



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE CARAÚBAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

DULCIEL MARCOS ABEL DA SILVA

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM
METAIS**

CARAÚBAS – RN

2023

DULCIEL MARCOS ABEL DA SILVA

**METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM
METAIS**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Walber Medeiros Lima - UFERSA

Coorientador: Prof. Dr. Jackson de Brito Simões - UFERSA

CARAÚBAS – RN

2023

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S586m Silva, Dulciel Marcos Abel da.
Metodologia para Determinação da Condutividade
Elétrica em Metais / Dulciel Marcos Abel da
Silva. - 2023.
65 f. : il.

Orientador: Walber Medeiros Lima.
Coorientador: Jackson de Brito Simões.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2023.

1. Metais. 2. Método experimental 4 fios. 3.
Condutividade elétrica. 4. Resistência elétrica.
5. Temperatura. I. Lima, Walber Medeiros, orient.
II. Simões, Jackson de Brito, co-orient. III.
Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

DULCIEL MARCOS ABEL DA SILVA

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM METAIS

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: 06 / 10 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

WALBER MEDEIROS
LIMA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por
WALBER MEDEIROS
LIMA [REDACTED]
Dados: 2023.10.10 16:54:27 -03'00'

Walber Medeiros Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

[REDACTED]

Assinado de forma digital
por JACKSON DE BRITO
SIMÕES [REDACTED]
Dados: 2023.10.10 22:40:36
-03'00'

Jackson de Brito Simões, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 ADRIANO COSTA DE OLIVEIRA
Data: 11/10/2023 16:00:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Adriano Costa de Oliveira, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 GLAUCO RUBEN DE FREITAS BRITO
Data: 11/10/2023 11:15:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Glauco Ruben de Freitas Brito, Prof. Ms. (Pesquisador Lammea-UFCG)
Membro Examinador

Dedico aos meus pais, Dulcinea Abel e Manoel Silva, e ao meu avô Cicero Abel, pelo amor, apoio e valores que me foram ensinados ao longo dos anos.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por suas graças derramadas sobre minha família e por dar força e coragem durante toda a minha caminhada.

Agradeço aos meus pais, Dulcinea Maria Abel e Manoel Marcos da Silva, a minha irmã Dávila Emanuely Abel da Silva, a minha namorada Francisca Gizele Bezerra e a meus amigos Lino Alessandro Morais Alves e Erick Aragão Gadelha de Oliveira, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida. Agradeço ao meu avô Cicero Abel, cujo os ensinamentos e o amor contribuíram enormemente para me tornar a pessoa que sou.

Agradeço a meus professores e orientadores Walber Medeiros Lima, Jackson de Brito Simões e ao técnico do laboratório Charles Augusto Santos de Carmo, pela orientação, aconselhamento e disposição para a conclusão deste trabalho. Também gostaria de agradecer a Associação Brasileira de Alumínio e a empresa AMG Brasil pela oportunidade de trabalhar em parceria no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que tive ao longo da minha vida acadêmica que repassaram conhecimentos e compartilharam ensinamentos, contribuindo para a formação da pessoa que sou atualmente.

Agradeço também a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização da presente pesquisa.

*“Lembre-se: o seu foco determina
sua realidade.”*

(Star Wars: Episódio I)

RESUMO

Os elementos metálicos possuem um papel crucial em diversas áreas da ciência e tecnologia. No ramo da engenharia elétrica os metais são amplamente utilizados como materiais condutores, pois possuem um alto valor de condutividade elétrica. Portanto, a condutividade elétrica dos metais é de extrema importância para o desenvolvimento de projetos e aplicações. Este trabalho propõe um método de ensaio experimental, utilizando a técnica de medição a 4 (quatro) fios para a obtenção do valor da condutividade elétrica de fios de metais, tais como, cobre e alumínio. Os valores de condutividade elétrica experimentalmente obtidos, quando comparados com os valores presente na literatura possuíram um erro inferior a 10%. Assim, considerando todos os erros que inferem um estudo experimental, o erro é considerado aceitável. Além disso, observou-se um decréscimo da condutividade com aumento da temperatura, isso é um dado importante pois em diversas aplicações os materiais elétricos são submetidos as mais diversas condições. A metodologia se mostrou eficaz para o uso na caracterização dessa propriedade.

Palavras-chave: Metais; Método experimental 4 fios; Condutividade elétrica; Resistência elétrica; Temperatura.

ABSTRACT

Metallic elements play a crucial role in several areas of science and technology. In the field of electrical engineering, metals are widely used as conductive materials, as they have a high electrical conductivity value. Therefore, the electrical conductivity of metals is extremely important for the development of projects and applications. This work proposes an experimental test method, using the 4 (four) wire measurement technique to obtain the electrical conductivity value of metal wires, such as copper and aluminum. The experimentally obtained electrical conductivity values, when compared with the values present in the literature, had an error of less than 10%. Thus, considering all the errors that an experimental study infers, the error is considered acceptable. Furthermore, a decrease in conductivity was observed with an increase in temperature, this is important data because in various applications electrical materials are subjected to the most diverse conditions. The methodology proved to be effective for use in characterizing this property.

Keywords: Metals; Experimental method 4 wires; Electric conductivity; Electrical resistance; Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Corrente elétrica em um condutor cilíndrico.	18
Figura 2: Níveis energéticos de um átomo.	21
Figura 3: Curva de resistência pela temperatura.	23
Figura 4: Linearidade entre os pontos A e B.	23
Figura 5: Esquema para medições de resistência de 2 fios.	25
Figura 6: Esquema para medições a 4 fios.	26
Figura 7: Bauxita vermelha.	27
Figura 8: Fonte de alimentação CC.	31
Figura 9: Multímetros.	31
Figura 10: Banho ultratermostático para controle de temperatura.	32
Figura 11: Fio de cobre para ensaio de condutividade.	33
Figura 12: Fio de alumínio para ensaio de condutividade.	33
Figura 13: Configuração para limitação de corrente e tensão.	34
Figura 14: Esquema de conexão dos equipamentos ao fio metálico.	36
Figura 15: Sistema para ensaio de condutividade elétrica.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais minerais para a extração de cobre.	29
Tabela 2: Condutividade elétrica do Al e do cobre a 20°C.	29
Tabela 3: Média dos valores de condutividades e condutividade IACS.	30
Tabela 4: Resultados experimentais para a condutividade elétrica do fio Cu no SI.	37
Tabela 5: Resultados experimentais para a condutividade em elétrica % IACS do fio Cu.....	38
Tabela 6: Valores experimentais de resistência elétrica do Cu obtidos no ensaio de condutividade.	43
Tabela 7: Resultados experimentais para a condutividade elétrica do Al no SI.	47
Tabela 8: Resultados experimentais para a condutividade elétrica em % IACS do Al.....	48
Tabela 9: Valores experimentais de resistência elétrica do Al obtidos no ensaio de condutividade.	53

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comportamento da condutividade elétrica do Cu x corrente elétrica, com temperatura fixa em 20°C.....	39
Gráfico 2: Variação da condutividade no Cu pela temperatura com corrente fixa 200 mA. ..	40
Gráfico 3: Variação da condutividade no Cu x temperatura com corrente fixa 400 mA:.....	41
Gráfico 4: Variação da condutividade no Cu x temperatura com corrente fixa 600 mA.....	41
Gráfico 5: Variação da condutividade no Cu x temperatura com corrente fixa 800 mA.....	42
Gráfico 6: Condutividade elétrica do Cu x temperatura, para correntes de 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA.	42
Gráfico 7: Variação da resistência elétrica no fio de Cu x temperatura, com corrente fixa em 200 mA.	44
Gráfico 8: Variação da resistência elétrica do Cu x temperatura, com corrente fixa em 400 mA.	45
Gráfico 9: Variação da resistência elétrica do Cu x temperatura, com corrente fixa em 600 mA.	45
Gráfico 10: Variação da resistência elétrica do Cu x temperatura, com corrente fixa em 800 mA.	46
Gráfico 11: Resistência elétrica do Cu x temperatura, para correntes de 200mA, 400mA, 600mA e 800mA	46
Gráfico 12: Comportamento da condutividade elétrica do Al x corrente elétrica, com temperatura fixa em 20°C.....	49
Gráfico 13: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 200 mA.....	50
Gráfico 14: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 400 mA.....	50
Gráfico 15: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 600 mA.....	51
Gráfico 16: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 800 mA.....	51
Gráfico 17: Condutividade elétrica do Al x temperatura, para correntes de 200mA, 400mA, 600mA e 800mA.	52
Gráfico 18: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 200mA.	54
Gráfico 19: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 400mA.	54
Gráfico 20: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 600mA.	55

Gráfico 21: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 800mA.	55
Gráfico 22: Resistência elétrica do Cu x temperatura, para correntes de 200mA, 400mA, 600mA e 800mA.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SI – Sistema Internacional de Unidades

CC – Corrente contínua

CA – Corrente alternada

FEM – Força Eletromotriz

ρ – Resistividade elétrica

R – Resistência elétrica

i – Corrente elétrica

v – Tensão elétrica

W – Trabalho

E – Vetor campo elétrico

dL – Deslocamento infinitesimal

σ – Condutividade elétrica

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

ABAL – Associação brasileira de alumínio

Cu – Cobre

Al – Alumínio

IACS - *international annealed copper standart*

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

DDP – Diferença de potencial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivos Gerais.....	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1. Carga e corrente elétrica	17
3.2. Diferença de potencial	18
3.3. Resistência, resistividade e condutividade elétrica	19
3.4. Classificação geral dos materiais elétricos.....	20
3.5. Materiais sob o ponto de vista elétrico	20
3.6. Lei de Joule-Lenz	21
3.7. Relação entre condutividade elétrica e temperatura	22
3.8. Coeficiente de temperatura e condutividade térmica.....	22
3.9.1. Método de medição de resistência de dois fios	24
3.9.2. Método de medição de resistência de quatro fios	25
3.10. Sólidos metálicos.....	26
3.11. O alumínio.....	26
3.12. O cobre	28
3.13. Condutividade elétrica do alumínio e do cobre: Uma revisão bibliográfica ..	29
3.14. Padrão internacional de cobre recozido.....	29
4. METODOLOGIA	30
4.1. Materiais	31
4.2. Dimensões dos fios de cobre e alumínio	32
4.3. Ensaio de condutividade elétrica	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1. Condutividade elétrica no fio de cobre	37

5.2.	Variação da condutividade elétrica no fio cobre pela temperatura	40
5.3.	Variação da resistência elétrica do cobre pela temperatura.....	43
5.4.	Condutividade elétrica no fio do alumínio	47
5.5.	Variação da condutividade elétrica do fio de alumínio pela temperatura	49
5.6.	Variação da resistência elétrica do alumínio pela temperatura	53
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A indústria elétrica engloba todas as atividades relacionadas a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como a fabricação de equipamentos e dispositivos elétricos e eletrônicos, tornando essa indústria de fundamental importância para a sociedade moderna.

O fornecimento de energia impacta todas as áreas da sociedade como, a educação, saúde, alimentação, comunicação e trabalho. Para o fornecimento de energia elétrica é necessária a utilização de materiais condutores.

De forma geral, utiliza-se alguns metais como condutores de energia elétrica, que possuem um alto valor de condutividade elétrica, ou seja, possuem uma baixa oposição a passagem de corrente elétrica (Alexandre; Sadiku, 2013). Dentre todos os metais, o alumínio (Al) e o cobre (Cu) se destacam como os condutores elétricos mais utilizados pela indústria.

O Cu é um metal muito utilizado como condutor elétrico devido a seu elevado valor de condutividade elétrica. O Cu é usado, como fios e cabos, nas instalações elétricas de edifícios residenciais, comerciais e industriais, e na área da eletrônica. Além disso possui outras características que o tornam um condutor elegível para diversas aplicações, pois possui uma elevada resistência à corrosão, um alto valor de condutividade térmica, é altamente maleável, é dúctil e pode ser reciclado sem que ocorra a perda de suas características (Silva, 2011).

Por outro lado, o Al é um dos metais mais abundantes da crosta terrestre e encontra-se em diversos minerais, principalmente na bauxita. Suas características naturais como: baixa densidade, que o torna um metal leve, possui um alto valor condutividade elétrica e térmica, além de uma alta resistência à corrosão (formação da camada de óxido de alumínio), pode ser reciclado sem perder suas características, o Al é maleável, é dúctil e possui um custo monetário inferior ao Cu. Devido a essas e outras características, utiliza-se o Al em diversas aplicações como em linhas de transmissão e na aviação.

As linhas de transmissão são responsáveis pela distribuição de energia elétrica das fontes geradoras até os consumidores, logo esse sistema de transmissão percorre grandes distancias geralmente ao ar livre, sendo submetida as intempéries climáticas do meio, tais como: variações de temperatura, chuva, vento, umidade, seca dentre outras. Devido ao alto valor de condutividade elétrica do Al, a capacidade de resistir as intemperes com a formação de uma camada protetora durante sua oxidação, leveza característica e seu baixo custo, são alguns dos motivos que tornam este metal muito utilizado para essa aplicação (Abal, 2017).

