos componentes integrantes do protótipo conceito. Serão abordados os testes feitos no laboratório de desenvolvimento de sensores da COGEO no Observatório Nacional para viabilizar os avanços feitos no algoritmo e na funcionalidade do pacote de simulação empregada tratamento dos dados geoeletrico, tornando esse tópico indispensável para a contextualização do projeto apresentado e paulatinamente implementar o protótipo a teste de campo em áreas de estudo já investigadas para comparação dos resultados obtidos.

### 6.1 Modelo Sintético de Camadas Resistivas

Neste item é apresentado um circuito auxiliar que representa um “modelo de Terra 2D” (Apêndice A), construído em uma placa universal perfurada 10x15 cm (Figura 6.2), para simular o mecanismo de propagação do fluxo de corrente elétrica em um meio geológico estratificado ideal.

Em conformidade com Siqueira (2018), esse circuito auxiliar será um modelo direto discretizado de um plano vertical, por uma rede de resistores com geometria retangular (Figura 6.1).

A montagem dessa malha 2D tem o intuito de ser o referencial de calibração em ensaios no laboratório de desenvolvimento de sensores da COGEO<sup>3</sup>. O circuito simula um modelo ideal da distribuição de algumas camadas da subsuperfície homogênea e isotrópico, constituída de resistores de mesmo valor em tiras horizontais (camadas) e diferentes espessuras distribuídos em uma malha bidimensional plana contendo células quadradas

---

<sup>3</sup>COGEO: coordenação de Geofísica

onde cada lado é um resistor.

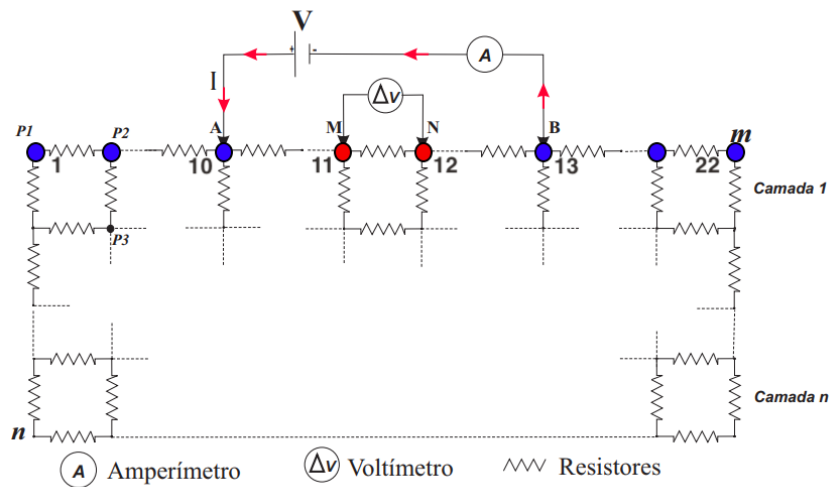


Figura 6.1: A rede resistiva elétrica estará sendo usado em todas as etapas do desenvolvimento do projeto: na etapa inicial auxiliará na conferência dos processos de programação e automação, e na etapa final será usado na calibração do instrumento e na validação dos resultados. Os pontos em vermelho representam a diferença de potencial aplicados nos nós 11 e 12 e os pontos em azul representam a injeção de corrente aplicados em nós com espaçamentos simétricos a partir do nó 10 e 13 até o nó 1 e 22.

Fonte: Adaptado de Siqueira (2018).

Neste circuito foram feitos testes de qualidade dos dados obtidos a partir dos ensaios feitos no COGEO (Figura 6.3), para se certificar e legitimar o seu bom funcionamento, associado ao estado da arte que governam o fluxo de corrente direta em um meio ideal.

A formulação do problema direto é feita através das leis de Kirchhoff para circuitos elétricos: lei dos nós e lei das malhas. A seguir uma breve explicação.

## 6.2 Leis de Kirchhoff

Como vimos na seção que descreve os fundamentos teóricos, a diferença de potencial descrita pela Lei de Ohm simples demonstrada na equação 4.2, também poder ser aplicada para as associações de resistores em série e em paralelo. No entanto, frequentemente não se pode reduzir um circuito a uma única malha utilizando essas leis. O procedimento para analisar circuitos mais complexos é possível utilizando os dois princípios a seguir, chamados Leis de Kirchhoff (SERWAY e JOHN JR, 2010).

**Lei dos nós:** Trata-se da primeira Lei de Kirchhoff sendo uma afirmação de conservação da carga elétrica, e é expressa na forma de um somatório em que sua resultante deve ser igual a zero como demonstrada na equação 6.1. Por convenção, esse princípio pode ser

aplicado para qualquer nó em um circuito adotando-se para as cargas que chegam ao nó um sinal positivo (+ $I$ ) e as que saem um sinal negativo (- $I$ ).

$$\sum_{no} I = 0 \quad (6.1)$$

**Lei das malhas:** E definida como sendo a segunda Lei de Kirchhoff que vem da lei de conservação de energia em torno de uma malha (circuito fechado) (SERWAY e JOHN JR, 2010). Da mesma forma como foi feito na lei dos nós, adotamos que para tensões que elevam o potencial do circuito como positiva (geradoras), a as tensões que causam queda de potencial como negativas (receptores passivos ou ativas) (MARKUS, 2011). Nessa conjuntura podemos representar essa lei como um somatório de todas as diferenças de potencial dos elementos em torno de qualquer circuito fechado, e seu resultado demonstrado na equação 6.2 deverá ser zero:

$$\sum_{malha} \Delta V = 0 \quad (6.2)$$

As Leis de Kirchhoff envolvem conceitos básicos para resolução e análise de circuitos elétricos, tanto de corrente contínua como em corrente alternada (MARKUS, 2011). Neste contexto poderemos aplicar tais conceitos ao Modelo de Terra 2D com intuito de simular em testes no laboratório de desenvolvimento de sensores da COGEO, o comportamento do fluxo de corrente no circuito aplicado aos métodos geoeletrico.

### 6.3 Calibração da Malha de Camadas Resistivas

Conforme SIQUEIRA (2018), é necessário realizar algumas calibrações no modelo, já que a malha por si só não pode representar o que realmente acontece durante uma medida real em campo. Esse autor constatou que um modelo de Terra 2D tem dois problemas, representar um semi-espaco infinito em uma malha de resistores contida em um semiplano finito e transfigurar a grandeza resistência elétrica dos resistores do modelo para grandeza resistividade elétrica.

A calibração então é feita forçando as medidas obtidas para uma malha onde todos os resistores são iguais (meio homogêneo), de modo que os valores calculados, pelo modelo, para a resistividade aparente assumam o valor da resistividade real do meio.

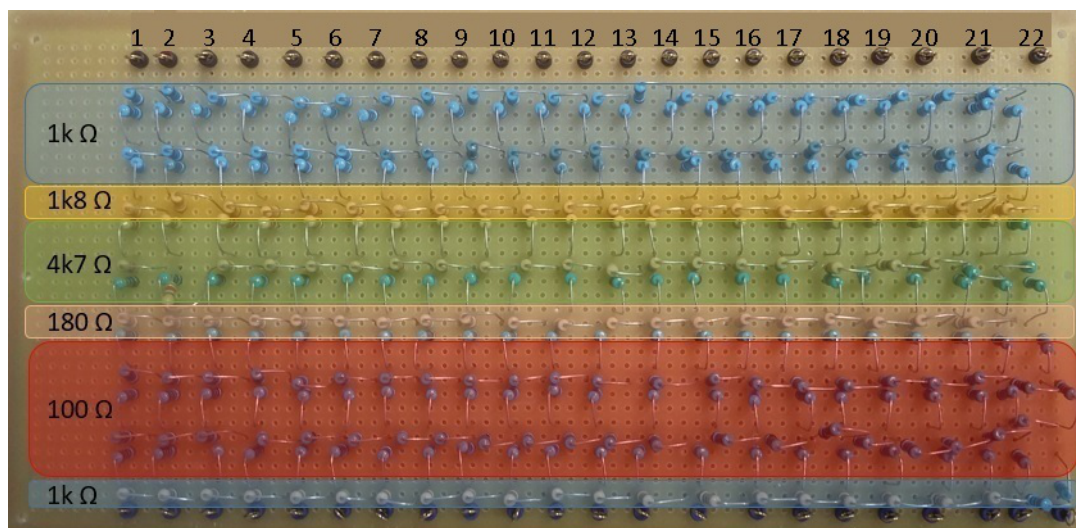


Figura 6.2: Modelo experimental de camadas resistivas representa cada horizonte da sub-superfície com resistores de diversos valores distribuídos em faixas horizontais delimitando as camadas. A numeração de 1 a 22 indicam os nós entre cada resistor onde serão fixos os eletrodos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6.4 Teste de Bancada

Os circuitos eletrônicos foram montados no laboratório de desenvolvimento de sensores da COGEO (LDSM), tendo como base o diagrama em blocos (Figura 5.1).

Os testes de laboratório aqui apresentados (Figura 6.3), permitem obter os parâmetros característicos para implementação de simulação de ensaios de injeção de corrente e medidas da diferença de potencial. As medidas obtidas puderam ser comparadas com simulações por algoritmos e teste de bancada.

