

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

JONAS OLIVEIRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE
ELETORRESISTIVÍMETRO MULTIELETRODO DE BAIXO CUSTO**

Caçapava do Sul - RS

2022

JONAS OLIVEIRA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE
ELETORRESISTIVÍMETRO MULTIELETRODO DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima

Coorientador: Prof. Dr. Leugim Corteze Romio

Caçapava do Sul - RS

2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

S76d Santos, Jonas Oliveira
DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE
ELETRORRESISTIVÍMETRO MULTIELETRODO DE BAIXO CUSTO /
Jonas Oliveira Santos.
116 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) --
Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2022.
"Orientação: Marcus Vinicius Aparecido Gomes de
Lima".

1. Instrumentação geofísica. 2. Protótipo de baixo
custo. 3. Eletroresistividade. 4. Monitoramento
contínuo. 5. Raspberry Pi. I. Título.

JONAS OLIVEIRA SANTOS

DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ELETRORRESISTIVÍMETRO MULTIELETRODO DE BAIXO CUSTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geofísica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geofísica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 18 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Me. Diogo Peixoto Córdova
UNIPAMPA

Prof. Me. Lenon Melo Ilha
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/06/2022, às 08:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **DIOGO PEIXOTO CORDOVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/07/2022, às 20:14, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LENON MELO ILHA, Técnico de Laboratório Área**, em 06/07/2022, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0770359** e o código CRC **ECE6A2C3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me abençoar com a oportunidade de concluir essa etapa da minha vida, por me dar força e sabedoria e por proporcionar situações de aprendizado e evolução como ser humano. Sou grato a cada momento que vivi, desde os momentos bons até os momentos de dificuldades.

Agradeço minha mãe e meu pai, Maria Elisa e José Oliveira, que me ensinaram desde cedo a importância de se dedicar aos estudos. Além disso, sou grato por terem entendido o quanto esta etapa era importante para mim e por terem feito o sacrifício da distância. Amo os senhores.

Agradeço a minha esposa, Rebeca Araujo Gomes, que é o maior presente que pude ser abençoado nesta etapa da minha vida. Obrigado amor pela parceria, companheirismo, amizade, convivência, por alegrar cada dia. Sou privilegiado por ter seus sorrisos diários, por suas palavras de incentivo, por me ajudar a crescer como homem, enfim, por ter você por completa. Te amo, Rebeca Araujo.

Agradeço minha irmã Joelisa Oliveira e meu irmão Vitor Orlando, pelo companheirismo desde sempre, pela amizade e por acreditarem. Amo vocês, irmãos.

Agradeço a minha sogra, Dora Silvia, que sempre esteve presente em nossos dias mesmo que distante fisicamente. Nos incentivando, encorajando e, assim como meus pais, nos mostrando o valor do estudo. Te amo, Dorinha.

Agradeço aos mestres que tive durante o período da graduação, em especial aos docentes, Mario Rosales, Éverton Frigo, José Rojas, Ítalo Golçalves, Moisés Razeira, Diogo Cordoba e Tiago Gregory, por terem compartilhado o que é sagrado, o conhecimento.

Excepcionalmente gostaria de agradecer ao meu amigo e orientador Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima, que sempre esteve presente, me orientando, não somente no Trabalho de Conclusão de Curso, mas em todas as etapas da graduação. Muito obrigado, pelo valioso conhecimento transmitido e sobretudo pela amizade, Mestre dos mestres. Saiba que o senhor é um exemplo para mim.

Agradeço ao meu coorientador, Leugim Corteze Romio, que embarcou no projeto de Trabalho de Conclusão de Curso, me ajudando sempre que necessário. Muito obrigado pela parceria, mestre.

Agradeço a todos os amigos e colegas que fiz na Unipampa, pelas horas

investidas na alegria, troca de conhecimentos e momentos que passamos. Em especial, trutinha Lessandro (lambe sal), Welynton, Nicolas, Patrick, Matheus Fernandes, Victor, Fernando Henrique (Presida), Paulo Roberto, Aline Senna, Gabriel Padre, Ana Naujokatt e Jefferson.

Por fim gostaria de agradecer a Universidade Federal do Pampa, por me proporcionar um ensino público de qualidade. Obrigado a todos que contribuem para o crescimento da instituição.

“Quando considero a brevidade da existência dentro do pequeno parêntese do tempo e reflito sobre tudo o que está além de mim e depois de mim, enxergo minha pequenez. Quando observo que um dia tombarei no silêncio de um túmulo, tragado pela vastidão da existência, compreendo minhas extensas limitações e, ao deparar com elas, deixo de ser deus e liberto-me para ser apenas um ser humano. Saio da condição de centro do universo para ser apenas um andante nas trajetórias que desconheço.”

- Augusto Cury – O vendedor de sonhos

RESUMO

O eletrorresistivímetro é um dos equipamentos mais utilizados em estudos geofísicos e tem como finalidade a medição de propriedades geoelétricas, por meio de um sistema de quadripolos. Usualmente, possui grande variedade de aplicações tais como, monitoramento ambiental, monitoramento geotécnico, estudos de hidrogeologia, entre outros. A sua aplicabilidade aumenta linearmente com a evolução da tecnologia do instrumento. Entretanto, esta relação causa grande impacto no valor econômico do equipamento para o usuário final, tornando o uso de eletrorresistivímetros comerciais inviáveis em alguns projetos, principalmente quando relacionados ao monitoramento contínuo ou permanente. Desta forma, este trabalho apresenta a prototipagem numérica de um eletrorresistivímetro em uma versão multieletrodo e de baixo custo, abordando as etapas de modelagem e simulação dos circuitos, projeção e validação do protótipo e a relação de materiais necessários para o desenvolvimento físico do equipamento. Para a etapa de simulação numérica, foi utilizado o *software* de modelagem e simulação de circuitos Proteus Design Suite©, desenvolvido pela empresa Labcenter Electronics Ltd. A metodologia implementada foi de acordo com a análise de manuais de equipamentos comerciais disponíveis e a revisão bibliográfica de prototipagens de eletrorresistivímetros já existentes. Por fim, o teste de validação do protótipo projetado, demonstrou que o mesmo está satisfatoriamente calibrado e conseqüentemente validado.

Palavras-Chave: Instrumentação geofísica; Protótipo de baixo custo; Métodos elétricos; Eletrorresistividade; Monitoramento contínuo; Raspberry Pi

ABSTRACT

The electroresistivimeter is one of the most used equipment in geophysical studies and its purpose is to measure geoelectrical properties, through a quadrupole system. Usually, it has a wide variety of applications such as environmental monitoring, geotechnical monitoring, hydrogeology studies, among others. Its applicability increases linearly with the evolution of instrument technology. However, this relationship has a great impact on the economic value of the equipment for the end user, making the use of commercial electroresistivimeters unfeasible in some projects, especially when related to continuous or permanent monitoring. In this way, this work presents the numerical prototyping of an electroresistivimeter in a multi-electrode and low cost version, approaching the stages of circuit modeling and simulation, projection and validation of the prototype and the list of materials necessary for the physical development of the equipment. For the numerical simulation step, the circuit modeling and simulation software Proteus Design Suite© was used, developed by the company Labcenter Electronics Ltd. The methodology implemented was in accordance with the analysis of commercial equipment manuals available and the bibliographic review of prototyping. of existing electrical resistance meters. Finally, the validation test of the designed prototype showed that it is satisfactorily calibrated and consequently validated.

Keywords: Geophysical instrumentation; Low cost prototype; Electrical methods; Electroresistivity; Continuous monitoring; Raspberry Pi;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Tensão elétrica. (a) Tensão contínua – VCC, (b) Tensão alternada – VAC.	23
Figura 2 – Relação entre grandezas elétricas e suas expressões matemáticas.	25
Figura 3 – Representação dos parâmetros para definição de resistência elétrica de um condutor linear.	26
Figura 4 – Ilustração das diferentes possibilidades de distribuição da resistividade em estruturas geológicas. (a) estrutura homogênea; (b) estrutura estratificada (1D); (c) distribuição de resistividade 2D no terreno; (d) distribuição de resistividade 3D no solo.	29
Figura 5 – Faixas de valores de resistividade para minerais e rochas mais comuns da crosta terrestre.	30
Figura 6 – Representação do campo elétrico num semiespaço e o potencial de superfície associado formado por: (a e b) um pólo isolado e (c, d) um dipolo.	31
Figura 7 – Linhas de campo elétrico e superfícies equipotenciais em torno de um único eletrodo na superfície de um semiespaço homogêneo: (a) linhas de campo radialmente externas em torno de uma fonte e (b) linhas de campo radialmente internas em torno de um sumidouro.	32
Figura 8 – Configuração geral de quatro eletrodos para medição de resistividade, consistindo em um par de eletrodos de corrente (A, B) e um par de eletrodos de potencial (M, N).	34
Figura 9 - (a) Efeito do tempo de decaimento IP na forma de onda potencial para uma corrente de entrada de onda quadrada. (b) Os intervalos de tempo usados para medir a capacidade de carga aparente, também denominado de cargabilidade (M), destacados pelos círculos sombreados.	36
Figura 10 – (a) Os sinais de onda quadrada de dupla frequência no domínio da frequência e as ondas distorcidas medidas pelo receptor. (b) mudança de fase entre a corrente da onda senoidal transmitida e a tensão elétrica medida em cada frequência.	37
Figura 11 – Ilustração dos mecanismos de polarização induzida. (a) Propriedades capacitivas ilustradas pelo armazenamento (carregamento) e descarga subsequente de cargas elétricas; (b) polarização da membrana devido à barreira de carga formada	

por íons nas superfícies dos grãos no estreitamento de um poro; (c) polarização da membrana devido ao acúmulo de carga em torno da argila e do mineral fibroso; e (d) polarização do grão devido ao acúmulo de carga em ambos os lados de um grão condutor.....	39
Figura 12 – Ilustração esquemática de um mecanismo eletroquímico para o SP produzido por um corpo de sulfeto de ferro.....	40
Figura 13 – Procedimento para execução da técnica de Sondagem Elétrica Vertical utilizando a configuração de eletrodo Wenner.....	43
Figura 14 – Procedimento para execução da técnica de Sondagem Elétrica utilizando a configuração de eletrodo Schlumberger.	44
Figura 15 – Disposição inicial no campo da configuração dipolo-dipolo para o caminhamento elétrico.	46
Figura 16 – Disposição inicial no campo da configuração pólo-dipolo para o caminhamento elétrico.	47
Figura 17 – Comportamento dos elétrons nos materiais condutores (a) e isolantes (b), quando submetidos a energia térmica.	49
Figura 18 – Variações dos tipos de resistores fixos, disponíveis comercialmente	50
Figura 19 – Modelos de resistores do tipo variável disponíveis comercialmente. (a) Potenciômetro, (b) Trimpot e (c) Trimmer.....	51
Figura 20 – Simbologias gráficas empregadas para os resistores de valores fixos e variáveis em diagramas elétricos.	51
Figura 21 - Modelos de capacitores disponibilizados comercialmente. (a) capacitores eletrolíticos, (b) capacitores de tântalo e (c) capacitores cerâmicos	53
Figura 22 – Simbologias empregadas para a representação gráfica de capacitores fixos e variáveis em diagramas elétricos.....	54
Figura 23 – Exemplo de modelos de transistores disponíveis comercialmente	55
Figura 24 – Simbologias empregadas para representação dos transistores BJT, em circuitos eletrônicos. (a) Transistores do tipo NPN, (b) Transistores do tipo PNP.	56
Figura 25 – Exemplificação de Modelos convencionais de diodos.....	57
Figura 26 – Exemplificação dos tipos de diodos e suas simbologias	58
Figura 27 - Modelos de encapsulamento utilizados para a compactação dos circuitos integrados.....	59
Figura 28 – Simbologia do Amplificador Operacional comum. (a) Terminais de contato	

e (b) símbolo representativo em circuitos.....	60
Figura 29 – Representação dos processos para conversão de grandezas analógicas em digitais (a) e grandezas digitais em analógicas (b), apresentado em diagramas de blocos.....	62
Figura 30 – Diagrama funcional genérico dos (a) multiplexadores – MUX e (b) demultiplexadores – DEMUX.	63
Figura 31 – Modelos de transformadores elétricos disponíveis comercialmente	64
Figura 32 – Modelos de simbologias empregadas para a representação dos transformadores com núcleo ferromagnético (a, b) e núcleo de ar (c, d).	64
Figura 33 – Modelos de relés disponíveis comercialmente.....	65
Figura 34 – Alguns tipos de simbologias utilizadas para a representação dos relés, de acordo com a quantidade de pólos.	66
Figura 35 – Exemplificações de algumas ferramentas do software Proteus Design Suite ©. (a) captura esquemática; (b) design de Firmware; (c) visualização 3D e (d) design de PCB.	67
Figura 36 – Eletroresistivímetro multieletrodo de escala laboratorial desenvolvido por Clement <i>et al.</i> , (2020).....	68
Figura 37 – Imagem do equipamento desenvolvido pelo Santos, K., (2014). (a) Painel frontal do equipamento; (b) Fonte de alimentação, responsável pela emissão de corrente ao solo. (c) circuito de seleção acoplado ao eletrodo; (d) circuito de seleção de eletrodo.	70
Figura 38 – Protótipo desenvolvido por Fatahillah <i>et al.</i> (2019).	71
Figura 39 – Diagrama de blocos dos sistemas genéricos de um eletroresistivímetro e possíveis configurações.	72
Figura 40 – Características da versão física do Raspberry Pi 3 modelo 3B.....	73
Figura 41 – Pinos do barramento GPIOs e suas respectivas funções.	74
Figura 42 – Representação do Raspberry Pi 3 modelo 3B disponível no <i>software</i> Proteus.....	74
Figura 43 – Diagrama de bloco do Sistema de transmissão de corrente	76
Figura 44 – Simbologia da bateria disponível no software Proteus.....	77
Figura 45 – Características do circuito integrado NE555, (a) Descrição dos contatos, (b) Diagrama de bloco funcional.....	77
Figura 46 – Circuito da etapa de oscilação do sinal.	78

Figura 47 – (a) Representação do CD4013 no software Proteus e o (b) Diagrama de bloco funcional do componente.....	80
Figura 48 – Circuito de inversão da etapa de oscilação do sinal.....	81
Figura 49 – Circuito de potência do sistema de transmissão	82
Figura 50 – Circuito de retificação e filtragem do sinal, do sistema de transmissão de corrente.	83
Figura 51 – Projeção do diagrama elétrico do sistema de transmissão de corrente.	84
Figura 52 – Exemplificação do módulo de controle do sistema de transmissão de corrente	85
Figura 53 – Diagrama de bloco funcional do conversor analógico-digital ADS1015.	86
Figura 54 – (a) Representação do ADC1015 no software Proteus e, (b) modelo real do dispositivo.....	87
Figura 55 – Diagrama do circuito de medição e conversão de sinal.	87
Figura 56 – Configuração do sistema de eletrodo em modelo cascata.....	89
Figura 57 – Exemplificação da organização do sistema de eletrodos para o subsistema A.....	90
Figura 58 – Conjunto de sistemas do protótipo projetado, com exceção do sistema de transmissão de corrente. Fonte: Elaborado pelo autor.	94
Figura 59 –Análise do circuito de oscilação do sinal realizado no Proteus.	95
Figura 60 - Análise da etapa de inversão do sinal realizado no Proteus.	96
Figura 61 – Simulação da etapa de potência. Conforme o gráfico, o sinal resultante é alternado e possui a forma de onda quadrada.	96
Figura 62 -Simulação da etapa de retificação e filtragem da tensão. O gráfico mostra o momento em que quando o circuito é ligado, após um curto período, o capacitor é carregado e desta forma a tensão permanece constante.	97
Figura 63 - Diagrama elétrico completo do circuito de transmissão de corrente.	98
Figura 64 – Diagrama do procedimento de validação do protótipo. Sendo RA = Resistência de contato do eletrodo A, RB = Resistência de contato do eletrodo B, RM = Resistência de contato do eletrodo M, RN = Resistência de contato do eletrodo N e RS representa a resistência do solo.....	99
Figura 65 – Circuito de teste para a validação do protótipo no <i>software</i> Proteus Design Suite.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Código de cores para determinação dos valores de resistência dos resistores e suas tolerâncias.	52
Tabela 2 – GPIOs a serem utilizado por cada um dos subsistemas e os endereços binários destinado a cada eletrodo.....	91
Tabela 3 – Relação de quadripolos e seus respectivos eletrodos utilizados no processo de validação.	101
Tabela 4 – Apresentação dos valores da pseudo resistência do solo registrados pelo protótipo e os valores da diferença de potencial (V_{mn}) e corrente (I) utilizadas para o seu cálculo.	102
Tabela 5 – Comparação entre os valores da pseudo resistência do solo registrado pelo protótipo e a referência RS.....	103
Tabela 6 – Lista de materiais utilizados para a projeção do protótipo.	104

LISTA DE SIGLAS

1D – Unidimensional

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

ADC – Analog Digital Converter

AOP – Amplificador Operacional

BJTs – Bipolar Junction Transistor

BLE – *Bluetooth Low Energy*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CE – Caminhamento Elétrico

CI – Circuito Integrado

CLK – *Clock*

CPU – *Central Processing Unit*

CSI – *Camera Serial Interface*

DEMUX – Demultiplexador

DSI – *Display Serial Interface*

E/S – Entrada/Saída

FETS – *Field Effect Transistor*

Fem – Força eletromotriz

GB – Giga *byte*

GND – *Ground*

GPIO – General Input Output

HDMI – *High Definition Multimedia Interface*

I/O – *Input/Output*

I²C – *Inter-Integrated Circuit*

JFETs – *Junction Field – Effect Transistor*

LCD – *Liquid Crystal Display*

MF – *Metal factor*

MISO – *Master Input Slave Output*

MOSFETs – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

MOSI – *Master Output Slave Input*

MUX – Multiplexador

NA – Normalmente aberto
NC – Normalmente comum
NF – Normalmente fechado
PCB – Placa de Circuito Impresso
PFE – *Percentage Frequency*
PIC – *Programmable Interface Controller*
PWM – Pulse Width Modulation
RAM – *Random Access Memory*
RMS – *Root mean square*
RPI3 – Raspberry Pi 3
RXD – *Receive Data*
SBC – *Single Board Computer*
SCL – *Serial Clock*
SDA – *Serial Data*
SEV – Sondagem Elétrica Vertical
SI – *Serial Interface*
SPI – *Serial Peripheral Interface*
TXD – *Transmit Data*
UART – *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*
USB – *Universal Serial Bus*
VCA – Tensão de Corrente Alternada
VCC – Tensão de Corrente Contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Objetivo Geral	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	21
1.2 Justificativa.....	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Grandezas elétricas fundamentais	22
2.1.1 Tensão Elétrica	22
2.1.2 Corrente elétrica	23
2.1.4 Potência elétrica	24
2.1.5 Relações entre grandezas elétricas	25
2.2 Métodos elétricos	26
2.2.1 Método de eletrorresistividade	27
2.2.1.1 Conceitos fundamentais da resistividade elétrica.....	27
2.2.1.2 Fluxo de corrente em um meio homogêneo	30
2.2.1.2 Método elétrico de Polarização Induzida (IP)	34
2.2.1.2.1 Polarização Induzida no domínio do tempo.....	35
2.2.1.2.2 Polarização Induzida no domínio da frequência.....	36
2.2.1.2.3 Mecanismos de Polarização Induzida	37
2.2.1.3 Método elétrico de Potencial Espontâneo (SP)	39
2.2.1.4 Técnicas de aquisição	41
2.2.1.4.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)	41
2.2.1.4.1.1 Configuração Wenner.....	42
2.2.1.4.1.2 Configuração Schlumberger.....	43
2.2.1.4.2 Caminhamento Elétrico (CE).....	44
2.2.1.4.2.1 Configuração dipolo-dipolo	44
2.2.1.4.2.2 Configuração pólo-dipolo.....	46
2.2.2 Eletrônica Básica.....	47
2.2.2.1 Materiais condutores, isolantes e semicondutores	48
2.2.2.2 Componentes eletrônicos.....	49
2.2.2.2.1 Resistores	49
2.2.2.2.2 Capacitores	53
2.2.2.2.3 Transistores.....	54
2.2.2.2.4 Diodos	57
2.2.2.2.5 Circuitos Integrados.....	58

2.2.2.6	Amplificadores Operacionais	59
2.2.2.7	Circuitos digitais	60
2.2.2.8	Conversores de sinais	60
2.2.2.9	Multiplexadores e Demultiplexadores	62
2.2.2.10	Transformadores	63
2.2.2.11	Relés	64
2.3	Proteus Design Suite ©	66
2.4	Estado da Arte	67
2.4.1	OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale	67
2.4.2	Desenvolvimento de Resistímetro de baixo custo para monitoramento ambiental	68
2.4.3	<i>Low-cost multi-electrode resistivity meter based on microcontroller for electric resistivity tomography purpose</i>	70
3	METODOLOGIA	71
3.1	Sistema de controle	72
3.2	Sistema de transmissão de corrente	75
3.2.1	Fonte de alimentação	76
3.2.2	Etapa de inversão de sinal	77
3.2.3	Etapa de potência	81
3.2.4	Etapa de retificação e filtragem do sinal	82
3.2.5	Controle do Sistema de Transmissão	85
3.3	Sistema de medição	86
3.4	Sistema de eletrodos	88
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	105
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
7	APÊNDICES	111

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos instrumentos está diretamente ligado ao aprimoramento de novas técnicas e aplicações científicas em todos os campos das ciências. Por exemplo, o surgimento do transistor, a otimização da eletrônica de estado sólido nos circuitos integrados e o avanço tecnológico de sistemas embarcados, tiveram um enorme impacto na ciência, em geral.

Nas Geociências, particularmente na Geofísica, o desenvolvimento da instrumentação expandiu o número de trabalhos, bem como, sua gama de aplicações. Foi possível reduzir o peso e o volume dos equipamentos, simplificar as fontes de alimentação, fornecer automação com relativa facilidade e introduzir técnicas de computador e microprocessamento numa ampla variedade de atividades de medição e coleta de dados (NEWELL, 1979). Instrumentos leves e compactos proporcionaram uma maior mobilidade e portabilidade que facilitaram a coleta de dados de estações amplamente dispersas e geralmente remotas.

Não obstante, este avanço tecnológico tem evoluído continuamente num ritmo acelerado, tornando os instrumentos cada vez mais sofisticados, capazes de medir e calcular parâmetros geofísicos com maior precisão sob diversos contextos de aplicação, abrangendo desde a exploração hidrogeológica, geotécnica, mineral, ambiental, entre outras.

Os instrumentos geofísicos variam em termos de complexidade, tamanho, peso, sensibilidade e natureza da fonte, mas em geral são usados para medir variações dos campos físicos relacionados ao contraste de propriedades físicas, tanto em campo, quanto em laboratório. Essas medições são feitas a fim de se obter informações sobre as condições de subsuperfície do local de investigação e caracterizar eventuais regiões anômalas do meio geológico.

Apesar da grande variedade de instrumentos atualmente disponibilizados comercialmente, o acesso para as pequenas e médias empresas e instituições de ensino e pesquisa ainda é limitado, devido principalmente ao custo relativamente elevado dos equipamentos, no qual impede o uso amplo e irrestrito destas ferramentas por estes setores da sociedade.

Obviamente, os equipamentos geofísicos que possuem mais alta precisão, robustez para manuseio em situações adversas de campo, mais leves, portáteis, de

baixo ruído, faixa dinâmica grande e baixo consumo de energia, são geralmente mais caros, da ordem de dezenas de milhares de dólares. Além disso, embora exista iniciativas de instituições brasileiras no desenvolvimento de equipamentos destinados a Geofísica, a maioria dos equipamentos são importados, o que pode tornar o acesso a essa tecnologia economicamente inviável para países em desenvolvimento e, principalmente em projetos específicos, tais como, o monitoramento contínuo de áreas de risco como destacam Arosio *et al.*, (2017) ou em pesquisas por água subterrânea como descrito por Badmus *et al.*, (2013).

Algumas alternativas para o desenvolvimento de instrumentação geofísica economicamente viáveis são encontradas na literatura. Autores como Clement *et al.*, 2020; Goffin, 2018; Marconi, *et al.*, 2018; Santos, K., 2014; Yohandri *et al.*, 2008, descreveram em suas obras a prototipagem de equipamentos geofísicos com o uso de microcontroladores de fácil acesso ou computadores de placa única, tais como o Arduíno (Livre), PIC (Microchip Technology Inc.), ATmega (*Microchip Technology Inc.*) e Raspberry Pi (*Raspberry Pi Foundation*). Entretanto, até então são poucos os trabalhos que descrevem detalhadamente o desenvolvimento do *hardware* necessário para a prototipagem desses equipamentos.

Sendo assim, este trabalho traz como proposta de pesquisa, a simulação numérica e o desenvolvimento de protótipo de um eletrorresistivímetro multieletrodo de baixo custo, baseado em trabalhos pré-existentes.

Este trabalho de conclusão de curso está dividido em duas etapas:

- a) descrição das unidades eletrônicas que compõem o protótipo;
- b) simulação numérica do protótipo por meio de *software* de modelagem de circuitos Proteus Design Suite®, desenvolvido pela empresa Labcenter Electronics Ltd..

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho é projetar e simular um protótipo do equipamento geofísico eletrorresistivímetro multieletrodo de baixo custo.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos destacam-se:

- a) projetar um protótipo de eletrorresistímetro multieletrodo de 32 canais que seja eficiente e economicamente viável em comparação com os equipamentos disponíveis atualmente no mercado;
- b) simular a resposta do modelo e validar a calibração do protótipo;

1.2 Justificativa

O eletrorresistímetro é um dos equipamentos mais utilizados em estudos geofísicos e tem como finalidade a medição da resistividade elétrica do meio através de um sistema de quadripolos denominados A, B, M, N. Usualmente é aplicado em estudos de hidrogeologia (GOEBEL *et al.*, 2017), monitoramentos ambientais (GRELLIER *et al.*, 2004), monitoramento de integridade estrutural (FAUCHARD *et al.*, 2013), exploração mineral (HORO *et al.*, 2020), entre outros.

Dependendo do projeto, o uso de eletrorresistímetros comerciais torna-se inviável, por exemplo, no monitoramento contínuo ou permanente de estruturas, barragens hidráulicas, barragens de rejeito, entre outras, nas quais requerem medições periódicas para avaliação da estrutura local. Logo, essas aplicações se beneficiariam com o emprego de equipamentos de baixo custo como sendo uma alternativa economicamente viável para execução destes trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta secção tem como objetivo apresentar os aspectos teóricos básicos para a compreensão do trabalho. São abordados os principais conceitos sobre as grandezas elétricas que envolvem métodos geofísicos elétricos; eletrônica básica; apresentação do estado da Arte; e uma breve descrição teórica do funcionamento e fundamentos do *software* Proteus Design Suite©.

2.1 Grandezas elétricas fundamentais

Para entender os princípios dos métodos elétricos e dos circuitos eletroeletrônicos, além de ser capaz de projetá-los, é de grande importância compreender as grandezas elétricas que os caracterizam. Desta forma, a seguir será discutido os conceitos das grandezas: tensão elétrica, corrente elétrica, resistência elétrica e potência elétrica.

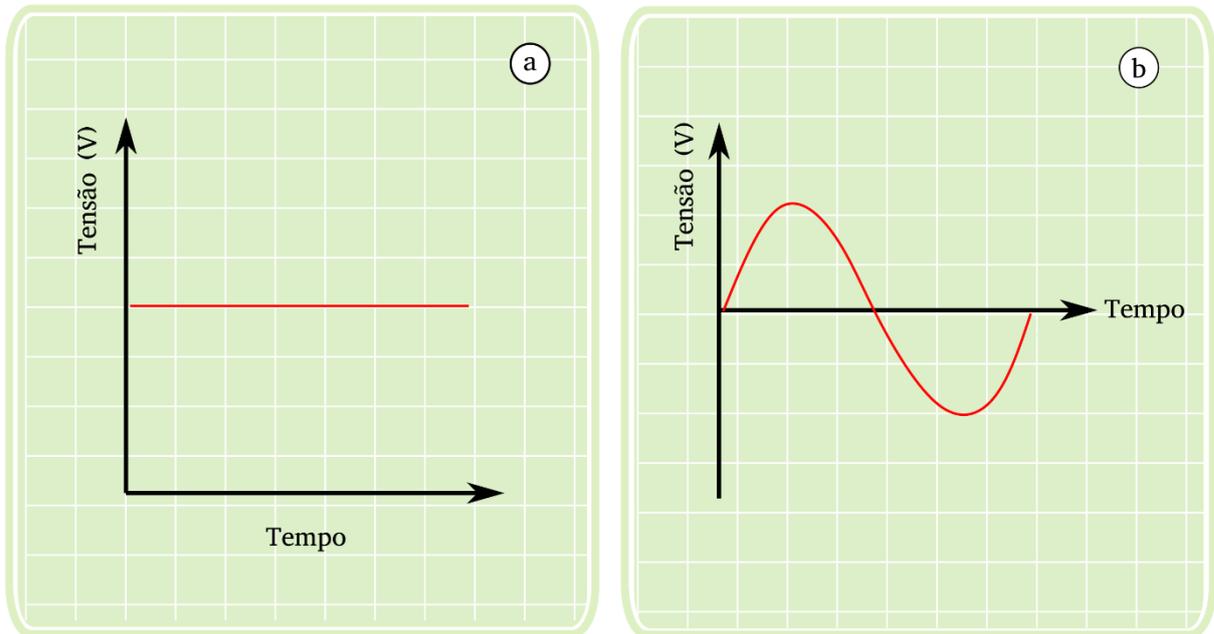
2.1.1 Tensão Elétrica

A tensão elétrica, também conhecida como diferença de potencial elétrico (d.d.p), é definida como a força que impulsiona os elétrons, por meio de um condutor. Isso ocorre em virtude da força do campo eletrostático das cargas elétricas que são capazes de realizar trabalho ao deslocarem uma outra carga por atração ou repulsão. A capacidade de uma carga realizar trabalho é chamada de potencial. Quando uma carga for diferente da outra, haverá uma diferença de potencial entre elas. A soma das diferenças de potencial de todas as cargas do campo eletrostático é conhecida como força eletromotriz (fem) ou tensão elétrica (HALLIDAY *et al.*, 2015; WESTCOTT & WESTCOTT, 2018). Na literatura, a tensão elétrica normalmente é representada pela letra V, sua unidade de acordo com o Sistema Internacional de medidas (SI) é o Volt, que, matematicamente, é definido como a diferença de potencial entre dois pontos, necessário para realizar um trabalho de 1 Joule (J), transferindo uma carga de 1 Coulomb (C) de um ponto a outro:

$$1V = \frac{1J}{1C} \quad (1)$$

A tensão elétrica pode ser categorizada em dois tipos, tensão contínua (VCC) ou tensão alternada (VCA). A origem da variação da tensão ocorre devido ao campo elétrico que a originou. Se a origem é um campo constante temos uma tensão contínua, se a origem é um campo alternado, no qual inverte seu sentido ao longo do tempo periodicamente, a tensão é alternada (SILVA, 2015). A Figura 1 ilustra graficamente os sinais resultantes dos dois tipos de tensão elétrica (VCA e VCC).

Figura 1 - Tipos de Tensão elétrica. (a) Tensão contínua – VCC, (b) Tensão alternada – VAC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1.2 Corrente elétrica

A corrente elétrica é definida como o movimento ordenado dos elétrons, devido à ação de um campo elétrico estabelecido no seu interior pela aplicação de uma d.d.p entre dois pontos desse condutor. Esta grandeza é representada pela letra I e de acordo com o SI a sua unidade de medida é o Ampère (A). Entretanto, em trabalhos geofísicos, utilizando métodos geoeletricos, usualmente é empregado a escala de miliampère (mA). Um Ampère (1A) equivale a $6,2 \times 10^{18}$ elétrons atravessando a seção reta de um meio qualquer durante um segundo. Esse mesmo número de elétrons transporta uma carga elétrica (q) igual a 1 Coulomb (C) (NUSSENZVEIG, 2015). A intensidade de corrente pode ser calculada através da equação:

$$1A = \frac{q}{\Delta t} \quad (2)$$

De maneira similar a tensão elétrica, a corrente elétrica pode ser classificada como contínua ou alternada. Denominamos corrente contínua toda corrente de sentido e intensidade constantes com o tempo. Nesse caso, a intensidade média da corrente elétrica em qualquer intervalo de tempo é a mesma e, portanto, igual à intensidade em qualquer instante (RAMALHO *et al.*, 2009). Em contrapartida, quando

ocorrem mudanças periódicas na intensidade e sentido da corrente é classificado como corrente alternada.