Na indústria da aviação o Al é muito utilizado, embora possua apenas cerca de 61% da condutibilidade do Cu, e também possui aproximadamente 30% do peso específico do Cu, logo a utilização de fios de Al possibilita uma redução no peso da aeronave (Abal, 2020).

Apesar de suas boas características elétricas, para a utilização do Cu e do Al como fios ou cabos condutores, é necessário ter conhecimento do comportamento da condutividade elétrica desses materiais. De acordo com Schmidt (1979) a condutividade elétrica de um metal é influenciada diretamente por sua temperatura, assim, quanto maior a temperatura menor é seu valor de condutividade elétrica, e vice-versa.

O vasto território brasileiro possui regiões com diferentes valores característicos de temperatura, em alguns locais do país onde a temperatura ambiente chega a mais de 38°C, enquanto outros lugares possuem uma temperatura ambiente inferior aos 20°C. Essa diversidade impacta diretamente na condutividade dos elementos condutores. Portanto, um cabo de Cu ou de Al utilizado para uma aplicação no Sul do país e outro cabo utilizado para uma aplicação igual no Nordeste apresentarão condutividades distintas.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um método de ensaio experimental, utilizando a técnica de medição a 4 (quatro) fios para a obtenção do valor da condutividade elétrica de metais, na faixa de temperatura de 20 a 60°C, na qual será posteriormente utilizado para medir a condutividade de novas ligas metálicas que serão desenvolvidas pelo grupo de pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Determinar metodologia para obtenção de condutividade elétrica dos metais.

2.2. Objetivos específicos

- Validar o método a quatro fios para medir a condutividade elétrica;
- Determinar a condutividade elétrica de dois metais;
- Investigar o comportamento da condutividade e resistência elétrica em função da temperatura.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Carga e corrente elétrica

A carga é uma propriedade elétrica de todas as partículas atômicas que compõem a matéria. É a partir da definição e do estudo da carga elétrica que se explica todos os fenômenos relacionados à eletricidade (Alexandre; Sadiku, 2013). No sistema internacional de unidades (SI), a carga (Q) é medida em Coulombs (C).

O átomo, formado por elétrons, prótons e nêutrons, é o elemento fundamental do qual toda matéria se constitui. Os elétrons possuem uma carga elétrica negativa, os prótons têm carga elétrica igual aos elétrons só que positiva e os nêutrons não possuem carga. Tanto os elétrons como os prótons possuem uma carga elétrica de módulo igual $1,602 \times 10^{-19}$ C. Dentre todos os elementos fundamentais que formam o átomo, o elétron é o único que possui mobilidade. Portanto, a carga elétrica pode se deslocar de um local para outro permitindo a transformação da energia elétrica em outros tipos de energia (Alexandre; Sadiku, 2013).

Corrente elétrica (i), medida em Amperes (A), é o fluxo de cargas elétricas por unidade de tempo, ou seja, é a quantidade de cargas elétricas que passam por uma determinada área ou volume em uma determinada quantidade de tempo. Matematicamente pode-se escrever a corrente elétrica pela Equação 1.

$$i = \frac{dQ}{dt} [A] \quad (1)$$

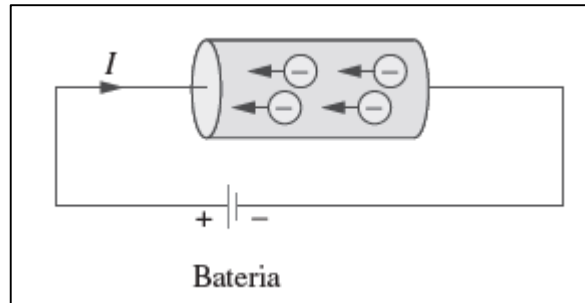
Existem vários tipos de corrente elétrica, porém os mais utilizados são, a corrente contínua (CC), e a corrente alternada (CA). A corrente contínua como seu próprio nome propõe não sofre alteração em sua direção, amplitude com o passar do tempo, logo a mesma não apresenta variação temporal. Já a corrente alternada apresenta variação com o tempo, com característica senoidal (Alexandre; Sadiku, 2013). Só se pode ter uma corrente elétrica se existir uma força que impulsiona esses elétrons a se deslocarem de forma a constituir um fluxo ordenado. Essa força é a diferença de potencial (DDP), também conhecida como tensão elétrica (v).

3.2. Diferença de potencial

Para se deslocar cargas elétricas e surgir uma corrente elétrica, que percorrerá um condutor ou circuito elétrico em determinado sentido, é preciso que algum trabalho seja exercido nas cargas ou alguma forma de transferência de energia (Alexandre; Sadiku, 2013). Pode-se definir diferença de potencial como o trabalho necessário realizado por uma fonte externa para o deslocamento de uma carga pontual de um ponto para outro na presença de um campo elétrico (Hayt Jr.; Buck, 2013).

Considerando o circuito mostrado na Figura 1, observa-se entre os polos positivo e negativo da bateria (fonte de força eletromotriz) existe uma DDP. Essa força irá realizar trabalho e fornecer a energia necessária para deslocar as cargas pelo circuito formando uma corrente elétrica. Na Figura 1, o sentido da corrente elétrica é oposto ao sentido do fluxo de elétrons, isto ocorre porque a figura traz a forma de representação convencional, nela se considera o fluxo de cargas positivas (que é oposto ao fluxo de carga negativa) e não de cargas negativas.

Figura 1: Corrente elétrica em um condutor cilíndrico.



Fonte: Alexander; Sadiku 2013.

A tensão elétrica (v) é medida em Volts (V). Matematicamente a tensão elétrica para deslocar uma carga unitária de um ponto inicial a um ponto final é descrita pela Equação 2:

$$v = \frac{dW}{dQ} = - \int_{\text{inicial}}^{\text{final}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad \left[\frac{J}{C} = V \right] \quad (2)$$

Em que W é o trabalho realizado medido em Joules [J], Q é a carga medida em Coulombs (C), $\mathbf{E}$ é vetor campo elétrico medido em Volt por metro [V/m] e $d\mathbf{L}$ é o vetor deslocamento infinitesimal medido em metros [m].

3.3. Resistência, resistividade e condutividade elétrica

A resistência elétrica é a propriedade de um elemento que indica a capacidade de se opor ao fluxo de corrente elétrica (Johnson; Hilburn; Johnson, 1993). A resistência depende das características do elemento, como a resistividade elétrica (ρ) do material, comprimento (L), área de seção transversal (A) e a temperatura (T), mas também pode ser calculada utilizando a lei de Ohm (Alexandre; Sadiku, 2013). A resistência elétrica é medida em ohms (Ω) e é representada pela letra "R". Com a Equação 3 pode-se calcular o valor da resistência elétrica utilizando as características do elemento. A Equação 4 utiliza a lei de Ohm para calcular a resistência elétrica.

$$R = \frac{\rho L}{A} [\Omega] \quad (3)$$

$$V = RI \quad (4)$$

Onde ρ é medida em Ohm vezes metros [Ωm], L é medido em metros [m] e A é medida em metros quadrados [m^2]

A resistividade elétrica é uma propriedade inerente de cada material, a qual mensura a capacidade desse material resistir a passagem de corrente elétrica. Diferente da resistência elétrica, a resistividade elétrica não depende do tamanho ou da forma do material.

Materiais com um alto valor de resistividade são chamados materiais isolantes, pois eles tendem a se opor ao fluxo de elétrons que os percorre. Esses materiais apresentam uma alta resistência elétrica. Um material com um baixo valor de resistividade elétrica é classificado como condutor, pois oferece uma baixa oposição a passagem de elétrons. Nesses materiais a corrente flui mais facilmente, pois possuem uma baixa resistência elétrica.

A condutividade elétrica (σ) é o inverso da resistividade elétrica, portanto um material com alta condutividade, é um material condutor e um material com baixa condutividade é um material isolante. Pode-se utilizar a Equação 5 para calcular a resistividade elétrica.

$$\rho = \frac{RA}{L} \left[\frac{\Omega m^2}{m} \right] \quad (5)$$

Como já foi mencionado, a condutividade é o inverso da resistividade, logo a Equação 6 é usada para calcular a condutividade. A unidade da condutividade é Siemens por metro [S/m].

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{RA} \left[\frac{m}{\Omega m^2} = \frac{S}{m} \right] \quad (6)$$

3.4. Classificação geral dos materiais elétricos

Os materiais mais comumente utilizados em aplicações elétricas (materiais elétricos) são classificados em duas categorias: uma do ponto de vista elétrico e outra do ponto de vista magnético.

- Materiais sob ponto de vista elétrico: Nessa classificação se encaixam os materiais condutores, semicondutores e isolantes.
- Materiais sob o ponto de vista magnético: Nessa classificação se encaixam os materiais ferromagnéticos, diamagnéticos e paramagnéticos.

A classificação dos materiais elétricos é feita com base na propriedade da resistividade transversal do material. A classificação dos materiais magnéticos é realizada levando em conta as grandezas de permeabilidade e da suscetibilidade, informando o quanto um material é capaz de concentrar linhas de fluxo magnético (Schmidt, 1979).

3.5. Materiais sob o ponto de vista elétrico

Os materiais elétricos se dividem em três grupos, materiais condutores, semicondutores e isolantes, com base em sua resistência transversal.

Um material condutor tem a característica de permitir a passagem de um fluxo ordenado de elétrons e íons (corrente elétrica) com mais facilidade. Um material isolante tem a característica de dificultar a passagem de um fluxo ordenado e os materiais semicondutores possuem características intermediárias, entre os materiais condutores e isolantes (Schmidt, 1979). Com base na resistividade do material temos que:

- Materiais condutores: Possuem uma resistência de 10^{-2} a $10 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.
- Materiais semicondutores: Possuem uma resistência de 10 a $10^{12} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.
- Materiais isolantes: Possuem resistividade de 10^{12} a $10^{24} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$.

Esses valores de resistividade utilizados para classificar os materiais foram obtidos de acordo com o comportamento de cada material quando existe uma corrente elétrica passando por ele.

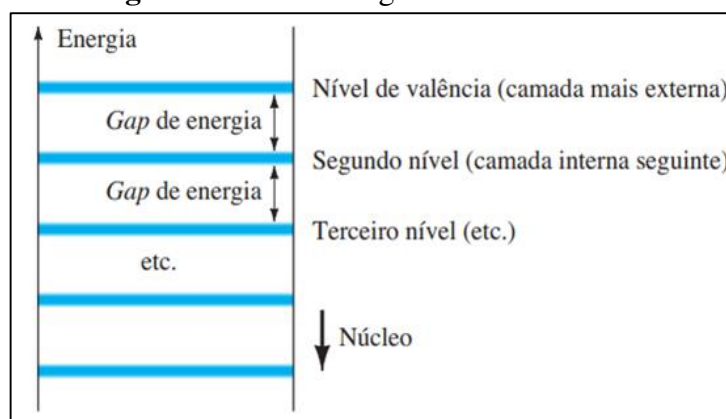
Também pode-se classificar um material como supercondutor. São condutores que possuem uma condutividade elétrica teoricamente infinita, a partir de um determinado valor de temperatura, chamado de temperatura crítica, que é geralmente próximo ao zero absoluto (0K) (Halliday; Resnick, 2012).

Para se estudar o efeito da corrente e como ela percorre o corpo do material, deve-se estudar a própria estrutura molecular do corpo e suas características de ionização e excitação (Schmidt, 1979).

3.6. Lei de Joule-Lenz

Os elétrons que orbitam o núcleo de um átomo possuem seus valores energéticos definidos. Cada átomo está organizado em uma banda eletrônica de acordo com seu valor energético. Entre as bandas existem espaços vazios, que recebem o nome de gap, onde não pode haver elétrons. Quando uma diferença de potencial externa é aplicada a um material, observa-se que os elétrons presentes no núcleo absorvem energia suficiente para “saltar” o gap (materiais condutores possuem gaps menores que os materiais isolantes, logo precisam de uma quantidade de energia menos elevada para mudar de banda energética), e mudar para a próxima faixa energética, como mostrado na Figura 2.

Figura 2: Níveis energéticos de um átomo.



Fonte: Boylestad; Nashelsky, 2013.

Se a aplicação da diferença de potencial for constante, os elétrons vão absorver energia até entrarem em estado de condução (estado onde os elétrons se desprendem do núcleo e ficam relativamente livres para vagar pelo material) gerando íons e formando a corrente elétrica (Boylestad; Nashelsky, 2013). Esse modelo descrito é chamado de nuvem eletrônica ou mar de

elétrons. Os elétrons que compõem a nuvem se chocam uns com os outros e com íons do sistema cristalino, gerando uma “perda” energética de deslocamento. A energia perdida gera um aquecimento no material. Esse fenômeno é descrito pela lei de Joule-Lenz. É através desse processo que a energia elétrica é transformada em energia térmica. Matematicamente a Equação 7 descreve a lei Joule-Lenz (Schmidt, 1979).

$$W = \sigma E^2 \quad (7)$$

Em que W é a quantidade de energia dissipada, σ é a condutividade elétrica e E é o módulo do campo elétrico aplicado.