Tabela 6.1: Tabela com dados simulados virtualmente para um arranjo Schlumberger na linguagem Fortran mostrados os valores da corrente  $I$  (A) e a diferença de potencial Delta  $V$  (V), para uma fonte de 12 volts e corrente de 4,6 mA.

N	Delta V (V)	I (A)	AB/2 (m)	MN (m)
1	3.5864E+000	8.8450E-003	3.0	1.0
2	1.9878E+000	6.6642E-003	5.0	1.0
3	1.3520E+000	5.6204E-003	7.0	1.0
4	1.0125E+000	4.9776E-003	9.0	1.0
5	7.9844E-001	4.5113E-003	11.0	1.0
6	6.4933E-001	4.1249E-003	13.0	1.0
7	5.3872E-001	3.7678E-003	15.0	1.0
8	4.5266E-001	3.4097E-003	17.0	1.0
9	3.8210E-001	3.0278E-003	19.0	1.0
10	3.1625E-001	2.5712E-003	21.0	1.0



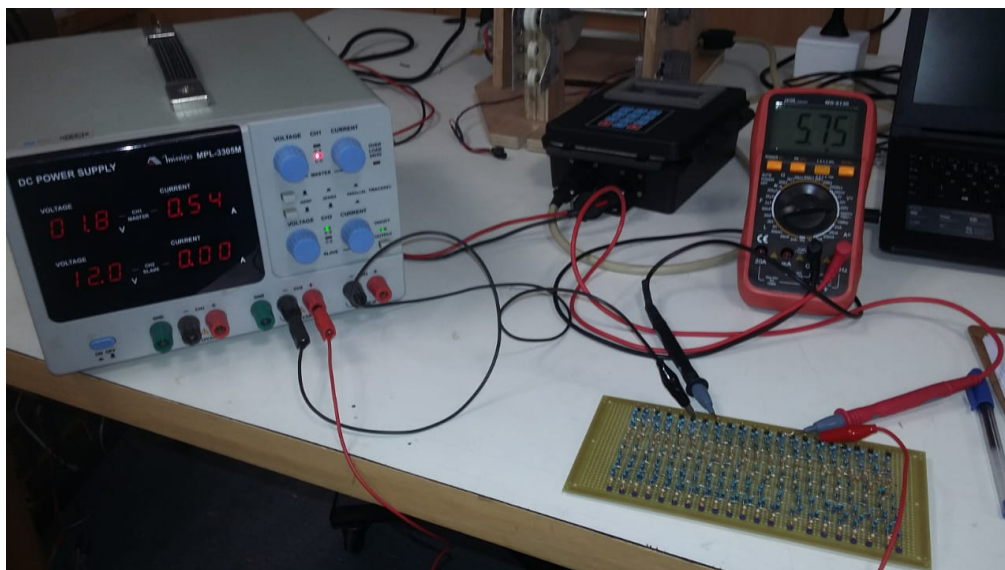


Figura 6.3: Teste de bancada feito no laboratório de eletrônica e sensores da COGEO.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse resultado obtido é apenas para comparação em um ensaio numérico determinístico sem a prevenção de simular o meio estratificado real, ou seja, ele apenas criar uma fonte de dados para teste do algoritmo de comutação das aberturas dos arranjos geoelétricos e, posteriormente implanta *Application Programming Interface* (API), que vai permitir uma troca e obtenção de informações despitados dados obtidos.

*Uma API tem por objetivo principal disponibilizar recursos de uma aplicação para serem usados por outra aplicação, abstraindo os detalhes da implementação e muitas vezes restringindo o acesso a estes recursos com regras específicas para tal (VENTURA, 2021).*

## 6.5 Comunicação e Transferencia de Dados

O circuito utilizado (Figura 6.4), para este teste foi uma estrutura montada apenas para viabiliza os avanços feitos no algoritmo desenvolvido para o projeto (sistema de automação), pois os componentes eletrônicos implementam não serão este utilizado para o teste, mas o princípio funcional é equivalente. Foi simulado com a utilização do modelo de Terra 2D de camadas resistivas (E), e na aquisição de dados (arranjo Schlumberger), pela diferença de potencial estabelecida nos eletrodos NM e conseqüentemente enviar esse dado a SBC para serem processados. Em (A), temos um microcontrolador, que neste circuito utilizada a comunicação UART (H), que desse através canal realiza o *upload* do código e troca de informações com a SBC. Após recebido as informações, o microcontrolador aciona módulo *RelayBoard* (D), que para este teste utiliza 8 relés eletromecânico



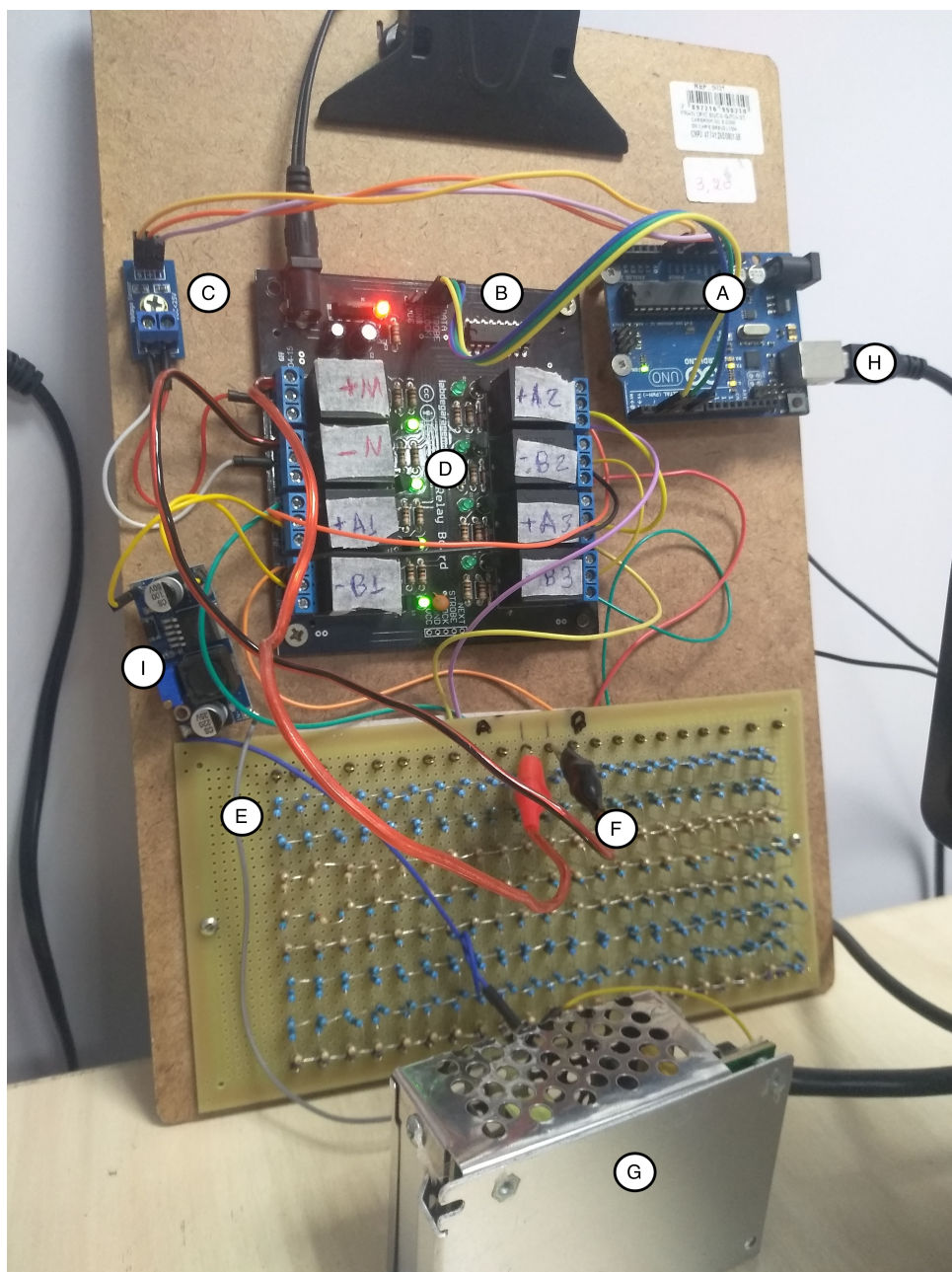


Figura 6.4: Teste de algoritmo, comunicação e transferência de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

destinado ao direcionamento da passagem de corrente nos eletrodos tanto de injeção, a depender do arranjo, como os de leitura da diferença de potencial, estabelecido na configuração feita pelo usuário na IHM. O modulo rele possui um *shift register* (B), sendo um tipo de *CI* fácil de conectar e de operar mais portas digitais controladas por apenas 3 pinos físicos. Uma fonte chaveada estabilizada 5A 12V tipo colméia (G). Um conversor DC/DC - *Step Down* para regular a tensão (I). Em (F), temos os eletrodos de MN e os eletrodos AB foram soldados na placa de resistores. Para mensurar a tensão (C), utilizamos um sensor baseado no princípio dos divisores de tensão.