2.1.3 Resistência elétrica

A resistência elétrica é definida como a capacidade do corpo em se opor a passagem de corrente elétrica. Essa oposição à condução de corrente elétrica é provocada principalmente pela dificuldade dos elétrons livres em se movimentarem pela estrutura atômica em alguns materiais (MARKUS, 2001). A unidade de resistência elétrica segundo o SI é o ohm (Ω) e sua grandeza é representada pela letra R. Essa grandeza pode ser definida por meio da equação:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

2.1.4 Potência elétrica

O conceito de potência elétrica (P) está associada à quantidade de energia elétrica τ desenvolvida num intervalo de tempo Δt (MARKUS, 2001; NUSSENZVEIG, 2015). Matematicamente:

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} \quad (4)$$

onde (τ) é dado em Joule e (Δt) em segundo (J/s).

Quando relacionado a circuitos elétricos, a potência pode também ser definida como sendo a quantidade de carga elétrica (q) que uma fonte de tensão V pode fornecer ao circuito num intervalo de tempo Δt , sendo expressa pela equação:

$$P = \frac{V \cdot q}{\Delta t} \quad (5)$$

Como a razão entre $q/\Delta t$ corresponde à corrente elétrica, temos então que a potência elétrica possui uma relação matemática com a tensão (V) e a corrente elétrica (I), sendo explicitada por:

$$P = V \cdot I \quad (6)$$

Segundo o SI, a unidade de medida da potência elétrica é o Watts, sendo este representado pela letra W.

2.1.5 Relações entre grandezas elétricas

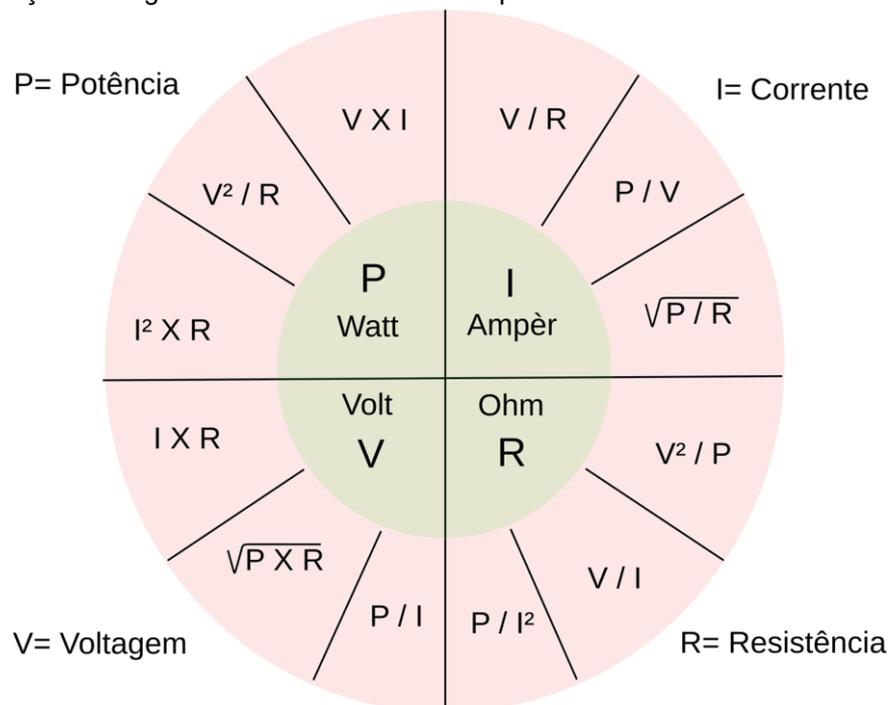
As grandezas elétricas, descritas anteriormente, podem ser relacionadas por meio das Leis de Ohm.

A primeira Lei de Ohm descreve que a intensidade da corrente elétrica que circula por um condutor é diretamente proporcional à tensão elétrica aplicada sobre ele, e inversamente proporcional à resistência elétrica do condutor (SHAMIEH & MCCOMB, 2012):

$$I = \frac{V}{R} \quad (7)$$

Por meio desta expressão, é possível obter as relações matemáticas entre as grandezas. A Figura 2 apresenta a relação entre as grandezas e as expressões matemáticas para a obtenção de seus valores.

Figura 2 – Relação entre grandezas elétricas e suas expressões matemáticas.



Fonte: Modificado de Westcott & Westcott, (2018, p.39).

Já a Segunda Lei de Ohm descreve quais são os fatores que influenciam a resistência elétrica. De acordo com a lei, a resistência elétrica é diretamente proporcional ao comprimento do condutor e inversamente proporcional a sua área de seção. Matematicamente:

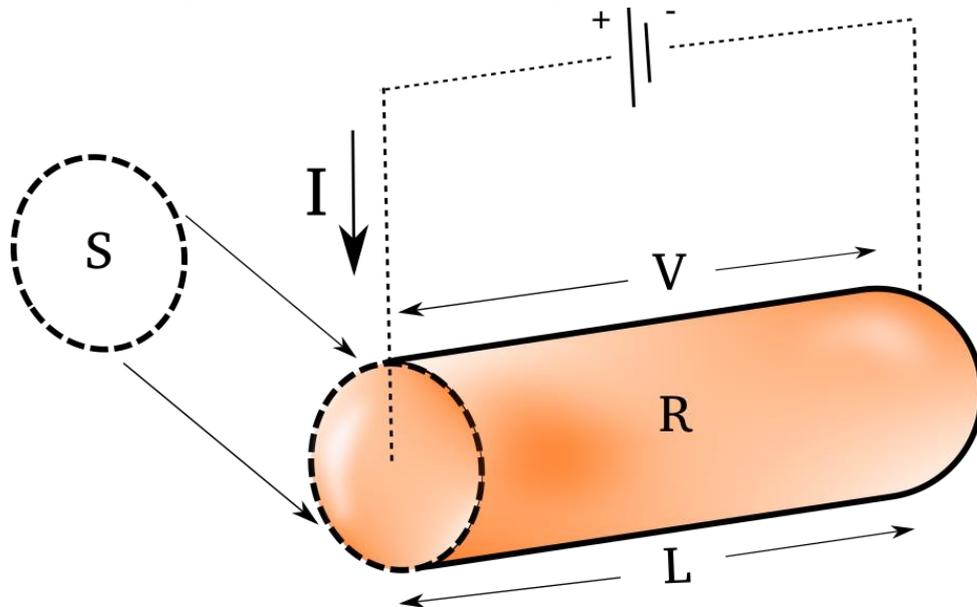
$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (8)$$

onde S (m^2) é a área da seção transversal do material, L o seu comprimento e ρ é a resistividade elétrica do material.

A resistividade elétrica (ρ) é uma propriedade intrínseca de cada material e expressa sua capacidade de se opor a corrente elétrica. Esta propriedade é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do corpo, como por exemplo a temperatura (NUSSENZVEIG, 2015).

A Figura 3 apresenta um esquema do circuito e representação da Segunda Lei de Ohm para um condutor linear.

Figura 3 – Representação dos parâmetros para definição de resistência elétrica de um condutor linear.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.2 Métodos elétricos

Várias técnicas foram desenvolvidas para investigações de propriedades elétricas da subsuperfície por meio do uso dos métodos elétricos. Algumas técnicas, fazem o uso de fontes naturais geradas pela própria estrutura em subsuperfície, geralmente causadas por reações de oxirredução, enquanto outras dependem da transmissão de corrente elétrica no solo, geradas artificialmente. Entre os métodos elétricos já desenvolvidos, incluem o de eletrorresistividade, potencial espontâneo (SP) e polarização induzida (IP) (ORELLANA, 1972; REYNOLDS, 2011; TELFORD, 1990).

2.2.1 Método de eletrorresistividade

O método de eletrorresistividade foi desenvolvido no início dos anos 1900, mas tornaram-se amplamente utilizados, na década de 70, principalmente devido as disponibilidades tecnológicas para processar e analisar os dados (ORELLANA, 1972; REYNOLDS, 2011).

O método é baseado na resposta do solo, mediante a transmissão de corrente elétrica. Normalmente, uma corrente elétrica é transmitida no solo por meio de dois eletrodos de transmissão de corrente, denominados A e B, e outros dois eletrodos, titulados de eletrodos de potencial M e N, medem a diferença de potencial elétrico. Com isso, é possível estimar a resistividade aparente do solo, que é uma função do quociente entre a diferença de potencial medida entre os eletrodos M e N, e a intensidade de corrente transmitida no solo. Nessa função intervém um coeficiente que depende da disposição dos eletrodos. Esse coeficiente é conhecido como fator geométrico e é representado pela letra K.

O método de eletrorresistividade permite não somente estudo das estruturas sub-horizontais, mas também a determinação das estruturas sub-verticais (falhas, diques) (FIGUEROLA, 1973). Este método é amplamente utilizado na busca de fontes de água subterrânea; monitoramento ambiental; pesquisas de engenharia para localizar cavidades subterrâneas, falhas e fissuras; exploração mineral, entre muitas outras aplicações (REYNOLDS, 2011).

2.2.1.1 Conceitos fundamentais da resistividade elétrica

Da Lei de Ohm (Equação 8) define-se que a resistividade é uma grandeza que relaciona a resistência elétrica de um corpo ao seu comprimento e à sua seção transversal, sendo definida pela equação:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (9)$$

onde S (m²) é a área da seção transversal do material, L o seu comprimento e R é a resistência elétrica medida. A resistividade é representada pela letra grega rho (ρ), cuja unidade de medida segundo SI é ohm.m ($\Omega.m$). O inverso da resistividade elétrica

é a condutividade elétrica (σ), expressa por,

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (10)$$

e possui como unidade de medida Siemens/metro (S/m).

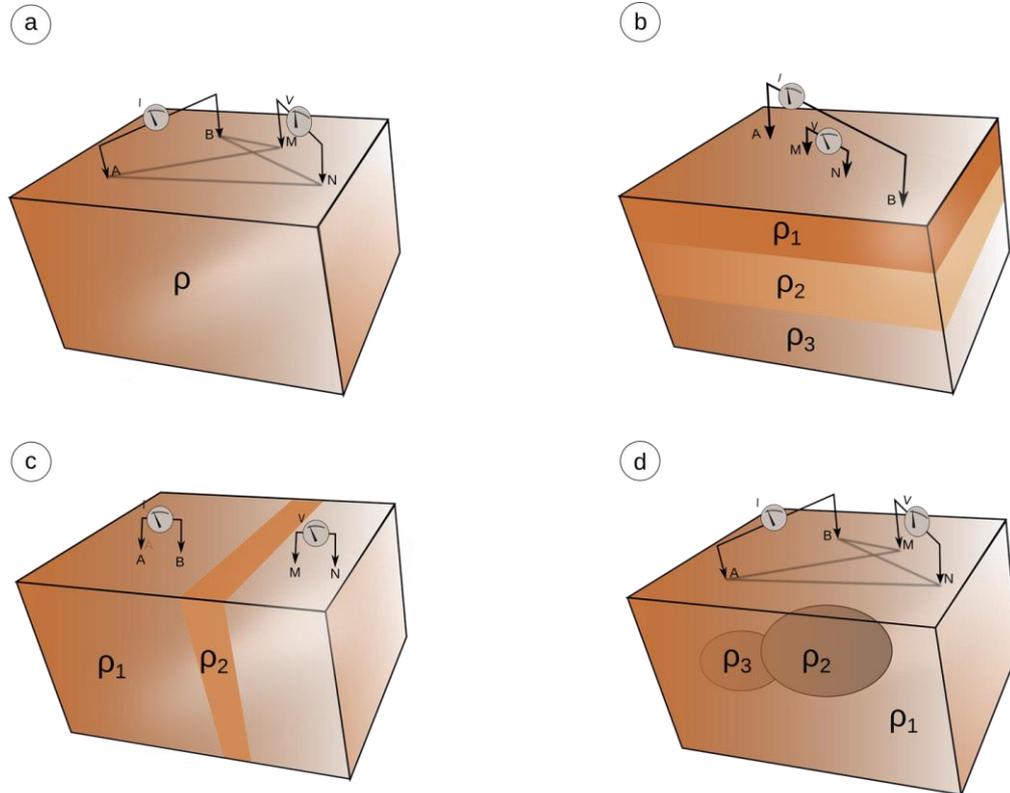
A equação de resistividade pode ser escrita alternativamente em termos do campo elétrico E (volts/m) e densidade de corrente J (ampères / m²) como:

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (11)$$

Quando se trata da medição da resistividade elétrica de corpos geológicos, algumas considerações devem ser feitas. No caso idealizado de um semiespaço homogêneo, a resistividade medida com uma configuração de quatro eletrodos é a resistividade verdadeira do semiespaço. Essa situação dificilmente ocorre, em termos geológicos, pelo fato de que, em situações reais, a resistividade é condicionada por diferentes litologias e estruturas geológicas e, portanto, pode apresentar respostas heterogêneas (Figura 6). Desta forma, para realizar a medição da resistividade elétrica de corpos geológicos considera-se que o semiespaço é homogêneo. Sendo assim, o resultado de tal medição é a resistividade aparente (ρ_a) e geralmente não representa a resistividade verdadeira de qualquer parte do solo, visto que a resistividade da subsuperfície é uma combinação das resistividades dos vários materiais que o compõem (BRAGA, 2007; KEAREY *et al.*, 2009; LOWRIE, 2007).

Assim, a resistividade pode variar enormemente. O teor de água ou argila, a porosidade e outros fatores como, temperatura e salinidade, podem influenciar o valor da resistividade medida (GLOVER, 2000; SCHÖN, 2004; YANG, 2017). A Figura 4 ilustra as diferentes possibilidades de distribuição da resistividade em estruturas geológicas

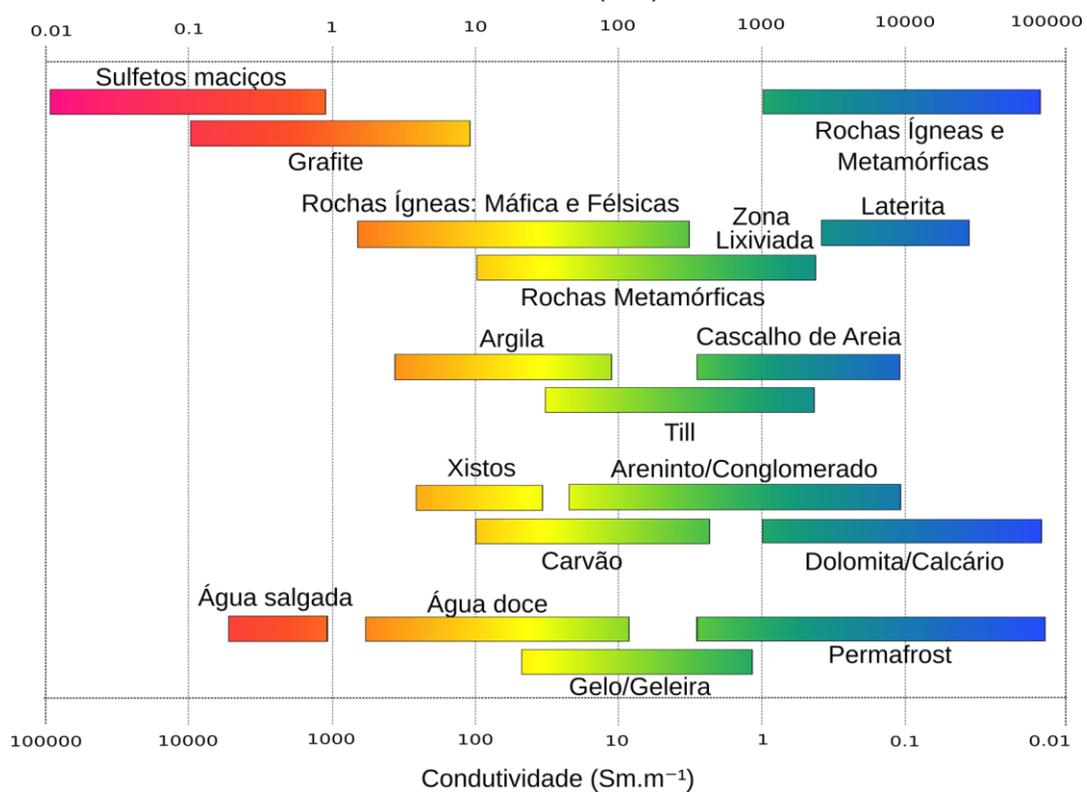
Figura 4 – Ilustração das diferentes possibilidades de distribuição da resistividade em estruturas geológicas. (a) estrutura homogênea; (b) estrutura estratificada (1D); (c) distribuição de resistividade 2D no terreno; (d) distribuição de resistividade 3D no solo.



Fonte: Modificado de Kirsch, (2009, p.86).

A Figura 5 ilustra a faixa de valores de resistividade para minerais e rochas mais comuns da crosta terrestre, conforme Palacky, 1998.

Figura 5 – Faixas de valores de resistividade para minerais e rochas mais comuns da crosta terrestre.



Fonte: Modificado de Palacky, (1998, p.53).

2.2.1.2 Fluxo de corrente em um meio homogêneo

O ponto de contato de um eletrodo que transmite corrente (I) em um semiespaço uniforme, atuará como uma fonte de corrente, a partir da qual a corrente aplicada se dispersará para a subsuperfície. As linhas de campo elétrico, geradas pela fonte, são paralelas ao fluxo de corrente e normais às superfícies equipotenciais, que possuem o formato hemisférico (LOWRIE, 2007). O campo elétrico (E) na distância (r) do eletrodo de transmissão é obtido a partir da Lei de Ohm, desta forma, o campo elétrico será definido como:

$$E = \rho \cdot J \quad (12)$$

A densidade de corrente (J) é igual a corrente elétrica (I) dividido pela área de superfície, que é $2\pi r^2$ para um hemisfério de raio r , logo temos que,

$$E = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad (13)$$

Rescrevendo esta expressão na equação de gradiente de potencial elétrico (dV/dr),

teremos o potencial elétrico (V) na distância (r) do eletrodo fonte, associado a essa corrente elétrica:

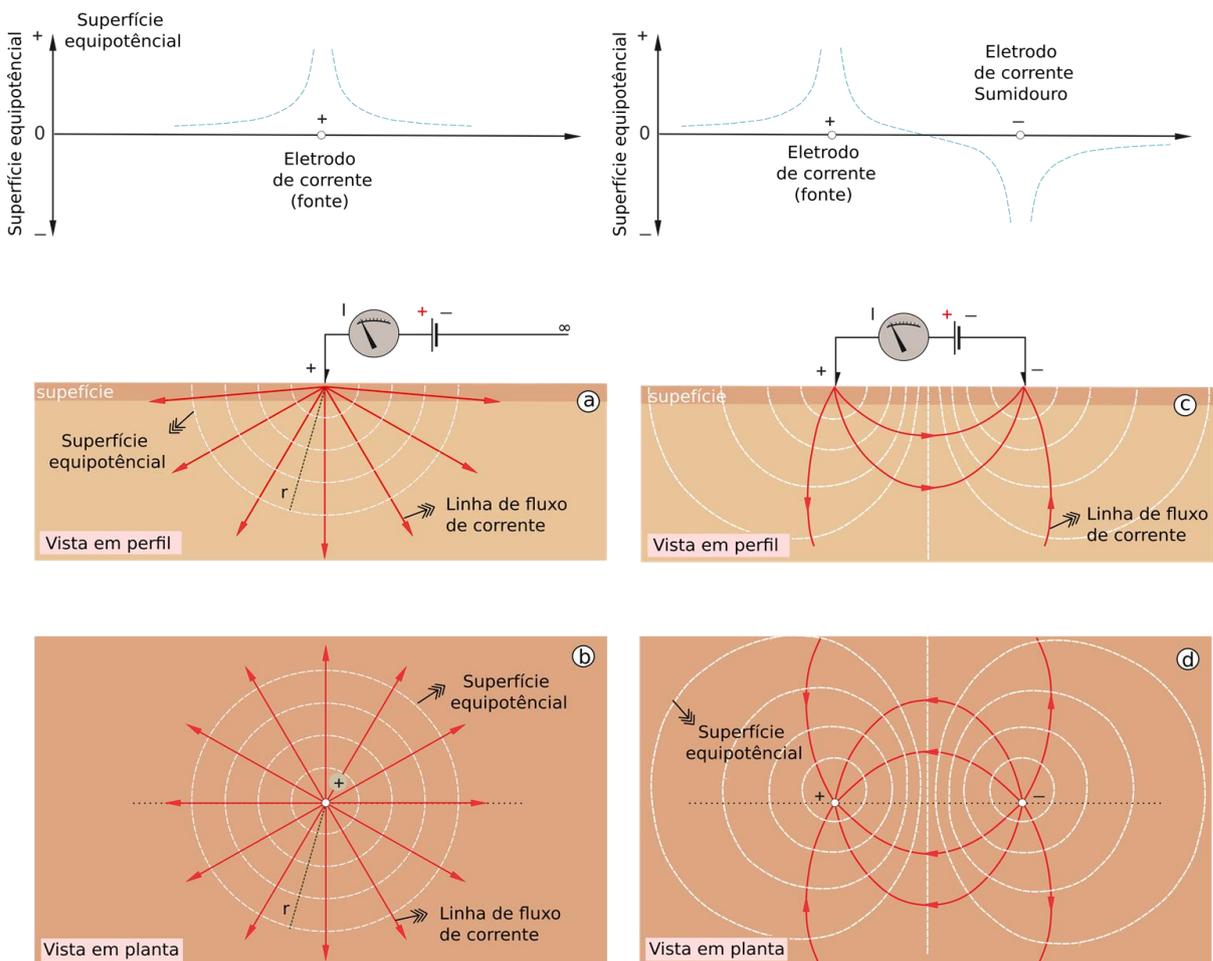
$$\frac{dV}{dr} = -\frac{\rho I dr}{2\pi r^2} = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (14)$$

O potencial V_r à distância r é, portanto, obtido pela integração,

$$V_r = \int dV = -\int \frac{\rho I dr}{2\pi r^2} = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (15)$$

Quando o r tende ao infinito, o potencial é igual a zero. A Equação 15 permite o cálculo do potencial em qualquer ponto abaixo da superfície ou na superfície de um semiespaço homogêneo. A Figura 6 ilustra o campo elétrico em um semiespaço e o potencial de superfície associado, desenvolvido por um pólo isolado num dipolo.

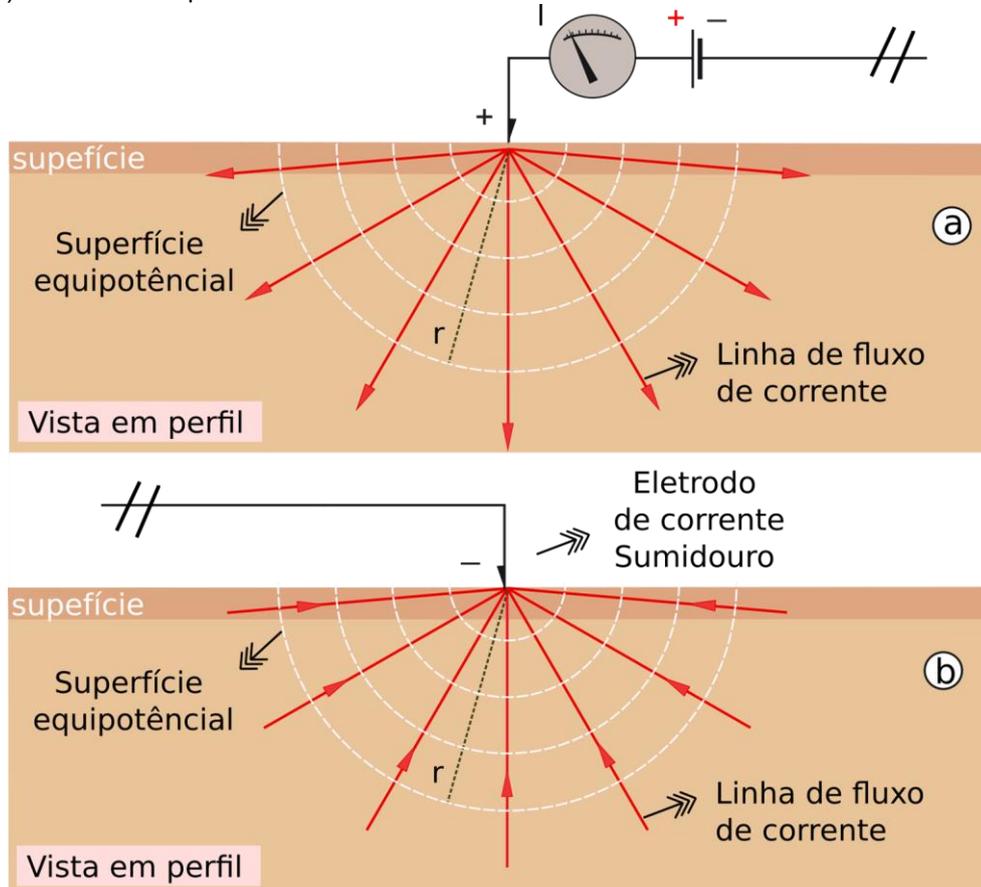
Figura 6 – Representação do campo elétrico num semiespaço e o potencial de superfície associado formado por: (a e b) um pólo isolado e (c, d) um dipolo.



Fonte: Modificado de Dentith *et al.*, (2014, p.269).

Ao que se refere as linhas de campo elétrico em torno do eletrodo de transmissão, se o corpo for um semiespaço homogêneo, as linhas de campo elétrico são direcionadas radialmente no sentido do fluxo de corrente (Figura 7a). Já em torno de um eletrodo de corrente sumidouro, as linhas de campo são direcionadas no sentido do fluxo de corrente sumidouro, ou seja, para a superfície (Figura 7b) (DENTITH *et al.*, 2014, LOWRIE, 2007).

Figura 7 – Linhas de campo elétrico e superfícies equipotenciais em torno de um único eletrodo na superfície de um semiespaço homogêneo: (a) linhas de campo radialmente externas em torno de uma fonte e (b) linhas de campo radialmente internas em torno de um sumidouro.



Fonte: Modificado de Dentith *et al.*, (2014, p.269)

Para o método geral de quatro eletrodos considera-se um arranjo que consiste num par de eletrodos de corrente e um par de eletrodos de potencial. Os eletrodos de corrente A e B atuam como fonte e sumidouro, respectivamente. No eletrodo de potencial M, o potencial devido à fonte A é igual a $+\rho \frac{I}{2\pi AM_r}$, e o potencial devido à fonte B é igual a $-\rho \frac{I}{2\pi MB_r}$.

Portanto, o potencial elétrico combinado em M é:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM_r} - \frac{1}{MB_r} \right) \quad (16)$$

Similarmente, o potencial resultante em N é:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AN_r} - \frac{1}{NB_r} \right) \quad (17)$$

Desta forma, a diferença de potencial entre M e N é, portanto:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\left(\frac{1}{AM_r} - \frac{1}{MB_r} \right) - \left(\frac{1}{AN_r} - \frac{1}{NB_r} \right) \right] \quad (18)$$

Todas as variáveis nesta equação podem ser medidas na superfície do solo, exceto a resistividade, que é dada por,

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} \left[\left(\frac{1}{AM_r} - \frac{1}{MB_r} \right) - \left(\frac{1}{AN_r} - \frac{1}{NB_r} \right) \right]^{-1} \quad (19)$$

reajustando a Equação 19, temos que a equação geral para o cálculo da resistividade é,

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left[\left(\frac{1}{AM_r} - \frac{1}{MB_r} \right) - \left(\frac{1}{AN_r} - \frac{1}{NB_r} \right) \right]} \quad (20)$$

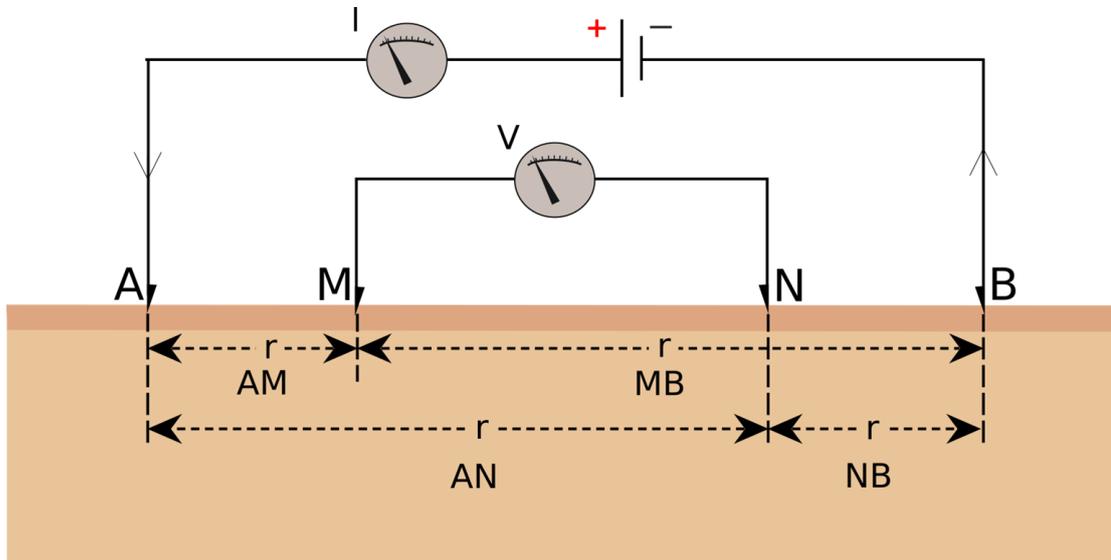
A parte da equação que representa os efeitos das separações dos eletrodos é denominado fator geométrico (K), sendo definido por:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\frac{1}{AM_r} - \frac{1}{MB_r} - \frac{1}{AN_r} - \frac{1}{NB_r} \right]} \quad (21)$$

Além disso, a equação do fator geométrico (K) pode ser ajustada de acordo com a configuração espacial dos eletrodos em campo, também conhecidos como arranjos geométricos.

A Figura 8 exemplifica a configuração geral de quatro eletrodos para a medição de resistividade.

Figura 8 – Configuração geral de quatro eletrodos para medição de resistividade, consistindo em um par de eletrodos de corrente (A, B) e um par de eletrodos de potencial (M, N).



Fonte: Modificado de Lowrie, (2007, p.261)

2.1.2 Método elétrico de Polarização Induzida (IP)

O fenômeno da polarização induzida (IP) foi relatado por Conrad Schlumberger em 1920 (*apud* FIGUEROLA, 1973). Autores como Dentith *et al.*, (2014); Kearey *et al.*, (2009); Reynolds, (2011), postulam que quando uma corrente elétrica é aplicada no solo e posteriormente essa corrente é cessada, a corrente não é imediatamente zero. Após um decaimento inicial, a voltagem sofre uma queda gradual e pode levar alguns segundos para atingir o valor zero (Figura 9a e 9b). Um fenômeno semelhante é observado quando a corrente é ligada. Após um rápido aumento inicial da voltagem, ocorre um aumento gradual de seu valor durante um intervalo de tempo até que o valor da tensão elétrica se torne estável. O solo, então, age como um capacitor e armazena carga elétrica, isto é, torna-se eletricamente polarizado (KEAREY *et al.*, 2009, PARASNIS, 1978). Portanto, o efeito de Polarização Induzida (IP) reflete a capacidade de minerais e rochas de agirem como um capacitor elétrico.

A medição de um decaimento de voltagem sobre um certo intervalo de tempo é conhecida como levantamento IP no domínio do tempo, enquanto as medições de resistividade aparente em duas ou mais baixas frequências é conhecida como levantamento IP no domínio da frequência. Essa classificação é determinada pelo tipo de corrente aplicada ao solo, podendo ser corrente contínua (CC) ou corrente

alternada (CA). A corrente contínua é empregada nos levantamentos IP do domínio do tempo enquanto a corrente alternada é empregada nos levantamentos de IP no domínio da frequência (KEAREY *et al.*, 2009; ORELLANA, 1972).