3.7. Relação entre condutividade elétrica e temperatura

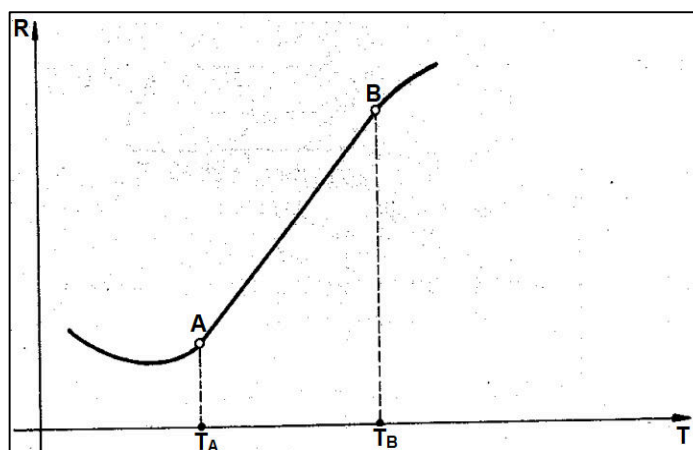
A resistência elétrica que um material oferece, decorre da forma de como está organizada a sua estrutura cristalina. Quanto mais organizada for a estrutura cristalina, torna-se mais fácil para a corrente elétrica percorrer o material. Estruturas cristalinas de formula retangular, como sistemas cristalinos puros, possuem um alto valor de condutividade elétrica (baixa resistividade elétrica), mas existindo impurezas, elas tendem a absorver energia elétrica e, em seguida, dissipar por meio do efeito Joule (Schmidt, 1979).

Com o aumento da temperatura, ocorre-se uma elevação nos níveis de energia dos átomos, fazendo que os mesmos entrem em vibração. Essa vibração com uma amplitude mais elevada, aumentando a probabilidade de colisões dos elétrons com os íons, dificulta a passagem de elétrons através do condutor. Portanto, quanto maior for a temperatura do condutor, maior será sua resistividade elétrica e consequentemente menor sua condutividade elétrica (Young; Freedman, 2016).

3.8. Coeficiente de temperatura e condutividade térmica

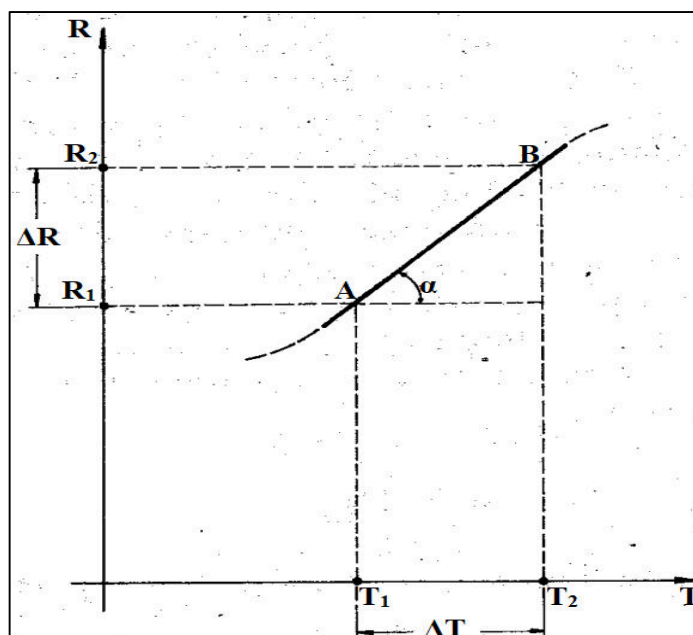
Na Figura 3, ilustra-se a curva característica da resistência elétrica pela temperatura. Nessa curva, observa-se que a relação entre a temperatura e a resistência elétrica não é completamente linear. Somente entre os pontos A e B nota-se alguma linearidade. Na Figura 4 ilustra-se justamente o trecho linear (Schmidt, 1979).

Figura 3: Curva de resistência pela temperatura.



Fonte: Schmidt, 1979, p.28.

Figura 4: Linearidade entre os pontos A e B.



Fonte: Schmidt, 1979, p. 28.

O trecho linear tem uma inclinação dada pela Equação 8:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta T}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \quad (8)$$

O termo $\text{tg}(\alpha)/R_1$ é chamado de coeficiente de temperatura da resistência, ele diz o quanto um determinado material varia sua resistência em decorrer do aumento ou da redução da temperatura, é indicado por α_{T1} , Equação 9.

$$\alpha_{T1} = \frac{\text{tg}(\alpha)}{R_1} = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} * \frac{1}{R_1}$$

$$\alpha_{T1} = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1} * \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \right) \quad (9)$$

Normalmente a temperatura inicial (T_1), que é usada como referência é escolhida de maneira geral de 20°C ou 25°C (Schmidt, 1979). Com a Equação 10, pode-se calcular a resistência na temperatura T_2 , quando a temperatura inicial é 20°C.

$$\alpha_{T1} = \alpha_{20}$$

$$R_{T2} = R_{20}[1 + \alpha_{20}(T_2 - 20)] \quad (10)$$

Pela Figura 4 nota-se que α_{T1} depende do valor escolhido como temperatura de referência.

3.9.Métodos para a medição da resistência elétrica

3.9.1. Método de medição de resistência de dois fios

Os dois métodos mais utilizados para medir a resistência de fios elétricos são as medições de “2 fios” e “4 fios”. Esses termos fazem referência à quantidade de fios que serão ligados no instrumento de medição.

O método de medição de resistência de 2 (dois) fios é preciso para medições acima de 10 Ω , mas para medir resistências baixas (abaixo de 1 Ω) esse método perde sua precisão. O método de medição de resistência 4 (quatro) fios é indicado para medir baixas resistências, como resistências menores que 1 Ω , esse método é bem mais preciso que o método mencionado anteriormente (Cordeiro, 2019).

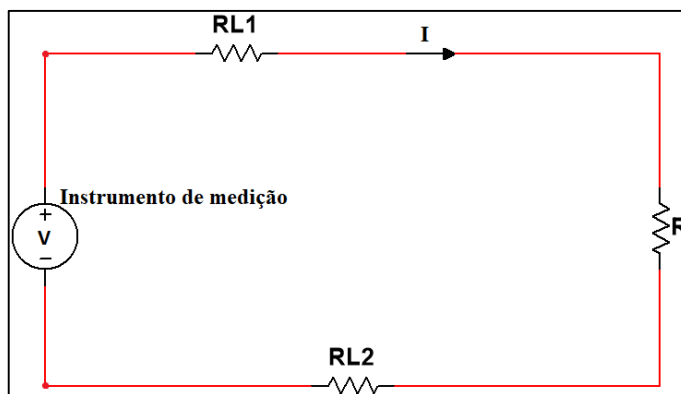
O esquema para a medição de resistência a 2 (dois) fios pode ser visto na Figura 5. Nesse tipo de medição o mesmo fio que transporta a corrente elétrica também faz a medição da tensão elétrica sobre os terminais de R.

Na Figura 5, observa-se que RL1 e RL2 são as resistências elétricas da parte superior e inferior dos fios ligados a R. Esses fios, por sua vez, são conectados ao instrumento de medição (multímetro ou sistema de aquisição). Além disso, observa-se uma configuração com três resistores em série, logo a resistência medida será a soma de todas as resistências do circuito, como mostra a Equação 11.

$$R_{\text{Total}} = RL1 + RL2 + R \quad (11)$$

De maneira geral os valores de RL1 e RL2 são pequenos e podem ser desprezados se o valor R for muito maior que ambos, porém se o valor de R for pequeno irá gerar uma imprecisão nos resultados. Logo o método de medição a 2 (dois) fios não deve ser utilizado para medir pequenas resistências (Cordeiro, 2019). Para esse tipo de medição é mais aconselhado o método de medição de resistência de 4 (quatro) fios.

Figura 5: Esquema para medições de resistência de 2 fios.



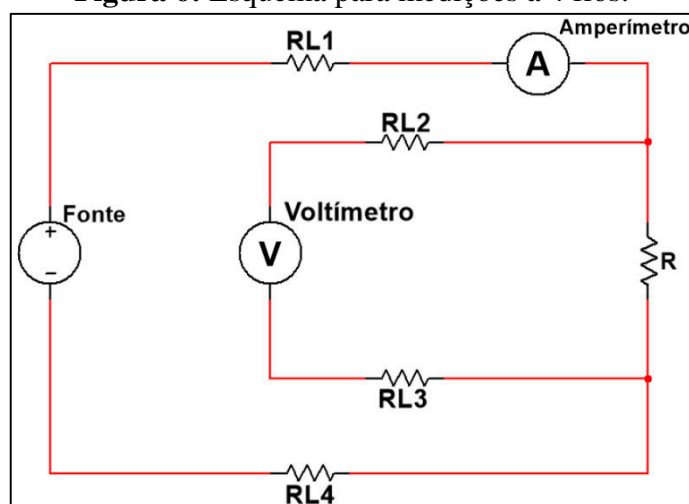
Fonte: Autoria própria, 2023.

3.9.2. Método de medição de resistência de quatro fios

A Figura 6, mostra a configuração para a utilização da técnica de medição de resistência elétrica a 4 (quatro) fios. A corrente CC injetada pela fonte percorre os fios de resistência elétrica RL1 e RL4. Um amperímetro é conectado em série com fonte de tensão de modo a medir a corrente que circula tanto pelos fios quanto pela resistência R. As resistências elétricas RL2 e RL3 correspondem às resistências dos fios utilizados para conectar o voltímetro, o qual será utilizado para fazer as medições de tensão necessárias (Panda, 2021). Com o valor da corrente elétrica que passa por R e da tensão elétrica presente nos terminais de R, pode-se calcular a resistência elétrica utilizando a Equação 4. Como a tensão é medida diretamente sobre os terminais do resistor R, não importa se as resistências RL1 e RL2 esquentarem e tiverem

seus valores alterados devido a passagem da corrente elétrica. Como a resistência interna de um voltímetro é muito elevada, idealmente infinita, pode-se considerá-lo como um circuito aberto, logo não irá ter corrente (ou uma corrente de intensidade desprezível) fluindo pelos resistores, logo esses valores não irão se alterar.

Figura 6: Esquema para medições a 4 fios.



Fonte: Autoria própria, 2023.

3.10. Sólidos metálicos

Sólidos metálicos, ou simplesmente metais, são materiais inteiramente constituídos de átomos metálicos. Embora haja uma diferença entre eles, todos os metais apresentam características semelhantes, permitindo ser classificados como tal.

Os metais possuem algumas características como um brilho próprio, um alto valor de condutividade térmica, um elevado valor de condutividade elétrica, a maioria são maleáveis, podendo ser moldados em diferentes formas como finas folhas, e também são dúcteis, permitindo serem transformados em fios (Brown et al., 2016).

3.11. O alumínio

O alumínio é um elemento químico, cujo símbolo na tabela periódica é Al, com número atômico 13 e massa atômica de aproximadamente 26,982u. É um dos principais metais utilizados atualmente, cujas características elétricas e mecânicas permitem diversas aplicações não só em áreas relacionadas com eletricidade (devido a sua elevada condutividade), mas para construção civil, aviação e a indústria automobilística. Isso se deve ao Al ser um metal leve,

com peso corresponde a cerca de 35% do peso específico do aço e 30% do peso específico do Cu, com grande durabilidade, baixa densidade, dúctil, maleável, reciclável, resistente à corrosão e intempéries.

O Al também possui propriedade paramagnético. Logo, o Al é bastante utilizado como forma de proteger equipamentos eletrônicos. O Al também é utilizado nas embalagens para produtos industrializados (Abal, 2020).

O Al é um metal que consegue formar ligas sem muitas dificuldades. A principal função das ligas de Al é aumentar a resistência mecânica sem prejudicar as outras propriedades. Assim, novas ligas têm sido desenvolvidas combinando as propriedades adequadas a aplicações específicas (Abal, 2017). Segundo Onder (2015), as ligas de Al podem atingir até 30 vezes a resistência mecânica do Al puro.

Atualmente, o Al pode ser encontrado no dia a dia de toda a sociedade, já que ele está presente em embalagens de alimentos, latas de bebidas, pratos, copos, motores, redes de transmissão elétricas e construção de aeronaves. Do ponto de vista ecológico o Al oferece inúmeros benefícios, um deles é a sua capacidade de ser infinitamente reciclado e moldado sem perder suas propriedades.

O Al, não é encontrado em sua forma metálica na crosta terrestre, é extraído a partir da bauxita, que é uma rocha avermelhada formada em maior parte por óxido de alumínio (Al_2O_3), em composição, e o restante varia com outros compostos como óxidos de ferro. A bauxita ocupa a posição de terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, perdendo apenas para o oxigênio e para o silício. Pode-se encontrar também a bauxita com uma cor esbranquiçada, mas esse tipo possui menos Al em sua composição (Abal, 2017). A Figura 7 apresenta uma bauxita avermelhada.