## 6.6 Simulação e Validação dos Ensaio de Laboratório

Para validar os dados dos ensaios feitos no laboratório com o modelo sintético de camadas resistivas, usamos a estrutura e a funcionalidade do pacote de simulação de volumes finitos, conhecido como *Simulation and Estimation of Parameters in Geophysics* (SimPEG).

O potencial para geociência desta ferramenta é muito grande, pois integra várias áreas do conhecimento (geologia, sísmica, eletrorresistividade, polarização induzida, eletromagnética, hidrogeologia), podendo ser inseridas em inúmeras aplicações que demandem cada vez mais, de recursos computacionais para o tratamento dos dados geofísicos.

O projeto Simpeg é desenvolvido por pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), que buscam a disseminação do conhecimento científico por meio da pesquisa e da educação.

Este pacote escrito com a linguagem de programação *Python* visa, usando a teoria da inversão, criar matematicamente modelos da Terra a partir de dados medidos (COCKETT *et al.*, 2015).

Outro ponto importante que se pode destacar no projeto Simpeg é que ele expõe o *Black box software*, os detalhes do processo de implementação da técnica de inversão, possibilitando que outros pesquisadores possam desenvolver seus próprios projetos.

*O objetivo de uma inversão determinístico não é apenas encontrar um modelo consistente com os dados, mas deve ser encontrar o "melhor" modelo que seja consistente com os dados (COCKETT et al., 2015)*

## 6.7 Interpretação

Neste teste de validação consideremos apenas três camadas horizontais da malha de resistores com valores de  $1000\Omega\text{m}$ ,  $4700\Omega\text{m}$  e  $100\Omega\text{m}$ , respectivamente conforme mostrado na Figura 6.5-b. O teste foi simulado de duas formas distintas: a primeiro somente com o modelo de camadas e o segundo com a inclusão de um dique com resistividade de  $743\Omega\text{m}$  Figura 6.6-b.

Os resultados obtidos com a inversão direto simulados para um arranjo Dipolo-Dipolo, Figura 6.5-a e 6.6-a, mostram que o algoritmo teve um bom desempenho, mesmo não terem sido feitos quaisquer configurações ou ajustes para melhora a resolução do resultado. A obtenção de medidas se mostrou plausível, coerente do ponto de visto do modelo geológico e viável com a simulação. A proposta tem como intuito de corrobora em validar o conceito do instrumento e não o método de inversão.

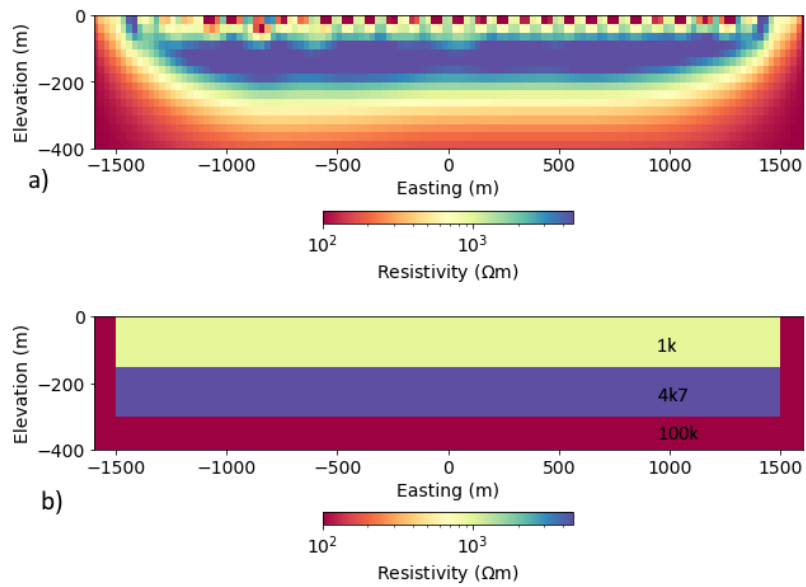


Figura 6.5: a) Resultado direta 2D de resistividade em simulação obtido com o arranjo diplo-dipolo. b)Malha de resistores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

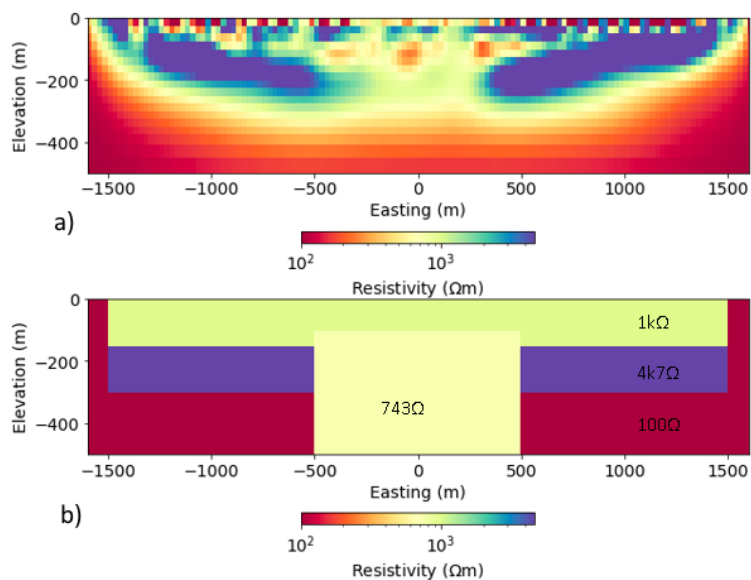


Figura 6.6: a) Resultado direta 2D de resistividade em simulação com a inclusão de um dique. b) Desenho esquemático das camadas horizontais e um dique simulado na malha de resistores.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste contexto é possível identificar clareamento as feições, a separação de camadas (bem perceptível na camada de 4700 Ohmm), a descontinuidade lateral, e sobretudo a ordem de grandezas da resistividade compatível com o valor físico criado para os testes em ambos os resultados obtidos. No segundo teste a intrusão incluída atravessa camadas com uma boa percepção a uma profundidade 200 m.

## 6.8 Teste de Campo

O levantamento foi realizado no período de 09 à 26 novembro 2021, na sede do Observatório Nacional em uma área de cerca de 80 m<sup>2</sup> (Figura 6.7), localizado na região norte do município do Rio de Janeiro.

Este local foi previamente selecionado, por já ter sido alvo de levantamentos anteriores com objetivo é demarcar o perfil geotécnico do projeto de construção do prédio anexo do complexo da sede do Observatório Nacional. Nesta perspectiva, foi realizada uma sondagem elétrica vertical (SEV), empregando um **circuito básico de bancada** e um **resistivímetro Geotest**, para serem comparados com os valores das medidas obtidas pelo protótipo conceitual.

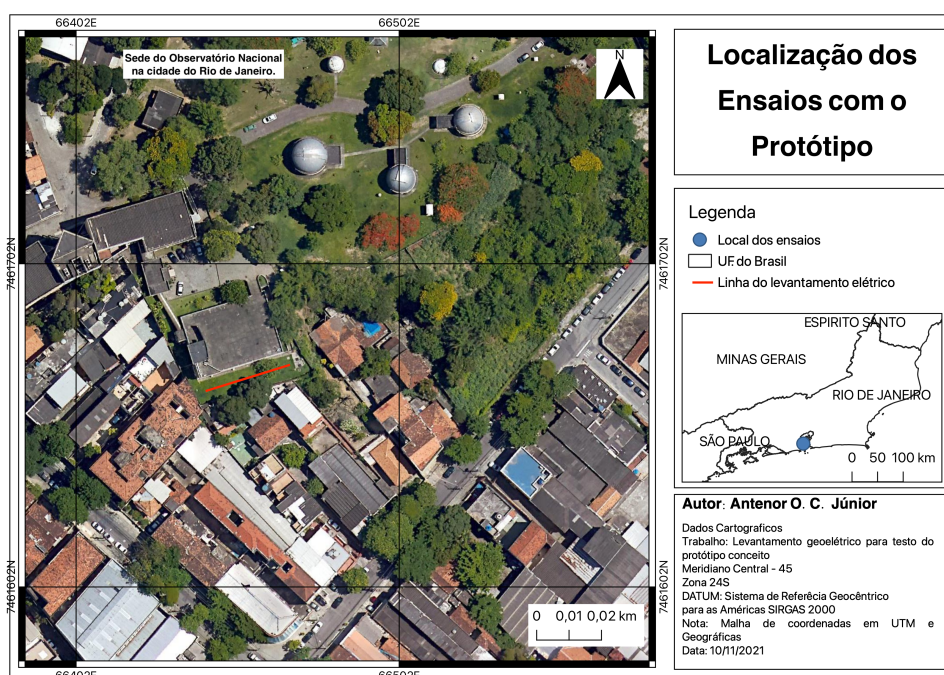


Figura 6.7: Local do levantamento para teste do protótipo conceitual.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi utilizado 24 eletrodos de aço de 40 cm dispostos em linha com separação de 1m enterrados parcialmente no solo. As medidas realizadas foram feitas com a mesma marcação e cabos ao longo do perfil.





Figura 6.8: Local escolhido para os teste de campo do protótipo conceito.  
Fonte: Elaborada pelo autor.