2.1.2.1 Polarização Induzida no domínio do tempo

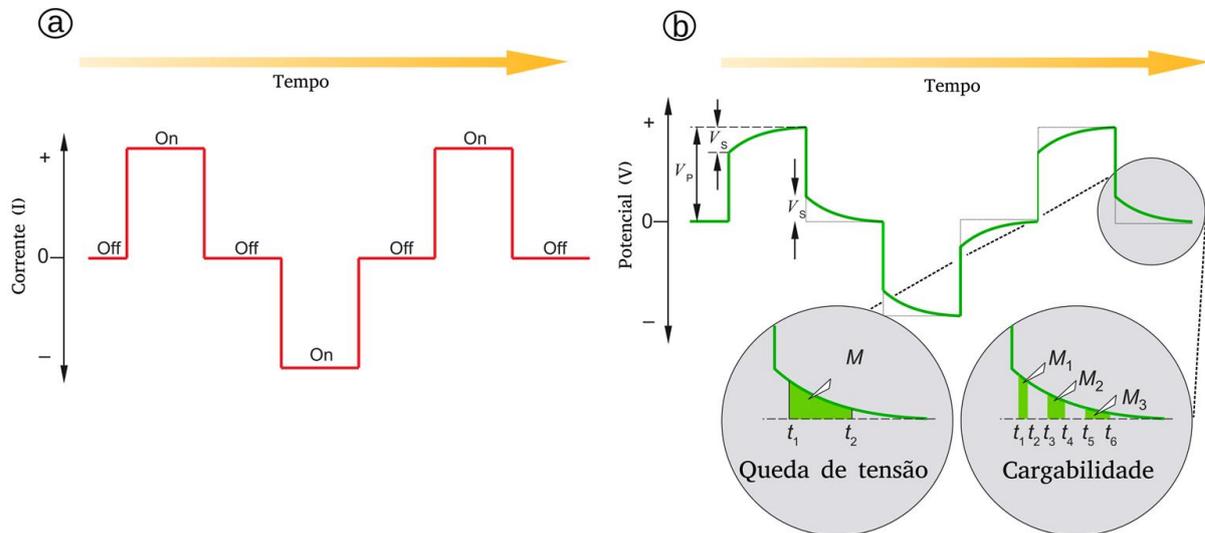
As medições IP no domínio do tempo envolvem o monitoramento do decaimento da voltagem após a corrente ser desligada. O parâmetro medido é a cargabilidade (M) que é definida como a área sobre a curva de decaimento durante um certo intervalo de tempo e é expressa pela equação:

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (22)$$

onde V_p é tensão primária; t_1 e t_2 é o intervalo de tempo do decaimento e $V(t)$ é a tensão elétrica residual.

A Figura 9 mostra a variação no potencial medido quando a subsuperfície é eletricamente polarizável. Quando a corrente é ligada, o potencial aumenta imediatamente de forma acentuada e, em seguida, o seu aumento ocorre de maneira gradual antes de se tornar estável. Isso é conhecido como tensão primária (V_p) e é usada para o cálculo da resistividade aparente (DENTITH *et al.*, 2014, KEAREY *et al.* 2009). O aumento gradual está associado ao “carregamento” do do corpo condutivo de subsuperfície. Quando a corrente transmitida é desligada, ocorre o inverso, ou seja, há uma queda abrupta inicial no potencial e, em seguida, uma queda gradual. Esta tensão secundária (V_s) é dependente das propriedades de polarização e está associada à descarga do “capacitor”. É a medição desse decaimento que é a base do método IP no domínio do tempo (BRAGA, 2007).

Figura 9 - (a) Efeito do tempo de decaimento IP na forma de onda potencial para uma corrente de entrada de onda quadrada. (b) Os intervalos de tempo usados para medir a capacidade de carga aparente, também denominado de cargabilidade (M), destacados pelos círculos sombreados.



Fonte: Modificado de Dentith *et al.*, (2014, p.272).

2.1.2.2 Polarização Induzida no domínio da frequência

Segundo Dentith *et al.*, (2014) no domínio da frequência, correntes de diferentes frequências são transmitidas e a mudança na resistividade aparente entre cada frequência é usada como uma medida de polarização elétrica. A corrente é transmitida como uma onda quadrada alternada de frequência relativamente muito baixa, na faixa de 0,1 a 3 Hz. As medições são feitas em duas frequências, a mais alta geralmente três vezes a frequência mais baixa, e a resistividade aparente do solo é calculada para ambas. A resistividade na frequência mais baixa é considerada como a resistividade aparente do solo. A diferença de resistividade nas duas frequências, em relação à resistividade na frequência mais alta, é usada para calcular o parâmetro de polarização induzida conhecido como efeito de frequência percentual (PFE) dado por:

$$PFE(\%) = \frac{\rho_{baixa} - \rho_{alta}}{\rho_{alta}} \quad (23)$$

onde ρ_{baixa} e ρ_{alta} são as resistividades nas frequências mais baixa e mais alta, respectivamente.

Um parâmetro de IP relacionado é o fator de metal (MF). Este parâmetro tem

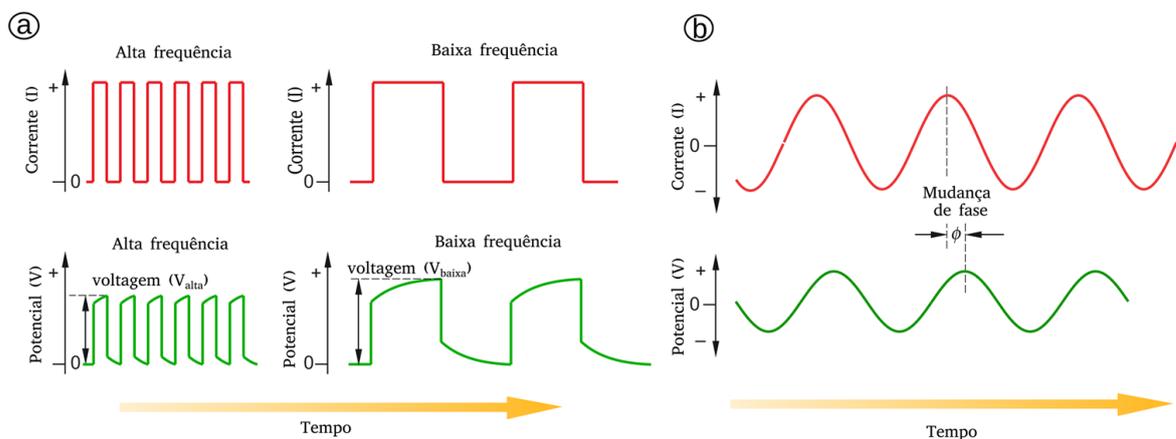
como finalidade remover variações no efeito de frequência percentual (PFE) relacionadas à resistividade da rocha hospedeira e destacar zonas anômalas com presença de minerais metálicos (DENTITH, *et al.*, 2014).

A mudança de fase entre a corrente da onda senoidal transmitida e a tensão medida em cada frequência pode ser usada como uma indicação de polarização elétrica (Figura 10b). O fator metálico é definido como:

$$MF = 2\pi 10^5 \frac{\rho_{0,1} - \rho_{10}}{\rho_{0,1} \cdot \rho_{10}} \quad (24)$$

onde $\rho_{0,1}$ e ρ_{10} são resistividades aparentes nas frequências de medida de 0,1 e 10 Hz.

Figura 10 – (a) Os sinais de onda quadrada de dupla frequência no domínio da frequência e as ondas distorcidas medidas pelo receptor. (b) mudança de fase entre a corrente da onda senoidal transmitida e a tensão elétrica medida em cada frequência.



Fonte: Modificado de Dentith *et al.*, (2014, p.272).

2.1.2.3 Mecanismos de Polarização Induzida

Os efeitos de polarização Induzida são resultados de dois mecanismos: polarização da membrana e polarização do grão.

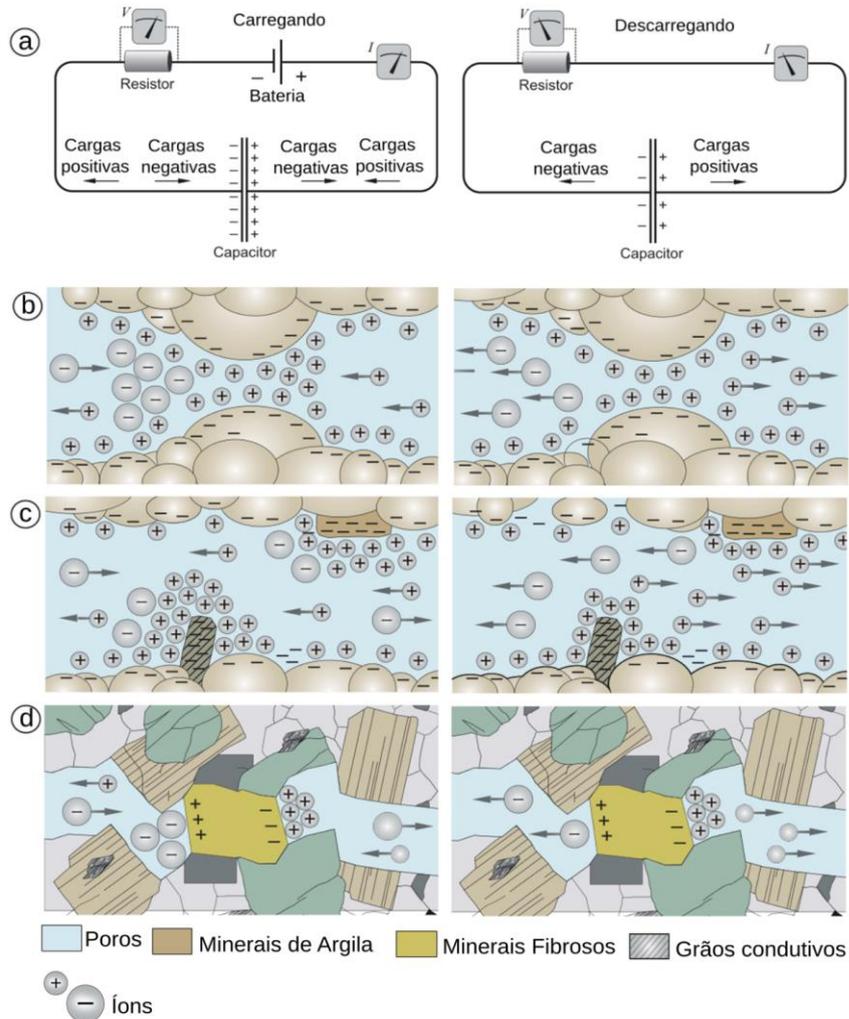
A polarização por membrana é uma característica da condução eletrolítica, ela surge de diferenças na capacidade dos íons nos fluidos dos poros de migrar através de uma rocha porosa (LOWRIE, 2007).

A principal causa da polarização da membrana é a presença de partículas de argila ou filamentos de minerais fibrosos, ambos os quais tendem a ter uma carga

negativa. Os íons positivos são atraídos por eles, produzindo uma nuvem carregada positivamente dentro do espaço dos poros. Quando uma voltagem é aplicada, cargas positivas podem se mover entre essas nuvens carregadas de forma semelhante, mas os íons carregados negativamente são bloqueados, o que produz uma diferença na concentração iônica (Figura 11b). Quando a tensão aplicada é desligada, os desequilíbrios na concentração iônica caem para níveis normais por difusão, possibilitando a medição da resposta IP (LOWRIE, 2007; TELFORD, 1990).

Já a polarização de grãos ocorre quando minerais metálicos estão presentes numa rocha, abre-se um caminho eletrônico alternativo para o fluxo de corrente (KEAREY *et al.* 2009). Segundo Parasnis (1978), quando uma corrente passa por um mineral metálico (por exemplo, grãos de pirita, ouro) mergulhado num eletrólito, a carga pode se acumular continuamente na superfície do mineral, quando todos os processos na reação eletrolítica não são uniformemente rápidos. Os íons negativos e positivos se acumulam de cada lado do grão, tentando, ou liberar elétrons para o grão ou aceitar elétrons conduzidos através do grão. A taxa pela qual os elétrons são conduzidos é mais lenta que a taxa de troca de elétrons com os íons. E devido a esse fator, ocorre um aumento de carga (KEAREY *et al.*, 2009). Quando a d.d.p aplicada é cessada, os íons retornam gradualmente de volta a seus locais de origem causando um caimento transiente de voltagem. A Figura 11d ilustra uma rocha em que um grão mineral metálico bloqueia um poro.

Figura 11 – Ilustração dos mecanismos de polarização induzida. (a) Propriedades capacitivas ilustradas pelo armazenamento (carregamento) e descarga subsequente de cargas elétricas; (b) polarização da membrana devido à barreira de carga formada por íons nas superfícies dos grãos no estreitamento de um poro; (c) polarização da membrana devido ao acúmulo de carga em torno da argila e do mineral fibroso; e (d) polarização do grão devido ao acúmulo de carga em ambos os lados de um grão condutor.



Fonte: Adaptado de Dentith *et al.*, (2014, p.253).

2.1.3 Método elétrico de Potencial Espontâneo (SP)

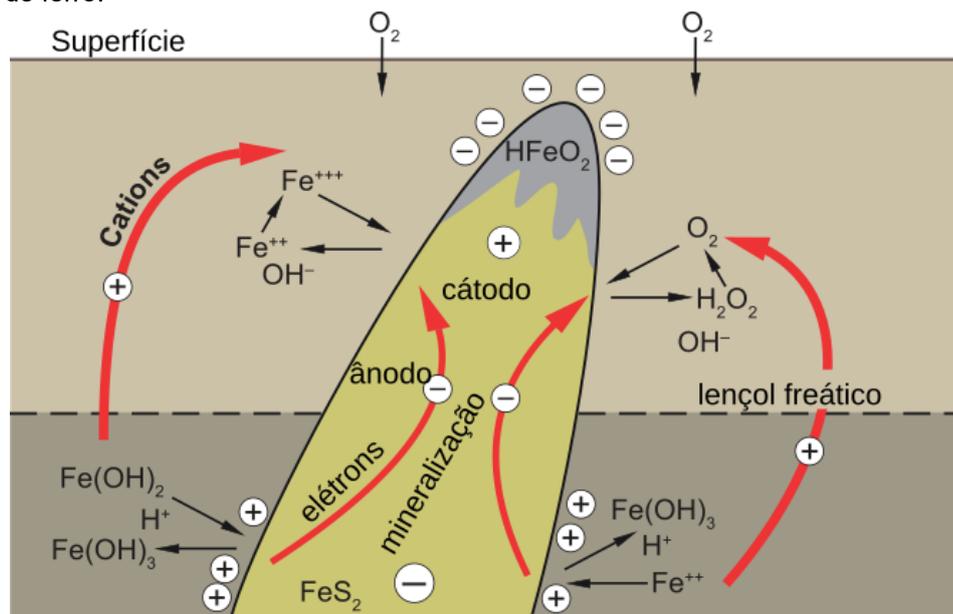
A polarização espontânea também conhecido como potencial espontâneo (SP) é um método elétrico passivo que consiste em medir a distribuição do potencial elétrico natural do solo, sem injeção de corrente. Sob certas condições, corpos condutores heterogêneos no subsolo se polarizam, tornando-se verdadeiras baterias elétricas, que originam correntes elétricas em subsuperfície. Estas correntes produzem uma distribuição de diferenças de potencial observadas na superfície do terreno e revela a presença de um corpo polarizado (GALLAS, 2005; KEARY, *et al.*, 2012; ORELLANA,

1972.

O Potencial espontâneo (SP) é causado por atividade eletroquímica ou electrocinética, seja por alteração de sulfetos, variação na composição da rocha em contatos geológicos, atividade bioelétrica de matéria orgânica, corrosão e gradientes térmicos e de pressão em fluidos subterrâneos. Segundo Gallas (2005), a água subterrânea é o agente mais importante no mecanismo de geração de SP.

De acordo com Sato & Mooney (1960), é necessário que o corpo causador transponha o lençol freático. Abaixo do lençol freático, os eletrólitos dos fluidos nos poros sofrem oxidação e liberam elétrons, que são conduzidos para cima através do corpo de minério. No topo do corpo, os elétrons liberados causam a redução dos eletrólitos. Cria-se, então, um circuito em que a corrente é carregada eletroliticamente nos fluidos dos poros e eletronicamente no corpo, de modo que o topo do corpo age como um terminal negativo. Como resultado das correntes de subsuperfície, as diferenças de potencial são produzidas em superfície (KEARY *et al.*, 2012; SATO & MOONEY, 1960). A Figura 12 ilustra o mecanismo eletroquímico para o Potencial Espontâneo produzido por um corpo de sulfeto de ferro.

Figura 12 – Ilustração esquemática de um mecanismo eletroquímico para o SP produzido por um corpo de sulfeto de ferro.



Fonte: Adaptado de Dentith *et al.*, (2014, p.261).

Este método possui uma peculiaridade no levantamento em campo. Em

levantamentos SP os eletrodos devem ser não polarizáveis, uma vez que eletrodos comuns, utilizados nos outros métodos elétricos, produzem fenômenos de polarização que podem mascarar os resultados. Esses eletrodos geralmente consistem em um metal de cobre embutido em um recipiente poroso contendo uma solução saturada de sulfato de cobre. Quando uma corrente passa pelo eletrodo, ela decompõe uma pequena parte do sulfato, mas este é imediatamente renovado pela dissolução de uma quantidade equivalente do mesmo sal presente no recipiente na forma de cristais, de modo que a dissolução do sulfato permanece sempre a mesma concentração, evitando, portanto, a polarização do eletrodo (FIGUEROLA, 1973; ORELLANA, 1972).

2.1.4 Técnicas de aquisição

Existem três principais técnicas de investigação de propriedades geoeletricas da subsuperfície: Caminhamento elétrico (CE), Perfilagem Geofísica e Sondagem Elétrica Vertical (SEV). A diferença básica entre essas técnicas está no procedimento de campo para se obter o parâmetro físico a ser estudado. Este procedimento em campo está diretamente ligado a disposição dos eletrodos na superfície e ao objetivo de investigação da pesquisa e em função do corpo a ser estudado (BRAGA, 2007). As técnicas de CE e SEV são abordados a seguir.

2.1.4.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A Sondagem Elétrica Vertical, também denominada apenas como SEV, é uma técnica geofísica usada principalmente no estudo de estruturas horizontais ou quase horizontais (Figura 4b) (KEARY *et al.*, 2012).

O objetivo da SEV é investigar a distribuição vertical da propriedade geoeletrica sob o ponto medido. A maior eficácia do método corresponde ao caso que as SEVs são realizadas em um terreno composto por camadas lateralmente homogêneas no que diz respeito à propriedade geoeletrica de interesse, e limitadas por planos paralelos à superfície do terreno (meios estratificados). Por se tratar de uma técnica de medida pontual, o uso da SEV não fornece informações laterais sobre a distribuição da propriedade de interesse. O procedimento para a execução de uma SEV consiste

em manter a posição dos eletrodos potenciais (M e N), e aumentar progressivamente a distância que separa os eletrodos de corrente (A e B), alcançando assim gradualmente maior profundidade de investigação (FIGUEROLA, 1973; ORELLANA, 1972). São duas as principais configurações de eletrodos utilizadas no levantamento do tipo SEV: Wenner e Schlumberger.

2.1.4.1.1 Configuração Wenner

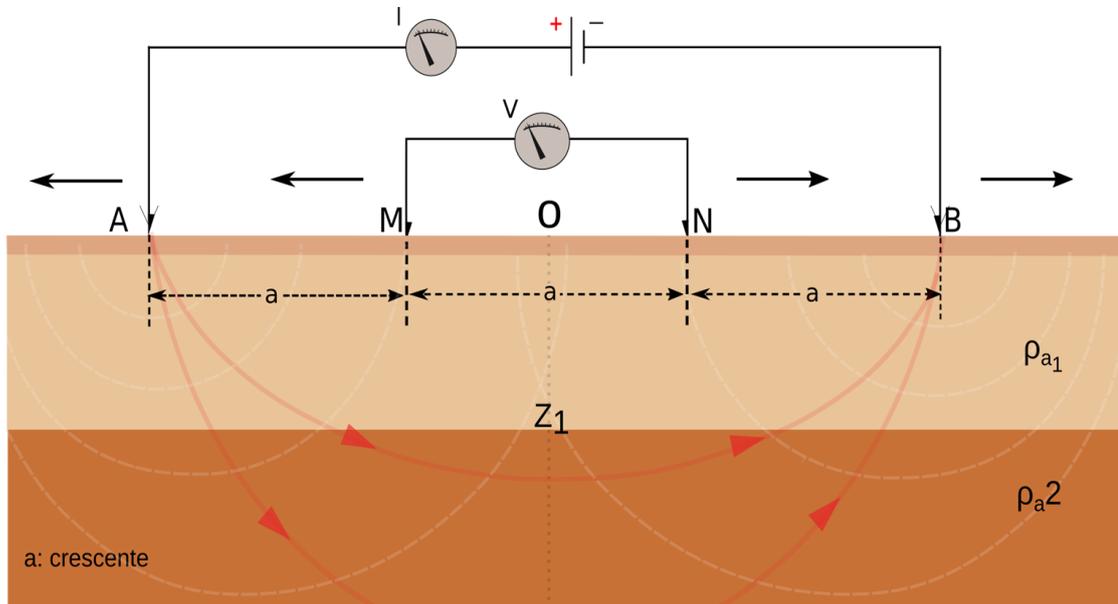
Neste tipo de configuração utiliza-se quatro eletrodos: A, B, M, N. O princípio da configuração Wenner é aplicar uma corrente elétrica no solo, através dos eletrodos A e B, e medir a diferença de potencial por meio dos eletrodos M e N. Para isso, a distância entre os eletrodos A, B, M, N são mantidas iguais durante a aquisição dos dados mantendo sempre a relação: $AM_r = MN_r = NB_r = "a"$ (BRAGA, 2007). Para a aquisição de sucessivas medidas, o espaçamento entre os eletrodos é aumentado de modo gradual e contínuo, possibilitando uma maior profundidade de investigação.

O fator geométrico para este tipo de configuração é calculado através da simplificação da Equação 21. Desta forma, o fator geométrico para o arranjo é,

$$K_{Wenner} = 2\pi a \quad (25)$$

A Figura 13 ilustra o procedimento para a execução da técnica de SEV utilizando a configuração Wenner.

Figura 13 – Procedimento para execução da técnica de Sondagem Elétrica Vertical utilizando a configuração de eletrodo Wenner.

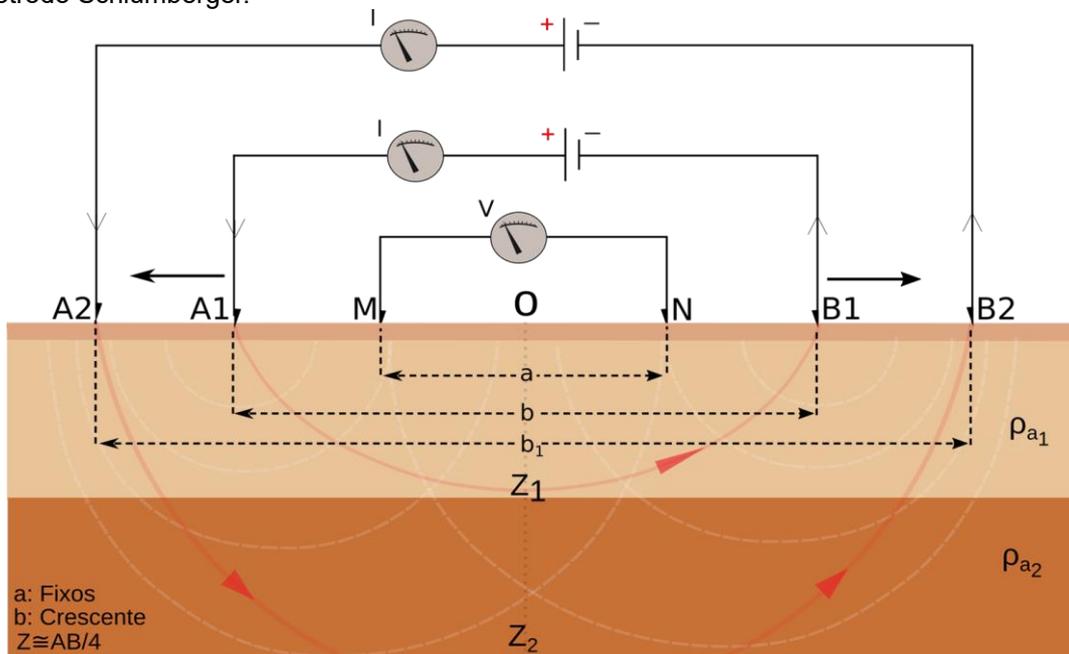


Fonte: Modificado de Braga, (2007, p.23).

2.1.4.1.2 Configuração Schlumberger

A configuração Schlumberger utiliza quatro eletrodos, A, B, M, N. O procedimento para a execução da configuração Schlumberger consiste em manter a posição dos eletrodos potenciais (M e N) fixas, e aumentar progressivamente a distância que separa os eletrodos de corrente (A e B), alcançando assim, gradualmente, uma maior profundidade de investigação ($AB/2$), conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Procedimento para execução da técnica de Sondagem Elétrica utilizando a configuração de eletrodo Schlumberger.



Fonte: Modificado de Braga, (2007, p.23).

O fator geométrico para este tipo de arranjo, é dado pela equação,

$$K_{Schulumberger} = \frac{\pi b^2}{a} \quad (26)$$

onde “a” é a distância entre os eletrodos M, N e “b” é a distância entre os eletrodos A, B.

2.1.4.2 Caminhamento Elétrico (CE)

O Caminhamento Elétrico é uma técnica usada para investigar variações verticais de resistividade de estruturas bidimensionais (2D) (Figura 4c). Os eletrodos de corrente e de potencial são mantidos a uma distância fixa e são progressivamente movidos ao longo do perfil. As principais configurações de eletrodos utilizadas para esta técnica é o dipolo-dipolo e o polo-dipolo, ambas serão abordadas a seguir.

2.1.4.2.1 Configuração dipolo-dipolo

Este tipo de configuração de eletrodos é, segundo muitos autores (BRAGA,

2007; GONDOLFO & GALLAS, 2007; LOWRIE, 2007), um dos mais empregados. Uma de suas vantagens está no fato de que o estudo da variação lateral do parâmetro físico pode ser efetuado em vários níveis de profundidade (BRAGA, 2007).

O levantamento de campo consiste em executar uma série de medidas mantendo-se fixo a distância a entre os eletrodos de corrente (A e B) e potencial (M e N), aumentando-se a separação entre eles de acordo com um fator “ $n.a$ ” (GANDOLFO & GALLAS, 2007). Cada um destes afastamentos corresponde a um nível de investigação em profundidade ($n_1, n_2, n_3\dots$). Quanto maior for esta distância, maiores profundidades teóricas poderão ser alcançadas.

Para a execução do caminhamento, os eletrodos M e N são deslocados de uma distância geralmente igual a um espaçamento entre dipolos, repetindo-se o procedimento anteriormente descrito para todo o arranjo e possibilitando a construção de uma pseudo-seção de resistividade elétrica aparente ao longo da linha do levantamento (GANDOLFO & GALLAS, 2007). O valor medido é plotado em um ponto da subsuperfície localizado na intersecção das retas que partem 45° do centro dos dipolos, posicionado, portanto, no ponto médio entre estes.

O fator geométrico para o arranjo dipolo-dipolo é definido por:

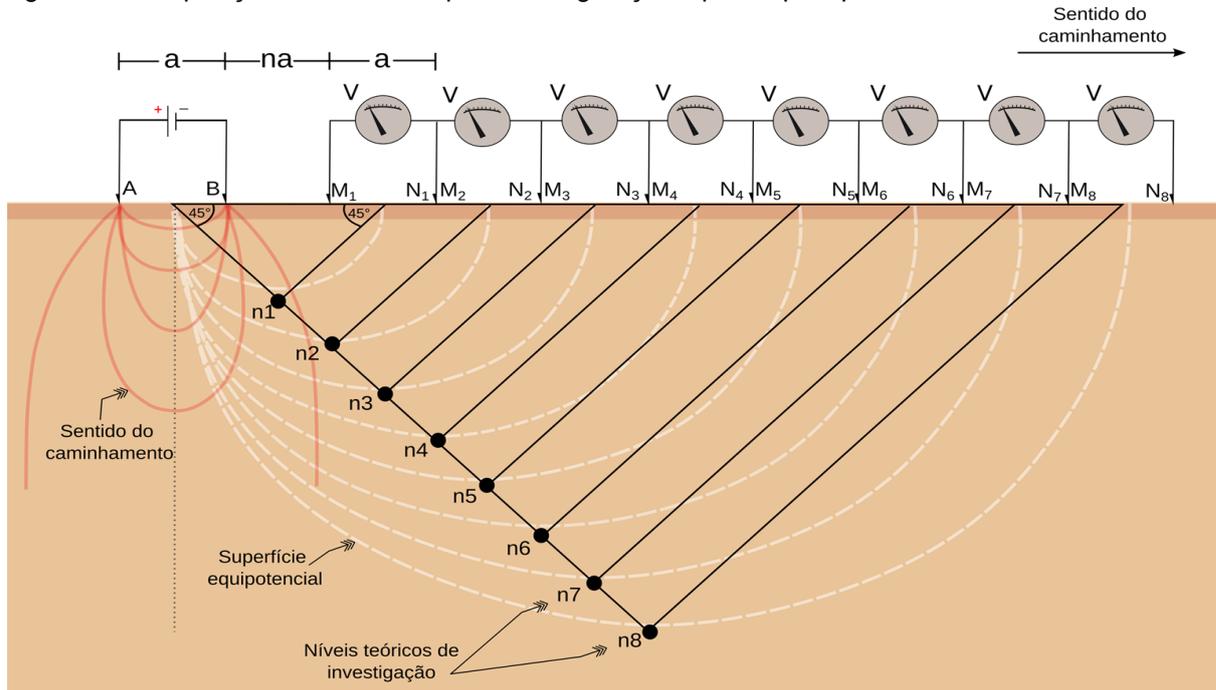
$$K = 2\pi aG \quad (27)$$

onde,

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{2}{n+1}\right) + \left(\frac{1}{n+2}\right)} \quad (28)$$

A Figura 15, apresenta o esquema de aquisição, utilizando a técnica de CE com o uso do arranjo dipolo-dipolo.

Figura 15 – Disposição inicial no campo da configuração dipolo-dipolo para o caminhamento elétrico.

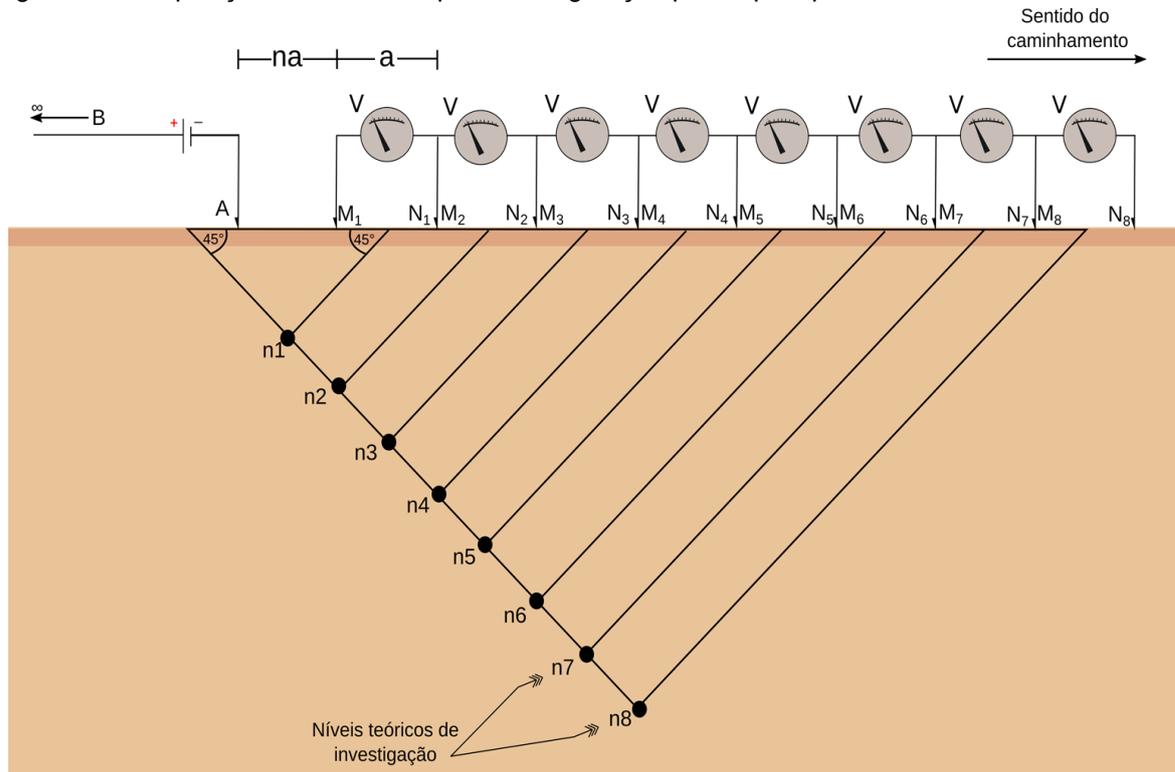


Fonte: Modificado de Braga, (2007, p.29).

2.1.4.2.2 Configuração pólo-dipolo

O arranjo pólo-dipolo consiste em três eletrodos móveis ao longo do perfil de caminhamento, um de corrente (A) e dois de potencial (M e N), cujo espaçamento permanece constante. O outro eletrodo de corrente que fecha o circuito (B), é mantido fixo a uma distância suficientemente grande, denominada de “infinito” e que corresponde de dez a vinte vezes a maior abertura entre os eletrodos extremos do arranjo que permanecem na linha do levantamento (TELFORD *et al.*, 1990). Segundo Gandolfo & Gallas (2007), isso garante que este eletrodo tenha baixa influência sobre o restante do arranjo. A configuração pólo-dipolo é exemplificado na Figura 16.