Figura 7: Bauxita vermelha.



Fonte: Revista do Alumínio, 2019.

A bauxita não possui uma quantidade fixa de Al em sua composição, logo existe lugares, onde a rocha é composta por uma maior e outros por uma menor, parcela de alumínio. Segundo a Abal (2017), a bauxita precisa apresentar no mínimo 30% de Al em sua composição de forma a sua mineração ser economicamente viável. Pode-se encontrar a bauxita em locais que tenham climas tropicais, subtropicais e mediterrâneo. No Brasil se encontram reservas com ótima qualidade, transformando o país em um dos maiores mineradores do mundo.

Como nada na natureza é 100% puro, o produto obtido contém cerca de 99,5% de Al e os outros 0.5% são distribuídos em outros elementos, chamados nesse processo de obtenção do Al de impurezas, como ferro, silício e titânio. Essas impurezas, também conhecidas como elementos de transição presentes no Al, alteram as propriedades elétricas diminuindo sua condutividade, na qual é indesejado para diversas aplicações (Nunes, 2014). Para contornar o aumento de resistividade é adicionado boro ao Al de forma a diminuir sua resistividade.

3.12. O cobre

O cobre foi um dos primeiros metais a ser descoberto e utilizado pelo homem e continua a ser amplamente utilizado até os dias de hoje. Ele é um metal pertencente ao grupo 11 da tabela periódica, representado pelo símbolo Cu, possui número atômico 29, massa atômica de 63,546u, um ponto de fusão de 1086°C, um brilho característico avermelhado e um alto valor de condutividade térmica e elétrica (Rodrigues; Silva; Guerra; 2012). Além disso, é resistente à corrosão e pode formar ligas com outros metais sem grandes dificuldades (Oliveira, 2013).

O Cu puro não é comumente encontrado na natureza, portanto a sua obtenção é por meio da extração do Cu associado a outros elementos químicos. Existem 2 (dois) grupos de minerais dos quais possuem um teor de Cu em sua composição suficiente para que seja realizado o processo de extração.

O primeiro grupo são os primários (ou sulfetados) que possuem um maior teor de Cu em sua composição, porém se encontram em camadas mais profundas da crosta terrestre. E o segundo grupo são os secundários (ou oxidados) que possuem uma menor quantidade de Cu em sua composição em relação ao primeiro grupo, porém se encontram em locais mais acessíveis da crosta terrestre (Oliveira, 2013). Nem todos os minérios presentes nesses 2 (dois) grupos são economicamente viáveis para se realizar o processo de extração e obtenção do Cu puro. Na Tabela 1, observa-se uma seleção dos minérios com maior teor de Cu em sua composição.

Tabela 1: Principais minerais para a extração de cobre.

Tipo	Nome usual	Fórmula Química	% de Cu
Minério Primário (sulfetado)	Calcopirita	CuFeS ₂	34,6
	Bornita	Cu ₅ FeS ₄	63,3
Minério Secundário (oxidado)	Calcocita	Cu ₂ S	79,9
	Covellita	CuS	66,4
	Cuprita	Cu ₂ O	88,8
	Tenorita	CuO	79,8
	Malaquita	CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	57,5
	Azurita	2CuCO ₃ .Cu(OH) ₂	55,3

Fonte: Adaptado Schlesinger, 2011.

3.13. Condutividade elétrica do alumínio e do cobre: Uma revisão bibliográfica

Tanto a condutividade do Cu como a do Al apresentam valores bem estabelecidos na literatura. Os dados da Tabela 2, apresenta os valores das condutividades do Al e do Cu presentes na literatura, todos os valores presentes foram medidos em relação a uma temperatura de 20°C.

Tabela 2: Condutividade elétrica do Al e do cobre a 20°C.

Tabela 27: Condutividade elétrica do Al e do Cu a 20 °C.							
Metais	Autores						Média
	Schmidt, 1979, p.29.	Callister; Rethwisch, 2012, p.621.	Tipler; Moscar, 2014, p.152.	Halliday; Resnick, 2012, p.141.	Nussenzveig, 1997, p.105.	Young; Freedman, 2016, p.140.	
	Condutividade Elétrica [M S/m] a 20°C						
Ouro	41,67	43,00	-----	42,55	-----	40,98	42,05
Cobre	59,17	60,00	58,82	59,17	58,82	58,13	59,02
Alumínio	38,17	38,00	35,71	36,36	35,71	36,36	36,33
Ferro	10,20	10,00	10,00	10,33	10,00	10,00	10,08

Fonte: Autoria própria, 2023.

3.14. Padrão internacional de cobre recozido

O cobre utilizado como condutor elétrico deve possuir um alto grau de pureza para tornar-se um condutor mais eficiente, pois quanto mais puro melhor a condutividade do material. O Padrão internacional de cobre recozido (*International Annealed Copper Standard*

ou IACS) é um padrão internacional de condutividade elétrica, o qual serve para expressar a condutividade relativa dos materiais em relação ao Cu, devido a seu elevado valor de condutividade e a sua ampla utilização como condutor na indústria elétrica (Lopes, 2018).

O Cu com pureza mínima de 99,9%, recozido, têmpera mole, a 20°C (293,15 K) possui uma condutividade de 100% IACS, que é igual a uma condutividade de 58 MS/m, ou seja, resistividade elétrica de $\rho_{20^\circ}=0,017241 \mu\Omega\text{m}$ (Mesquita, 1981).

A condutividade elétrica IACS do Al no IACS é de 61% IACS a 20°C, que corresponde a uma condutividade de 35,4 MS/m, e a uma resistividade de $\rho_{20^\circ}=0,02825 \mu\Omega\text{m}$ (Mesquita, 1981). Comparando os valores da condutividade do Cu e do Al no sistema IACS, com a média dos valores de condutividade para esses materiais presente na Tabela 2, nota-se que ambos os valores são muito próximos, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3: Média dos valores de condutividades e condutividade IACS.

Material	Condutividade média	Condutividade IACS	Erro percentual
Cobre	59,02M S/m	58M S/m	1,76%
Alumínio	36,73M S/m	35,73M S/m	3,76%

Fonte: Autoria própria, 2023.

Considerando a pequena margem de erro para o valor médio da condutividade, em relação a condutividade IACS do Cu (1,76%) e do Al (3,76%) obtido com a revisão bibliográfica, será adotado além do Sistema internacional (SI) como referência os valores de condutividade do sistema IACS, pois são usados em vários países. A condutividade IACS serve como padrão de referência para analisar a qualidade dos materiais condutores comercializados em diversos países.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, os ensaios foram realizados no Laboratório de Química Aplicada da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) - Campus Caraúbas.

4.1. Materiais

Para a realização dos ensaios de condutividade, utilizou-se uma fonte de alimentação de corrente contínua, da marca Agilent modelo E3633A, ilustrada na Figura 8, e 2 (dois) multímetros, da marca Agilent, modelo U1252B, ilustrado na Figura 9.

Figura 8: Fonte de alimentação CC.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 9: Multímetros.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR nº 6814 - Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica de 1986, estabelece que os ensaios de condutividade devem ser realizados a uma temperatura de 20°C. Assim, utilizou-se um banho ultratermostático SL 152 da marca Solab, ilustrado na Figura 10, para realização do controle de temperatura durante os testes.

Figura 10: Banho ultratermostático para controle de temperatura.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2. Dimensões dos fios de cobre e alumínio

As normas ABNT NBR n° 5111 - Fios de cobs nus, de seção circular, para fins elétricos – Especificação de 1997 e a ABNT NBR n° 5118 - Fios de alumínio nus para fins elétricos de 1985, trazem algumas recomendações, como: a superfície do fio não apresenta fissuras, asperezas, escamas ou rebarbas.

Na Figura 11, ilustra-se o fio de Cu utilizado. Escolheu-se um fio comercial com isolamento para evitar o contato direto entre a parte metálica do banho ultratermostático. O fio de Cu possui um comprimento (L_{Cu}) de 0,15 m com 0,00144 m de diâmetro (D_{Cu}), utilizou-se um micrometro digital para medir as dimensões do fio de Cu. A partir da Equação 12, pode-se obter área da seção transversal para o fio de Cu.

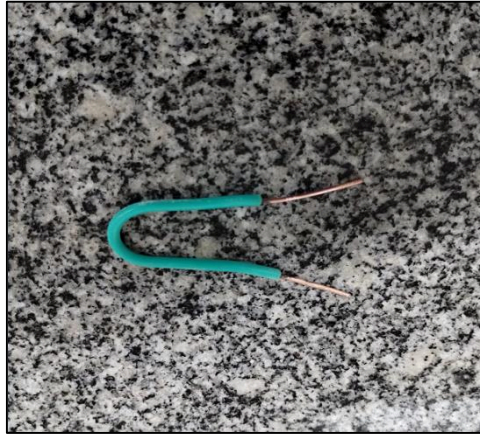
$$L_{Cu} = 0,15 \text{ m}; \quad D_{Cu} = 0,00144 \text{ m}$$

$$A_{Cu} = \frac{\pi * D_{Cu}^2}{4} \quad (12)$$

$$A_{Cu} = \frac{\pi * (0,00144 \text{ m})^2}{4}$$

$$A_{Cu} = 1,6286 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 1,6286 \mu \text{ m}^2$$

Figura 11: Fio de cobre para ensaio de condutividade.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Na Figura 12, ilustra-se o fio comercial de Al utilizado. O fio foi coberto por uma camada de fita isolante para evitar o contato direto entre a parte metálica do banho ultratermostático. O fio de Al possui um comprimento (L_{Al}) de 0,15 m com 0,00248 m de diâmetro (D_{Al}), utilizou-se um micrometro digital para medir as dimensões do fio de Al. Utilizando a Equação 12, pode-se obter área da seção transversal para o fio de Al.

$$L_{Al} = 0,15 \text{ m}; \quad D_{Al} = 0,00248 \text{ m}$$

$$A_{Al} = \frac{\pi * (0,00248 \text{ m})^2}{4}$$

$$A_{Al} = 4,83051 \times 10^{-6} \text{ m}^2 = 4,83051 \mu\text{m}^2$$

Figura 12: Fio de alumínio para ensaio de condutividade.



Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3. Ensaio de condutividade elétrica

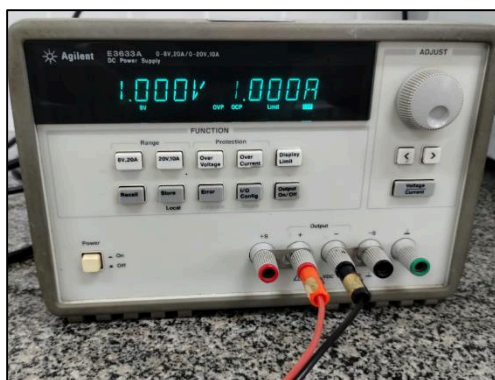
Para ensaios de condutividade elétrica deve-se utilizar corrente CC, já que a utilização de uma corrente CA geraria um aumento na resistência elétrica do material, devido ao efeito pelicular (*skin effect*). Para frequências elevadas a corrente CA tende a se distribuir uniformemente na superfície do condutor, essa organização acaba por gerar uma redução na área por qual a corrente flui, aumentando assim o valor da resistência elétrica, o que causaria imprecisão nos resultados do ensaio (Robert, 2000).

O ensaio de condutividade foi realizado seguindo as orientações da NBR nº 6814 - Fios e cabos elétricos – Ensaio de resistência elétrica de 1986. Portanto, a temperatura para o ensaio foi fixada em 20°C, pois pode-se utilizar tanto a condutividade SI quando a condutividade IACS como referência para comparação com os dados obtidos experimentalmente e os valores presentes na literatura, validando assim o método de ensaio.

Após o banho atingir a temperatura de 20°C, esperou-se um tempo médio de 10 minutos com a amostra totalmente submergida em água destilada, de forma a garantir que a fio metálico estivesse a temperatura desejada.

Posteriormente os multímetros foram ajustados para medir tensão elétrica, em milivolts (mV), e corrente elétrica, em miliamperes (mA). Para configurar a fonte de alimentação CC, levou-se em consideração o máximo de corrente que seria utilizado no ensaio, pois os cabos conectores utilizados tanto na fonte quanto no multímetro conseguem aguentar no máximo uma corrente de 1 A. Portanto, para evitar problemas, a fonte de alimentação foi configurada de modo a limitar a corrente e a tensão elétrica em 1 A e 1 V respectivamente, como ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Configuração para limitação de corrente e tensão.