O circuito básico de bancada (Figura 6.9), foi montado no laboratório de geofísica aplicada do Observatório Nacional, com a proposta de produzir medidas e que pudessem ser correlacionadas as obtidas com o protótipo em testes no mesmo local. As medidas foram efetuadas da seguinte forma: conectou-se uma bateria veicular de 12 *volts* a um inversor de tensão para converter CC alcançando em sua saída 127 *Vac* 60Hertz. Foi empregado um transformador ajustável Variac para controla a tensão de saída em 100 *volts*. Um amperímetro fazia as medições de corrente nos eletrodos (eletrodos A e B), enquanto, um voltímetro ligado entre os eletrodos potenciais (eletrodos M e N), media a tensão que chegava até eles. Uma chave seletora de voltagem invertia a polaridade para mitigar os efeitos da polarização eletrolítica nas medidas.

O resistivímetro comercial Geotest, pertencente ao Pool de Equipamentos de Geofísica do Brasil - PEGBr (PEGBr, 2021), de fabricação brasileira (Figura 6.10). Segundo (MONTEIRO, 2017), esse equipamento geofísico mono canal que possibilita medidas individuais dos valores de diferença de potencial (V) e de corrente (I), por meio da emissão de corrente elétrica no subsolo. A resistividade aparente é calculada através da multiplicação do fator geométrico do arranjo (K) pela razão  $V/I$ .

O equipamento é composto por uma unidade alimentada por uma bateria de 12 volts e permite o ajuste da voltagem de saída entre 5 a 800 volts, e a unidade. A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos no ensaio.

As curvaturas de resistividade aparente (Figura 6.11), apresentaram na primeira camada, respectivamente, 11  $\Omega.m$  (circuito básico de bancada) e 17  $\Omega.m$  (Geotest). Graficamente, os valores iniciais de resistividade aparente correspondem a camada com características elétricas da parte superficial do solo, se tornando mais resistivas variando entre 127  $\Omega.m$  (circuito básico de bancada) e 76  $\Omega.m$  (Geotest) a poucos metros de profundi-

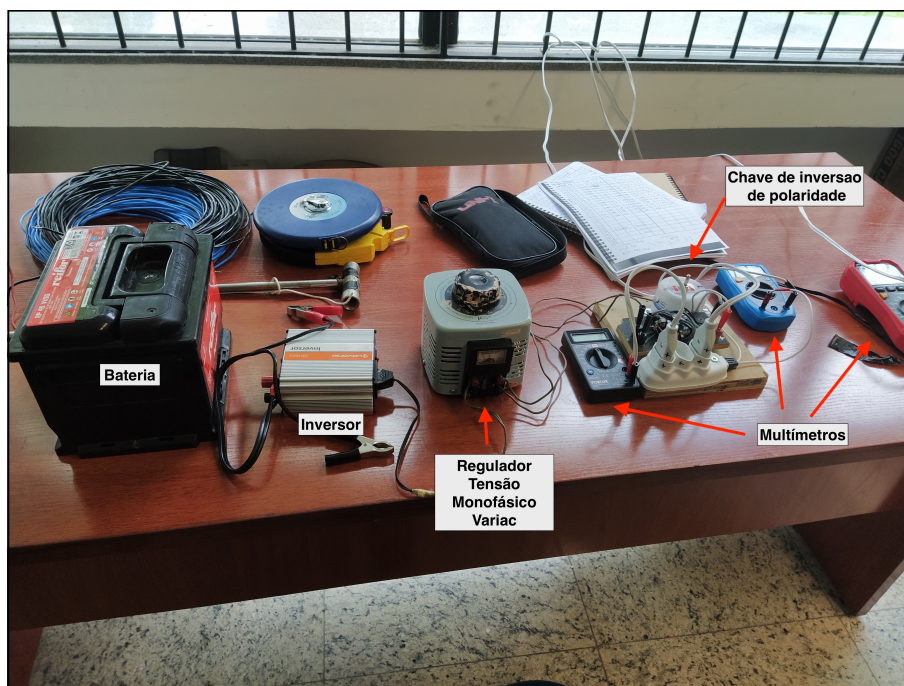


Figura 6.9: Circuito básico de bancada.  
 Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6.2: Resultados obtidos utilizando um circuito básico de bancada em ensaio de campo preliminar.

N	AB/2 (m)	MN/2 (m)	Volt.(V)	$\Delta V(mV)$	I (mA)	Resis. Aparente( $\Omega.m$ )
1	2	1	100	321	134,5	11,24
2	3	1	100	132	136,5	12,15
3	4	1	100	425,5	79,15	126,66
4	5	1	100	287,5	87,85	123,37
5	6	1	100	243	108,2	123,46
6	7	1	100	121	80,5	113,32
7	8	1	100	164,5	150,85	107,91
8	9	1	100	119	137,35	108,87
9	10	1	100	79	125,25	98,08
10	11	1	100	54	109,75	92,74
11	12	1	100	55,5	143,3	86,99
12	13	1	100	57,5	189,6	80,02
13	14	1	100	54,5	218,2	76,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

dade em decorrência possivelmente provocado pelo topo rochoso.

Este mostrou que os mecanismos utilizados mesmo com suas diferenças tiveram razoável compatibilidade de medidas na área escolhida para os testes.

Com relação ao teste de campo com o protótipo (Figura 6.12), utilizamos o circuito básico de bancada conectado aos terminais do protótipo para aquisição das medidas em simultâneos por ambos equipamentos.

Tabela 6.3: Resultados obtidos resistivimetro comercial Geotest.

N	AB/2 (m)	MN/2 (m)	Volt.(V)	$\Delta V$ (mV)	I (mA)	Resis. Aparente( $\Omega.m$ )
1	2	1	100	428,1	131	17,35
2	3	1	100	112,5	137	10,31
3	4	1	100	507	93	127,75
4	5	1	100	262	79	125,02
5	6	1	100	215	89	123,46
6	7	1	100	126,5	82	133,42
7	8	1	100	171	148,5	116,31
8	9	1	100	125	140,5	113,95
9	10	1	100	75	120	111,8
10	11	1	100	56,5	110	97,51
11	12	1	100	55	138,5	96,81
12	13	1	100	61	195	89,19
13	14	1	100	53	209	78,50

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 6.10: Equipamento Resistivimetro Geotest .

Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado das distribuições de resistividade aparente ao longo da seção está muito comparável, entretanto, bem diferentes ao obtido nos primeiros ensaios. Uma possível explicação para este fenômeno decorre de que, os testes preliminares ocorreram dias antes do início de uma estação chuvosa e por causa dos protocolos de controle da pandemia e apenas um dia da semana. A anomalia observada nas medidas provavelmente pode ter sido causada por algum sistema de captação de águas pluviais por causa da presença de uma cisterna no terreno.

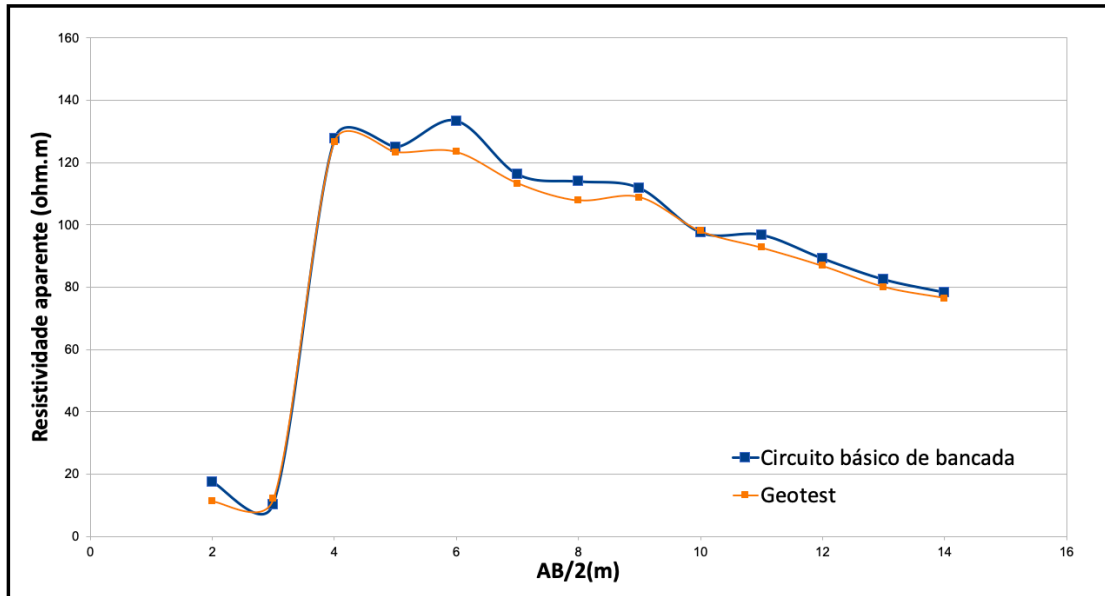


Figura 6.11: Curvas de resistividade aparente, em função das semi-distâncias AB/2.  
 Fonte: Elaborada pelo autor.