Figura 16 – Disposição inicial no campo da configuração pólo-dipolo para o caminhamento elétrico.



Fonte: Modificado de Gandolfo & Gallas, (2007, p.231).

De maneira semelhante ao arranjo dipolo-dipolo, conforme o aumento da distância maior será a profundidade de investigação. Após a sequência de leituras, o trio de eletrodos é deslocado de uma distância usualmente igual a “a”.

O fator geométrico para o arranjo polo-dipolo é dado pela equação:

$$K = 2\pi aG \quad (29)$$

onde G é definido por,

$$G = \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right)} \quad (30)$$

2.2 Eletrônica Básica

A instrumentação geofísica está definitivamente ligada à eletrônica. Apesar dos princípios físicos de funcionamento dos instrumentos se manterem inalterados, as técnicas de condicionamento e processamento de sinais têm acompanhado a

evolução da eletrônica. Portanto, para compreender o funcionamento de um equipamento geofísico é muito importante entender os conceitos básicos relacionados à eletrônica. Esta seção fornece os alguns dos fundamentos sobre eletricidade, eletrônica analógica e digital.

2.2.1 Materiais condutores, isolantes e semicondutores

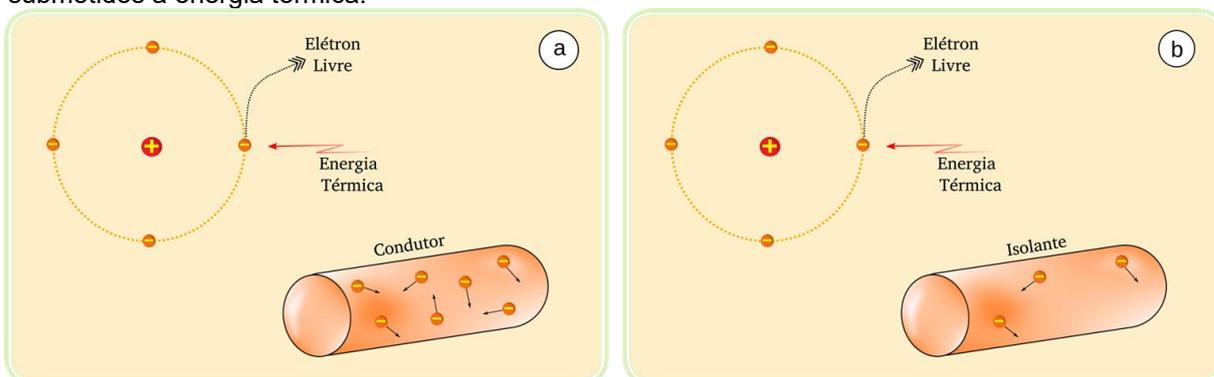
Cada material encontrado na natureza possui uma gama de características físicas que os diferem um do outro. Uma das principais características intrínsecas, está relacionada ao seu comportamento quanto à passagem de corrente elétrica. Por meio deste atributo pode-se classificar os materiais em três tipos: os condutores, os isolantes e os semicondutores, estes são definidos diretamente pela propriedade e estrutura atômica dos materiais, mais especificamente a quantidades de elétrons livres (FUENTES & NASCIMENTO, 2013; HALLIDAY *et al.*, 2015).

Os materiais condutores possuem uma grande quantidade de elétrons livres. Com isso eles possibilitam a movimentação de cargas elétricas em seu interior com grande facilidade quando neles é aplicado uma diferença de potencial (MARKUS, 2001). Os metais são os principais condutores de carga elétrica, devido a fraca ligação dos elétrons da camada de valência com os núcleos de seus átomos que, à temperatura ambiente, a energia térmica é suficiente para libertá-los da camada de valência, tornando-os elétrons livres (Figura 17a). Como exemplos de bons materiais condutores, pode-se citar o estanho, cobre, alumínio.

Já os materiais isolantes possuem como característica a oposição a passagem de cargas elétricas. Nos isolantes, os elétrons da camada de valência dos átomos estão fortemente ligados aos seus núcleos, de tal forma que, à temperatura ambiente, apenas alguns elétrons conseguem se libertar. A baixa existência elétrons livres dificulta a condução de cargas elétricas em condições normais. Na eletrônica os materiais isolantes mais utilizados é o fenolite, fibra de vidro, teflon, poliéster e cerâmica. Esses materiais são comuns no desenvolvimento de placas impressas.

A Figura 17 ilustra o comportamento dos elétrons em materiais condutores e isolantes, respectivamente.

Figura 17 – Comportamento dos elétrons nos materiais condutores (a) e isolantes (b), quando submetidos a energia térmica.



Fonte: Modificado de Markus, (2001, p.6).

Entre os materiais condutores e isolantes, existem os materiais semicondutores, que possuem propriedades elétricas entre as do condutor e as do isolante. Na eletrônica atual, os materiais semicondutores de maior importância são o germânio e o silício, pois a partir deles são obtidos diversos componentes eletrônicos e são a base do desenvolvimento tecnológico da eletrônica de estado sólido, como por exemplo os transistores, diodos, entre outros componentes semicondutores.

2.2.2 Componentes eletrônicos

Componentes eletrônicos fazem parte de todos os dispositivos eletrônicos existentes desde os analógicos aos digitais, sendo, portanto, um dos grandes propulsores de tecnologia. Dessa forma, o conhecimento sobre suas funções e empregabilidades é essencial para o desenvolvimento de novos dispositivos. Nesta subseção, será abordado apenas os componentes de maior aplicabilidade na eletrônica com ênfase nos componentes de interesse para o trabalho.

2.2.2.1 Resistores

Os resistores são componentes do circuito elétrico que possuem a finalidade de limitar ou controlar a intensidade da corrente elétrica do circuito. Esse componente pode desempenhar importantes funções nos circuitos, tais como, divisores de tensão, dissipação de energia e entre outras (GIBILISCO, 2001). Comercialmente, existem

dois tipos de resistores, sendo estes diferenciados de acordo com a constituição de seus valores: resistores de valor fixos ou resistores de valores variáveis.

Os resistores fixos são dispositivos cujo valor de resistência, sob condições normais, permanece constante. Comercialmente, podem ser encontrados resistores com diversas tecnologias de fabricação. Os mais comuns são: resistores de carvão, resistores de fio, resistores de filme de carbono e os resistores de filme metálico (GIBILISCO, 2001; TORRES, 2018). A Figura 18 exemplifica alguns dos tipos de resistores de valores fixos, disponíveis no mercado da eletrônica.

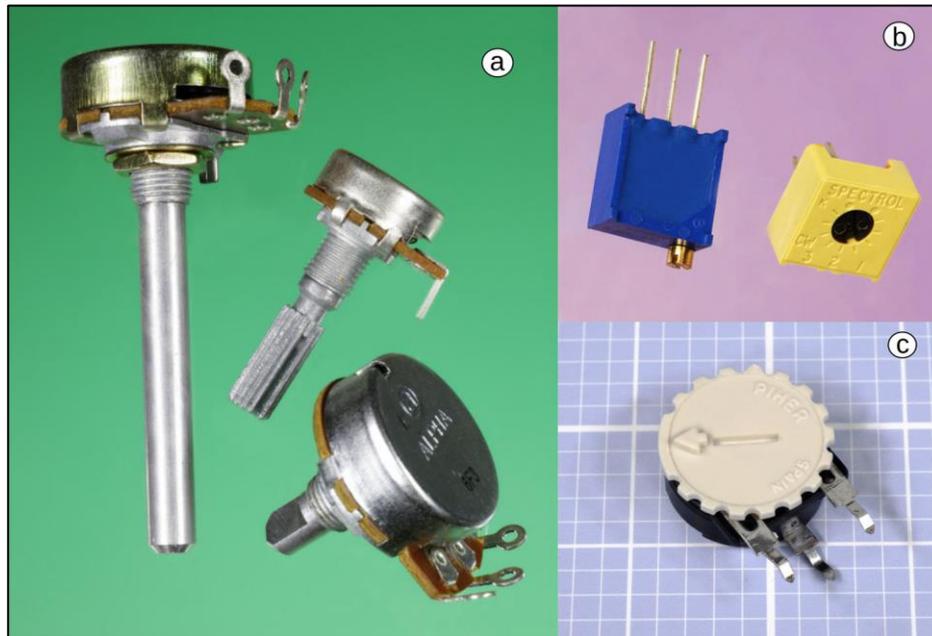
Figura 18 – Variações dos tipos de resistores fixos, disponíveis comercialmente.



Fonte: Extraído de Platt, (2013, p.75).

Os resistores variáveis permitem que sua resistência seja ajustada numa determinada faixa de valores. Existem diversos tipos de resistores variáveis, a maioria deles possuem o mesmo conceito. O que os diferenciam, são as suas aplicabilidades. A exemplo deste tipo de resistor, são os potenciômetros, reostatos, trimpot, dentre outros. A Figura 19 exemplifica alguns dos tipos de resistores variáveis existentes.

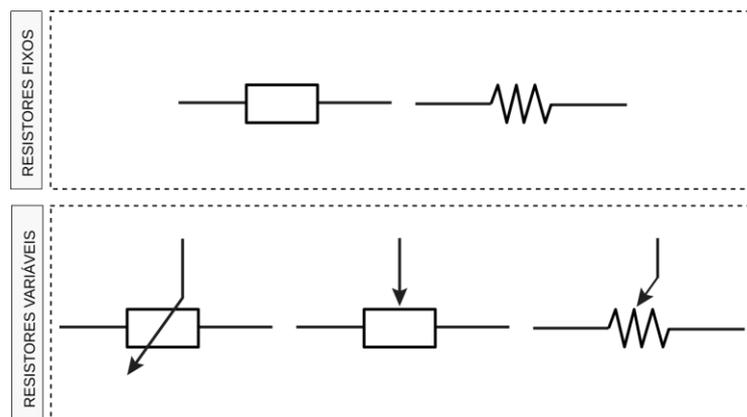
Figura 19 – Modelos de resistores do tipo variável disponíveis comercialmente. (a) Potenciômetro, (b) Trimpot e (c) Trimmer.



Fonte: Extraído de Platt, (2013, p.92, 94).

A Figura 20 descreve algumas das simbologias empregadas para a representação de resistores fixos e resistores de valor variável em diagramas elétricos.

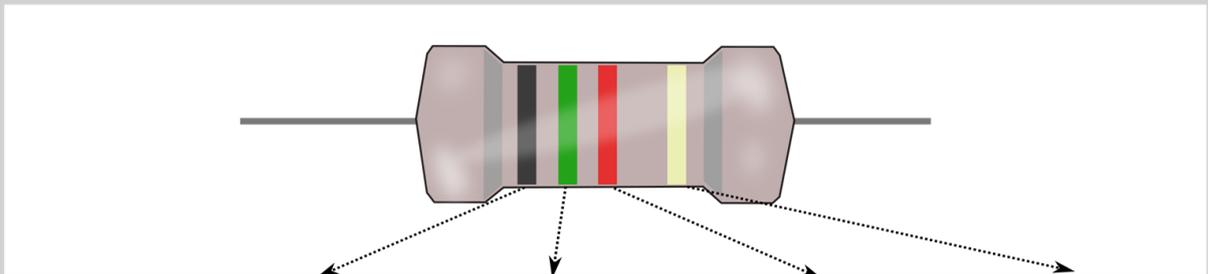
Figura 20 – Simbologias gráficas empregadas para os resistores de valores fixos e variáveis em diagramas elétricos.



Fonte: Adaptado de Platt, (2013, p.92).

Os resistores possuem em sua superfície um código de cores que corresponde ao seu valor em ohm (Ω). A Tabela 1 abaixo detalha o padrão de codificação dos resistores com base em seus valores de resistência.

Tabela 1- Código de cores para determinação dos valores de resistência dos resistores e suas tolerâncias.



	1ª faixa	2ª faixa	3ª faixa	4ª faixa
Cores	1º dígito	2º dígito	Dígito multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	10^0	-
Marrom	1	1	10^1	1%
Vermelho	2	2	10^2	2%
Laranja	3	3	10^3	3%
Amarelo	4	4	10^4	4%
Verde	5	5	10^5	0,5%
Azul	6	6	10^6	0,25%
Violeta	7	7	10^7	0,1%
Cinza	8	8	-	0,05%
Branco	9	9	-	-
Prata	-	-	10^{-2}	5%
Ouro	-	-	10^{-1}	10%
Sem faixa	-	-	-	20%

Fonte: Modificado de Santos, K. V., (2011, p.49).

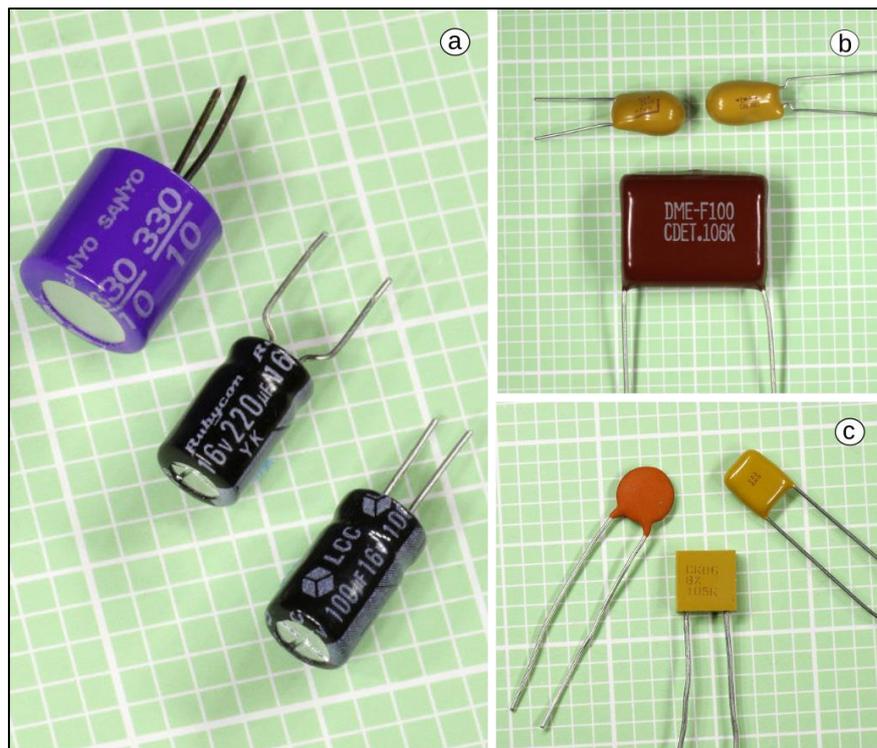
Por não se tratar de componentes ideais, os fabricantes de resistores disponibilizam o seu valor nominal acompanhado de uma tolerância de erro, sendo expressa em valor percentual (MARKUS, 2001). Quanto menor for esse valor percentual mais preciso o resistor será. Na literatura é possível encontrar três códigos de cores para determinação de valores de resistores: um para resistores de 5% e 10% de tolerância, formado por quatro faixas; outro para resistores de 2% e 15% de tolerância, estes, também são conhecidos como resistores de precisão e são formados por cinco faixas. Há também os resistores com 20% de tolerância, cujo código de cores é formado por três faixas.

2.2.2.2 Capacitores

Os capacitores são componentes eletrônicos que possuem como característica o armazenamento e liberação de carga elétrica em seu interior, quando uma d.d.p nele é aplicada. A capacidade de armazenamento de cargas é chamada de capacitância, o símbolo que representa essa grandeza é a letra C, e a unidade de medida é o Farad (F). Na eletrônica, convencionalmente os capacitores são usados em valores de microfarads (μF), nanofarad (nF) e picofarads (pF) (HUGHES, 2015; TORRES, 2018).

Os capacitores são classificados, categoricamente, de acordo com o material usado em sua fabricação, tipo de valor (fixos ou variáveis) e a disposição de polaridade ou não-polaridade. Os capacitores mais comuns disponíveis no mercado da eletrônica são, os eletrolíticos, os de tântalo, os de poliéster e os capacitores cerâmicos. Dentre as diversas aplicações do componente exemplifica-se o seu uso, na constituição de filtros para processamento de sinais e o seu uso para suavização de picos ou quedas de tensão. A Figura 21 apresenta alguns dos modelos de capacitores disponíveis comercialmente.

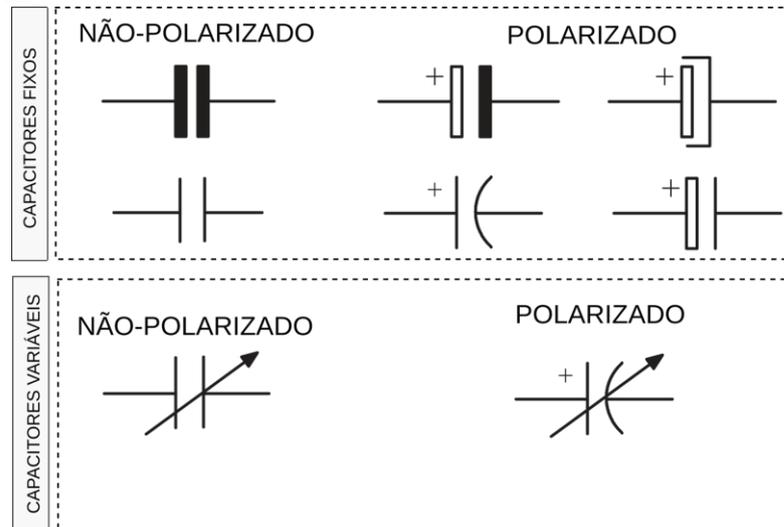
Figura 21 - Modelos de capacitores disponibilizados comercialmente. (a) capacitores eletrolíticos, (b) capacitores de tântalo e (c) capacitores cerâmicos.



Fonte: Extraído de Platt, (2013, p.99, 100, 103).

Quando o componente for polarizado, haverá indicação de polo positivo e polo negativo. Nos componentes físicos, é comum o uso dos sinais “+” e “-” para indicar a polaridade, além disso alguns capacitores representam a polaridade por meio do tamanho dos seus terminais, o terminal de menor comprimento indica o polo negativo (TORRES, 2018). Já a representação da polaridade do componente em diagramas elétricos, pode ser feita de diversas formas. Uma das mais usuais é a indicação do polo negativo por meio de uma linha curvada enquanto a linha reta indica o polo positivo. A Figura 22 apresenta as simbologias mais utilizadas para representação dos capacitores em diagramas elétricos.

Figura 22 – Simbologias empregadas para a representação gráfica de capacitores fixos e variáveis em diagramas elétricos.



Fonte: Modificado de Markus, (2001, p.82).

Alguns capacitores também possuem código de cores, além de um código alfanumérico, para determinação de sua capacitância.

2.2.2.3 Transistores

Os transistores são componentes eletrônicos semicondutores, normalmente feitos de silício ou germânio, que têm como característica a amplificação ou atenuação de sinais num circuito. Este componente permite controlar a quantidade de corrente que flui através de um circuito (PLATT, 2013). A Figura 23 apresenta alguns dos tipos de transistores disponíveis comercialmente.

Figura 23 – Exemplo de modelos de transistores disponíveis comercialmente.



Fonte: Extraído de Platt, (2013, p.236).

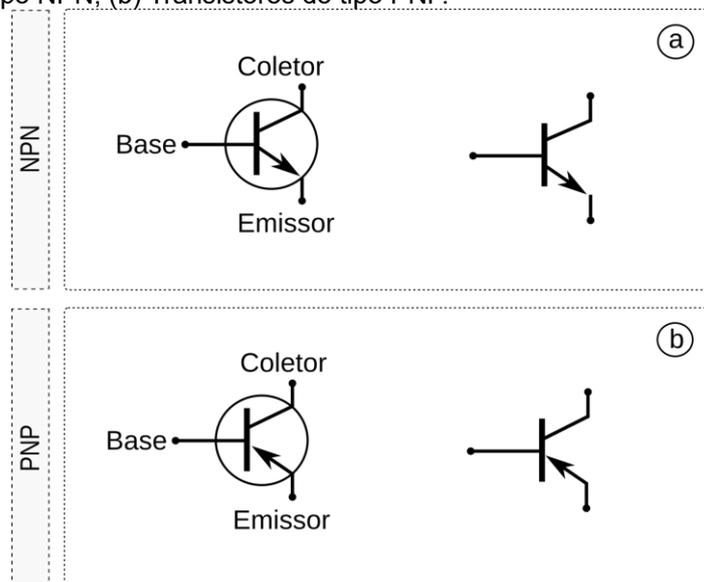
A invenção dos transistores causou grande impacto na indústria pois tornou possível o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos menores e mais potentes, devido a uma de suas principais características que é o baixo consumo de energia, o que o torna eficiente para várias aplicações. O componente é um dos grandes propulsores da eletrônica moderna (WESTCOTT & WESTCOTT, 2018). Entre as diversas aplicações dos transistores, destaca-se o seu uso no desenvolvimento de *chips* eletrônicos.

Há diferentes tipos de transistores, mas os dois tipos mais comuns são os transistores de junção bipolar (TJB – ou BJTs, em inglês) e os transistores de efeito de campo (FETs – *field effect transistor*). Os transistores de junção bipolar (BJTs) são categorizados em dois tipos: PNP e NPN. Os dois se diferem pelo tipo de dopagem (silício ou germânio) pela qual esse dispositivo é constituído. A dopagem determina para qual direção a corrente poderá fluir. Em ambos os tipos, os transistores BJTs são constituídos por três terminais, conhecidos como base, coletor e emissor.

Os BJTs PNP, possuem duas regiões carregadas positivamente – o coletor e o emissor. A região de depleção entre os dois é carregada negativamente por ter excesso de elétrons. Os limites entre as regiões são chamados junções. A junção

base-emissor é polarizada inversamente e a junção de base-coletor é polarizada diretamente. Quando uma pequena tensão é aplicada no terminal base, o componente comuta (PLATT, 2013; WESTCOTT & WESTCOTT, 2018). Já os transistores BJT NPN, possuem duas regiões carregadas negativamente – o coletor e o emissor – cada uma com excesso de elétrons. A região de depleção é carregada positivamente. Em um NPN BJT, a junção base-emissor tem polarização direta e a junção de coleta de base é polarizada inversamente. De modo similar aos BJTs NPN, quando uma pequena tensão é aplicada no terminal base, o componente comuta. A Figura 24 apresenta as representações gráficas dos transistores BJT tipo NPN e PNP.

Figura 24 – Simbologias empregadas para representação dos transistores BJT, em circuitos eletrônicos. (a) Transistores do tipo NPN, (b) Transistores do tipo PNP.



Fonte: Modificado de Platt, (2013, p.242).

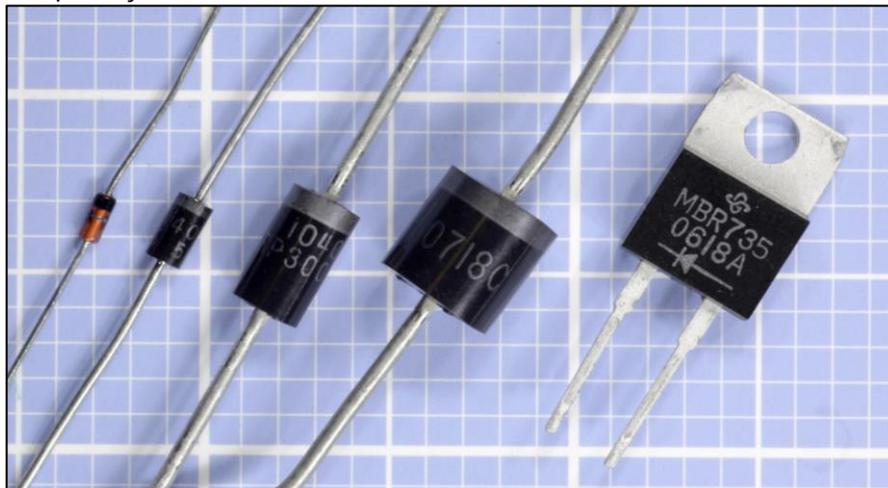
Os transistores do tipo FET possuem quatro terminais ou condutores que possuem similaridades com as finalidades dos terminais dos BJTs: *gate* (porta), *drain* (dreno), *source* (fonte) e *body* (corpo). O terminal porta (*body*) é o substrato do transistor; o contato porta (*gate*) é análoga à base de um transistor do tipo BJT; o terminal dreno (*drain*) funciona da mesma forma que um coletor BJT; e o contato fonte (*source*) faz o mesmo trabalho que um terminal emissor do BJT. No geral, existem dois tipos de FETs: tipo n e tipo p. depende do tipo de material semiconductor através do qual a corrente flui. O controle do fluxo da corrente da fonte para o dreno ocorre por meio da aplicação de uma baixa tensão no conector porta (*gate*). Há dois principais

subtipos de FETs: os MOSFETs (*metal-oxide-semiconductor* FETs) e os JFETs (*junction* FETs) (SHAMIEH *et al.*, 2011; WESTCOTT & WESTCOTT, 2018).

2.2.2.4 Diodos

Diodos são componentes que permitem que a eletricidade flua em uma única direção e opondo-se contra seu fluxo na direção oposta. O componente possui dois terminais: o terminal positivo, também chamado de ânodo, e terminal negativo, denominado de cátodo (WESTCOTT & WESTCOTT, 2018). O sentido do fluxo de corrente na qual o diodo permite é do ânodo para o cátodo, já no sentido contrário, ocorre a oposição da passagem de corrente elétrica. A Figura 25, exemplifica alguns dos modelos convencionais de diodos.

Figura 25 – Exemplificação de Modelos convencionais de diodos.



Fonte: Extraído de Platt, (2013, p.222).

Os diodos possuem uma gama de aplicações na eletrônica. Dentre as aplicações a mais conhecida é na elaboração de circuitos retificadores. Sendo peça fundamental na conversão de tensão alternada em tensão contínua (SHAMIEH *et al.*, 2011).

Existe uma variedade de tipos de diodos e cada um possui uma finalidade específica. A Figura 26 apresenta uma relação entre os tipos de diodos e suas simbologias.

Figura 26 – Exemplificação dos tipos de diodos e suas simbologias.



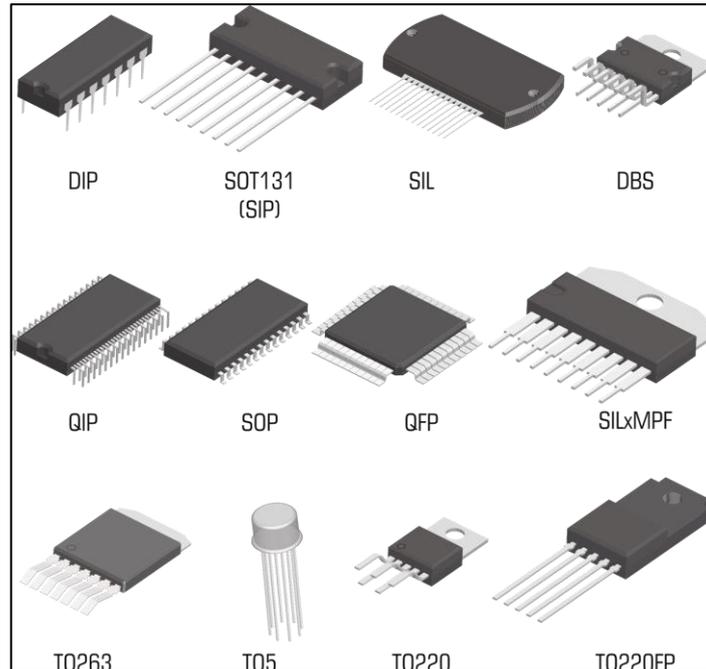
Fonte: Modificado de Torres, (2018, p.252).

2.2.2.5 Circuitos Integrados

Circuitos integrados, também chamados CIs, são dispositivos que possuem um circuito pronto dentro de um encapsulamento. Podem ser classificados basicamente em dois tipos: analógicos ou digitais. Na bibliografia, os CIs digitais também são chamados de circuitos lógicos e variam desde circuitos simples até microprocessadores que podem realizar milhões de operações lógicas. Os CIs analógicos são usados no gerenciamento de diversos dispositivos como, sensores, temporizadores, amplificadores, entre outros (DIAGO *et al.*, 2011; TORRES, 2018).

Devido a sua compactação, os ICs modernos podem conter milhares de componentes em um único encapsulamento. A Figura 27 exemplifica alguns dos tipos mais comuns de encapsulamento de circuitos integrados.

Figura 27 - Modelos de encapsulamento utilizados para a compactação dos circuitos integrados.



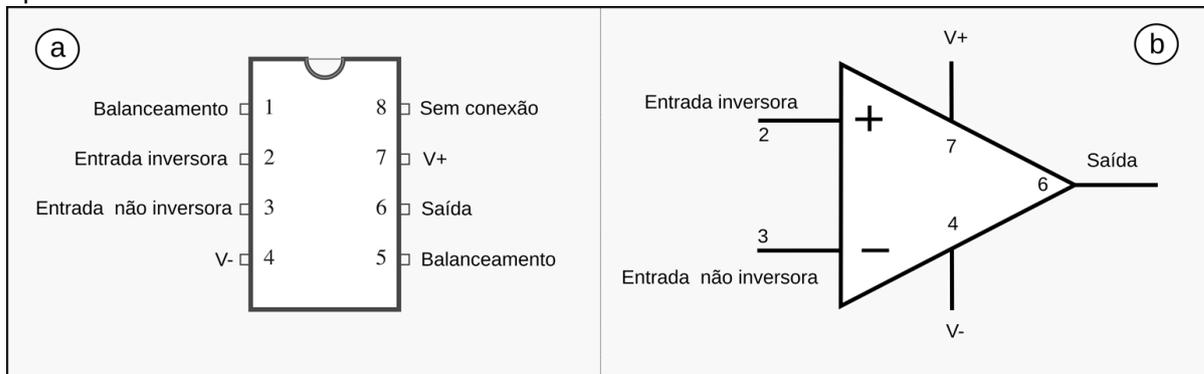
Fonte: Extraído de Torres, (2018, p.327).

2.2.2.6 Amplificadores Operacionais

O amplificador operacional, também conhecido como AOP, é um elemento de circuito ativo projetado para executar operações matemáticas de adição, subtração, multiplicação, divisão, diferenciação e integração. Normalmente os AOP's são formados por um complexo arranjo de resistores, transistores, capacitores e diodos. Através dessas operações, um AOP é capaz de adicionar sinais, amplificar um sinal, integrá-lo ou diferenciá-lo (ALEXANDER & SADIKU, 2013).

Os AOPs são disponibilizados em circuitos integrados sob diversas formas. A simbologia que representa os amplificadores operacionais é mostrada na Figura 28.

Figura 28 – Simbologia do Amplificador Operacional comum. (a) Terminais de contato e (b) símbolo representativo em circuitos.



Fonte: Modificado de Alexander & Sadiku, (2013, p.156).

2.2.2.7 Circuitos digitais

Os sinais digitais são projetados para aceitar apenas tensões de valores específicos. Um circuito que usa apenas dois estados é conhecido como um circuito binário. O projeto do circuito com quantidades binárias, usa a lógica de Álgebra booleana¹. Esses elementos básicos são combinados no projeto de CI para computadores e dispositivos associados para executar as funções desejadas. A exemplo de circuitos digitais são: microprocessadores; conversores de sinais analógicos-digitais e digitais-analógicos; multiplexadores e demultiplexadores, dentre outros (ALEXANDER & SADIKU, 2013).

2.2.2.8 Conversores de sinais

Para entender o conceito dos conversores de sinais analógicos e digitais deve-se entender a diferença entre os tipos de grandezas físicas e a suas representações. Na eletrônica, podemos classificar as grandezas em dois tipos: grandezas digitais e grandezas analógicas.

As grandezas digitais são aquelas que não variam continuamente no tempo, ou seja, são variáveis que possuem um valor especificado entre duas possibilidades, como 0 ou 1, ligado ou desligado, verdadeiro ou falso, e assim por diante. Já as grandezas analógicas podem assumir qualquer valor ao longo de uma faixa contínua

¹ Disponível em: < <https://www.britannica.com/topic/Boolean-algebra>>. Acesso em: 10 de mar. 2021.

e, o mais importante, seu valor exato é relevante (DIAGO *et al.*, 2011; TOCCI *et al.*, 2011).