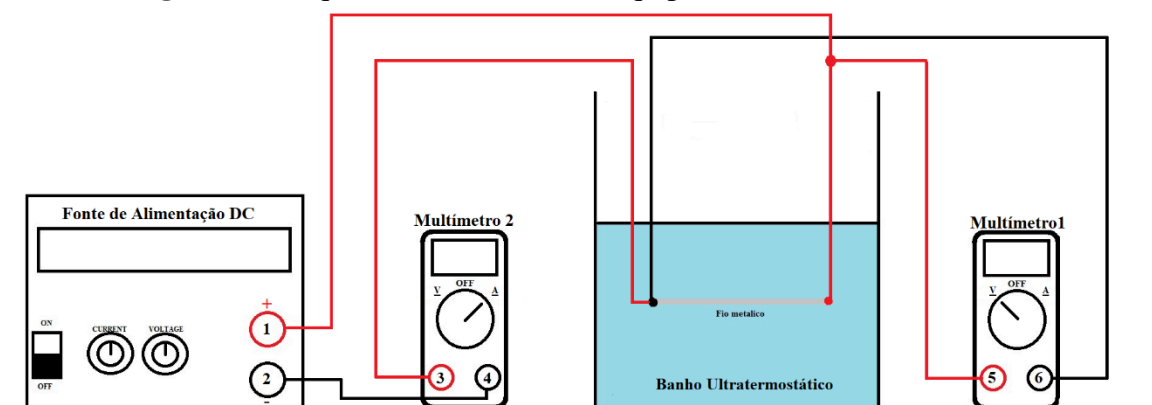
Fonte: Autoria própria, 2023.

Assim, utilizou-se o método dos 4 (quatro) fios para medir o valor da resistividade elétrica dos fios de Cu e de Al, já que ele possibilita uma maior precisão para medir resistência elétrica com valor inferior a $1\ \Omega$. Uma vez obtida a resistência elétrica do fio e conhecendo as dimensões dos fios (comprimento e área), pode-se calcular o valor da condutividade elétrica, utilizando a equação 6.

A montagem do circuito para o método dos 4 (quatro) fios foi realizada em 5 (cinco) passos:

- (I) O fio metálico foi inserido no equipamento de controle de temperatura, de modo a ficar completamente submerso;
- (II) Com a fonte desligada, conectou-se o cabo ligado ao terminal positivo da fonte em uma das extremidades do fio metálico;
- (III) Conectou-se o multímetro utilizado para fazer as medições de tensão elétrica em paralelo ao fio metálico. O cabo ligado ao positivo do multímetro deve ser conectado à mesma extremidade do fio metálico, onde está presente a conexão do positivo da fonte de alimentação, e o cabo ligado ao comum do multímetro é conectado na outra extremidade do fio metálico;
- (IV) O multímetro utilizado para medir corrente elétrica deve ser conectado em série com o fio metálico. Logo, deve-se conectar o cabo positivo do multímetro na extremidade do fio metálico oposta a conexão do fio com o positivo da fonte de alimentação, ou seja, deve-se conectar o positivo do multímetro medidor de corrente na mesma extremidade onde está conectado o comum do multímetro medidor de tensão;
- (V) Para fechar o circuito deve-se conectar o comum do multímetro medidor de corrente ao negativo da fonte de alimentação. O esquema da montagem, contendo todas as ligações do fio metálico e o equipamento pode ser visto na Figura 14. A Figura 15 mostra a montagem real realizada em laboratório.

Figura 14: Esquema de conexão dos equipamentos ao fio metálico.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 15: Sistema para ensaio de condutividade elétrica.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Os ensaios para ambos os fios foram realizados primeiramente a uma temperatura de 20°C, com diversas intensidades de corrente, para investigar a influência da corrente no teste. Para o início das medições, a corrente foi ajustada para 150 mA, com incrementos de 50 mA até a intensidade de 500 mA. Após este ponto, a corrente foi incrementada em 100 mA, até a intensidade final de 800 mA. Após a realização dos ensaios a temperatura de 20°C, foram realizados os ensaios também nas temperaturas de 30°C, 40°C, 50°C e 60°C.

Com os valores de tensões e correntes medidos pelos multímetros, pode-se calcular a resistência elétrica do fio metálico utilizando a lei de Ohm, descrita pela Equação 4. Após o cálculo da resistência elétrica, utiliza-se a Equação 6 para calcular a condutividade elétrica.

A NBR nº 6814, recomenda que as medições nos ensaios de condutividade sejam feitas rapidamente e com correntes não muito elevadas. Isso é recomendado pois um alto valor de corrente elétrica aplicado por um longo tempo modifica a temperatura do fio e, consequentemente, ocorre uma alteração na condutividade elétrica do fio.

Seguindo as recomendações da NBR nº 6814, as medições de corrente e tensão elétrica foram feitas rapidamente. Cada medição era feita em um tempo inferior a 20 (vinte) segundos, após a obtenção dos valores de tensão e corrente sobre os fios, a corrente elétrica fornecida era ajustada para a próxima intensidade de corrente a ser usada, após o ajusta, a corrente era bloqueada pela fonte, em seguida esperava-se cerca de 3 (três) minutos para garantir que os metais estavam na temperatura determinada pelo banho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Condutividade elétrica no fio de cobre

O cobre é um dos principais condutores elétricos utilizados atualmente, servindo como referência para comparação entre os valores de condutividade elétrica entre condutores. Além do Sistema Internacional de unidades (SI), escolheu-se a condutividade IACS desse material como referência para a realização deste trabalho. O Cu tem uma condutividade elétrica de 100% IACS a 20°C o que corresponde a 58 MS/m. Foram realizados dois ensaios para o fio comercial de Cu, os valores de condutividade elétrica obtidos durante um dos ensaios estão nas Tabelas 4 e 5. Na Tabela 4 os dados estão no SI, enquanto na Tabela 5 os dados estão no IACS.

Tabela 4: Resultados experimentais para a condutividade elétrica do fio Cu no SI.

Condutividade Elétrica (MS/m)					
Corrente (mA)	Temperatura				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
150	63,58	54,25	46,7	42,69	38,42
200	62,87	53,78	47,91	45,57	40,99
250	62,67	53,5	48,57	46,7	42,72
300	62,48	53,23	49,17	47,57	44,08
350	62,34	53,15	49,71	48,16	45,06
400	62,23	53,07	50,17	48,66	46,65
450	62,2	52,99	50,47	49,04	46,25
500	62,13	52,94	50,73	49,37	46,62
600	61,6	52,77	50,96	49,86	47,33
700	61,81	52,73	51,1	50,19	47,83
800	61,81	52,67	51,23	50,49	48,18

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 5: Resultados experimentais para a condutividade em elétrica % IACS do fio Cu.

Condutividade % IACS					
Corrente (mA)	Temperatura				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
150	109,62	93,53	80,51	73,60	66,24
200	108,40	92,72	82,60	78,57	70,67
250	108,05	92,24	83,74	80,52	73,65
300	107,86	91,78	84,78	82,02	76,00
350	107,72	91,64	85,70	83,03	77,69
400	107,29	91,50	86,50	83,90	80,43
450	107,24	91,36	87,01	84,55	79,74
500	107,12	91,28	87,46	85,12	80,38
600	106,21	90,98	87,86	85,97	81,60
700	106,57	90,91	88,10	86,53	82,47
800	106,57	90,81	88,32	87,05	83,07

Fonte: Autoria própria, 2023.

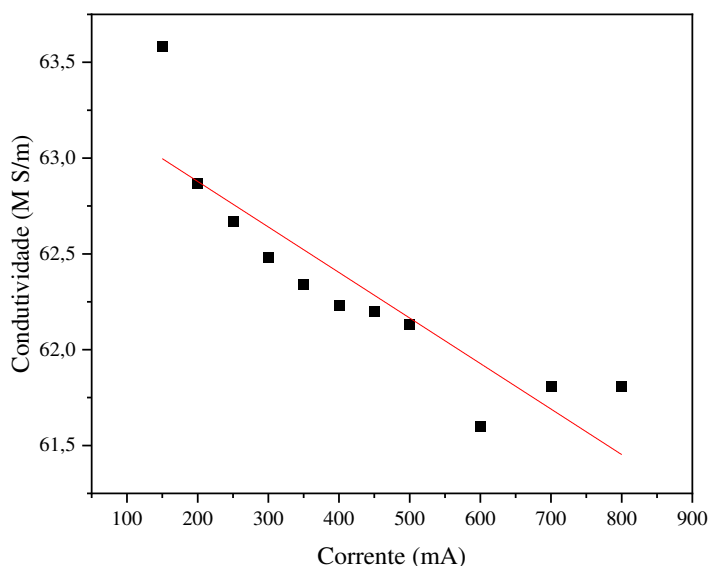
Comparando os valores presentes nas tabelas a 20°C com o valor de referência para o Cu 100% IACS (58 MS/m) tem-se um erro máximo de 9,62% para a corrente de 150 mA e um erro mínimo de 6,57% para uma corrente de 800 mA. Existem algumas possíveis razões que possam ter gerado essa diferença entre o valor teórico e o valor experimental, desde a composição química do fio utilizado, já que foi utilizado um fio de Cu comercial (não possui um elevado grau de pureza) e ambos os sistemas (SI e IACS) se baseiam em ensaios realizados com condutores com elevado grau de pureza. Outra fonte de erro é o nível de precisão dos equipamentos utilizados para realizar as medições de tensão e corrente, a influência dos cabos conectores e o próprio erro humano na realização do experimento. Porém, como o maior erro encontrado foi inferior a 10%, os resultados são considerados válidos, pois sabe-se que as considerações das equações analíticas também inferem erros devido suas hipóteses e simplificações.

Na Tabela 4, observa-se uma redução na condutividade elétrica, quando se mantem os valores de temperatura fixa e se varia a intensidade da corrente elétrica, para as temperaturas de 20°C e 30°C, porém para as temperaturas de 40°C até 60°C ocorre um aumento no valor da condutividade elétrica do fio de cobre. Serão necessários novos estudos para se ter uma melhor compreensão dos dados obtidos. Porém, segundo Schmidt (1979) a curva da resistência elétrica pela temperatura de um material condutor não é uma curva linear, mas ela possui pontos de linearidade, como pode ser visto na Figura 3. Logo devido ao aumento da temperatura do ensaio

e da intensidade da corrente, os dados obtidos podem se encontrar na região não linear do gráfico, o que esse comportamento é uma característica do Cu.

Já quando se mantém a corrente elétrica fixa e se varia o valor da temperatura, a condutividade elétrica do fio de cobre manteve a mesma característica de redução de valor conforme a temperatura era elevada. O Gráfico 1 mostra a curva da condutividade pela corrente elétrica para uma temperatura fixa de 20°C no SI.

Gráfico 1: Comportamento da condutividade elétrica do Cu x corrente elétrica, com temperatura fixa em 20°C.



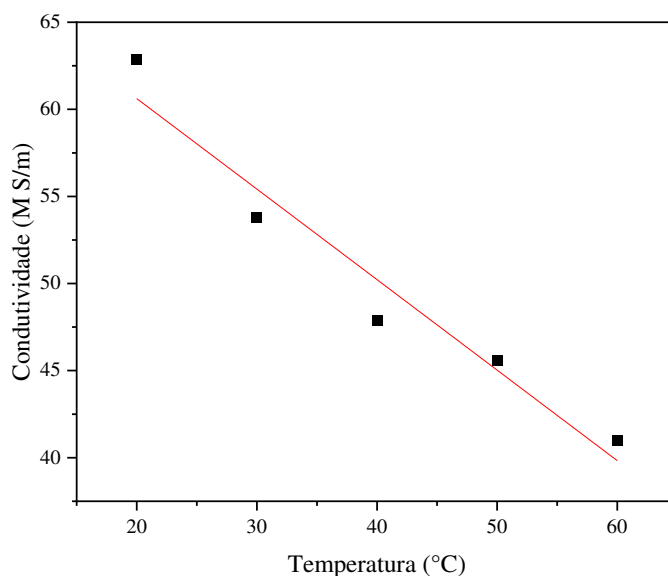
Fonte: Autoria própria, 2023.

O gráfico mostra uma diminuição na condutividade elétrica à medida que a corrente aumenta. A redução da condutividade elétrica é devido ao fato de que mesmo em um ambiente com temperatura controlada o Cu aquece, pois, seus elétrons estão sendo excitados por uma fonte externa, o que aumentará a amplitude de movimento de vibração dos elétrons reduzindo sua condutividade. Se o fio de Cu não estivesse em um ambiente com uma temperatura controlada sua queda na condutividade seria ainda mais elevada, pois o material irá converter parte da energia elétrica em térmica por meio do efeito Joule, o que resultaria em uma mudança expressiva na temperatura e na condutividade do Cu, o controle de temperatura ajuda a reduzir o impacto causado.