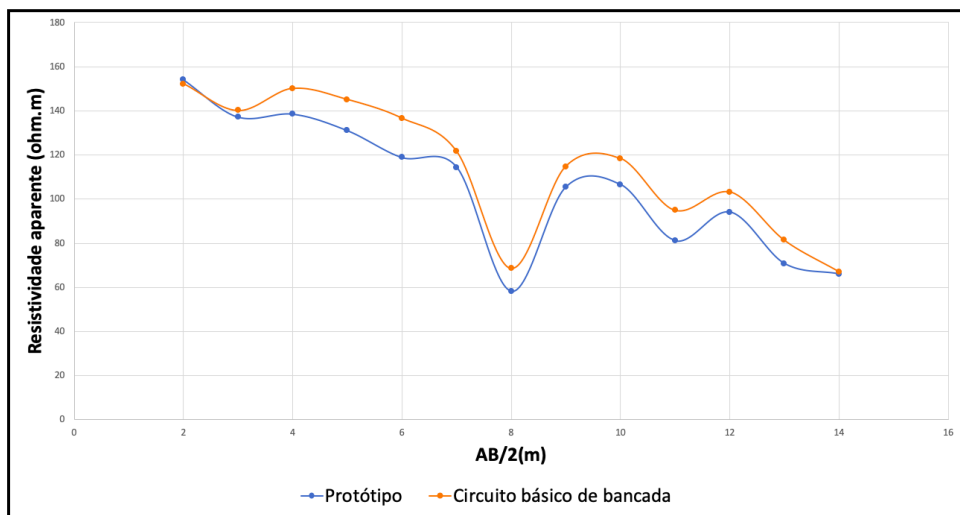


Figura 6.12: Resultados do teste de resistência resistividade aparente obtido na área de teste para uma sondagem elétrica vertical com o arranjo Schlumberger.



# Capítulo 7

## Conclusão e Perspectivas Futuras

### 7.1 Conclusão

Algumas iniciativas de converter a teoria do método geoelétrico e executá-la de modo a se tornar prática, surge com o desenvolvimento de novos sistemas como prova de conceito, reforçando o empenho de pesquisadores em trazer soluções para o desenvolvimento de protótipos que propiciem a acurácia das medições e em simultâneo possibilita um dispêndio sobre a implementação do método em levantamentos geoelétricos.

Nesse contexto, este trabalho apresentou a construção de um protótipo conceitual, como uma solução de *hardware e software* de código aberto baseada em conceitos presentes na *Internet das Coisas*, com intuito de fomentar a pesquisa geofísica com alta resolução e precisão.

Foram avaliadas as medições obtidas em campo e no laboratório COGEO, que em maior parte, foram condizentes com os objetivos propostos no trabalho evidenciando qualitativamente o bom funcionamento do protótipo de baixo custo, para obtenções de parâmetros de resistividade in-situ a pequena profundidade.

Nesta perspectiva, os testes em laboratório envolvendo a tensão e corrente apresentaram um bom desempenho e acurácia pelos resultados observados, mostrando uma correlação linear obtida pelos ADCs do protótipo comparadas com as medições de instrumentos básicos de bancada para medir essas grandezas elétricas com alta precisão. A análise da regressão que correlacionavam a corrente encontrou  $y = 4192,3x + 3375,3$  e  $R^2 = 1$ , onde  $y$  é a medição obtida pelo protótipo e  $x$  é a medição obtida com um amperímetro (Figura 7.1-a), enquanto no tocante as medidas de tensão tiveram uma regressão igual  $y = 375353x + 4383$  e  $R^2 = 0,9998$  (Figura 7.1-b). Evidenciando que as medidas em modo diferencial e a demodulação síncrona foram escolhas acertadas, garantindo medidas razo-

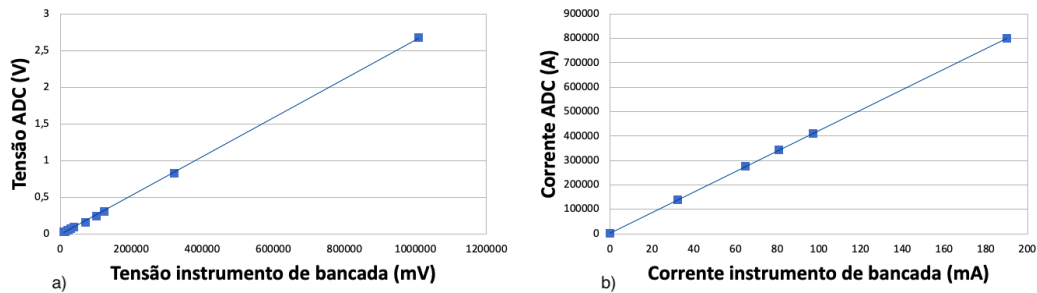


Figura 7.1: Gráfico de correlação linear que mostra os resultados de laboratório da CO-GEO, comparando as medições de tensão e corrente medidas pelo protótipo em relação aos medidos por instrumentos de bancada para medida de corrente e da diferença de potencial através de um levantamento qualitativo realizado no laboratório.

avelmente lineares e confiáveis.

Esses resultados demonstram um nível imprescindível, sobre as medidas obtidas em testes preliminares aos ensaios de campo. Analisando essas mesmas medições, observa-se uma média percentual de variação entre os dois equipamentos (instrumentos de bancada e o protótipo), de 9.4%.

Em relação as inovações trazidas pertinentes a parte funcional do equipamento, a efetivação de uma unidade computacional propício ao protótipo possibilidades de implementação de novas funções, sensores e de uma interface gráfica, da mesma maneira que a viabilidade da execução de algoritmos de modelagem de resistividade tridimensional e inversão para o tratamento dos dados comparáveis aos de instrumentos comerciais. A experiência do levantamento de campo confirmou a viabilidade da utilização de sistemas multi-eletrodos e aquisição automatizada, devido ao tempo despendido na tomada de medidas neste tipo de levantamento.

E sua capacidade operacional o equipamento se mostrou de fácil manuseio, dado que todas as funções estão bem descritas em sua interface de controle, passível de melhorias graças ao seu código aberto que possibilitam uma customização de todo o processo operacional do equipamento pelo usuário.

Outro aspecto importante está em sua atual configuração que para esse protótipo, proporcionou ministrar tensões maiores, possibilitando consequentemente sondagens em maior profundidade.

Seu hardware modular propícia a possibilidade de se poder atualizar o instrumento independente do fabricante, proporcionando a implementação de novas tecnologias de fácil aquisição. Seu código aberto traz uma vantagem para o usuário poder conhecer o sistema de operacionalização e acionamentos do instrumento corroborando com a perspectiva já citadas, tornando assim um referencial sobre os equipamentos comerciais.

O uso de um sistema automatizado e a multiplexação de eletrodos com a comutação, proporcionou a redução da quantidade de relês distribuídos ao longo do cabo e o tempo de

levantamento em campo, comparado ao equipamento nacional de medição manual, onde o operador a cada nova obtenção de dados, tem que manusear os eletrodos o que significa tempo e recursos desperdiçados.

Em relação ao ruído indesejável, com a utilização de sinal elétrico AC (Figura 7.2), por intermédio de um circuito ativo eletrônico podemos contorna os problemas de potencial espontâneo e polarização do solo, e ademais o uso de amplificadores diferenciais, conseguimos evita descarga eletrostática ou a indução indevida ao solo. Nesta mesma premissa, implantamos outra funcionalidade ao protótipo que é a frequência programável, que viabilizou a utilização de valores distintos de frequência que podem chegar a centenas de Hertz.

Por fim, com a demodulação síncrono utilizado para que a tensão medida na saída, seja um reflexo da corrente a excitação, conseguimos eliminar parcialmente os ruídos espúrios, ruídos estes não correlacionados com a fonte de excitação.

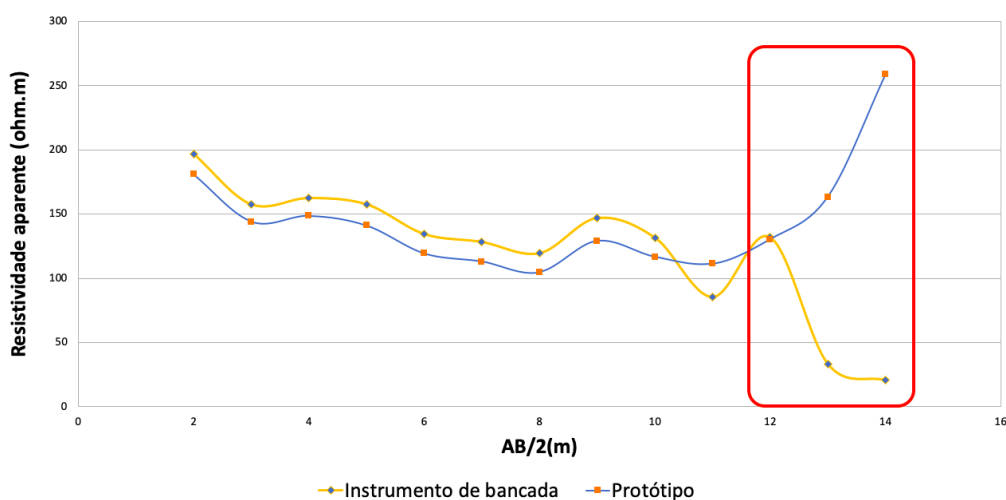


Figura 7.2: As resistividades verificadas no levantamento, se comparadas aos valores observados com a SEV feita com a GeoTest e o circuito básico de bancada, podem ser explicadas como consequência de intensas chuvas que ocorreram na época em que foi realizada a aquisição dos dados. O quadrado vermelho mostra que tensões de vários milivolts, proveniente de 60Hz no entorno da área de teste, detectadas pelo instrumento de bancada, não foram detectadas nas medições realizadas pelo protótipo, ferindo medidas apenas do aumento da resistividade aparente do solo devido ao topo rochoso.