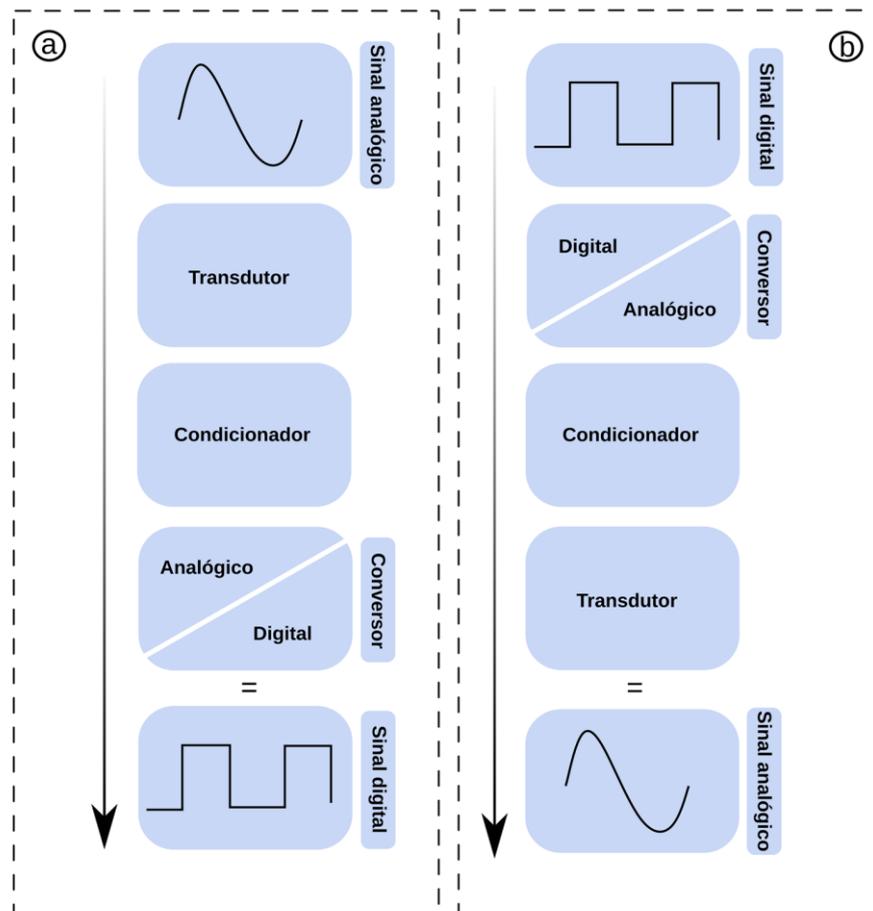
A maioria das variáveis físicas são analógicas por natureza e podem assumir qualquer valor dentro de uma faixa, a exemplo dessas grandezas é a resistividade, pressão, temperatura, e entre outras variáveis. Para integralizar os dois tipos de grandezas, existem os conversores de sinais, que são disponibilizados em dois tipos: conversor analógico-digital (ADC ou A/D) e conversores digitais-analógicos (DAC ou D/A) (JUNIOR & JULIÃO, 2012; TOCCI *et al.*, 2011).

Um conversor analógico-digital é um sistema que faz a transposição dos valores analógicos para representações booleanas. Para que essas grandezas possam ser permutadas para representações digitais, inicialmente é necessário transformá-las em sinais elétricos. Para isso, utiliza-se um dispositivo denominado transdutor (TOCCI *et al.*, 2011). O transdutor tem como finalidade no circuito, enviar os sinais elétricos para um condicionador de sinal, cuja função é condicionar os sinais elétricos recebidos para uma escala que possa ser reconhecida pelo conversor.

A forma generalizada da conversão de sinais digitais em sinais analógicos segue o processo inverso dos conversores analógico-digitais. O sinal digital é recebido pelo conversor D/A, que o transforma em sinal elétrico enviando para o condicionador. Este por sua vez repassa o sinal já condicionado para o transdutor que resulta na saída do sinal analógico.

O diagrama de blocos apresentado na Figura 29, ilustra o processo para a conversão de grandezas analógicas em digitais e o processo para a conversão de grandezas digitais em analógicas.

Figura 29 – Representação dos processos para conversão de grandezas analógicas em digitais (a) e grandezas digitais em analógicas (b), apresentado em diagramas de blocos.



Fonte: Modificado de Junior & Julião (2012, p.113).

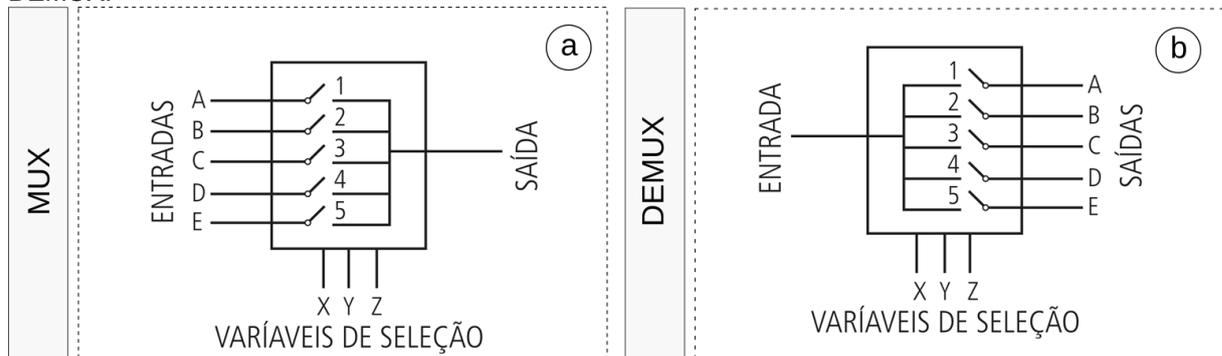
2.2.2.9 Multiplexadores e Demultiplexadores

Um multiplexador também denominado de MUX é um circuito combinacional que tem a finalidade de selecionar, por meio de entradas de seleção (também denominadas de endereço) a entrada que será conectada à saída. Em outras palavras o multiplexador atua como uma chave de múltiplas posições, controlada digitalmente. Circuitos multiplexadores encontram numerosas aplicações em sistemas digitais de todos os tipos. Essas aplicações incluem seleção de dados, roteamento de dados, sequenciamento de operações, conversões paralelo-série, geração de formas de onda e geração de funções lógicas (PLATT, 2013; TOCCI *et al.*, 2011).

Já os demultiplexadores, denominados de DEMUX, realizam a operação inversa a dos multiplexadores. Estes, possuem como finalidade selecionar, também

por meio de variáveis de seleção, várias saídas através de uma única entrada. A figura 30 apresenta um diagrama funcional genérico de um multiplexador e demultiplexador.

Figura 30 – Diagrama funcional genérico dos (a) multiplexadores – MUX e (b) demultiplexadores – DEMUX.



Fonte: Modificado de Junior & Julião, (2012, p.69).

2.2.2.10 Transformadores

Os transformadores são componentes formados por duas ou mais bobinas enroladas em um núcleo (núcleo de ar ou ferromagnéticos). E possuem a finalidade de modificar os níveis de tensão e corrente, podendo aumentá-las ou diminuí-las. Quando uma corrente alternada é aplicada ao enrolamento primário do transformador, é produzido um fluxo magnético variável que percorre o núcleo do transformador e passa pelo enrolamento secundário, provocando uma tensão induzida na saída do componente. Os transformadores podem ser especificados pela sua impedância (impedância dos enrolamentos) ou então pela tensão e corrente de entrada e saída. O que determina se o transformador é elevador de tensão ou diminuidor de tensão, são os números de espiras de cada bobina.

Segundo Martins, (1985), uma das limitações dos transformadores está no fato de que esses dispositivos requerem uma entrada de fontes de corrente alternada (CA) não sendo possível portanto a elevação ou diminuição diretamente de fontes de corrente contínua (CC). A Figura 31 apresenta algum dos modelos de transformadores disponíveis comercialmente.

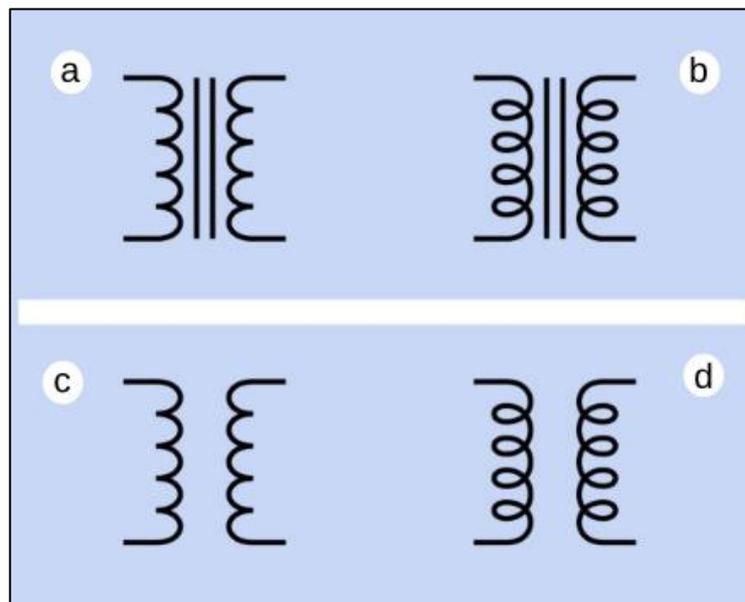
Figura 31 – Modelos de transformadores elétricos disponíveis comercialmente.



Fonte: Extraído de Platt, (2013, p.135, 141).

A simbologia empregada para representação dos tipos de transformadores é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Modelos de simbologias empregadas para a representação dos transformadores com núcleo ferromagnético (a, b) e núcleo de ar (c, d).

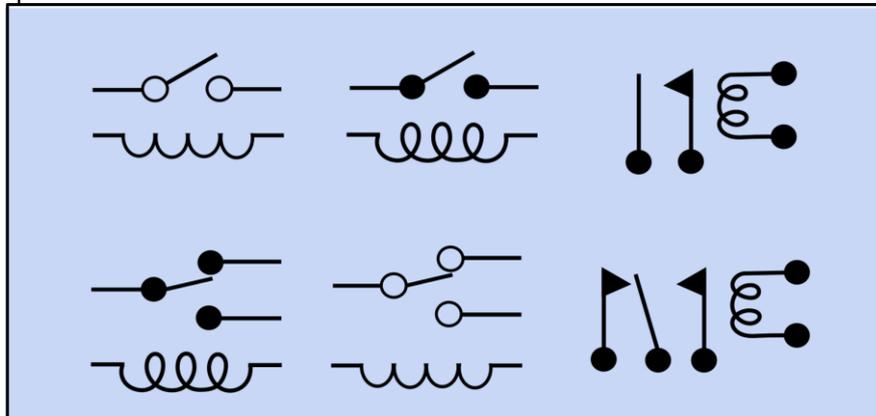


Fonte: Modificado de Platt, (2013, p.136).

2.2.2.11 Relés

Os relés são interruptores eletromagnético que possibilitam a abertura e

Figura 34 – Alguns tipos de simbologias utilizadas para a representação dos relés, de acordo com a quantidade de pólos.



Fonte: Modificado de Platt, (2013, p.267).

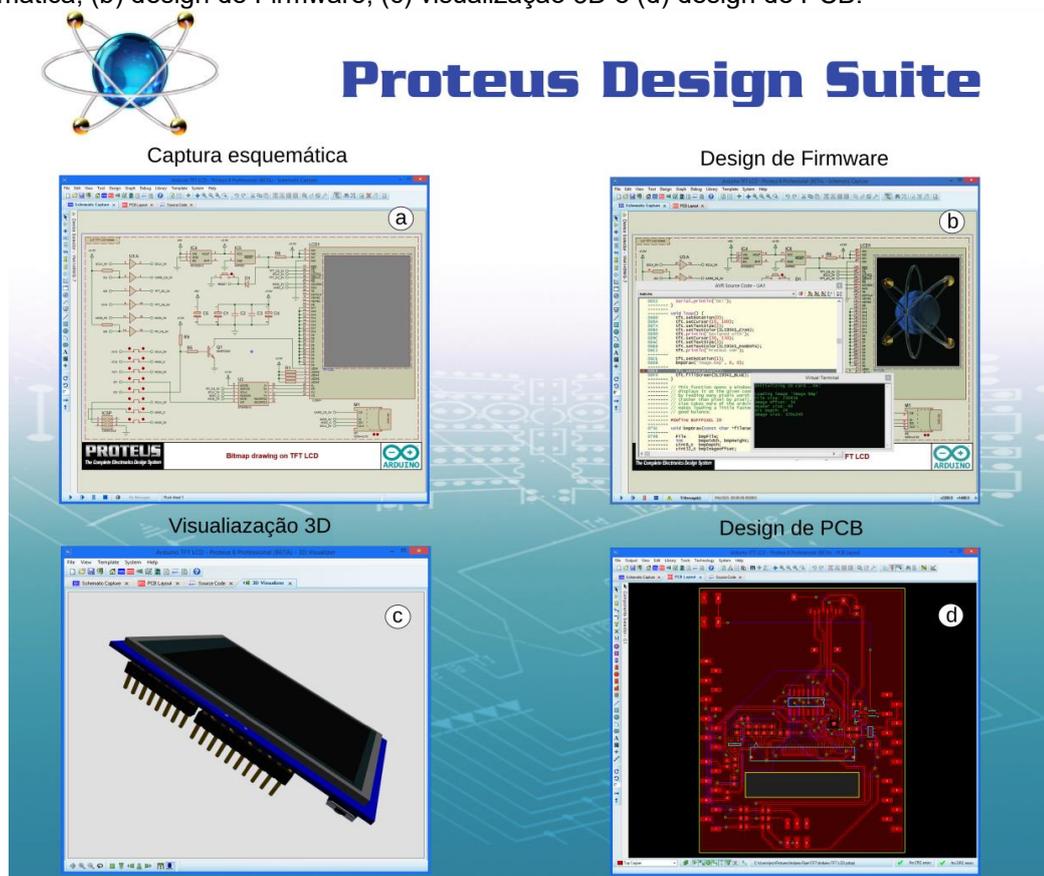
2.3 Proteus Design Suite ©

O Proteus Design Suite © é um *software* desenvolvido pela empresa britânica *Labcenter Electronics Ltd.*² e possui como finalidade a criação e simulação de projetos eletrônicos. O *software* é composto por uma suíte de ferramentas, que inclui captura esquemática, simulação e módulos de projetos de placas de circuito impresso (PCB, na sigla em inglês), suporte para visualização 3D, *design* de *Firmware*, entre outras ferramentas.

Além de realizar simulações de componentes analógicos e digitais, o *software* possibilita simular componentes programáveis como os microcontroladores, minicomputadores, monitores LCD com controladores gráficos integrados ou componentes com protocolos de comunicação específicos. A exemplo de microcontroladores disponíveis no Proteus, temos: PIC; Arduino; Piccolo; ATmega entre outros. A exemplo de computadores de placa única, o *software* disponibiliza a simulação do Raspberry Pi 3. De acordo com a aplicação do microprocessador, ele pode programar diretamente no protótipo virtual do diagrama e realizar a depuração em tempo real. O *software* também disponibiliza instrumentos de medição e análise de sinais, tais como: osciloscópio, multímetro, amperímetro, entre outros. A Figura 35 exemplifica algumas das principais ferramentas disponíveis no *software*.

² Disponível em: <<https://www.labcenter.com/>>. Acesso em: 20 de mar. 2021.

Figura 35 – Exemplificações de algumas ferramentas do software Proteus Design Suite ©. (a) captura esquemática; (b) design de Firmware; (c) visualização 3D e (d) design de PCB.



Fonte: Adaptado de *Labcenter Electronics Ltd*³.

2.4 Estado da Arte

Esta secção apresenta uma revisão de trabalhos relacionados, analisando-os, a fim de reforçar a justificativa e a relevância do trabalho que está sendo proposto, além de apresentar métodos que serviram de referência para o presente trabalho.

2.4.1 OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale

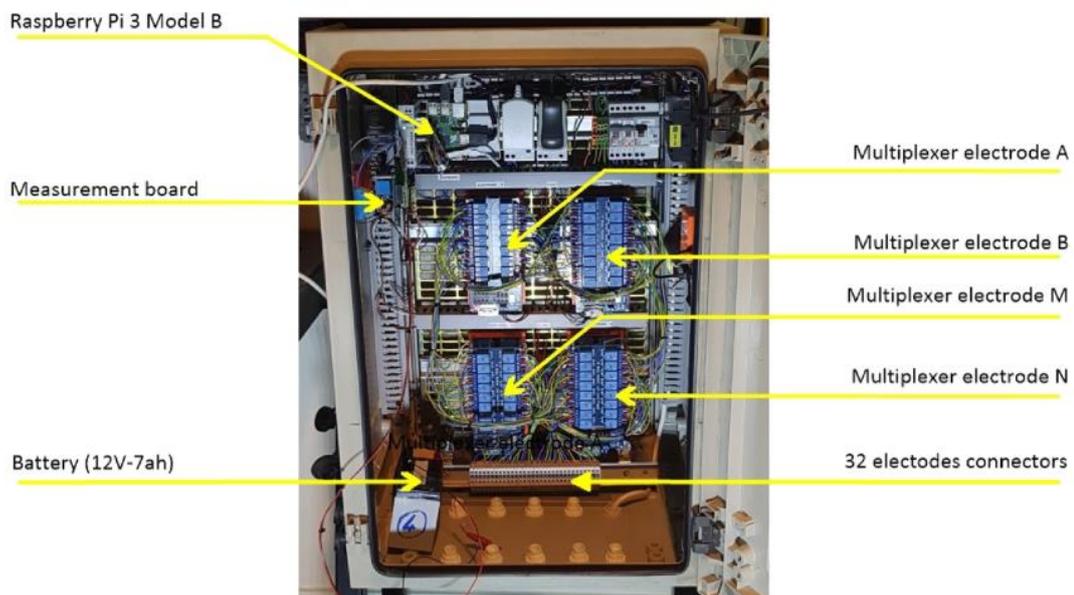
O medidor de resistividade elétrica proposto por Clement *et al.* (2020) é multieletrodo e destinado a escala laboratorial. Possui baixo custo e utiliza um computador de placa única, Raspberry Pi, modelo 3B, para a coleta e processamento

³Disponível em: <<https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/tftShield.pdf>>. Acesso em: 1 de abril. de 2021

dos dados. É utilizado um Conversor Analógico Digital (ADC) de 16 bits para realizar a conversão do sinal medido nos eletrodos e transmití-los para o Raspberry Pi. Segundo os autores, isso foi necessário devido ao fato de que o Raspberry Pi não possui portas para entrada de sinais analógicos.

A programação do equipamento foi feita em linguagem Python, embutido num sistema Linux, que integra o Raspberry Pi. O trabalho de Clement *et al.* (2020) se difere dos outros trabalhos analisados, pois propõe um método de cascata para seleção dos eletrodos, baseado nos fundamentos de sistema de multiplexadores – MUX. Esse método adequou o sistema de eletrodos à quantidade de GPIO's disponíveis pelo Raspberry Pi, com isso, os autores propuseram um equipamento de até 32 eletrodos. A Figura 36 demonstra o equipamento desenvolvido, denominado OhmPI.

Figura 36 – Eletrorresistivímetro multieletrodo de escala laboratorial desenvolvido por Clement *et al.*, (2020).



Fonte: Extraído de Clement *et al.*, (2020, p.17).

2.4.2 Desenvolvimento de Resistivímetro de baixo custo para monitoramento ambiental

O Resistivímetro multieletrodo de baixo custo desenvolvido por Santos, K., (2014) é destinado para monitoramento ambiental. Para o desenvolvimento do circuito

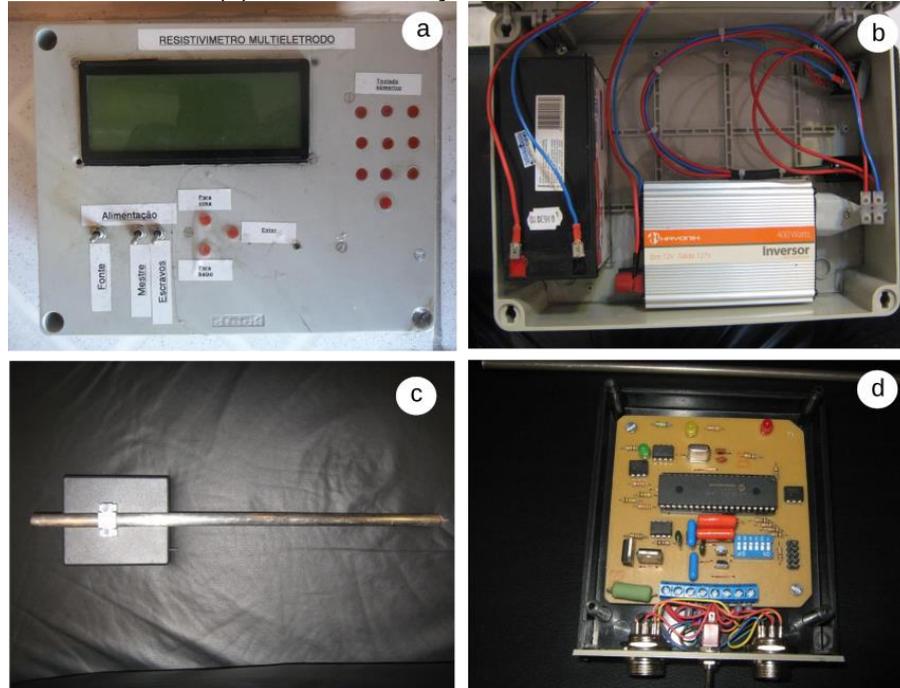
eletrônico, o autor utilizou como base do processamento um microcontrolador programável, também conhecido como PIC “*Programmable Interface Controller*” (Controlador de Interface Programável). O PIC foi o responsável pela lógica e armazenamento dos dados do Resistivímetro multieletrodo através de um programa que o autor desenvolveu em linguagem C, especificamente para a aplicação em monitoramento ambiental.

Para o módulo de transmissão de corrente, o autor desenvolveu uma fonte que possibilita até três níveis de corrente (87mA, 248mA e 469mA). A fonte de corrente desenvolvida foi baseada num conversor de tensão utilizado em veículos, capaz de transformar 12VCC em 127 VCA. Após a obtenção da tensão e corrente necessárias, foi montado um circuito para conversão da tensão alternada para contínua e estabilização da corrente. A comutação entre níveis de correntes foi feita através de relés, estes eram ativados por meio das saídas digitais do PIC.

O diferencial deste equipamento está no sistema de medição da diferença de potencial. O autor fez o uso de um PIC modelo 18F25J10 e um ADC de 12 bits, para cada eletrodo em campo (Figura 37c e 37d). Além disso foi implantado um sistema de identificação via *hardware* com uma chave de seis bits que permite várias combinações para seleção dos eletrodos, podendo-se chegar até o limite de 64 eletrodos nesta configuração. No projeto o autor optou por utilizar 24 eletrodos.

Além dos circuitos criados para fazer a leitura e armazenamento de dados, foi implementada também uma interface com um *display* de 20 x 4 para a visualização dos dados e para navegação no sistema operacional. A Figura 37 apresenta o equipamento desenvolvido por Santos, K., (2014).

Figura 37 – Imagem do equipamento desenvolvido pelo Santos, K., (2014). (a) Painel frontal do equipamento; (b) Fonte de alimentação, responsável pela emissão de corrente ao solo. (c) circuito de seleção acoplado ao eletrodo; (d) circuito de seleção de eletrodo.



Fonte: Extraído de Santos, K., (2014).

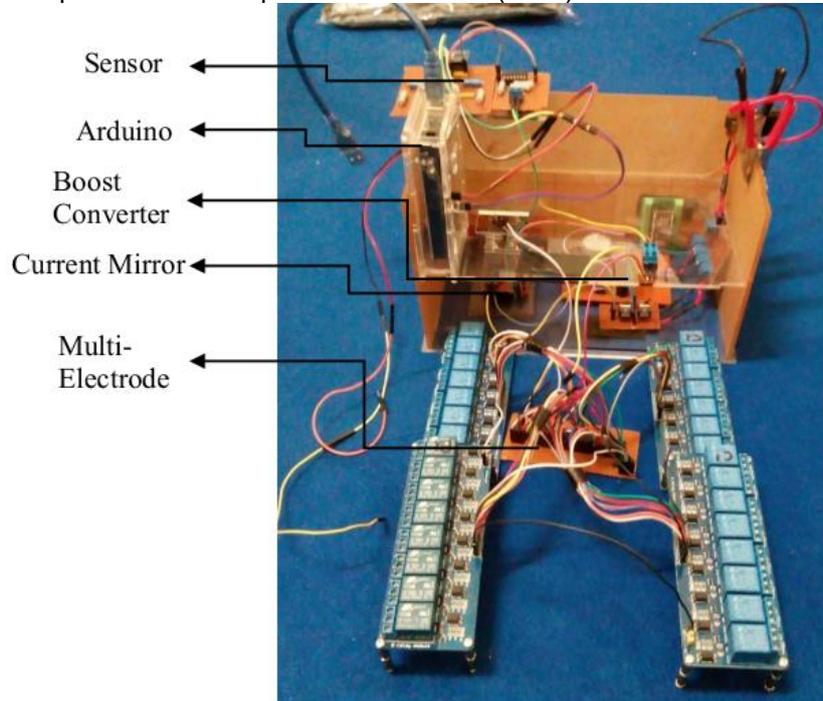
2.4.3 Low-cost multi-electrode resistivity meter based on microcontroller for electric resistivity tomography purpose

O protótipo desenvolvido por Fatahillah *et al.* (2019) é multieletródo e de baixo custo. Os autores projetaram o equipamento para levantamentos de tomografia de resistividade elétrica. Os autores utilizaram um Arduino UNO como microcontrolador do sistema. Um conversor *boost* foi utilizado para converter a tensão de 12V para 127V, com o Arduino Nano como uma fonte de sinal PWM (*Pulse Width Modulation*) para ativar o conversor *boost*. O sistema de medição da diferença de potencial elaborado pelos autores, usa um circuito divisor de tensão para o eletrodo potenciais. Já para o circuito de transmissão de corrente foi utilizado um amplificador operacional – AOP não inversor.

Para o sistema de multieletródos os autores também fizeram o uso de módulos relés regulados por um circuito integrado IC74HC595. Esse sistema foi projetado para ser controlado por um Arduino MEGA 2560. Além disso, os autores integraram ao instrumento uma interface gráfica que serve como controlador e exibição de dados. A

Figura 38 é uma imagem do equipamento desenvolvido por Fatahillah *et al.* (2019).

Figura 38 – Protótipo desenvolvido por Fatahillah *et al.* (2019).



Fonte: Extraído de Fatahillah *et al.*, (2019, p.3).

3 METODOLOGIA

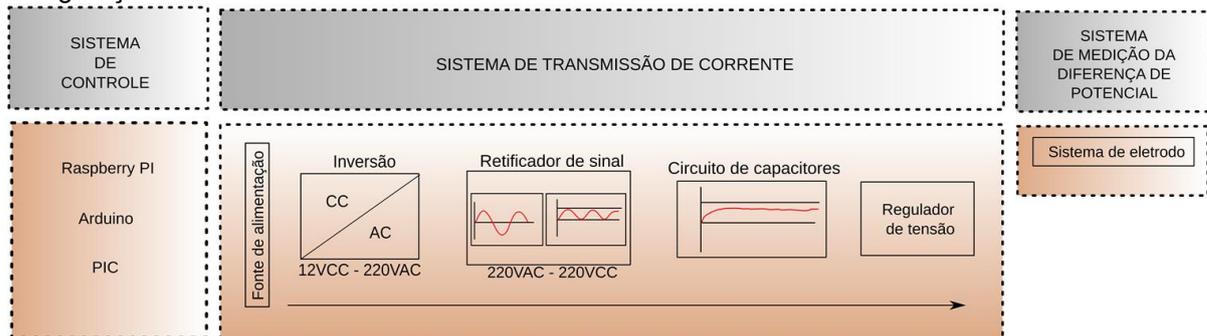
A projeção do protótipo, teve como ponto de partida o estudo dos manuais de eletrorresistímetro comerciais e o estudo de obras que fundamentam a elaboração de protótipos de eletrorresistímetros de baixo custo, que estão disponíveis na literatura. Com isso, foi realizada uma compilação das informações sobre a estrutura eletrônica desses equipamentos. Após a análise destes documentos, percebeu-se que há um padrão estrutural na constituição de seus *hardwares*, nota-se que, genericamente, os eletrorresistímetros, ao que se refere a suas características estruturais e eletrônicas, são compostos por três sistemas principais:

- a) **sistema de controle** que é responsável pelo gerenciamento operacional do equipamento;
- b) **sistema de transmissão**, que se encarrega de transmitir corrente elétrica ao subsolo;
- c) **sistema de medição** que é responsável por realizar as medições do parâmetro

petrofísico de interesse.

A Figura 39 apresenta um diagrama de blocos exemplificando de maneira genérica os sistemas de um eletrorresistivímetro e possíveis configurações de *hardware* para o seu desenvolvimento, conforme as informações disponíveis na literatura.

Figura 39 – Diagrama de blocos dos sistemas genéricos de um eletrorresistivímetro e possíveis configurações.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Sistema de controle

Para o sistema de controle do protótipo, optou-se por utilizar um computador de placa única (traduzido do inglês *Single Board Computer* – SBC). Os SBC's são computadores construídos em uma única placa de circuito, composto por microprocessador, sistema de entrada/saída (E/S), memória e outros recursos comuns a um computador tradicional. Um dos SBC's mais populares no mercado é o Raspberry Pi, fabricado pela empresa Raspberry Foundation (Reino Unido). O Raspberry Pi é amplamente empregado em diversos projetos de desenvolvimento de protótipos, *devido ao fato de possuir um sistema próprio e maior nível de processamento, possibilitando a elaboração de sistemas mais complexos*. Atualmente, o *hardware* encontra-se na 4ª geração. No *software* Proteus, é disponibilizado o Raspberry Pi 3 modelo 3B, este modelo compreende todos os requisitos necessários para a elaboração do protótipo, o modelo físico do *hardware* apresenta as seguintes especificações:

- CPU Quad Core 1.2 GHz Broadcom BCM2837 64 bits;
- 1 GB de RAM;
- BCM43438 LAN sem fio e *Bluetooth Low Energy* (BLE) a bordo;

- Base Ethernet;
- GPIO estendido de 40 pinos (*header 2x20*);
- 4 portas USB 2.0;
- Saída estéreo de 4 pólos e porta de vídeo composto;
- HDMI modelo A;
- Porta de câmera CSI para conectar uma câmera Raspberry Pi;
- Porta de exibição DSI para conectar uma tela de toque Raspberry Pi;
- Porta Micro SD para carregar seu sistema operacional e armazenar dados;
- Fonte de alimentação Micro USB comutada atualizada de até 2,5A.

A Figura 40 apresenta as características do Raspberry Pi 3 modelo 3B, em sua versão física.

Figura 40 – Características da versão física do Raspberry Pi 3 modelo 3B.



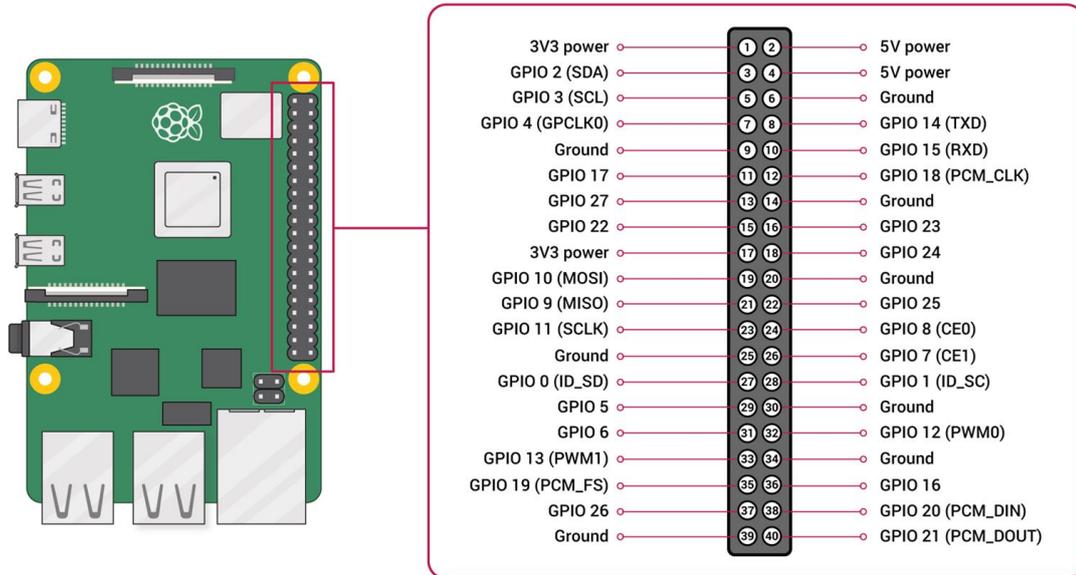
Fonte: Extraído de *Raspberry foundation*⁴

O controle do sistema por meio do Raspberry Pi, ocorre através dos pinos GPIOs (do inglês *General-Purpose Input/Outputs – GPIOs*). Uma GPIO é uma porta, de entrada ou saída, que possibilita ser controlada e programada para diversos fins, tais como, interface serial (SPI (*Serial Peripheral Interface*), I²C (*Inter-Integrated Circuit*) e UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* serial), e também podem ser programadas como pinos de entrada ou saída (I/O – *Input/Output*). O *header* de GPIOs dispõe de alguns pinos de terra (GND – *ground*) e fontes de tensão de 3,3V e 5V para a integração com periféricos.