5.2. Variação da condutividade elétrica no fio cobre pela temperatura

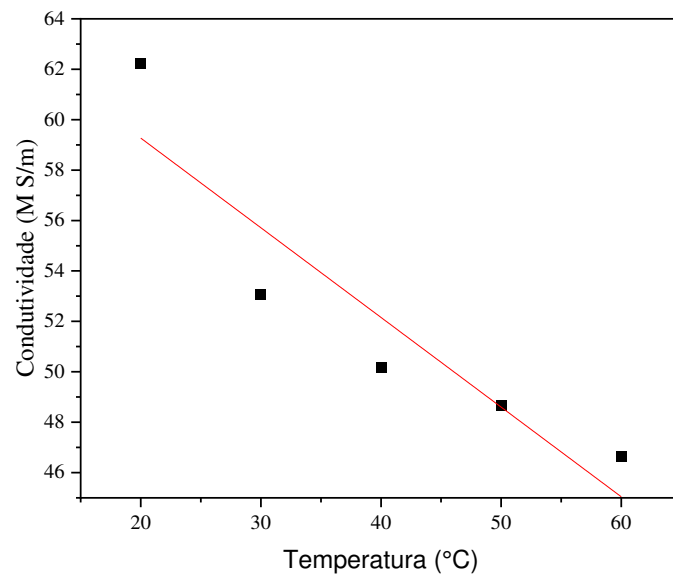
Observando os valores de condutividade elétrica para o fio de Cu comercial nas Tabelas 4 e 5, para todos os valores de correntes investigados. Nota-se que com o aumento da temperatura existe uma redução na condutividade do fio de Cu. Isso significa que a resistividade elétrica e consequentemente a resistência elétrica do fio aumentou. O comportamento da condutividade devido a variação da temperatura, quando se mantém as correntes fixas (200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA), pode ser visto nos Gráficos de 2 a 5. O Gráfico 6 traz a junção de todas as curvas dos gráficos anteriores.

Gráfico 2: Variação da condutividade no Cu pela temperatura com corrente fixa 200 mA.



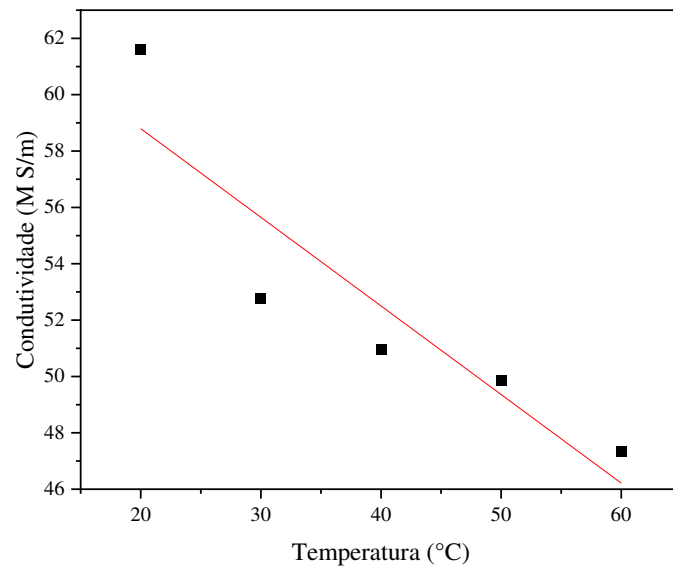
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 3: Variação da condutividade no Cu x temperatura com corrente fixa 400 mA:



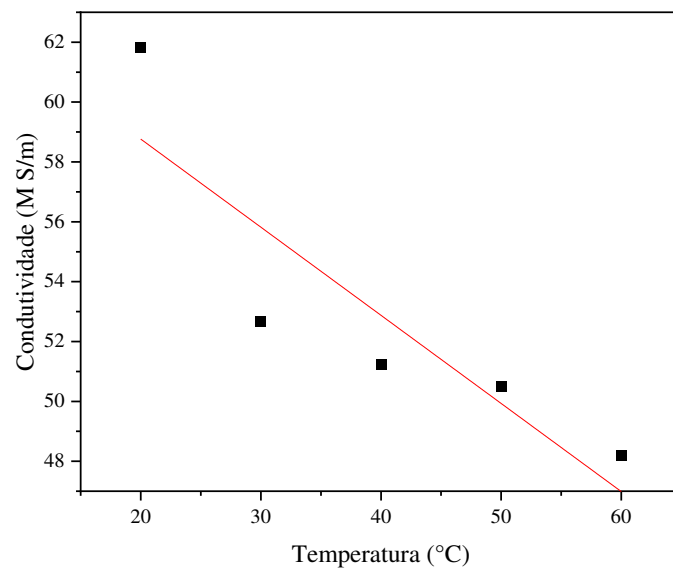
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 4: Variação da condutividade no Cu x temperatura com corrente fixa 600 mA.



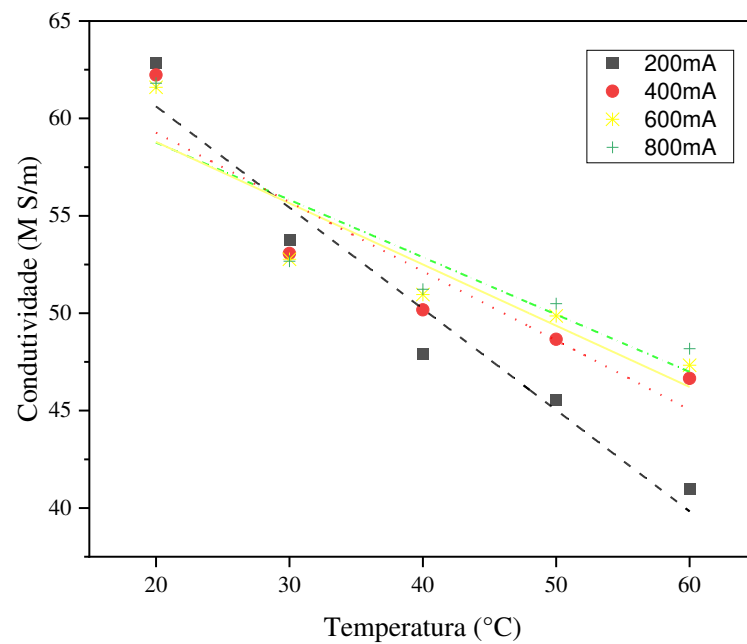
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 5: Variação da condutividade no Cu x temperatura com corrente fixa 800 mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 6: Condutividade elétrica do Cu x temperatura, para correntes de 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

O Gráfico 6 traz todas as curvas sobrepostas, é fácil de observar graficamente a redução da condutividade elétrica em todas as curvas, quando ocorre o aumento da temperatura do ensaio. Isso ocorre devido ao grau de agitação das moléculas que aumentam a dificuldade da condução de corrente elétrica. Analisando a condutividade de todas as curvas à temperatura de 20°C, percebe-se que conforme a intensidade da corrente aumenta, a curva é deslocada para baixo nas temperaturas de 20°C e 30°C, isso ocorre porque a potência dissipada se eleva com o quadrado da corrente, logo quanto maior a corrente nessas temperaturas, mais potência o fio tem que dissipar por efeito Joule, o que leva ao aquecimento do condutor e consequentemente a diminuição de sua condutividade elétrica. Esse comportamento da condutividade elétrica do Cu está de acordo com a literatura. Porém, para as temperaturas de 40°C até 60°C existe uma inversão, nota-se que conforme a intensidade da corrente aumenta o valor da condutividade elétrica também se eleva.

5.3. Variação da resistência elétrica do cobre pela temperatura

Na Tabela 6, observa-se todos os valores de resistência elétrica obtidos durante o ensaio de condutividade.

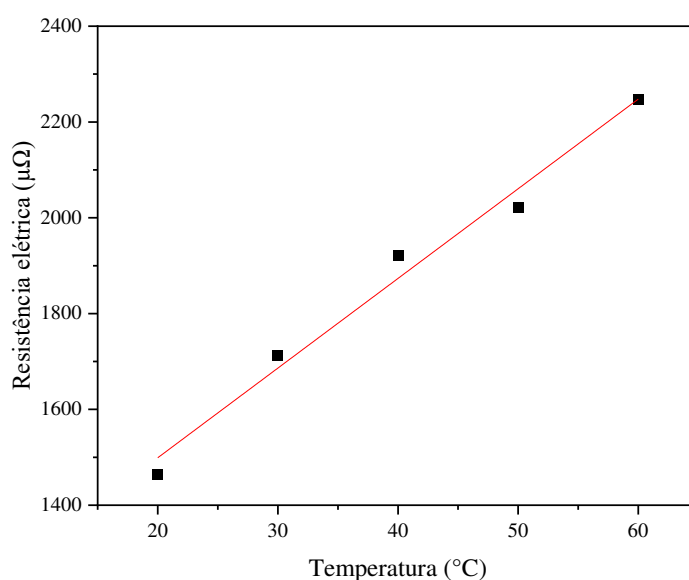
Tabela 6: Valores experimentais de resistência elétrica do Cu obtidos no ensaio de condutividade.

Corrente (mA)	Resistência elétrica ($\mu\Omega$)					Variação ($R_{60^\circ\text{C}} - R_{20^\circ\text{C}}$)
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	
150	1448,60	1697,74	1972,02	2157,12	2396,80	948,20
200	1464,87	1712,43	1922,12	2020,96	2246,63	781,76
250	1469,65	1721,25	1896,21	1972,06	2155,69	686,04
300	1474,02	1730,00	1872,92	1936,13	2089,16	615,14
350	1477,35	1732,80	1852,70	1912,10	2043,96	566,61
400	1480,00	1735,33	1835,66	1892,63	2017,49	537,49
450	1480,66	1738,07	1824,64	1877,91	1991,12	510,46
500	1482,39	1739,56	1815,45	1865,49	1975,58	493,19
600	1495,00	1745,21	1807,27	1846,97	1945,97	450,97
700	1490,00	1746,58	1802,20	1835,07	1925,39	435,39
800	1490,00	1748,47	1797,72	1823,97	1911,49	421,49

Fonte: Autoria própria, 2023.

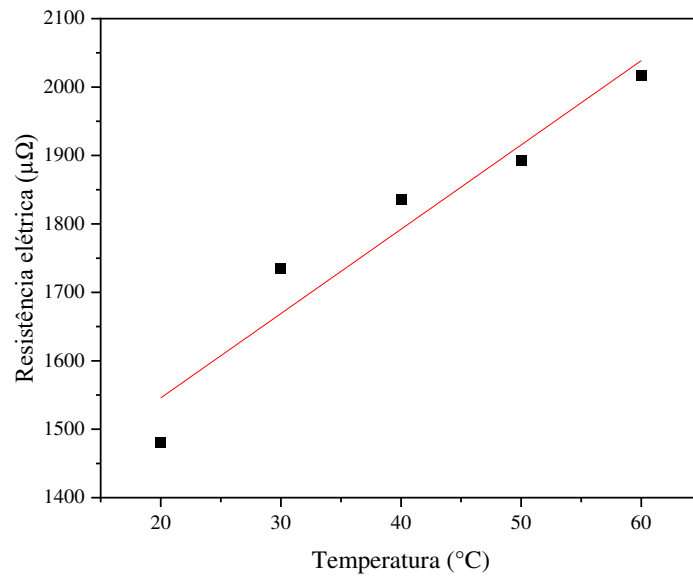
Analisando-se os valores da tabela, é perceptível o aumento da resistência elétrica quando a temperatura foi elevada, a coluna de variação da tabela mostra o quanto a resistência elétrica aumentou com a temperatura. Os Gráficos de 7 a 10 mostram a variação da resistência elétrica para o fio cilíndrico de Cu utilizado no ensaio em função da temperatura, para as correntes fixadas em 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA. O Gráfico 11 traz todas as curvas dos gráficos anteriores.

Gráfico 7: Variação da resistência elétrica no fio de Cu x temperatura, com corrente fixa em 200 mA.



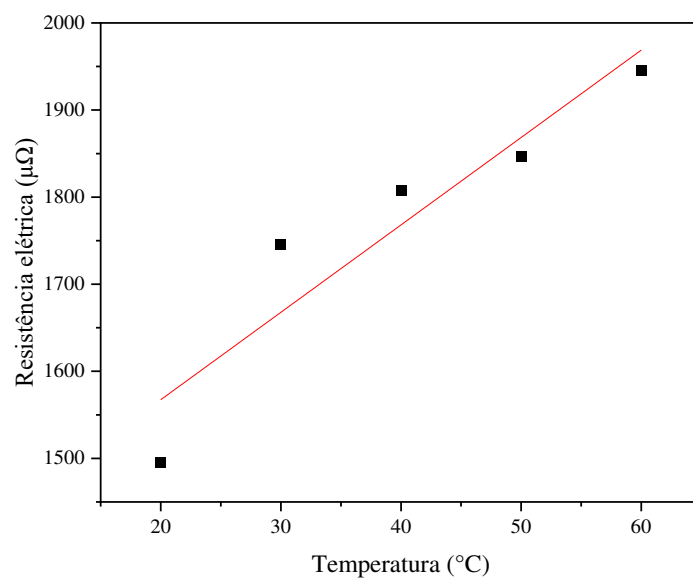
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 8: Variação da resistência elétrica do Cu x temperatura, com corrente fixa em 400 mA.