Desta forma, o projeto demonstrou a viabilidade do desenvolvimento do protótipo conceito com características próprias de *software* e *hardware* livre (Open Source), utilizados em seu desenvolvimento e operação, singulares a qualquer outro equipamento disponível comercialmente, se tornando uma importante contribuição acadêmica para a pesquisa instrumental de código aberto, propiciando o melhoramento do entendimento de princípios, funcionalidades e programação dos parâmetros intrínsecos ao método, além de incentiva a pesquisa por meio dessa técnica, de modo a otimizar o trabalho de operação em levanta-

tamentos Geofísicos.

## 7.2 Perspectivas Futuras

O processo de desenvolvimento do protótipo de um resistivímetro apresentado nesta dissertação deu apenas os seus primeiros passos, com a demonstração de todas as suas etapas e assertivas sobre os componentes escolhidos que corroboraram para a qualidade do resultado.

Muito embora, o protótipo esteja finalizado em seu objetivo de validação do projeto conceitual e representação (Apêndice B). Esse projeto foi destinado à definição dos elementos e serviços que colaboraram para identificar com maior assertividade as características básicas necessárias para o desenvolvimento de um produto final.

Existem muitas melhorias e modificações a fazer, sobretudo na perspectiva de torná-lo num projeto de aspecto *Open-Soucer*, com a construção de uma página na plataforma de hospedagem *Github* contendo os detalhes do projeto para uma divagação ampla na comunidade científica, com todas as etapas integradas para a construção do equipamento.

Finalmente, poder considerar que este projeto possibilitou uma base de estudo para futuras iniciativas de melhorias e implementação de novas rotinas de operacionalização do equipamento, sobretudo em relação à parte de desenvolvimento de algoritmos para o tratamento das medidas obtidas. Outro aspecto não explorado neste projeto está na possibilidade desse instrumento poder ser usado no acompanhamento contínuo em pesquisas que demandem o armazenamento seguro de informações digitais por um grande período de tempo, podendo tornar esse protótipo um equipamento de monitoramento remoto, o que representa ainda muito esforço e trabalho futuro!

# Referências Bibliográficas

- 3D, R. I. Disponível em: <https://all3dp.com/1/single-board-computer-raspberry-pi-alternative/> . Acesso em: 05/10/2019.
- ALAGIA, M. C. S., 2018, “Polarização induzida no domínio da frequência associada a integração de dados multifonte na prospecção de zona mineralizada no Greenstone Belt Faina, Goiás”, .
- BAGNATO, V. S., ORTEGA, L. M., SOUZA, M. A., et al., 2017, *Guia Prático I Introdução à Propriedade Intelectual*.
- BECKER, J., 2003a, “Projects and Circuits-EARTH RESISTIVITY LOGGER–Part I-Help your local archaeological society to locate the hidden mysteries of our ancestors”, *Everyday Practical Electronics*, v. 32, n. 4, pp. 288–295.
- BECKER, J., 2003b, “Projects and Circuits-EARTH RESISTIVITY LOGGER–Part 2-Describing the software that helps locate the hidden mysteries of our ancestors”, *Everyday Practical Electronics*, v. 32, n. 5, pp. 360–368.
- BERNARDI, L. O., PANTANO FILHO, R., 2012, “Medição da resistividade elétrica em condutores metálicos”, *Revista Intellectus*, , n. 19, pp. 55–69.
- BORGES, L. E., 2014, *Python para desenvolvedores: aborda Python 3.3*. Novatec Editora.
- BORJA, M. S., 2018, “Modelagem e inversão de eletrorresistividade 1d usando Fortran moderno: arranjos Wenner e Schlumberger”, .
- BORTOLOZO, C. A., 2016. “Inversão conjunta 1D e 2D de dados de Eletrorresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na bacia do Paraná”. .
- BOYLE, A. J. S., 2016, *Geophysical applications of electrical impedance tomography*. Tese de Doutorado, Carleton University.

- BRAGA, A. C. O., 2007, *Apostila de Métodos Geométricos Aplicados*. 1 ed. Rio Claro, UNESP.
- BRAGA, A. C. O., 2016, *Geofísica aplicada: métodos geométricos em hidrogeologia*. Oficina de Textos.
- CANATA, R. E., FERREIRA, F. J. F., STEVANATO, R., et al., 2018, “Integração dos métodos geofísicos de eletrorresistividade, polarização induzida e eletromagnético Aterro Sanitário de Guaratuba-PR”, *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 74, n. 1.
- CLEMENT, R., FARGIER, Y., DUBOIS, V., et al., 2020a, “OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale”, *HardwareX*, v. 8, pp. e00122.
- CLEMENT, R., FARGIER, Y., DUBOIS, V., et al., 2020b. “OHMPI: Open source and open hardware resistivity-meter”. <https://reversaal.gitlab.irstea.page/OhmPi/index.html>, b. acessado em 23/12/2021.
- COCKETT, R., KANG, S., HEAGY, L. J., et al., 2015, “SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications”, *Computers & Geosciences*.
- COLLETT, L., BRANT, A., BELL, W., et al., 1959, “Laboratory investigation of overvoltage”. In: *Overvoltage research and geophysical applications*, Elsevier, pp. 50–69.
- DIAS, C., 2017, *Métodos Geofísico Eletromagnético a Multifrequência: Um Invento Brasileiro*. 1 ed. Rio de Janeiro, Blue Print Gráfica e Editora.
- DRAFTS, B., 1996, “Methods of current measurement”, *Sensors-the Journal of Applied Sensing Technology*, v. 13, n. 10, pp. 99–105.
- ELIS, V. R., MENDONÇA, C. A., PORSANI, J. L., et al., 2008, “O uso de sondagens dipolo-dipolo em estudos hidrogeológicos e de depósitos de resíduos”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 3, pp. 317–325.
- EWA, 2020. “SPI (Serial Peripheral Interface)”. <https://www.corelis.com/blog/spi-serial-peripheral-interface/>. acessado em 26/04/2020.
- FACHIN, S. J. D. S., 2019, *O sinal de potencial espontâneo em investigações ambientais: fatores que condicionam a amplitude de uma anomalia*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

- FEITOSA, F., MANOEL FILHO, J., FEITOSA, E., et al., 2008, “Hidrogeologia: conceitos e aplicações. rev. e ampl.” *Rio de Janeiro: CPRM*.
- FLOYD, T., 2009, *Sistemas digitais: fundamentos e aplicações*. Bookman Editora.
- FOLLY, W. S. D., SENRA, A. S., 2016, “A LOW-COST RESISTIVIMETER FOR USE IN PRACTICAL LECTURES OF APPLIED GEOPHYSICS”, *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 34, n. 1, pp. 25–31.
- FRASER, D., 1964, *Electrical Properties of Clay-containing Sandstones*. Institute of Engineering Research, University of California.
- GALITZ, W. O., 2007, *The essential guide to user interface design: an introduction to GUI design principles and techniques*. John Wiley & Sons.
- GALLAS, J., 1999, “Geofísica–Uma Aplicação em Área Urbana de Ocorrência de Colapso de Terreno”, *Acta Geologica Leopoldensia*, v. 23, n. 49, pp. 103–109.
- GALLAS, J. D. F., 2000, *Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista.
- GALLAS, J. D. F., 2005, “O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 2, pp. 133–144.
- GANDOLFO, O. C. B., 2007, *Um estudo do imageamento geoelétrico na investigação rasa*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- GANDOLFO, O. C. B., GALLAS, J. D. F., 2007, “O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade”, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 25, n. 3, pp. 227–235.
- GEE, B., 1969, “Georg Simon Ohm 1789-1854”, *Physics Education*, v. 4, n. 2, pp. 106.
- GREAVES, D. J., 2011, “System on Chip Design and Modelling”, *University of Cambridge Computer Laboratory Lecture Notes*, p. 130.
- GUPTA, A., 2019, “UART Communication”. In: *The IoT Hacker’s Handbook*, Springer, pp. 59–80.
- HALLOF, P., 1957, “On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements”, *PhD thesis, MIT*.