⁴Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org>>. Acesso em: 22 jun. 2021.>

Esse modelo de hardware disponibiliza um total de 40 GPIOs, conforme apresentado na Figura 41.

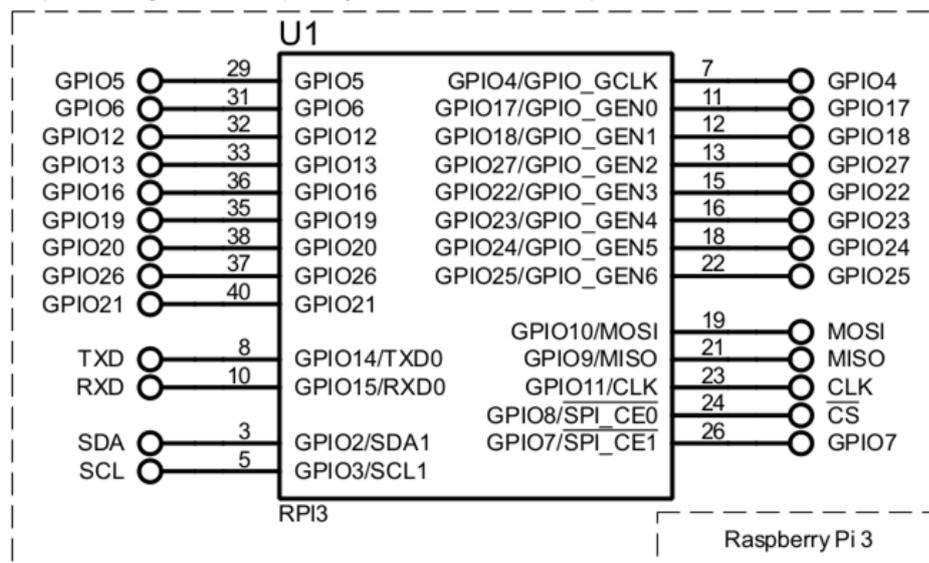
Figura 41 – Pinos do barramento GPIOs e suas respectivas funções.



Fonte: Extraído de *Raspberry foundation*.

No *Software Proteus*, o Raspberry Pi é representado conforme a Figura 42.

Figura 42 – Representação do Raspberry Pi 3 modelo 3B disponível no *software Proteus*.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseado nestas características, o Raspberry Pi foi utilizado neste projeto para

controlar tanto o sistema de transmissão de corrente, quanto ao sistema de medição. Possibilitando também a seleção e sequência dos eletrodos para o levantamento em campo ou laboratório. Além disso, o *hardware* ficou encarregado de realizar o registro e armazenamento das informações obtidas por meio do sistema de medição.

É possível controlar os pinos GPIO's utilizando diversas linguagens de programação e ferramentas, tais como: Python, C/ C++, Scrach, entre outras. A linguagem de programação utilizada no protótipo, é a linguagem Python⁵ na versão 2.8. Além de ser utilizada como linguagem principal no desenvolvimento de sistemas, o Python também é muito utilizado como linguagem *script* em vários *softwares*, a exemplo disso é o *Software* Proteus Design Suite© que possui instalado em sua biblioteca a linguagem na versão 2.8, possibilitando o controle do Raspberry Pi pelo *software*. As bibliotecas utilizadas para a programação e processamento do protótipo são: Pandas, RPi.GPIO, adafruit_ads1x15, busio, datetime, board, numpy, os, time e sys.

3.2 Sistema de transmissão de corrente

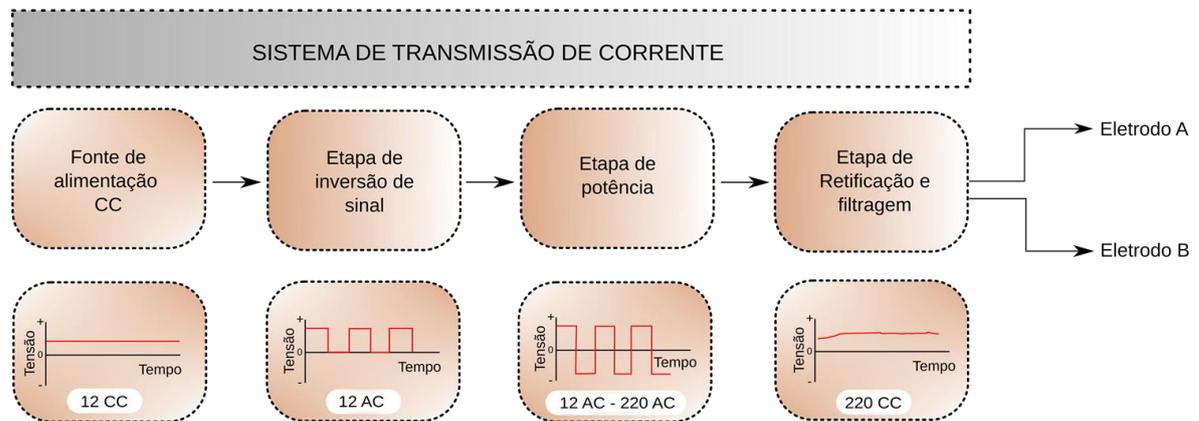
O sistema de transmissão de corrente, é o módulo de maior complexidade no desenvolvimento protótipo, pois requer maiores processos para a fonte de corrente do sistema. Ao citarmos o manual do eletrorresistivímetro comercial SyscalPro da empresa Iris instruments (França), temos a informação de que o equipamento utiliza uma bateria recarregável de 12Vcc como fonte de entrada do sistema, entretanto, o equipamento dispõe de uma tensão de saída que varia de 12Vcc – 800Vcc. O mesmo ocorre com o equipamento da ABEM, terrameter LUND imaging system, este modelo também possui 12Vcc de fonte de entrada, e a tensão de saída do equipamento pode variar de 12Vcc – 400Vcc podendo atingir 800Vcc de pico a pico e até gerar uma corrente elétrica de 1000mA. Os manuais de outros equipamentos também possuem tal semelhança. Dessa forma, nota-se que a fonte de transmissão contínua de 12Vcc deve passar por uma etapa de elevação. Este processo na eletrônica é comum e pode ser feito facilmente com o uso de um transformador. Entretanto, como já descrito anteriormente (secção 2.2.2.3), os transformadores são dispositivos que operam,

⁵Disponível em: <<https://www.python.org/>> Acesso em:28 ago. 2021.

exclusivamente com corrente alternada e não corrente contínua, portanto é necessário desenvolver um circuito de inversão CC – AC e posteriormente elevar o sinal com o uso do transformador. Finalmente, o sinal elevado deve passar por uma etapa de retificação e filtragem, com o objetivo de torná-lo novamente contínuo. Podemos chamar este processo como conversão CC – CC.

Levando em consideração estes conceitos, procedemos com o desenvolvimento do sistema de transmissão de corrente da seguinte forma, conforme ilustrado no diagrama de blocos da Figura 43.

Figura 43 – Diagrama de bloco do Sistema de transmissão de corrente.

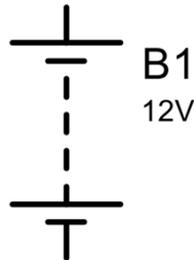


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Fonte de alimentação

Como fonte de entrada do sistema de transmissão, foi utilizado uma bateria de 12Vcc. O Proteus Design Suite© disponibiliza diversos tipos de fontes, entre elas estão as baterias que são facilmente encontradas no *software* e possui a simbologia destacada na Figura 44.

Figura 44 – Simbologia da bateria disponível no software Proteus.

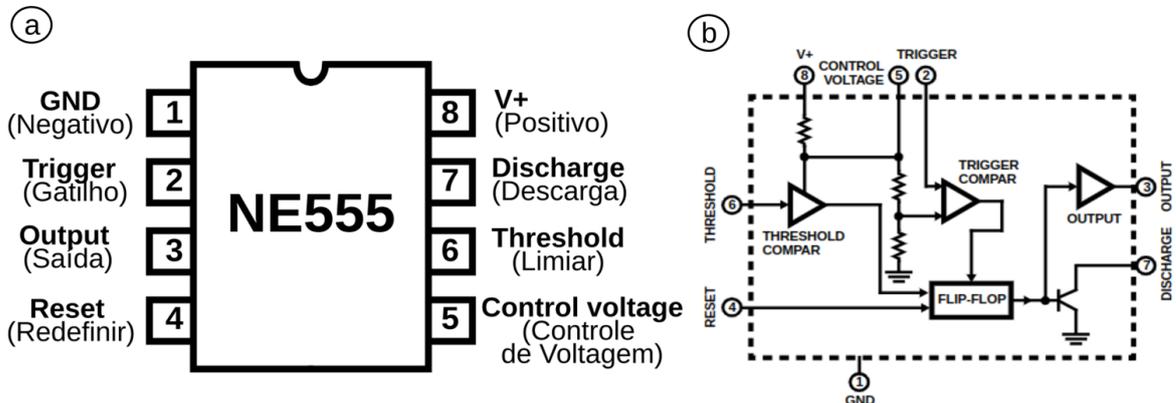


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 Etapa de inversão de sinal

A etapa de inversão do sinal tem como base um circuito integrado oscilador, que possui como finalidade criar um ciclo de alternância na corrente da fonte de tensão de entrada. Para isso, optou-se por utilizar o circuito integrado NE555, esse dispositivo é um circuito preciso de temporização capaz de produzir atrasos de tempo ou oscilação. Suas características eletrônicas são demonstradas na Figura 45. Neste projeto o CI NE555 produzirá alternância em formato de ondas quadradas com uma frequência de oscilação de aproximadamente 1.5khz, esta frequência é ajustável de acordo os componentes periféricos, conectados ao CI.

Figura 45 – Características do circuito integrado NE555, (a) Descrição dos contatos, (b) Diagrama de bloco funcional.



Fonte: Adaptado do *datasheet* do componente⁶

⁶ *Datasheet* disponível em: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/100921/HARRIS/NE555.html>
Acesso em 22 de junho de 2021.

Para calcular R_1 , devemos isolá-lo na Equação 33 e substituir os valores de tempo de carga ($T/2$) e do capacitor (C_2), que já foram pré-estabelecidos, desta forma teremos que R_1 equivale 3333Ω , conforme a equação,

$$R_1 = \frac{0,000333333s}{0,1\mu F} = 3333\Omega \quad (34)$$

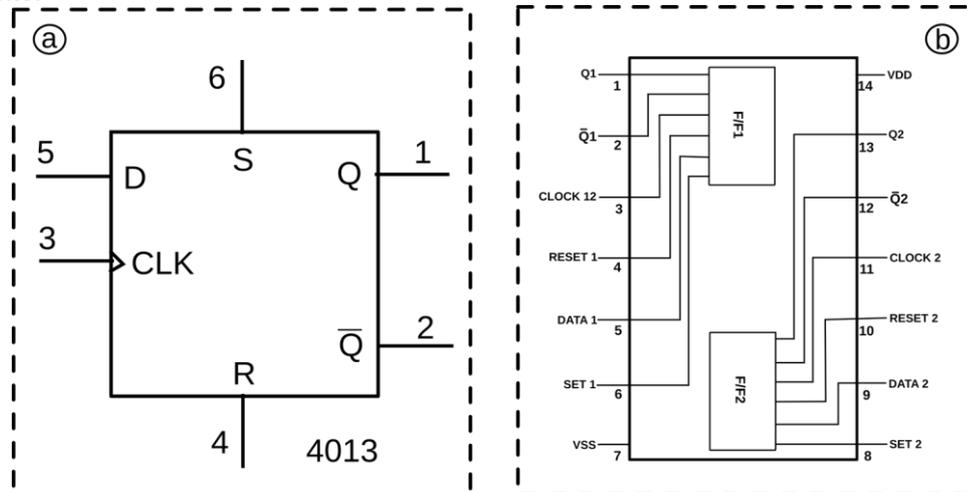
Para o cálculo do resistor R_2 , segue-se o mesmo procedimento, entretanto, como $R_1 = R_2$ ambos os resistores terão o mesmo valor. Contudo, uma consideração deve ser feita, o valor de resistor comercialmente disponível, mais próximos do resistor calculado é o resistor de $3k6\Omega$, com tolerância de 5%. Logo para tornar a simulação de acordo com a disponibilidade comercial dos componentes considera-se que os resistores R_1 e R_2 terão como valor $3k6\Omega$. Com esses resistores, a frequência de oscilação será de aproximadamente 1,33 kHz, conforme a Equação 35.

$$F = \frac{1,44}{(R_1 + 2R_2)C_2} = \frac{1,44}{(3600 + 2 * 3600)0,1\mu} = 1,3kHz \quad (35)$$

A saída do CI NE555 (Terminal 3) é conectada no terminal 3 do CI CD4013 que será responsável por dividir o sinal da saída do circuito oscilador em duas ondas quadradas de tempos opostos. Este circuito possui duas saídas que mudam de estado alternadamente em cada pulso que provém da saída do CI NE555 (terminal 3). Quando uma das saídas estiver em “tempo alto” a outra saída estará no “tempo baixo” e vice-versa. A Figura 47 apresenta representação do CI40137 no *software* Proteus e o diagrama de bloco funcional do componente.

⁷Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/FAIRCHILD/CD4013.html>> Acesso em: 25 jun. 2021.

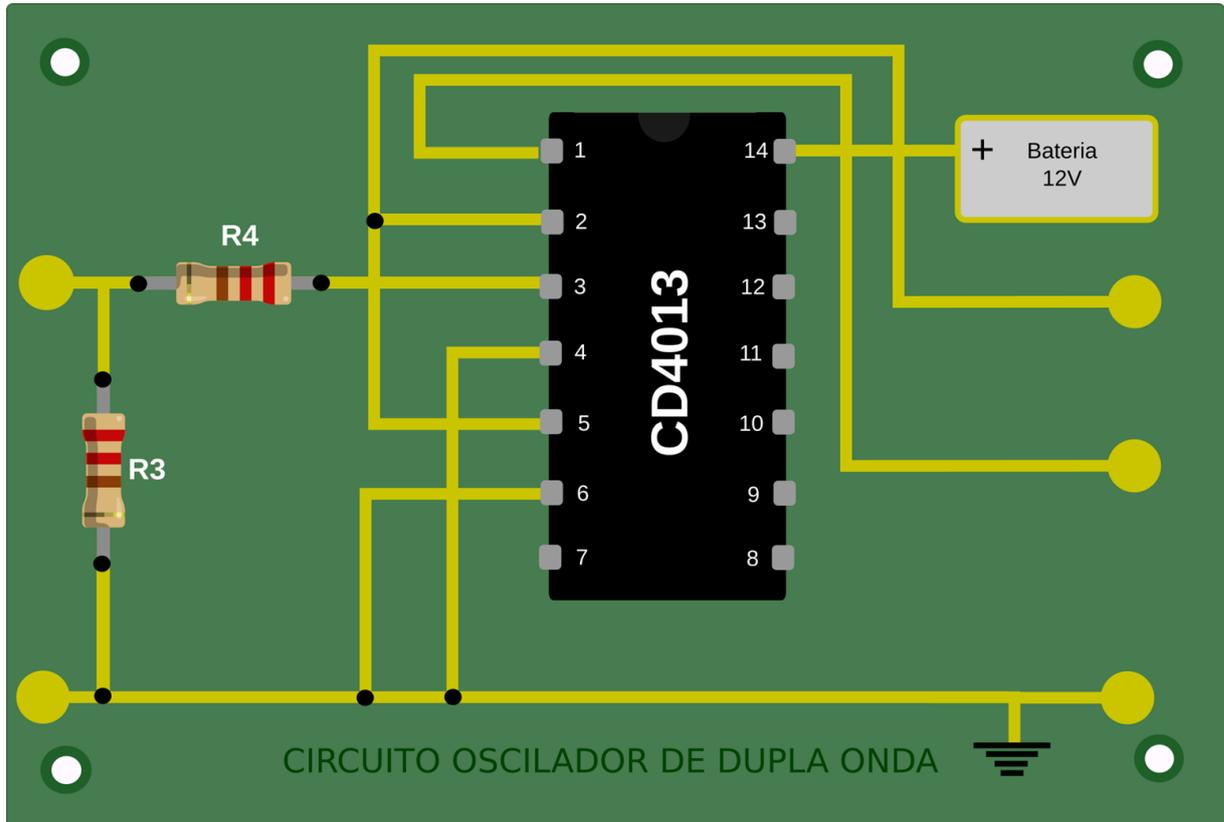
Figura 47 – (a) Representação do CD4013 no software Proteus e o (b) Diagrama de bloco funcional do componente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No componente real, o CI CD4013 deve ser alimentado por uma tensão de 12Vcc, para isso o terminal 14 é conectado ao terminal positivo da bateria e o terminal negativo da bateria é conectado ao terminal 7. Os terminais 4 e 6 são conectados ao aterramento do sistema e o terminal 2 e 5 conectados entre si. Para proteger a entrada do terminal *clock* (CLK) do CI CD4013, são integrados antes do terminal CLK dois resistores de $2k7\Omega$ que servem como um divisor de tensão. A Figura 48 exemplifica o circuito da etapa de inversão do sinal.

Figura 48 – Circuito de inversão da etapa de oscilação do sinal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.3 Etapa de potência

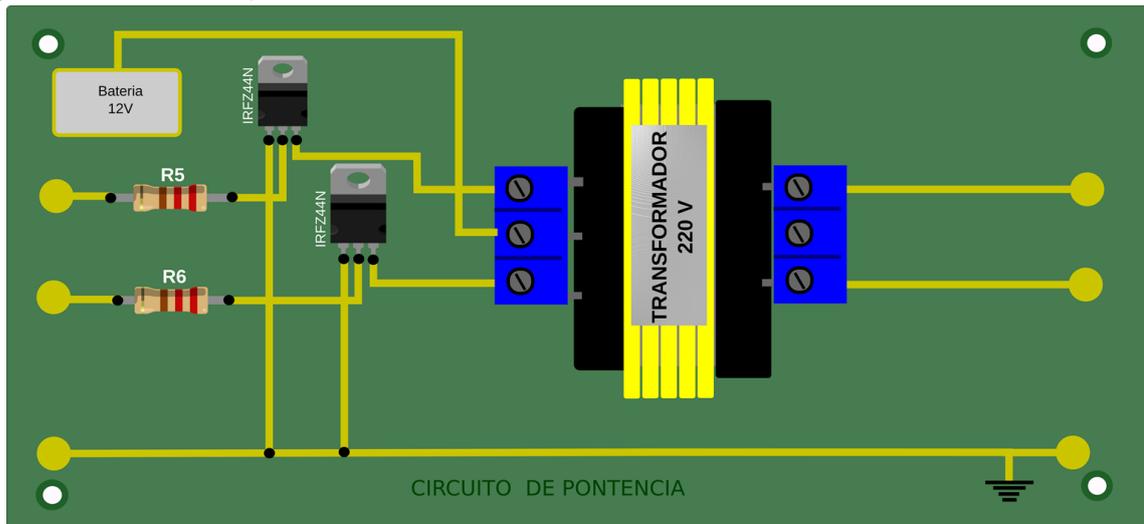
O objetivo desta etapa do circuito é converter a tensão contínua de sinal oscilado, para uma tensão alternada e elevada. Isso é possível devido a um circuito baseado em transistores Mosfet que são controlados a partir dos sinais da saída 1 e 2 do circuito integrado CD4013, que ativam alternadamente cada Mosfet. Os Mosfets podem ativar e desativar muitas vezes por segundo, possibilitando a condução de corrente de maneira intermitente. O controle deste dispositivo ocorre mediante a aplicação de uma voltagem no terminal G, também conhecido como *gate*. Para este projeto utilizaremos o transistor Mosfet modelo IRFZ44N.

Os Mosfets IRFZ44N serão responsáveis por alternarem o sinal de entrada na bobina primária, isso gerará uma indução magnética no transformador que terá sentido alternante a cada variação na ativação dos Mosfets. Esta variação do sentido da indução magnética provoca na bobina secundária uma corrente alternada de maior voltagem. Este fenômeno é descrito pela Lei de Faraday também conhecido como lei

da Indução Eletromagnética.

Para proteger os transistores, na entrada dos contatos (*gate*) são acoplados dois resistores de $1k5\Omega$. Desta forma, a tensão é convertida e potencializada de acordo com o circuito da Figura 49.

Figura 49 – Circuito de potência do sistema de transmissão.



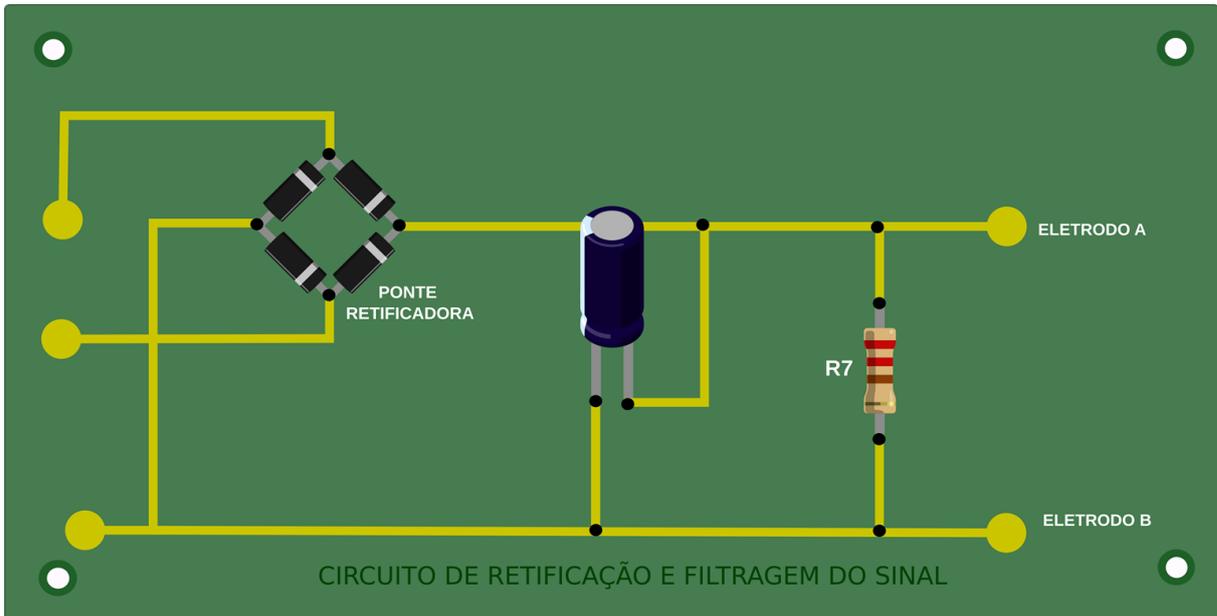
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Etapa de retificação e filtragem do sinal

A etapa de retificação e filtragem do sinal, terá como finalidade ao sistema converter a tensão alternada (AC) para uma tensão contínua (CC). Para isto, utiliza-se uma ponte retificadora.

O sinal resultante será contínuo e possuirá ondulações, estas ondulações também são conhecidas como efeito de onda, que pode ser filtrada com a utilização de um capacitor. A explicação, é que quando o pulso decai o capacitor descarrega a sua energia armazenada e preenche este decaimento, diminuindo o efeito de onda e, portanto, aumentando a linearidade do sinal (MARTINS, 1985). Este diagrama completo é conhecido como circuito retificador de onda completa e é apresentado na Figura 50.

Figura 50 – Circuito de retificação e filtragem do sinal, do sistema de transmissão de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma das características do retificador de onda completa, é que quando se retifica um sinal alternado, a tensão retificada será maior. Esta tensão é conhecida como tensão de pico (V_{pico}), e pode ser calculada por,

$$V_{pico} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} \quad (36)$$

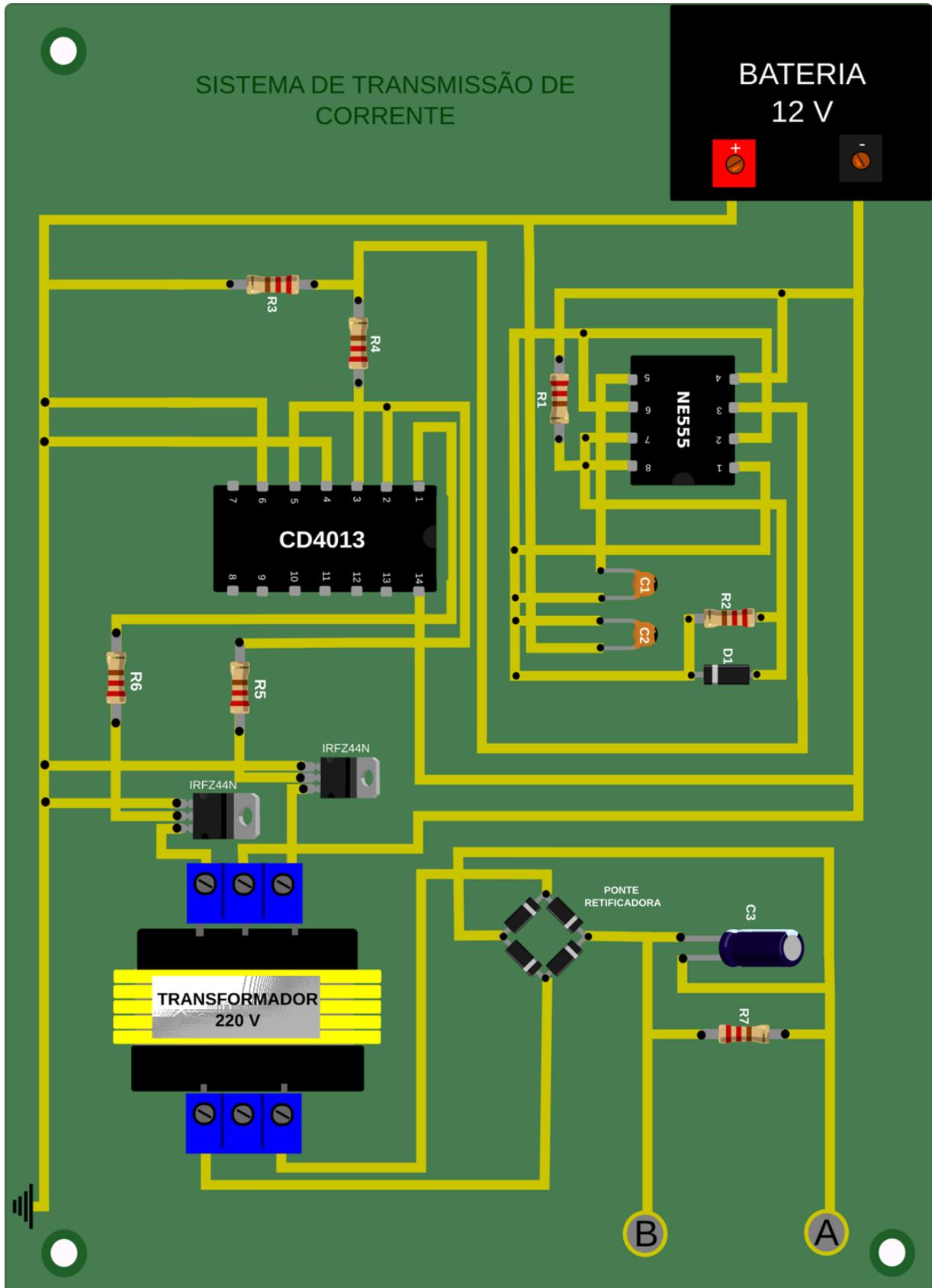
onde V_{rms} é a tensão da bobina secundária do transformador. Desta forma, substituindo os termos na Equação 36 teremos:

$$V_{pico} = 220\sqrt{2} = 311V \quad (37)$$

Um resistor de $4k7\Omega$ foi acoplado paralelamente ao capacitor para realizar o descarregamento do mesmo e servir como uma forma de proteção para o circuito.

A Figura 51 apresenta a projeção do diagrama elétrico do sistema de transmissão de corrente

Figura 51 – Projeção do diagrama elétrico do sistema de transmissão de corrente.

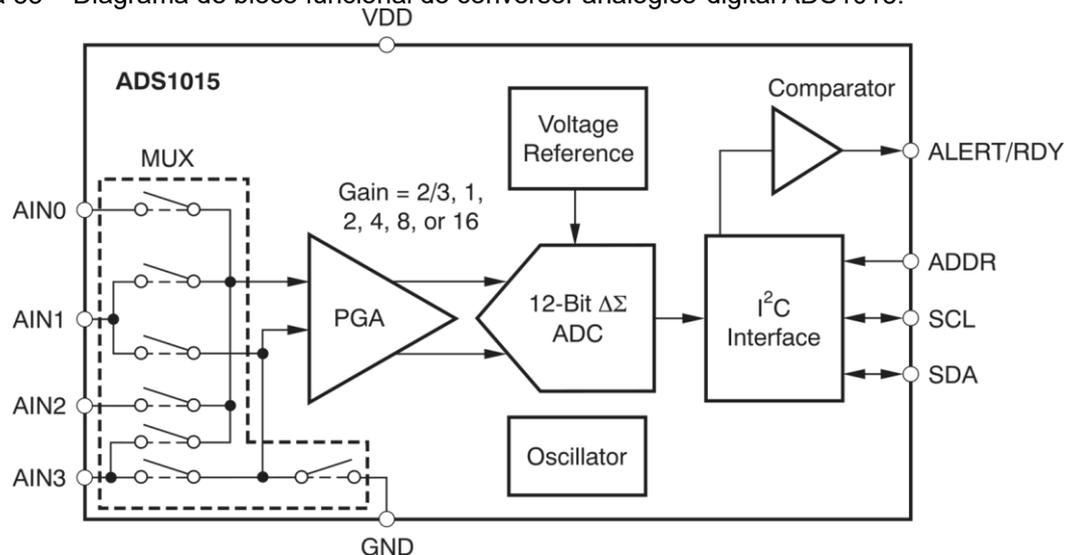


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Sistema de medição

A medição da diferença de potencial, é realizada pelos eletrodos M e N. Entretanto, alguns ajustes devem ser feitos para o registro da diferença de potencial. Um dos ajustes está ligado a uma das limitações do Raspberry Pi, o fato é que, o *hardware* não possui entradas para sinais analógicos, desta forma, a diferença de potencial medida pelos eletrodos M e N, deve ser convertido para um sinal digital. Para isso, é necessário integrar ao sistema um conversor analógico – digital (ADC), conforme proposto por Clement *et al.*, (2020) e Florsch *et al.*, (2018). O ADC utilizado neste projeto foi o modelo ADS1015 suas especificações são apresentadas na Figura 53.

Figura 53 – Diagrama de bloco funcional do conversor analógico-digital ADS1015.

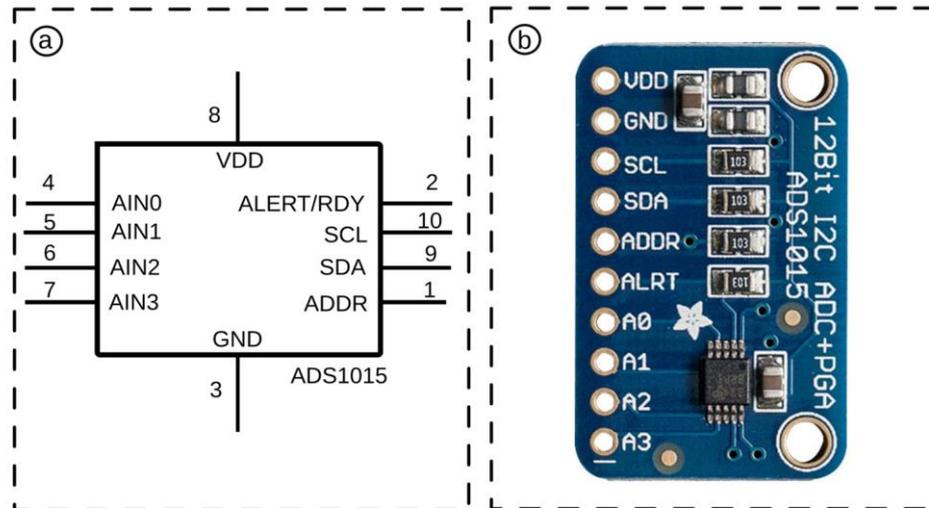


Fonte: Extraído do *datasheet* do componente⁸

A Figura 54 apresenta a representação do componente no *software* Proteus e o modelo físico do componente.