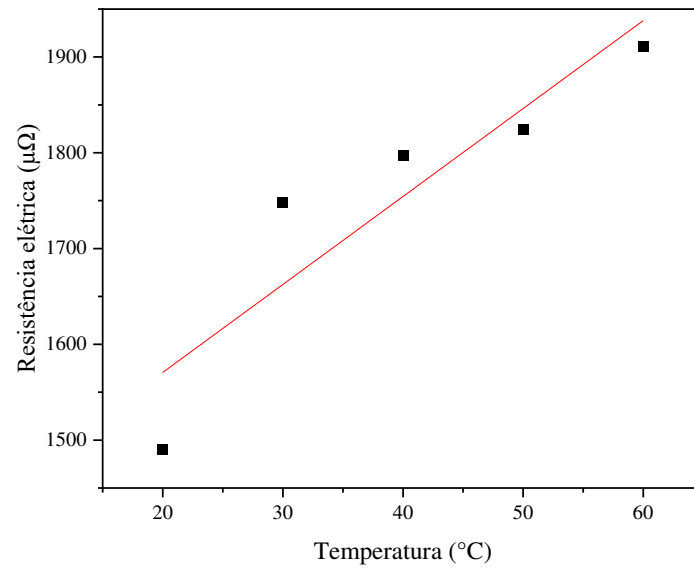
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 9: Variação da resistência elétrica do Cu x temperatura, com corrente fixa em 600 mA.



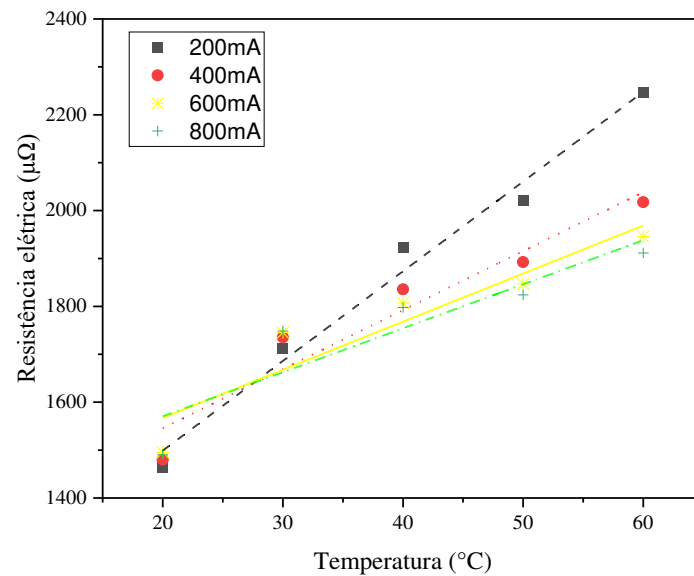
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 10: Variação da resistência elétrica do Cu x temperatura, com corrente fixa em 800 mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 11: Resistência elétrica do Cu x temperatura, para correntes de 200mA, 400mA, 600mA e 800mA



Fonte: Autoria própria, 2023.

Observando os gráficos nota-se a reta crescente que indica o aumento da resistência elétrica em decorrência do aumento de temperatura.

Como os valores da condutividade elétrica apresentaram dois comportamentos distintos para as temperaturas de 20°C e 30°C e as temperaturas de 40°C até 60°C em função da intensidade da corrente elétrica, onde a primeira possui um comportamento decrescente e a segunda crescente, isso se reflete nos valores da resistência elétrica presente na Tabela 6, como nas curvas do Gráfico 11, onde para as temperaturas de 20°C e 30°C ela aumenta e nas temperaturas de 40°C a 60°C ela diminui.

5.4. Condutividade elétrica no fio do alumínio

Todos os valores de condutividade obtidos durante o processo de ensaio com o fio de Al estão disponíveis na Tabela 7 no SI e na Tabela 8 no %IACS.

Tabela 7: Resultados experimentais para a condutividade elétrica do Al no SI.

Condutividade Elétrica (MS/m)					
Corrente	Temperatura				
(mA)	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
150	37,48	35,48	33,20	30,06	30,60
200	36,49	35,03	33,17	30,88	30,57
250	35,94	34,78	33,02	31,05	30,60
300	36,10	34,63	32,91	31,15	30,64
350	35,96	34,70	32,91	31,21	30,68
400	35,77	34,39	32,84	31,36	30,66
450	35,63	34,32	32,87	31,33	30,57
500	35,61	34,27	32,82	31,37	30,44
600	35,48	34,18	32,73	31,41	30,53
700	35,40	34,12	32,74	31,46	30,49
800	35,37	34,07	32,68	31,44	30,51

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 8: Resultados experimentais para a condutividade elétrica em % IACS do Al.

Condutividade % IACS					
Corrente (mA)	Temperatura				
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
150	64,58	61,14	57,21	51,8	52,73
200	62,88	60,36	57,16	53,21	52,68
250	61,93	59,93	56,90	53,50	52,73
300	62,21	59,67	56,71	53,68	52,80
350	61,96	59,79	56,71	53,78	52,87
400	61,64	59,26	56,59	54,04	52,83
450	61,40	59,14	56,64	53,99	52,68
500	61,36	59,05	56,55	54,06	52,45
600	61,14	58,90	56,40	54,12	52,61
700	61,00	58,79	56,42	54,21	52,54
800	60,95	58,71	56,31	54,18	52,57

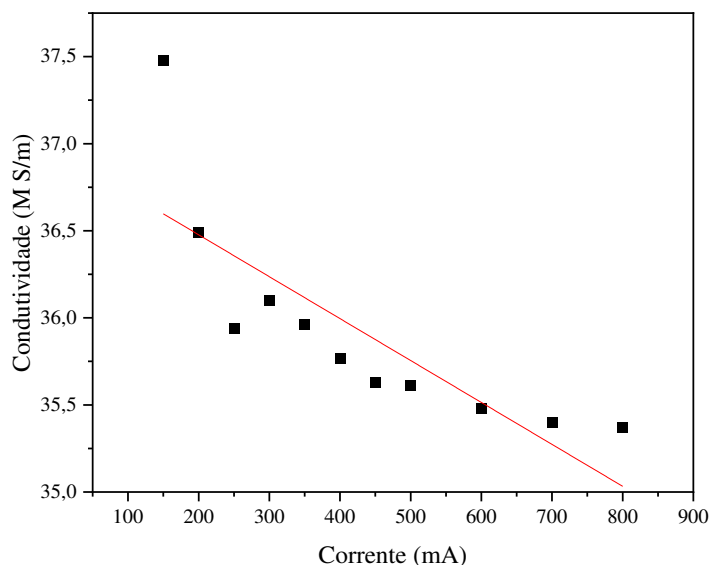
Fonte: Autoria própria, 2023.

Comparando os valores experimentais da condutividade elétrica, obtidos a temperatura de 20°C, presentes nas Tabelas 7 e 8 com o valor de referência para o Cu de 61% IACS que é equivalente 35,4 MS/m no SI, tem-se um erro máximo de 5,90% para a corrente de 150 mA e um erro mínimo de 0,02% para uma corrente de 700 mA.

Todos os valores de condutividade elétrica do Al (assim como para o Cu) apresentam uma redução em seu valor quando se mantém a corrente fixa e se aumenta o valor da temperatura. Deforma semelhante ao ocorrido com o fio de Cu, a condutividade elétrica do fio de Al mostra dois comportamentos diferentes quando se mantém fixa a temperatura e se aumenta a intensidade da corrente elétrica. Para as temperaturas de 20°C até 40°C a condutividade elétrica apresenta uma redução em seu valor devido a elevação da intensidade da corrente. Já para as temperaturas de 50°C e 60°C o fio de Al apresenta uma condutividade elétrica praticamente constante, com pequenas variações de elevação (em sua maior parte) de seu valor de condutividade elétrica. Serão realizados novos ensaios para analisar o comportamento da condutividade elétrica de outros fios de Al.

O Gráfico 12 mostra a curva da condutividade pela corrente elétrica em uma temperatura fixa de 20°C no SI.

Gráfico 12: Comportamento da condutividade elétrica do Al x corrente elétrica, com temperatura fixa em 20°C.



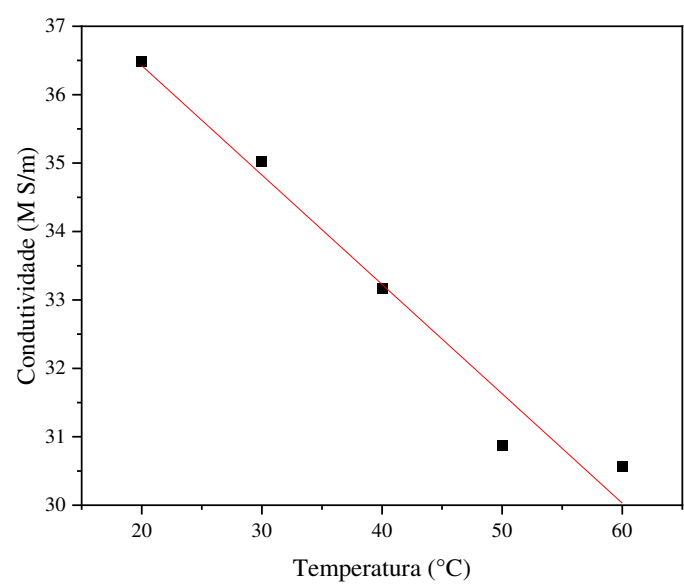
Fonte: Autoria própria, 2023.

Comparando o Gráfico 12 com o Gráfico 1, nota-se que ambos possuem o mesmo comportamento, a condutividade elétrica diminui com o aumento da corrente elétrica, para uma temperatura fixa de 20°C, a explicação para essa queda da condutividade elétrica do Al é análoga a explicação apresentada para o fio de Cu.

5.5. Variação da condutividade elétrica do fio de alumínio pela temperatura

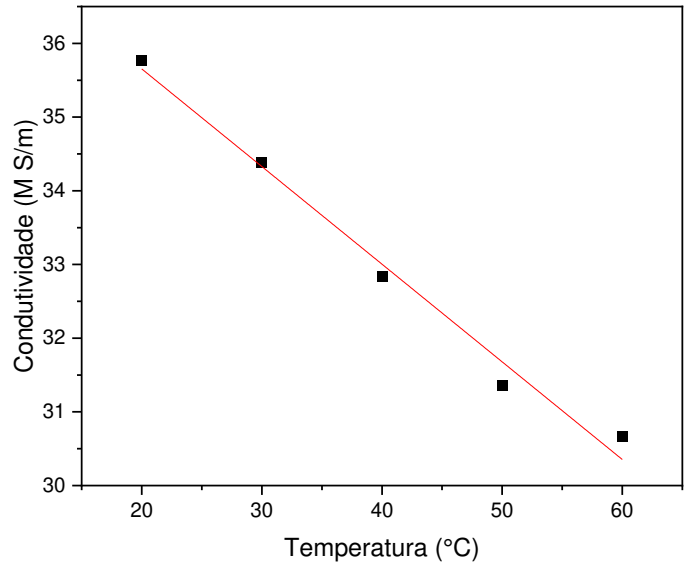
Observando os valores de condutividade elétrica obtidos experimentalmente para o Al na Tabela 7 (ou Tabela 8), para todos os valores de corrente elétricas utilizados, nota-se que o Al também sofre uma redução em seu valor de condutividade elétrica com o aumento da temperatura, aumentando consequentemente a resistência elétrica do fio. O comportamento da condutividade devido a variação da temperatura, quando se mantém a corrente fixa, pode ser visto nos Gráficos de 13 a 16, para correntes fixas de 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA respectivamente.

Gráfico 13: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 200 mA.



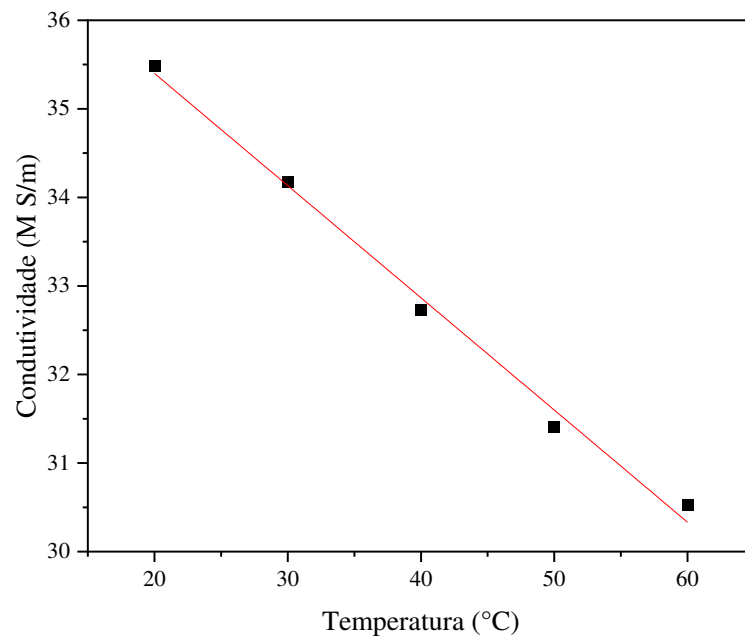
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 14: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 400 mA.