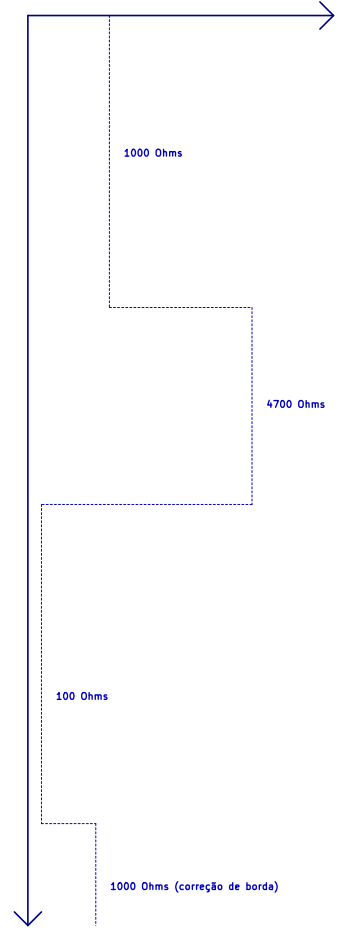
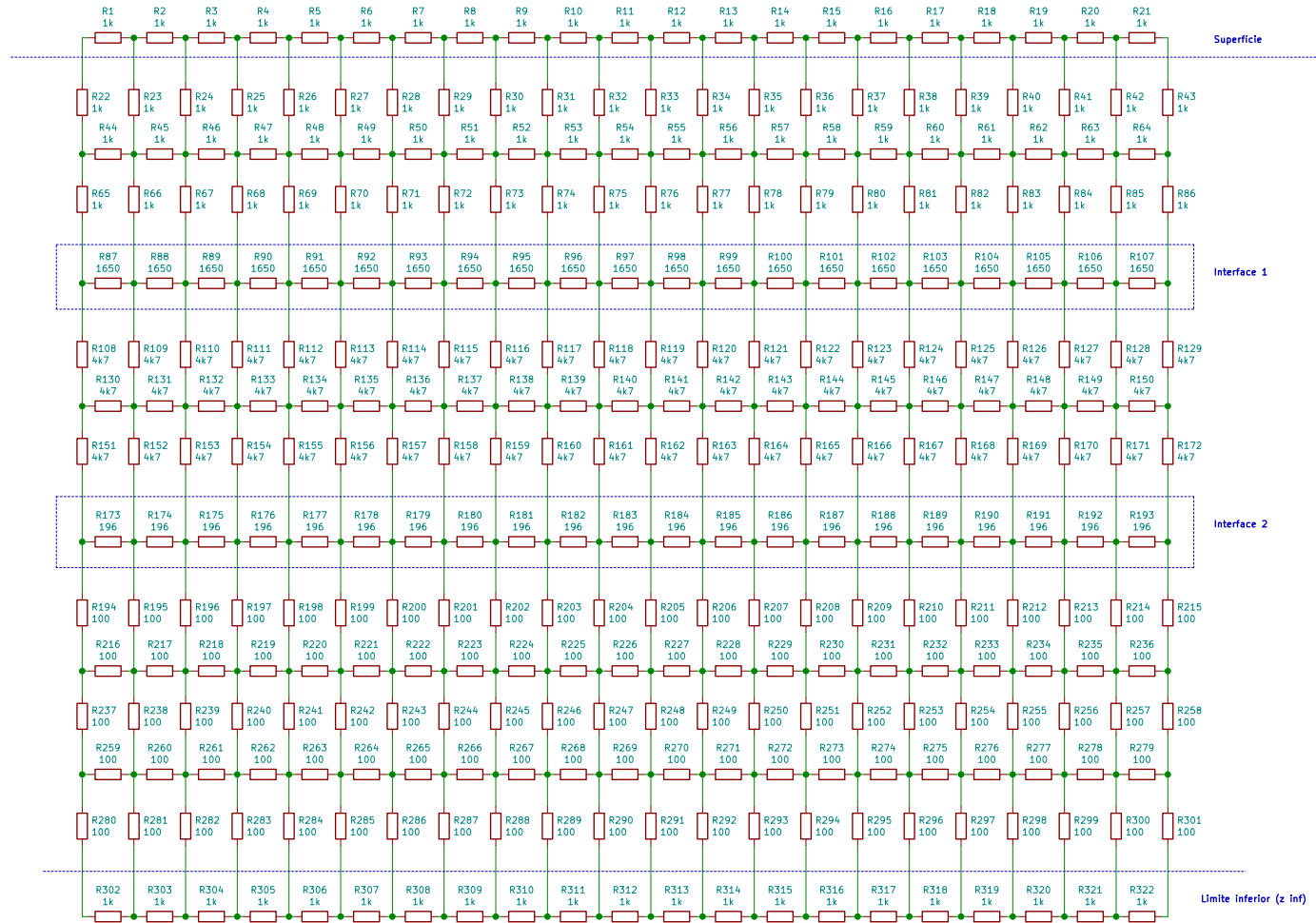
- HASSAN, A., OTHERS, 2014, *Electrical resistivity method for water content characterisation of unsaturated clay soil*. Tese de Doutorado, Durham University.
- HAYKIN, S., MOHER, M., 2011, *Sistemas de Comunicação-5*. Bookman Editora.
- HEMMANUR, K., 2009, “Inter-Integrated Circuit (I2C)”, *ECE 480 Journal*, v. 8.
- INC, A. G., 2019. Disponível em: [http://www.alphageofisica.com.br/agiusa/prospectos/CrossBoreHoleInstr\\_br.pdf](http://www.alphageofisica.com.br/agiusa/prospectos/CrossBoreHoleInstr_br.pdf) . Acesso em: 02/10/2019.
- KEAREY, P., BROOKS, M., HILL, I., 2009, *Geofísica de exploração*. Oficina de textos.
- KEEVIL JR, N., WARD, S., 1962, “Electrolyte activity: its effect on induced polarization”, *Geophysics*, v. 27, n. 5, pp. 677–690.
- KELLER, G. V., FRISCHKNECHT, F. C., 1966, “Electrical methods in geophysical prospecting”, .
- LIMA, C. B. D., VILLAÇA, M. V., 2012, “AVR e Arduino–Técnicas de Projeto. 2ª Edição”, *Editora Clube de Autores*.
- LIU, C., YI, H., LIU, J.-G., et al., 2015, “A Novel Method for Measuring Current Derivative Signal with Closed Loop Hall-Effect Current Sensor”. In: *Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, pp. 1–8.
- LUIZ, J. G., SILVA, L. M. D. C., 1995, *Geofísica de prospecção*. Editora Universitária UFPA.
- MARKUS, O., 2011, *Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada, teoria e exercícios*. Editora Érica.
- MARSHALL, D. J., MADDEN, T. R., 1959, “Induced polarization, a study of its causes”, *Geophysics*, v. 24, n. 4, pp. 790–816.
- MAYPER JR, V., 1959, “The Normal Effect Part I”. In: *Overvoltage Research and Geophysical Applications*, Elsevier, pp. 125–141.
- MONTEIRO, D. P., 2017, “APLICAÇÃO DE SONDAGENS ELÉTRICAS VERTICAIS NA ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DO EMBASAMENTO CRISTALINO NOS MUNICÍPIOS DE SÃO JOÃO DE PIRABAS E SALINÓPOLIS, REGIÃO COSTEIRA DO NORDESTE DO PARÁ”, .
- NAVAS, M. , 2020. “profesionalreview”. <https://www.profesionalreview.com/2021/07/18/que-es-raspberry-pi/>. acessado em 26/04/2021.



- OHM, G. S., 1905, *The Galvanic circuit investigated mathematically*. N. 102. D. Van Nostrand Company.
- OLIVEIRA, F., 2017, *EstGeoMag: Integrando soluções de Hardware, Software e Internet das Coisas na medição de grandezas Geomagnéticas*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo.
- ORELLANA, E., 1972, “Prospección geoeléctrica en corriente continua.” .
- PARASNIS, D. S., 2012, *Principles of applied geophysics*. Springer Science & Business Media.
- PEGBR, 2021. “PEGBr”. Disponível em: [http://www.pegbr.on.br:8080/normas\\_estatuto.html](http://www.pegbr.on.br:8080/normas_estatuto.html). Acesso em: 12/11/2021.
- PEREIRA, J. M., KRUGLIANSKAS, I., 2005, “Gestão de inovação: a lei de inovação tecnológica como ferramenta de apoio às políticas industrial e tecnológica do Brasil”, *RAE eletrônica*, v. 4, n. 2, pp. 0–0.
- PINTO, L. G. R., OLIVEIRA, C. E. S. D., FARIA, B. M., et al., 2013, *Estudos geoelétricos (sondagem vertical e caminhamento elétrico) em sedimentos aluvionares do Rio Madeira-município de Porto Velho-RO*. Relatório técnico, CPRM.
- REYNOLDS, J. M., 2011, *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.
- ROY, A., APPARAO, A., 1971, “Depth of investigation in direct current methods”, *Geophysics*, v. 36, n. 5, pp. 943–959.
- ROY, K. K., 2007, *Potential theory in applied geophysics*. Springer Science & Business Media.
- SANTOS, K. P. C. D., 2014, “Desenvolvimento de resistivímetro de baixo custo para monitoramento ambiental”, .
- SATO, M., MOONEY, H. M., 1960, “The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials”, *Geophysics*, v. 25, n. 1, pp. 226–249.
- SERWAY, R. A., JOHN JR, W., 2010, *PRINCÍPIOS DE FÍSICA-Eletromagnetismo-VOLUME 3*. Cengage Learning Edições Ltda.
- SEVERO, E. A., DE OLIVEIRA, M., DE GUIMARÃES, J. C. F., 2014, “Inovação de produto em uma empresa de micro-ônibus”, *Revista Pretexto*, pp. 46–63.
- SILVA, L. M. A., 2016, “Resistividade elétrica superficial do concreto: influência da cura”, .