⁸Disponível em: <<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1015.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

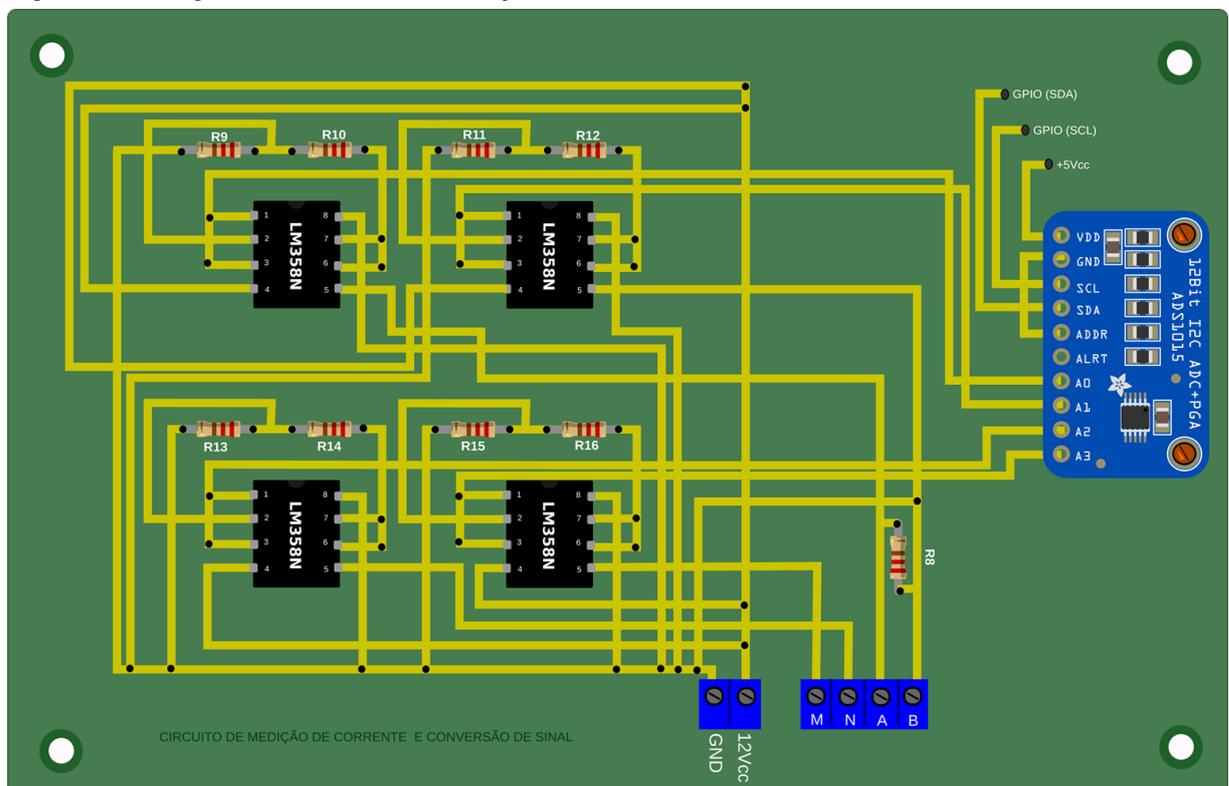
Figura 54 – (a) Representação do ADC1015 no software Proteus e, (b) modelo real do dispositivo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, a fim de registrar o valor de corrente elétrica transmitida, nos contatos A0 e A1 do ADS1015 são conectados os polos do sistema de transmissão. A Figura 55 exemplifica o diagrama geral da placa de medição desenvolvida.

Figura 55 – Diagrama do circuito de medição e conversão de sinal.

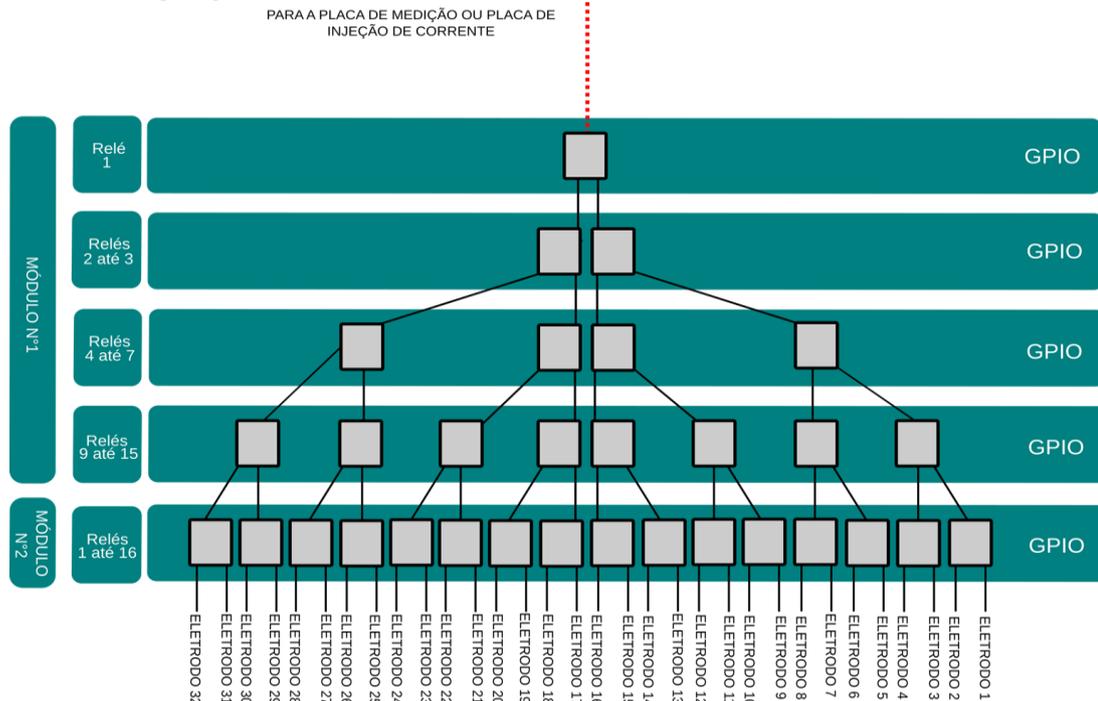


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Sistema de eletrodos

O sistema de eletrodos teve como referência o trabalho desenvolvido por Clement *et al.*, (2020), onde os autores descreveram o desenvolvimento de um sistema multieletrodo, baseando-se nas premissas dos fundamentos dos dispositivos Multiplexadores (MUX). Segundo Clement *et al.*, (2020), com o uso deste sistema é possível conectar os módulos A, B, N e M a qualquer um dos eletrodos, dedicando-os a uma função de acordo com o arranjo configurado. Desta forma todos os eletrodos podem assumir a condição de transmissor de corrente ou como eletrodo de potencial. Para isso foi necessário separar os eletrodos em subsistemas (A, B, M ou N). Em cada subsistema foi utilizado dois módulos relés de 16 canais, sendo que o módulo 1 tem como finalidade a seleção dos eletrodos e o módulo 2 é responsável pelo acesso aos eletrodos. Cada relé pode ser ativado por uma GPIO, deste modo seria necessário o uso de 128 GPIOs para o controle do sistema, o que tornaria impossível realizar o projeto utilizando o Raspberry Pi, devido ao fato de que o *hardware* possui somente um total de 40 pinos GPIOs. Para contornar este problema Clement *et al.*, (2020) sugeriram a organização do controle dos eletrodos em configuração de cascata. Essa configuração organiza os relés em cinco níveis sucessivos, cada um controlado por um único GPIO. A Figura 56 exemplifica a configuração genérica do sistema de eletrodos.

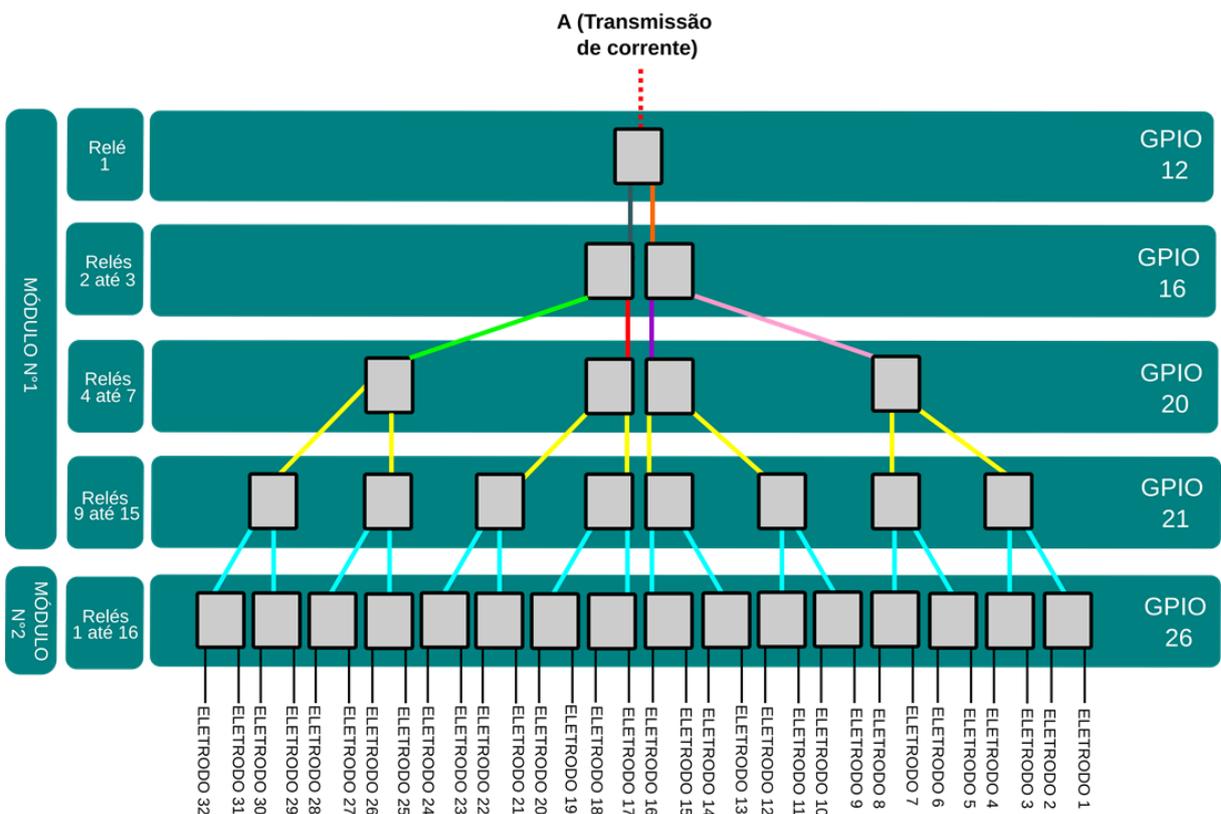
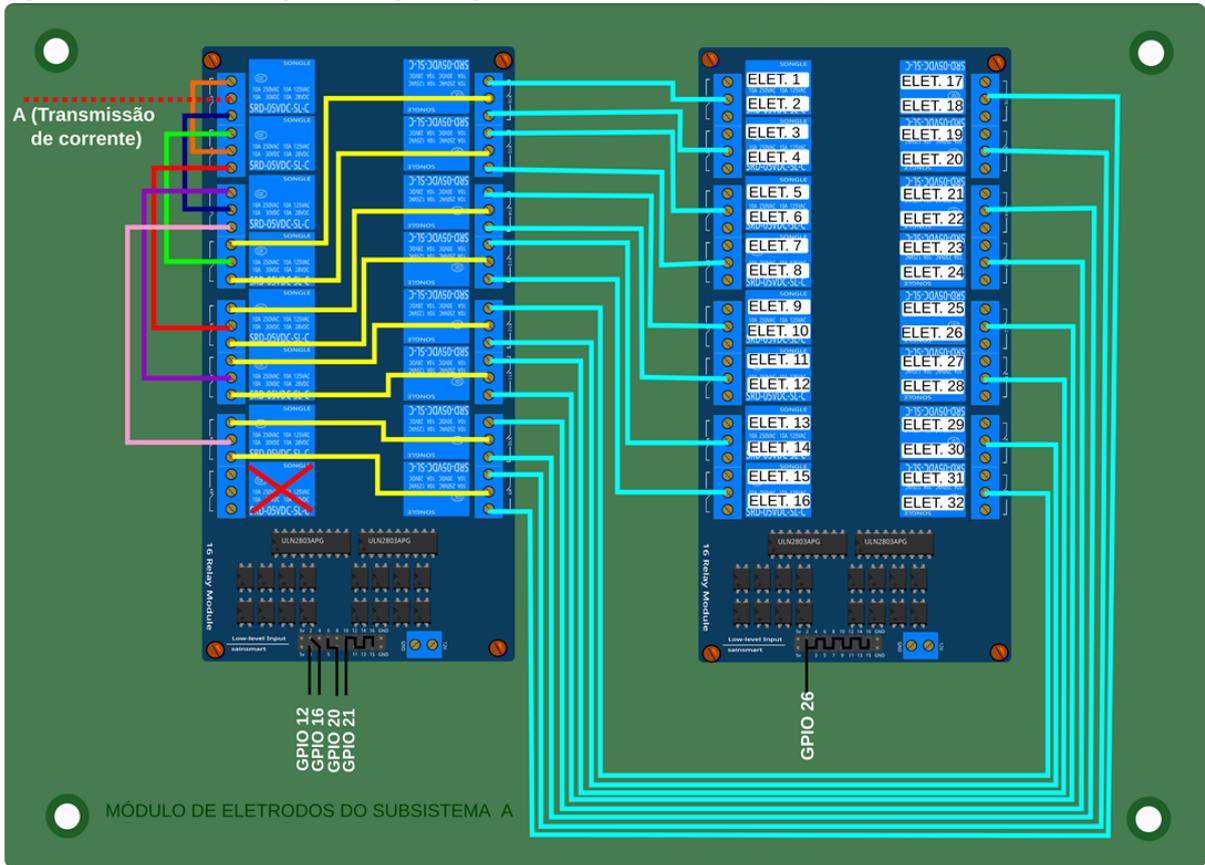
Figura 56 – Configuração do sistema de eletrodo em modelo cascata.



Fonte: Modificado de Clement, *et al.* (2020, p. 7)

O primeiro nível da cascata é composto por um único relé, enquanto o quinto nível compreende 16 relés. Para alternar cada subsistema (A, B, M e N) em qualquer um dos 32 eletrodos, a configuração sugerida requer 8 módulos de canais e apenas 20 GPIOs para gerenciá-lo. Para ativar qualquer um dos relés é endereçado a cada um deles um código binário de 5 dígitos, onde cada dígito representa um nível da cascata e o estado de controle do relé, sendo 0 para “desligado” e 1 “ligado”. A Figura 57 exemplifica a organização do sistema de eletrodos do subsistema A.

Figura 57 – Exemplificação da organização do sistema de eletrodos para o subsistema A.



Fonte: Modificado de Clement, *et al.* (2020, p. 7)

Para os subsistemas B, M e N, seguiremos com o mesmo princípio, a única diferença são as GPIOs que serão utilizadas. A Tabela 2 apresenta os pinos GPIOs a serem utilizado por cada um dos subsistemas e os endereços binários destinado a cada eletrodo.

Tabela 2 – GPIOs a serem utilizado por cada um dos subsistemas e os endereços binários destinado a cada eletrodo.

Eletrodo A	GPIO 12	GPIO 16	GPIO 20	GPIO 21	GPIO 26
Eletrodo B	GPIO 18	GPIO 23	GPIO 24	GPIO 25	GPIO 19
Eletrodo M	GPIO 6	GPIO 13	GPIO 4	GPIO 17	GPIO 27
Eletrodo N	GPIO 22	GPIO 10	GPIO 9	GPIO 11	GPIO 5
Eletrodo 1	1	1	1	0	1
Eletrodo 2	1	1	1	0	0
Eletrodo 3	1	1	1	1	1
Eletrodo 4	1	1	1	1	0
Eletrodo 5	1	1	0	0	1
Eletrodo 6	1	1	0	0	0
Eletrodo 7	1	1	0	1	1
Eletrodo 8	1	1	0	1	0
Eletrodo 9	1	0	1	0	1
Eletrodo 10	1	0	1	0	0
Eletrodo 11	1	0	1	1	1
Eletrodo 12	1	0	1	1	0
Eletrodo 13	1	0	0	0	1
Eletrodo 14	1	0	0	0	0
Eletrodo 15	1	0	0	1	1
Eletrodo 16	1	0	0	1	0

(continua)

(Conclusão)

Eletrodo A	GPIO 12	GPIO 16	GPIO 20	GPIO 21	GPIO 26
Eletrodo B	GPIO 18	GPIO 23	GPIO 24	GPIO 25	GPIO 19
Eletrodo M	GPIO 6	GPIO 13	GPIO 4	GPIO 17	GPIO 27
Eletrodo A	GPIO 12	GPIO 16	GPIO 20	GPIO 21	GPIO 26
Eletrodo 17	0	1	1	0	1
Eletrodo 18	0	1	1	0	0
Eletrodo 19	0	1	1	1	1
Eletrodo 20	0	1	1	1	0
Eletrodo 21	0	1	0	0	1
Eletrodo 22	0	1	0	0	0
Eletrodo 23	0	1	0	1	1
Eletrodo 24	0	1	0	1	0
Eletrodo 25	0	0	1	0	1
Eletrodo 26	0	0	1	0	0
Eletrodo 27	0	0	1	1	1
Eletrodo 28	0	0	1	1	0
Eletrodo 29	0	0	0	0	1
Eletrodo 30	0	0	0	0	0
Eletrodo 31	0	0	0	1	1
Eletrodo 32	0	0	0	1	0

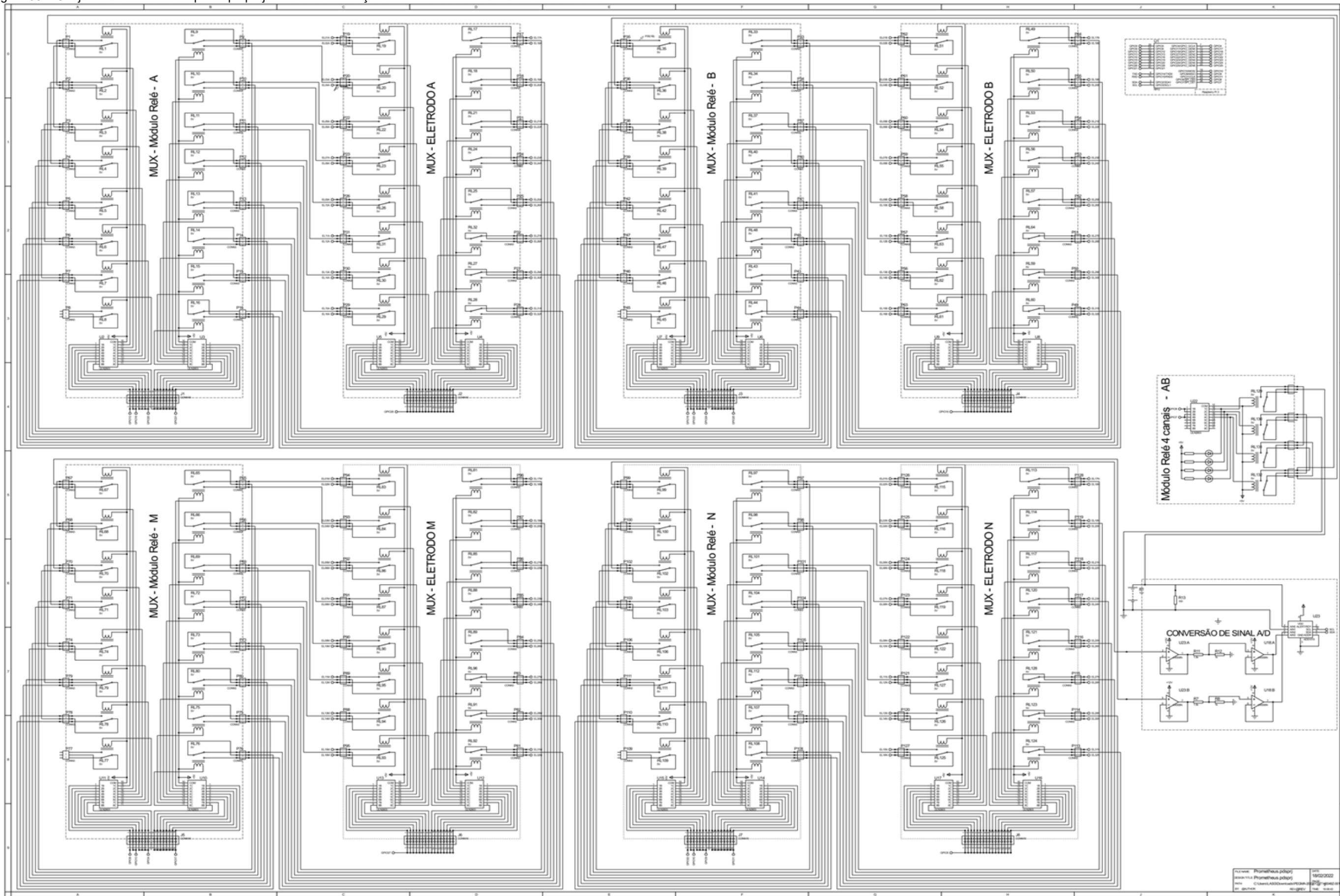
Fonte: Modificado de Clement *et al.* (2020, p. 8).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve os resultados obtidos no processo de validação do protótipo executados no *software* Proteus Design Suite ©.

A Figura 58 apresenta o circuito completo projetado para o protótipo com a exceção dos circuitos do sistema de transmissão de corrente que devido a limitação da máquina não foi possível realizar a simulação em conjunto com os outros sistemas. Dessa forma, para a validação do protótipo optou-se por utilizar uma fonte de 12 VCC, disponível na biblioteca do *software*. Os resultados das etapas do sistema de transmissão de corrente são apresentados paralelamente nas Figura 59 a 62.

Figura 58 – Conjunto de sistemas do protótipo projetado com a exceção do sistema de transmissão de corrente.

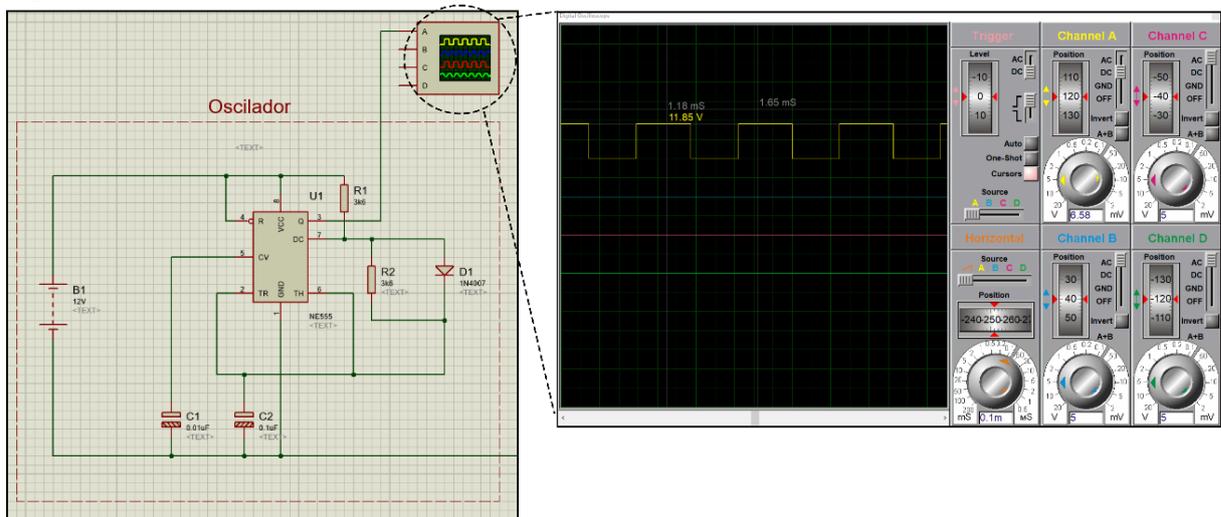


4.1 Sistema de transmissão

Para verificar o funcionamento do sistema de transmissão de corrente foi utilizado o osciloscópio disponível no software. Com a utilização desta ferramenta foi possível analisar a saída do sinal de cada um dos circuitos e validar as suas projeções.

Na análise do circuito de oscilação do sinal o contato 3 do CI NE555 foi conectado ao contato A do osciloscópio (Figura 59). O sinal resultante satisfaz o objetivo proposto para a etapa, tendo visto que a finalidade do componente é gerar pulsos de onda quadrada de aproximadamente 1.33KHz na corrente da fonte de tensão de entrada, conforme supracitado na secção 3.2.2.

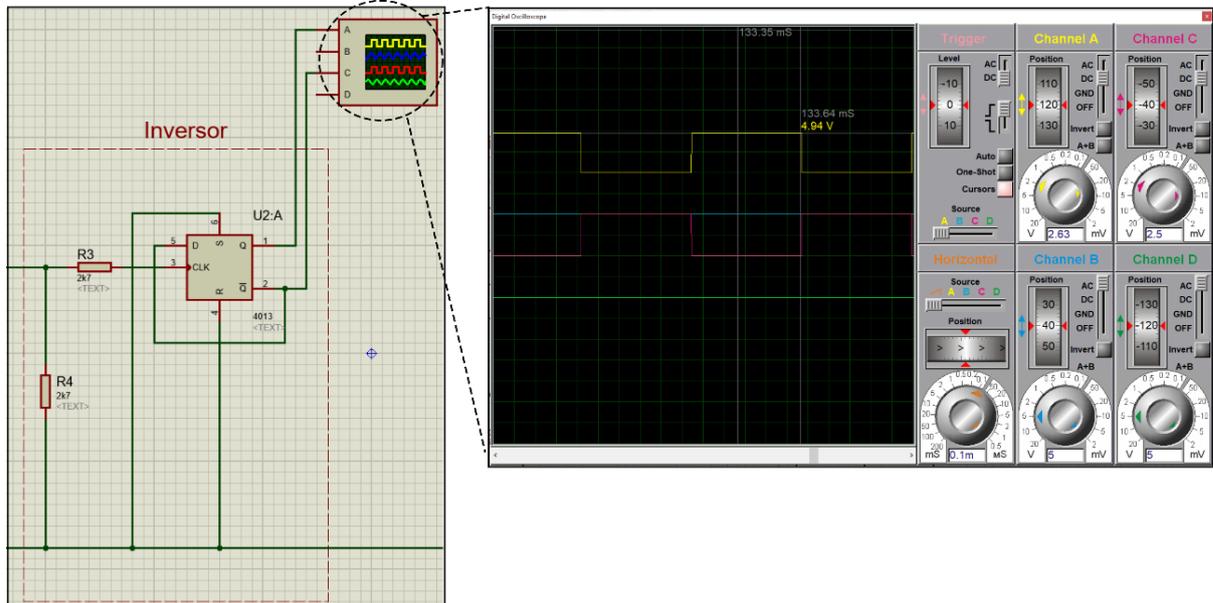
Figura 59 –Análise do circuito de oscilação do sinal realizado no Proteus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estágio de inversão do sinal tem como objetivo alternar o sinal periodicamente entre as duas saídas do CI CD4013. Na Figura 60 é mostrado que o terminal 1 e 2 do CD4013 foi conectado ao osciloscópio por suas entradas A e C, respectivamente. O gráfico apresenta que para cada uma das saídas (1 e 2) existem pulsos de onda quadrada. Esses pulsos são alternados, ou seja, enquanto em uma saída é observado um estado "alto" ao mesmo tempo na outra saída o estado será "baixo" e vice-versa. Esta etapa é fundamental para a realização de conversão da corrente contínua em alternada pelos transistores e assim possibilitar a implementação do transformador ao sistema.

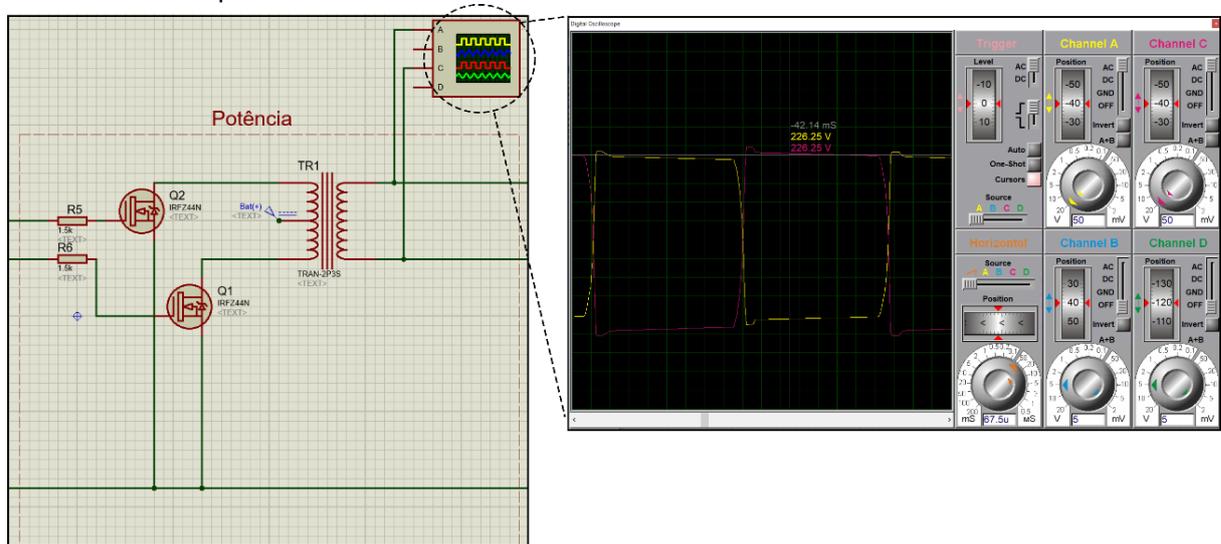
Figura 60 - Análise da etapa de inversão do sinal realizado no Proteus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para analisar a forma de onda resultante na etapa de potência, os contatos A e C do osciloscópio são conectados, respectivamente, nos contatos positivo e negativo do transformador. A Figura 61 apresenta os resultados da análise da etapa de potência, nela observa-se o correto funcionamento do circuito. É possível visualizar que a forma de onda resultante é quadra e alternada, nota-se que a tensão de 12 VCA, oriunda da etapa anterior, foi elevada para aproximadamente 226 VCA, ou seja, bem próximo do valor projetado de 220 VCA.

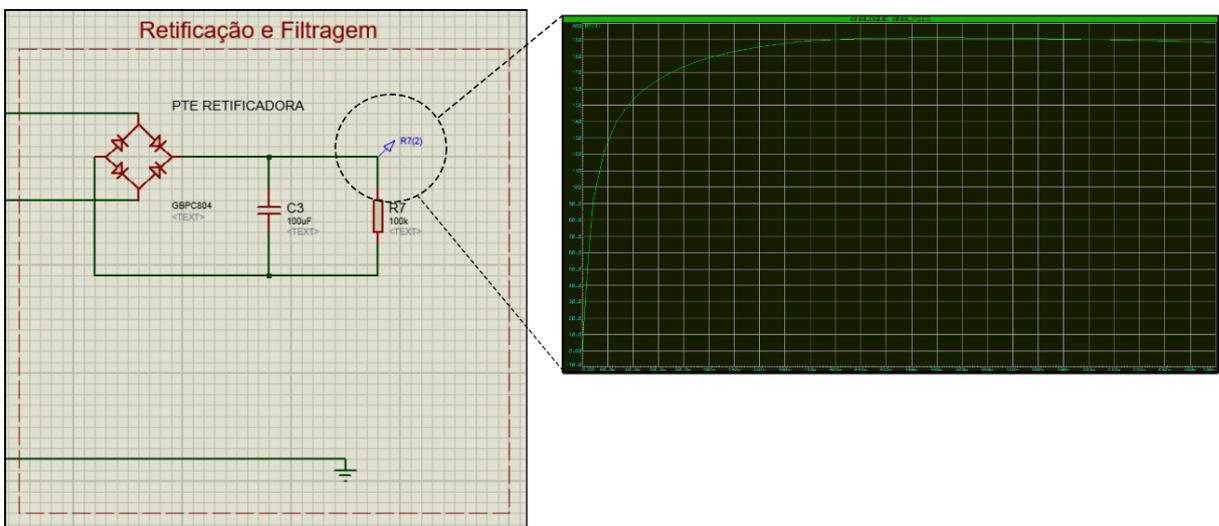
Figura 61 – Simulação da etapa de potência. Conforme o gráfico, o sinal resultante é alternado e possui a forma de onda quadra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa de retificação e filtragem a tensão de saída do circuito é retificada por meio de um capacitor. Como descrito anteriormente, a cada pulso positivo da ponte de diodos o capacitor é carregado e desta forma armazena cargas elétricas. Quando o pulso decai, o componente fornece a energia que armazenou, produzindo uma tensão linear como visto no gráfico da Figura 62.

Figura 62 - Simulação da etapa de retificação e filtragem da tensão. O gráfico mostra o momento em que quando o circuito é ligado, após um curto período, o capacitor é carregado e desta forma a tensão permanece constante.