- SILVA, M. S. D., OTHERS, 2013, “Rede de sensores sem fio de baixo custo para monitoramento ambiental”, .
- SIQUEIRA, R. L. A., 2018, *Modelagem direta do problema da sondagem geométrica 2d com uma discretização baseada numa rede de resistores*. Tese de D.Sc., ON, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SMITH, S. W. E. O., 1997, *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, v. 14. California Technical Pub. San Diego.
- SOUZA, L. A. P. D., 2006, *Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- TELFORD, W., GELDART, L., SHERIFF, R., 1990, *Applied Geophysics*. 2 ed. Cambridge, Cambridge University Press.
- VENTURA, P., 2021. “Interfaces de Programação”. Disponível em: <https://www.ateomomento.com.br/o-que-e-api/>. Acesso em: 05/1/2022.
- VIDAL, P. R., 2008, “Sistema de controle industrial microprocessado”, .

# Apêndice A



Projeto Geo Resistivímetro		
Simulação de dados para prototipagem		
AW - LDSM		
Observatório Nacional		
File: malha 3 camadas.sch		
<b>Título: Malha Resistiva de 3 camadas</b>		
Size: A3	Date: 2019-Oct-16	Rev: 0.1
KICad E.D.A. kicad (5.1.0)-1		Id: 1/1

## Apêndice B

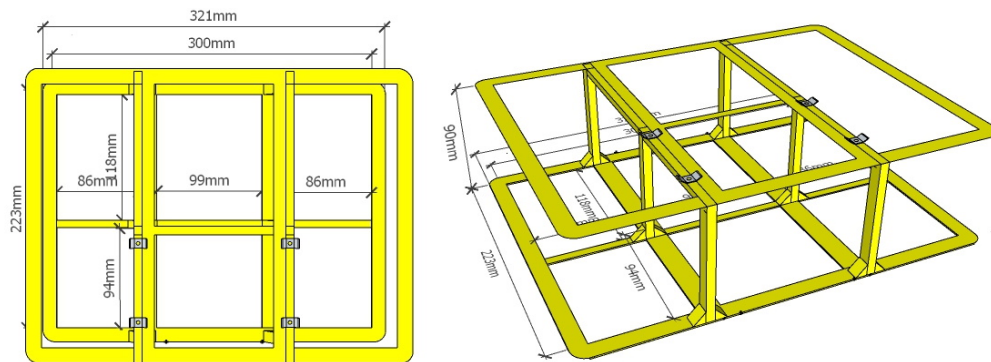


Figura 7.3: Estrutura responsável por dar a sustentação e acomodar todos os componentes eletrônicos. Está estrutura vai ser construída em uma impressora 3D, com filamentos de acrilonitrila butadieno estireno ( ABS).

Fonte: Elaborada pelo autor.

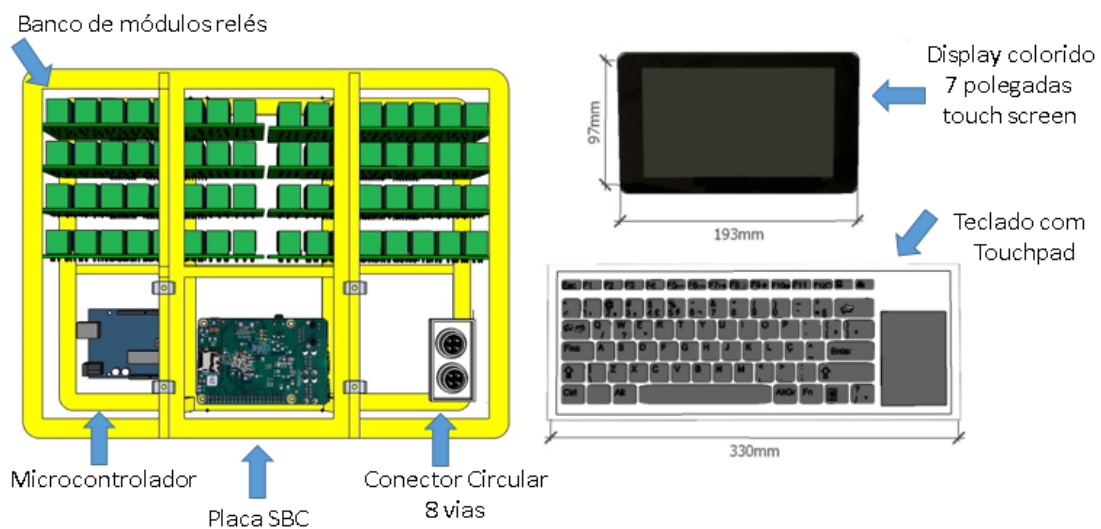


Figura 7.4: Os componentes eletrônicos montado na estrutura independente da caixa de proteção, para melhor acomodação e maior resistência a choques.

Fonte: Elaborada pelo autor.

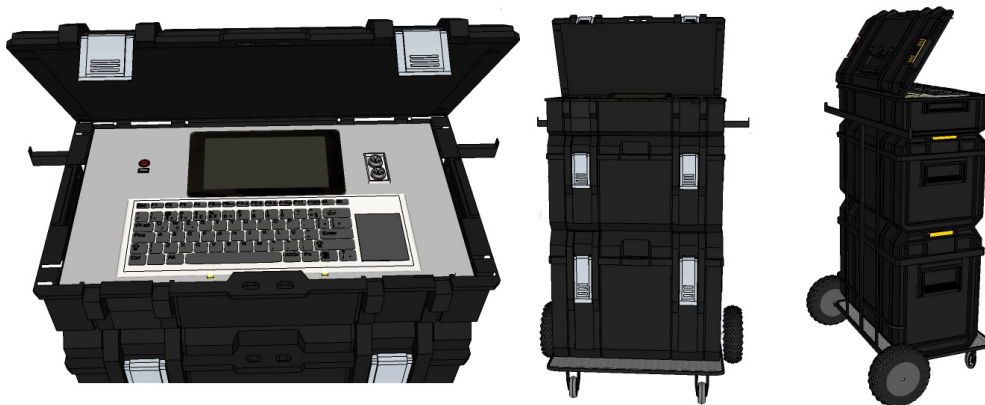


Figura 7.5: A estrutura da caixa do equipamento e feira de paredes estruturais duráveis proporcionam uma estrutura independente e robusta para as unidades, com vedação contra água integrada em todas as unidades para proteção do conteúdo e longa vida útil do equipamento. Alças dobráveis para transporte manual e fixação no suporte do carro e gancho metálico para travar o organizador do mecanismo de fechadura do carrinho.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Figura 7.6: O conjunto é formado por três caixa, sendo uma o próprio equipamento, um carrinho metálico com duas rodas e as outras duas para carregar todo material de campo, com uma capacidade de carga de até 40kg e índice de proteção IP65.

Fonte: Elaborada pelo autor.

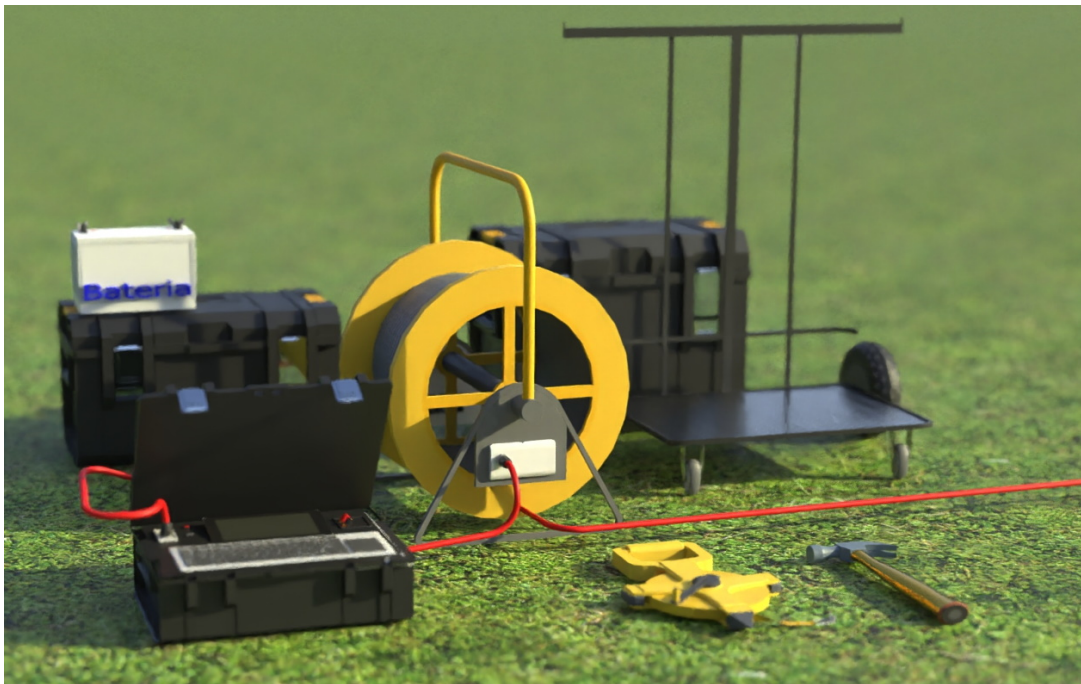


Figura 7.7: O conjunto do materiais idealizado para o protótipo conceito.  
Fonte: Elaborada pelo autor.