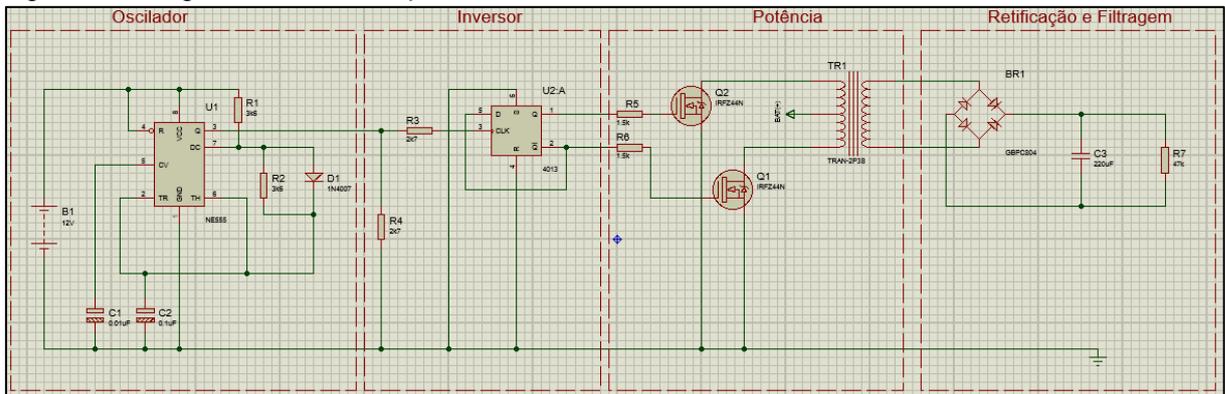


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos por meio da simulação do sistema de transmissão de corrente foram satisfatórios. As etapas projetadas demonstraram consistências nos valores obtidos o que qualifica o possível desenvolvimento prático do sistema.

O diagrama elétrico completo do circuito de transmissão de corrente é apresentado na Figura 63.

Figura 63 - Diagrama elétrico completo do circuito de transmissão de corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

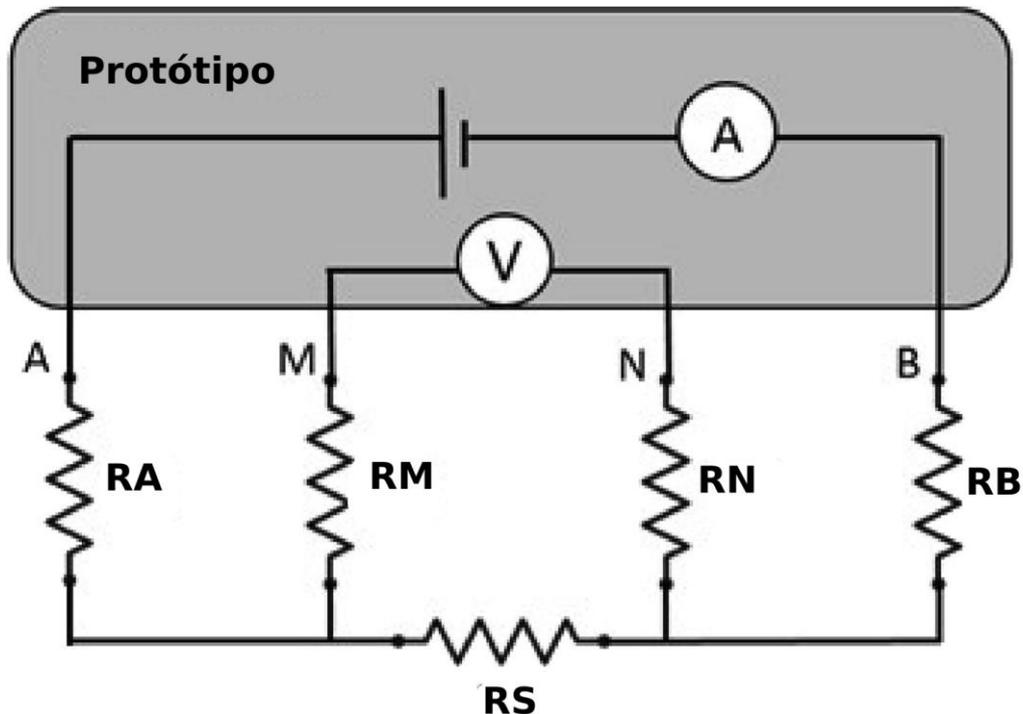
4.1 Validação do protótipo projetado

Holman *et al.* (1986), descrevem que os processos de calibração de um equipamento podem seguir três possíveis meios de validação:

- 1) Padrão primário: É necessário ter um valor de alguma resistência ou material de resistividade conhecida, com a qual podemos saber que a valor medido com o protótipo adere ao valor de referência;
- 2) Padrão secundário: É necessário comparar o valor de resistividade obtido por meio do protótipo projetado, e aquele obtido com um equipamento comercial calibrado para conhecer o erro dos dados;
- 3) Fonte de dados conhecidas: Realização da validação em áreas onde as propriedades físicas são conhecidas ou controladas. Ou seja, uma área onde o tipo de material geológico das camadas, as espessuras, a profundidade etc., já foram previamente determinadas. Com isso, os dados obtidos são comparados com a realidade física do terreno de estudo.

Por se tratar de uma simulação numérica, o procedimento escolhido para a validação da calibragem do protótipo foi a de Padrão primário. Para o uso deste procedimento foi implementado um circuito de resistores representando as resistências de contato dos eletrodos e do solo, conforme Figura 64.

Figura 64 – Diagrama do procedimento de validação do protótipo. Sendo R_A = Resistência de contato do eletrodo A, R_B = Resistência de contato do eletrodo B, R_M = Resistência de contato do eletrodo M, R_N = Resistência de contato do eletrodo N e R_S representa a resistência do solo.

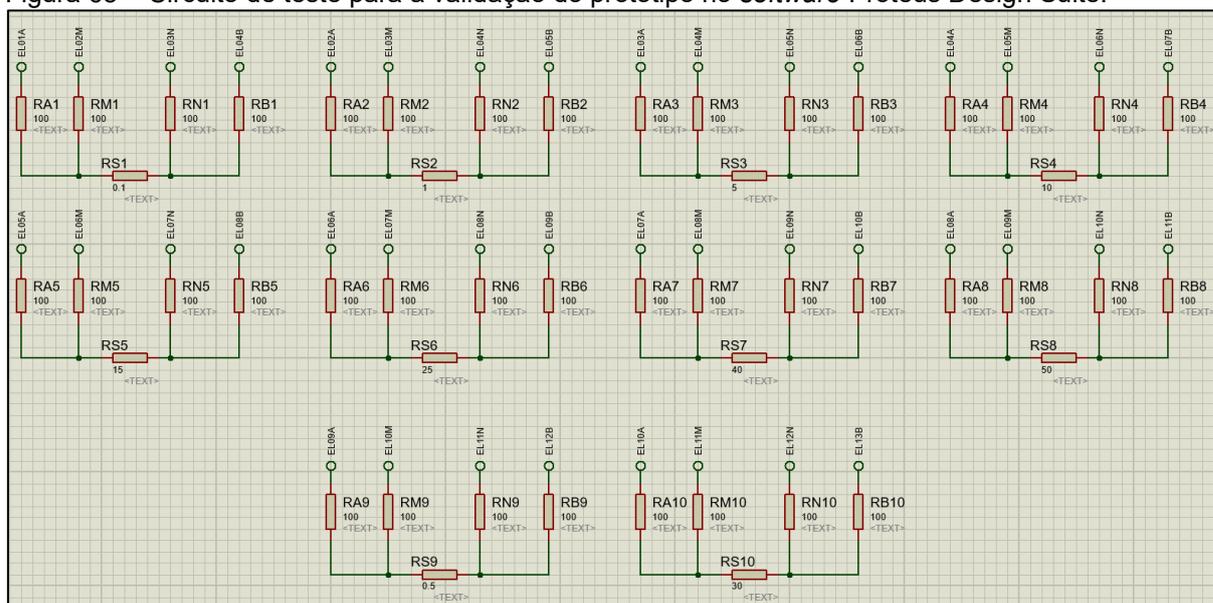


Fonte: Modificado de Clement *et al.* (2020, p. 10).

Através do cálculo da razão entre a diferença de potencial medida nos eletrodos potenciais (M e N) e a corrente transmitida pelos eletrodos de transmissão (A e B) é possível obter o valor referente a resistência do solo. Desse modo, o valor da resistência registrada pelo protótipo deve ser igual ou bem próximo ao valor da resistência de referência (R_S), com isso teremos a comprovação de que o protótipo projetado está satisfatoriamente calibrado e conseqüentemente validado.

O arranjo utilizado no processo de validação foi o Schlumberger, no total foram feitos os registros de pseudo resistência do solo de 10 quadripolos. A Figura 65 apresenta o diagrama elétrico representativo dos arranjos de eletrodos utilizados para a validação do protótipo no *software* Proteus Design Suite®.

Figura 65 – Circuito de teste para a validação do protótipo no *software* Proteus Design Suite.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No processo de validação, quando os valores dos resistores que simulam a resistência de contato ultrapassavam 100 Ω , ocorria uma diferença considerável entre o valor da pseudo resistência do solo calculado pelo protótipo e o valor de referência RS. Esse desvio pode ser justificado devido a impedância de entrada dos canais de medição da diferença de potencial, representados na validação como RM e RN, não serem suficientemente alta e desta forma os valores de resistência de contato, RA e RB, afetam a medida da diferença de potencial. Devido algumas limitações do *software* essa correção não pôde ser realizada. Com isso, a análise de validação do protótipo será limitada em até 50 ohms para RS e 100 ohms para RA, RB, RM e RN. Os eletrodos selecionados para o processo e os seus valores de referências (RS) são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação de quadripolos e seus respectivos eletrodos utilizados no processo de validação.

#Quad.	Eletrodo A	Eletrodo B	Eletrodo M	Eletrodo N	Resistor RS
1	1	4	2	3	0.1
2	2	5	3	4	1
3	3	6	4	5	5
4	4	7	5	6	10
5	5	8	6	7	15
6	6	9	7	8	25
7	7	10	8	9	40
8	8	11	9	10	50
9	9	12	10	11	0.5
10	10	13	11	12	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha dos valores de referência teve como princípio separar os números em três possíveis escalas de resistência: 0,1 até 0.9 Ω ; 1 até 9 Ω e 10 até 50 Ω . Dessa forma, a validação do protótipo pôde abranger uma variação considerável de valores de resistência.

Os valores de pseudo resistência do solo calculados pelo protótipo e os parâmetros necessários para sua determinação são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Apresentação dos valores da pseudo resistência do solo registrados pelo protótipo e os valores da diferença de potencial (V_{mn}) e corrente (I) utilizadas para o seu cálculo.

#Quad.	Eletrodo A	Eletrodo B	Eletrodo M	Eletrodo N	ΔV_{MN} (mV)	I_{AB} (mA)	R (Ω)
1	1	4	2	3	4.04	40.94	0.098681
2	2	5	3	4	48.48	40.94	1.184172
3	3	6	4	5	234.32	40.94	5.723498
4	4	7	5	6	456.52	40.94	11.15095
5	5	8	6	7	670.64	40.94	16.38105
6	6	9	7	8	1070.6	40.94	26.15046
7	7	10	8	9	1603.88	40.94	39.17636
8	8	11	9	10	1927.08	40.94	47.07084
9	9	12	10	11	24.24	40.94	0.592086
10	10	13	11	12	1256.44	40.94	30.68979

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que valor da corrente elétrica se manteve constante durante todo processo de validação. Em um levantamento *in situ* de dados de resistividade aparente, o valor da corrente elétrica transmitida sofre variações, fato que não ocorre se tratando da simulação numérica devido as limitações do *software*. Todavia, esse fator não compromete a validação do projeto do protótipo.

A comparação entre os valores registrados pelo protótipo e o seu desvio do valor de referência RS são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação entre os valores da pseudo resistência do solo registrado pelo protótipo e a referência RS.

# Quad.	Resistor RS Ω	Valor medido Ω	Diferença	%
1	0.1	0.098680997	-0.00132	-1%
2	1	1.184171959	0.184172	18%
3	5	5.723497802	0.723498	14%
4	10	11.15095261	1.150953	12%
5	15	16.38104543	1.381045	9%
6	25	26.15046409	1.150464	5%
7	40	39.17635564	-0.82364	-2%
8	50	47.07083537	-2.92916	-6%
9	0.5	0.592085979	0.092086	18%
10	30	30.68978994	0.68979	2%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A maior diferença percentual positiva obtida no processo de validação foram nos quadripolos 2 e 9, onde a diferença entre as pseudos resistências registradas pelo protótipo foi de 18% para ambos os quadripolos. Já o registro de pseudo resistência medida pelo protótipo que teve maior diferença negativa foi o quadripolo de número 8 que apresentou uma disparidade de -6% do valor de referência de 50 Ω .

Percebe-se que, embora o valor de referência não tenha sido exatamente alcançado, no geral, a disparidade entre os valores é baixa. Indicando que o projeto do protótipo está satisfatoriamente calibrado, quando se tratando de valores referenciais abaixo de 50 ohms.

4.2 Lista de componentes

A Tabela 6 apresenta os valores projetados dos componentes que foram utilizados para a projeção do protótipo. O valor dos componentes pode variar de acordo com o fornecedor dos materiais.

Tabela 6 – Lista de materiais utilizados para a projeção do protótipo.

Componente	Modelo	Preço/unid.	Total	Fornecedor
Raspberry Pi (1x)	3B	R\$ 900.00	R\$ 900.00	Amazon
Resistores (11x)	1k5 (4x)	R\$ 0.06	R\$ 0.24	Baú da eletrônica
	1k (2x)	R\$ 0.06	R\$ 0.12	Baú da eletrônica
	3k6 (2x)	R\$ 0.06	R\$ 0.12	Baú da eletrônica
	2k7 (2x)	R\$ 0.06	R\$ 0.12	Baú da eletrônica
	4k7	R\$ 0.06	R\$ 0.06	Baú da eletrônica
Capacitores (3x)	0.1uF	R\$ 2.00	R\$ 2.00	Robocore
	0.01uF	R\$ 0.17	R\$ 0.34	Fornell
	220uF	R\$ 5.00	R\$ 5.00	Eletrônica Castro
Bateria (2x)	12V - 7Ah	R\$ 119.00	R\$ 238.00	Amazon
CI oscilador	NE555	R\$ 1.50	R\$ 1.50	Robocore
Conversor Analógico/Digital	ADS1115	R\$ 69.90	R\$ 69.90	FilipeFlop
Diodo (5x)	1N4007	R\$ 0.23	R\$ 1.15	Baú da eletrônica
Transformador	12V/220V	R\$ 57.19	R\$ 57.19	Baú da eletrônica
Transistor (2x)	IRFZ44N	R\$ 3.48	R\$ 6.96	Baú da eletrônica

(Continua)

(conclusão)

Componente	Modelo	Preço/unid.	Total	Fornecedor
Amplificador operacional (4x)	LM358	R\$ 1.42	R\$ 5.68	Baú da eletrônica
Módulo relé 4 canais	5V	R\$ 33.90	R\$ 33.90	FilipeFlop
Módulo relé 16 canais (8x)	5V	R\$ 106.95	R\$ 855.60	Baú da eletrônica
Total			R\$ 2.175,88	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A projeção atingiu um valor de aproximadamente R\$2.200,00, sendo o computador de placa única Raspberry Pi o componente de valor mais elevado para a aquisição (R\$ 900,00). Na projeção da lista de materiais, foi desconsiderando o custo de outros componentes importantes para a prototipação real do equipamento, como por exemplo, placas PCB's, conectores, terminais de cabos, fios e outros acessórios. Desta forma, agrega-se ao valor total um montante de R\$3.000,00. Com isso, chega-se ao valor final de R\$5.200,00 para a concepção do protótipo projetado. Nota-se que o valor final obtido ainda sim é bem inferior aos valores dos equipamentos comerciais, que em média custam dezenas de milhares de dólares.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho objetivou o desenvolvimento e simulação de um protótipo de eletrorresistivímetro multieletródo de baixo custo. O protótipo projetado foi validado por meio do processo de Padrão primário. Nesse processo foi utilizado valores de resistência como referência, para comparar com cada registro de pseudo resistência do solo calculado pelo protótipo. O resultado da validação demonstrou que, embora o projeto do protótipo apresente limitações por causa do *software* de modelagem de circuitos, ele está satisfatoriamente calibrado para medidas de resistência do solo de até 50Ω. A estimativa do valor total para a construção do protótipo físico foi de

aproximadamente R\$ 5.200,00, valor este bem abaixo dos valores dos eletrorresistímetro comerciais que normalmente custam na faixa de dezenas a milhares de dolares.

Como recomendações a serem desenvolvidos a partir dos resultados obtidos com este trabalho, temos:

- a) desenvolver o protótipo físico projetado e realizar o procedimento de validação Padrão Secundário;
- b) avaliar a utilização de um sistema de transmissão de corrente mais eficiente como é o caso dos inversores automotivos;
- c) desenvolver uma interface de transmissão de dados sem fios, tendo em vista de que Raspberry dispõe de conexão de rede Wifi;
- d) avaliar a possibilidade de utilização de um *I/O expander* para aumentar o número de GPIOs no sistema;
- e) corrigir o problema causado devido à baixa impedância na entrada dos eletrodos de medição de potencial, com a inclusão de resistores de alta resistências na entrada dos contatos A3 e A4 do ADS1015.
- f) buscar uma alternativa para os módulos relés do sistema de multiplexadores, visto que os relés utilizados no sistema não suportam tensões acima de 30VCC. Em caso da utilização de fontes de entrada acima do valor supracitado, algumas modificações deverão ser feitas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, C.; SADIKU, M. **Fundamentos de circuito elétricos**. Tradução: José Lucimar do Nascimento, 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013. Título original: fundamentals of electric circuits.

AROISO, D. *et al.* **A customized resistivity system for monitoring saturation and seepage in earthen levees: installation and validation**, Open Geosciences, v. 9, p. 457 – 467, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/geo-2017-0035>.

BADMUS, B. S.; KILASHO, A. O. **Fabrication of Electrical Resistivity Equipment and Some Model Studies within Complex Basement Terrain of Southwestern Nigeria**, Research Journal of Physics, v. 7, p. 17 – 23, 2013. Disponível em: DOI:10.3923/rjp.2013.17.23.

BRAGA, A. **Métodos Geométricos Aplicados nos Estudos de Captação e Contaminação das águas subterrâneas**. São Paulo: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 2007.

CLEMENT, R. *et al.* **OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale**, HardwareX, Elsevier, v. 8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00122>

DENTITH, M. MUDGE, S. **Geophysics for the mineral exploration geocientist**. New York: Cambridge University Press, 2014.

DIAGO, R.; MOREIRA, V. **Eletrônica: eletrônica digital**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011.

FATAHILLAH, D.; DARSONO; NURYANI, N. **Low-cost multi-electrode resistivity meter based on microcontroller for electric resistivity tomography purpose**, Journal of Physics Conference Series. v. 1153, n. 1. 2019, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012022>.

FAUCHARD, C. *et al.* **Assessment of an ancient bridge combining geophysical and advanced photogrammetric methods: Application to the Pont De Coq, France**, Journal of Applied Geophysics, Elsevier, v. 98, p. 100–112, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.08.009>.

FIGUEROLA, **Tratado de Geofísica Aplicada**. 2. ed. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Minas, 1973.

FLORSCH, N.; MUHLACH, F.. **Everyday Applied Geophysics 1: An Acquisition System Designed for the Electrical Prospection of Soil**, Elsevier, v.1 2018, p.157 – 180. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-199-4.50006-4>.

FUENTES, R.; NASCIMENTO, R. **Eletrônica**. 4. ed. Santa Maria: Universidade

Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso Técnico em Automação Industrial, 2013.

GALLAS, J. **O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais**. Revista Brasileira de Geofísica [online]. 2005, v. 23, n. 2, pp. 133-144. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2005000200003>.

GANDOLFO, O.; GALLAS, J. **O arranjo pólo-dipolo como alternativa ao dipolo-dipolo em levantamentos 2D de eletrorresistividade**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n. 3, p. 227 – 235, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000300001>.

GIBILISCO, S. **Teach Yourself Electricity and Electronics**. 3. ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2001.

GLOVER, P. **Petrophysics**. 1. ed. Escócia: Department of Geology and Petroleum Geology, University of Aberdeen UK, 2000.

GOEBEL, M.; PIDLISECKY, A.; KNIGHT, Rosemary. **Resistivity imaging reveals complex pattern of saltwater intrusion along Monterey coast**, Journal of Hydrology, v. 551, p. 746 – 755, 2017.

GOFFIN, B. **Karst Detection Using Low-Cost Electrical Resistivity Meter**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - School of Engineering and Applied Science, University of Virginia, 2018.

GRELLIER, *et al.* **Monitoring of Leachate Recirculation in a Bbioreactor Landfill by 2-D Electrical Resistivity Imaging**, 2004. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v. 13, 2008.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. 9. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, v. 3, 2015.

HOLMAN, J., & Gajda, W. **Métodos Experimentales para Ingenieros**. México: 4.ed, 1986.

HORO, D. *et al.* **Combined self-potential, electrical resistivity tomography and induced polarisation for mapping of gold prospective zones over a part of Babaikundi-Birgaon Axis, North Singhbhum Mobile Belt, India**, Exploration Geophysics, v. 51, p. 507 – 522, 2020.

HUGHES, J. **Practical Electronics: Components and Techniques: Components and Techniques**. 1. ed. EUA: O'Reilly Media, Inc., v. 1, 2015.

JUNIOR, F.; FERRARO, N.; SOARES, P. **Física: Os fundamentos da física**. 10. ed. São Paulo: Moderna, v. 3, 2009.,

JUNIOR, R.; JULIÃO, J. **Circuitos Digitais**. 1. ed. Manaus: Centro de Educação Tecnológica do Amazonas, 2012.

KEAREY, P.; BROOKS, M. HILL, I. **Geofísica de Exploração**. Tradução: Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Título original: An Introduction to geophysical exploration.

KIRSCH, R. **Ground Geophysics: A Tool for Hydrogeology**. 1. ed. Germany: Springer, 2006.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2. ed. EUA: Cambridge University Press, 2007.

MARCONI, A.; COVIELLO, V.; GALLETTI, M.; SEIFERT, R. **Short Communication: Monitoring rockfalls with the Raspberry Shake**, Earth Surf. Dynam, v. 6, p. 1219 - 1227, 2018.

MARKUS, O. **Circuitos elétricos: corrente contínua e corrente alternada – Teoria e Exercícios**. 21. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.

MARTIN, J. **Radio e eletrônica: Conserte aparelhos eletrônicos**. 1. ed. São Paulo: Editora Fittipaldi LTDA., 1985.

NEWELL, H. **Impact of Technology on Geophysics**. EOS, v. 60 p. 769, 1979.

NUSSENZEIG, M. **Curso de física básica 3: eletromagnetismo** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

ORELLANA, **Prospeccion geoelectrica: en corriente continua**. 2. ed. Espanha: Paraninfo, 1972.

PALACKY, G. **Resistivity characteristics of geologic targets**. Electromagnetic methods in applied geophysics, v. 1, p.53-130, 1988.

PARASNIS, D. S. **Principles of Applied Geophysics**. 3. ed. EUA: John Wiley & Sons, 1979.

PLATT, C.. **Encyclopedia of Eletronic Components**. EUA: O'Reilly. 2012, v.1.

REYNOLDS, J. **An introduction to applied and environmental geophysics**. 2. ed. USA: John Wiley & Sons, Ltd., 2011.

SANTOS, K. **Desenvolvimento de resistivímetro de baixo custo para monitoramento ambiental**. Dissertação (Mestrado em Hidrogeologia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SANTOS, K. V **Fundamentos de eletricidade**. 1. ed. Manaus: Centro de Educação Tecnológica do Amazonas, 2011.

SATO, M. & MOONEY, H. **The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials**, Geophysical, v. 25, p. 226 – 249, 1960.

SCHÖN, **Physical Properties of Rocks, Fundamental and Principles of Petrophysics**, Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration, v. 18, Ed. Elsevier, 583pp.

SHAMIEH, C.; MCCOMB, G. **Eletrônica para leigos**. Tradução: Fernando Effiori e Roberto Assis Rezende. 2. ed. Rio de Janeiro: Alta Books, 2012. Título original: Electronics for Dummies.

SILVA, M. **Eletricidade**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Rede e-Tec Brasil, 2015.

TELFORD, W.; GELDART, L.; SHERIFF, R. **Applied geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University press, 1990.

TOCCI, R.; WIDMER, N.; MOSS, G. **Sistemas digitais: princípios e aplicações**. Tradução: Jorge Ritter. 11. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

TORRES, G. **Eletrônica: Para Autodidatas, Estudantes e Técnicos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Clube do Hardware, 2018.

WESTCOTT, S; WESRCOOT, J. **Basic Electronics: Theory and Practice**. 2. ed. Dulles, Virginia: Mercury Learnig and Information, 2018.

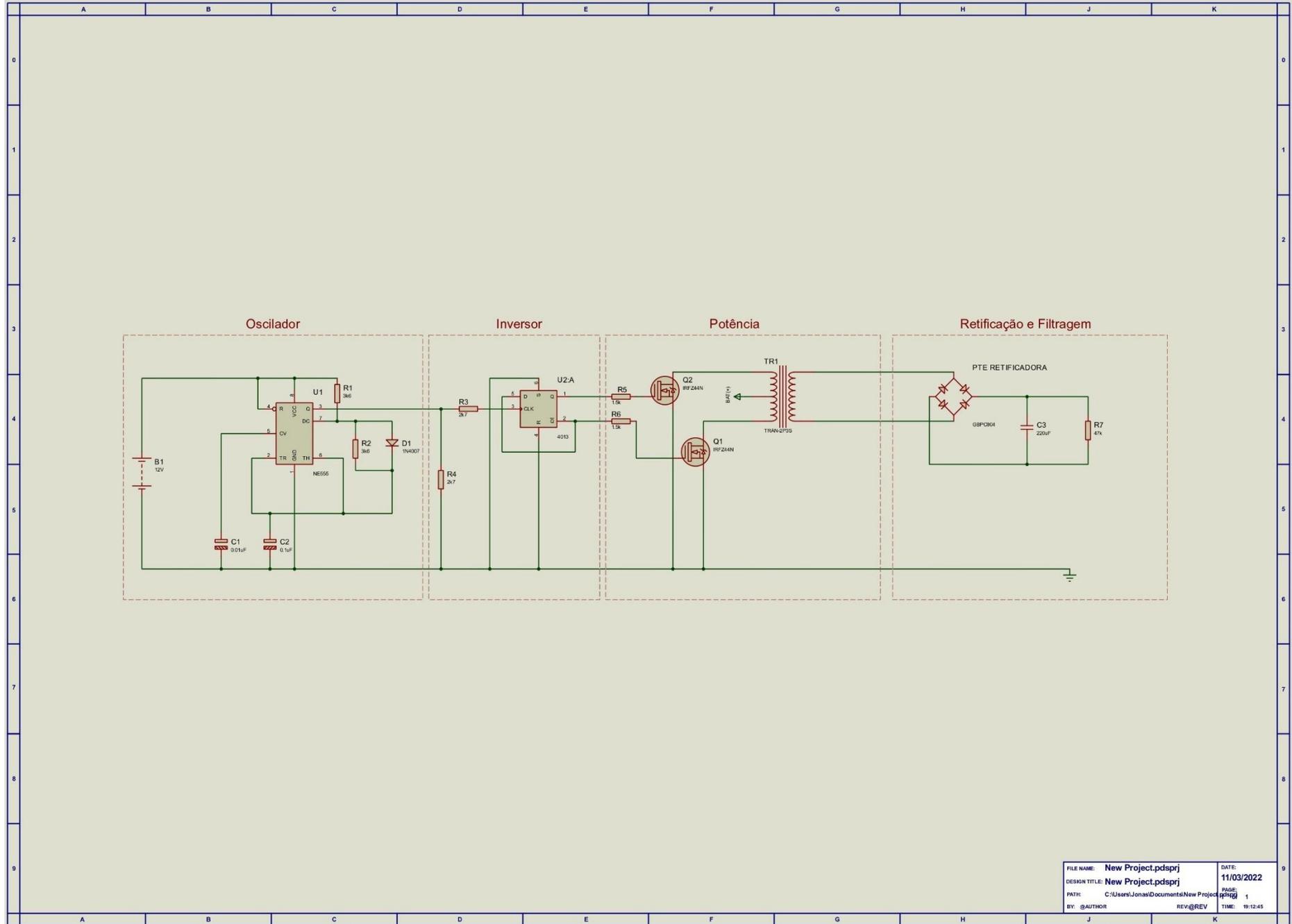
YANG, **Fundamentals of Petrophysics**, China University of Petroleum, Department of Petroleum Engineering, 2017.

YOHANDRI; MAIRIZWAN; AKMAM **Development of a Digital Resistivity Meter Based on Microcontroller**, Proceedings of TENCON, Korea, p. 28 – 31, 2018.

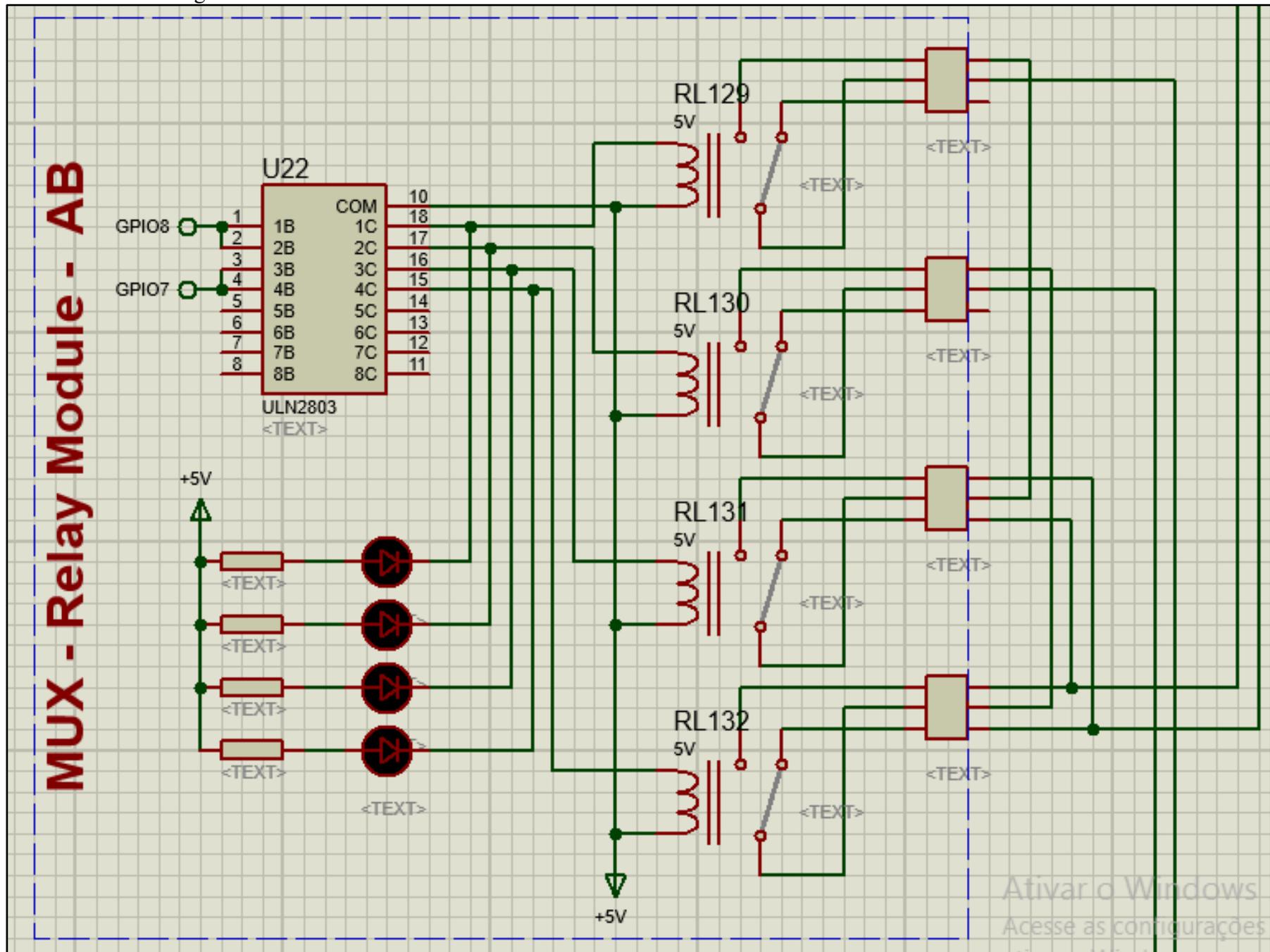
7 APÊNDICES

Esta seção apresenta os diagramas elétricos desenvolvidos na projeção do protótipo.

APÊNDICE A - Diagrama elétrico do sistema de transmissão de corrente.



APÊNDICE B - Diagrama elétrico do módulo relé de 4 canais.



APÊNDICE D - Diagrama elétrico completo do protótipo com a exceção do sistema de transmissão de corrente.