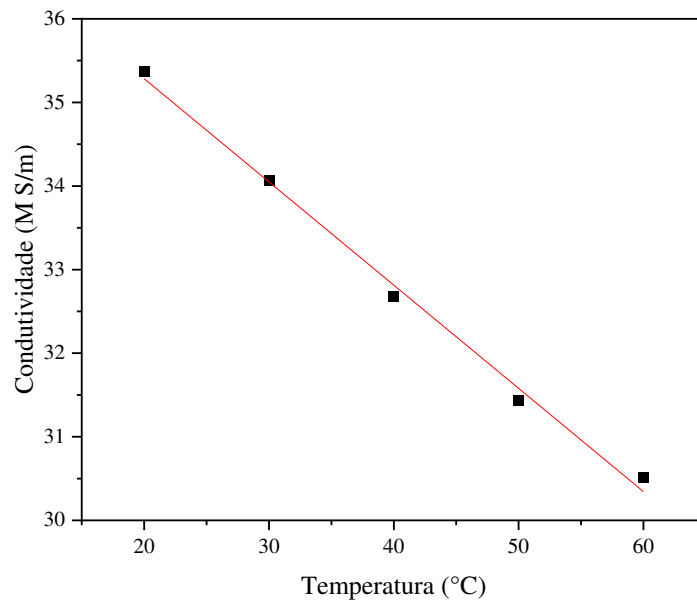
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 15: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 600 mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

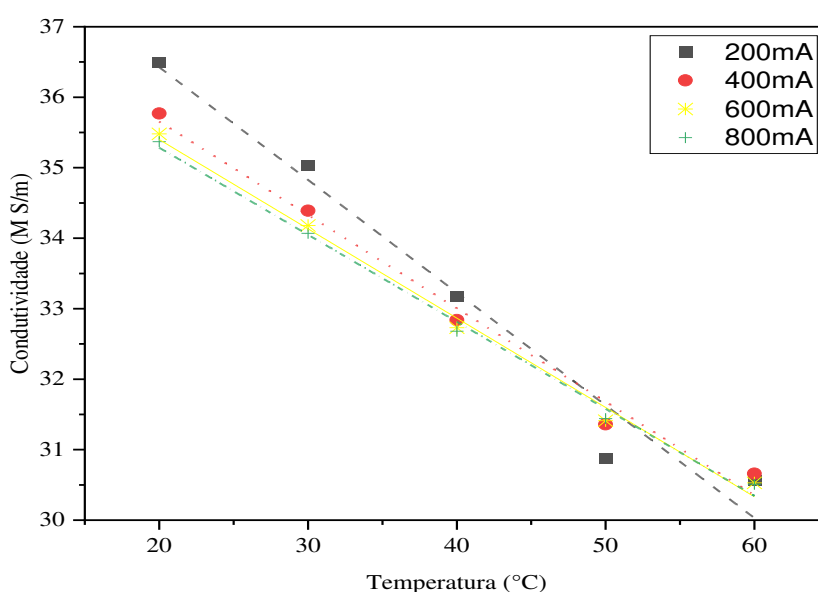
Gráfico 16: Variação da condutividade no Al x temperatura com corrente fixa 800 mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Assim como os gráficos para o fio de Cu, todos os gráficos para o fio de Al apresentam curvas decrescentes, que significa uma redução no valor da condutividade elétrica do condutor. O comportamento da condutividade elétrica do Al está em conformidade com o que é descrito na literatura. O Gráfico 17 reúne todas as curvas para as correntes fixas em 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA pela variação da temperatura.

Gráfico 17: Condutividade elétrica do Al x temperatura, para correntes de 200mA, 400mA, 600mA e 800mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Nota-se que as curvas sempre se iniciam uma a baixo da outra, assim como nas curvas para o fio de Cu, logo a curva de 200 mA possui uma condutividade maior que a de 400mA a 20°C, isso se repete para todas as outras curvas (600 mA e 800 mA). Esse deslocamento ocorre devido a intensidade da corrente elétrica, quanto maior a intensidade mais potência ele dissipa por efeito joule, consequentemente maior e a temperatura do fio de Al, com o aumento da temperatura ocorre uma queda no valor da resistividade. Logo é notável a igualdade no comportamento dos fios de Cu e Al. O gráfico mostra a pouca variação para os valores de condutividade elétrica do alumínio, para as temperaturas de 50°C e 60°C, como já mencionado anteriormente.

5.6. Variação da resistência elétrica do alumínio pela temperatura

Na Tabela 9, observa-se os valores experimentalmente da resistência elétrica do fio de Al, obtidos por meio do ensaio de condutividade e utilização da Equação 4.

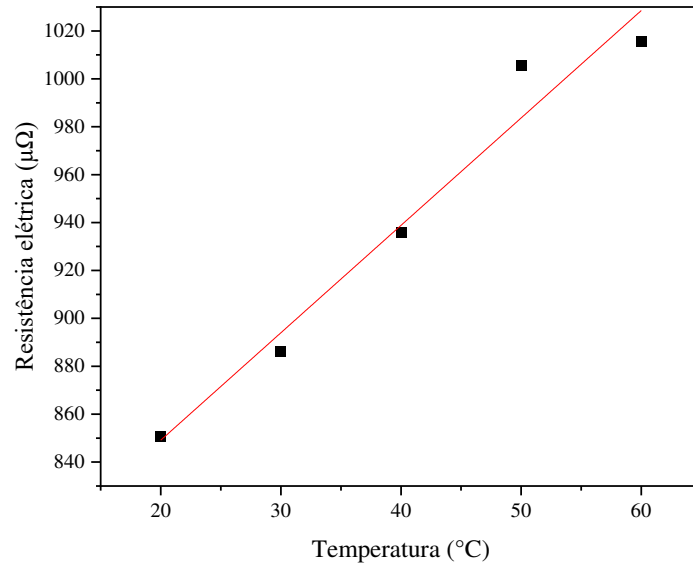
Tabela 9: Valores experimentais de resistência elétrica do Al obtidos no ensaio de condutividade.

Corrente (mA)	Resistência elétrica ($\mu\Omega$)					Variação ($R_{60^\circ\text{C}} - R_{20^\circ\text{C}}$)
	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	
150	828,32	875,08	935,20	1014,69	1014,69	186,37
200	850,85	886,33	935,94	1005,50	1015,51	164,66
250	864,00	892,71	940,38	1000,00	1020,00	156,00
300	860,00	896,67	943,33	996,67	1013,33	153,33
350	863,35	894,80	943,40	994,85	1012,01	148,66
400	867,93	902,95	945,47	990,00	1012,75	144,82
450	871,30	904,65	944,44	991,11	1015,56	144,26
500	872,00	906,00	946,00	989,80	1020,00	148,00
600	875,14	908,48	948,49	988,50	1016,84	141,70
700	877,02	910,00	948,44	987,00	1018,43	141,41
800	877,72	911,36	950,00	987,50	1017,50	139,78

Fonte: Autoria própria, 2023.

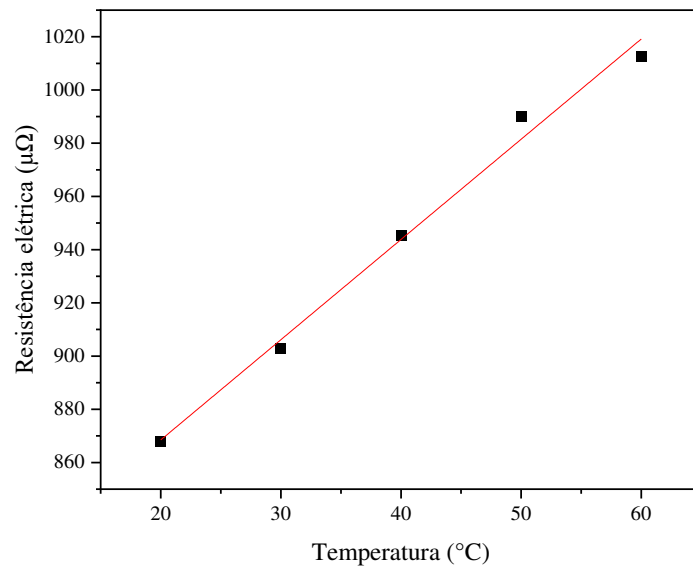
Analisando-se os valores da Tabela 9, nota-se que assim como aconteceu no Cu, o valor da resistência elétrica aumenta com a elevação da temperatura, mantendo-se a intensidade de corrente elétrica fixa. Como a condutividade elétrica praticamente constante nas temperaturas de 50°C e 60°C, quando se mantém a intensidade da corrente elétrica fixa, os valores de resistência elétrica também permanecem praticamente constante, logo apresentam uma pequena variação em seus valores. Os Gráficos 18 ao 21 mostram o comportamento da resistência elétrica, para correntes fixas em 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800mA. No Gráfico 22 tem-se a união de todas as curvas em um único plano cartesiano.

Gráfico 18: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 200mA.



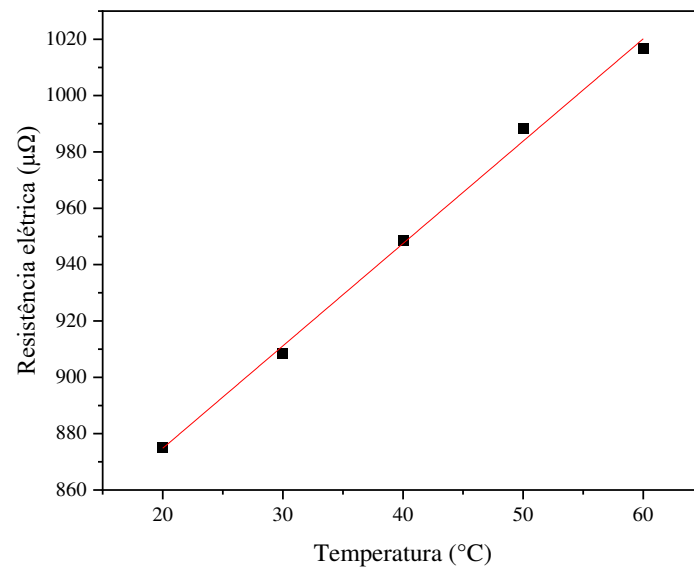
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 19: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 400mA.



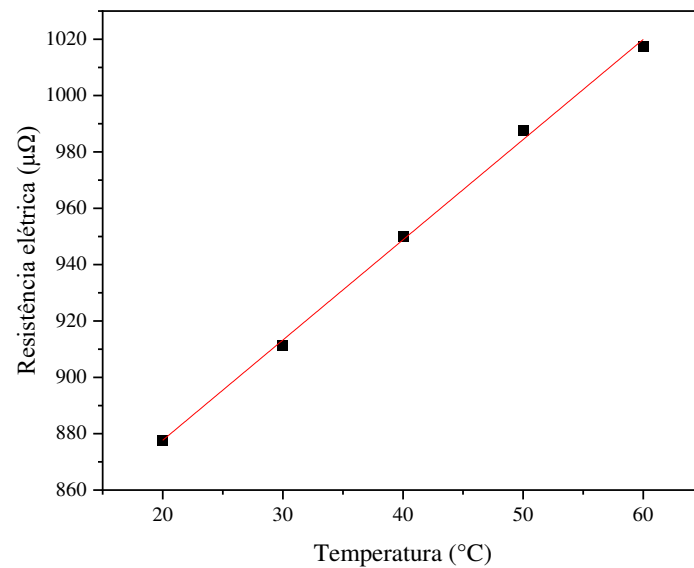
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 20: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 600mA.



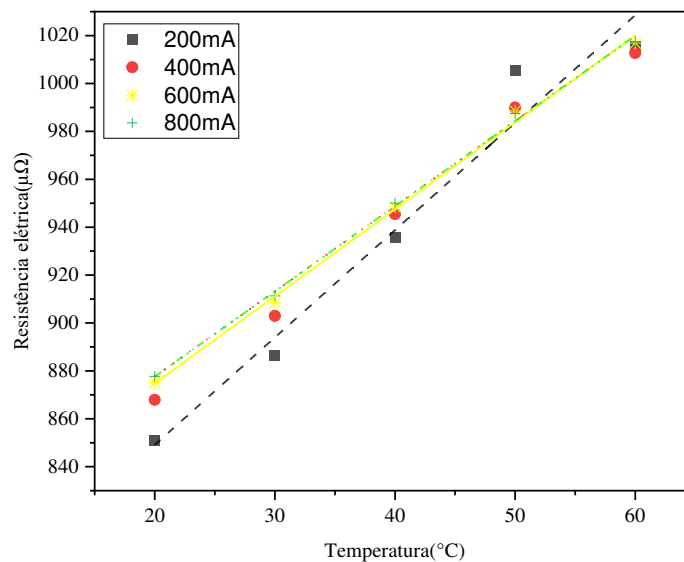
Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 21: Variação da resistência elétrica do Al x temperatura, com corrente fixa em 800mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Gráfico 22: Resistência elétrica do Cu x temperatura, para correntes de 200mA, 400mA, 600mA e 800mA.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Analisando o Gráfico 22, tem-se dois comportamentos distintos para as temperaturas de 20°C, 30°C e 40°C e as temperaturas de 50°C e 60°C em função da intensidade da corrente elétrica, onde a primeira possui um comportamento decrescente e a segunda quase constante, como se a condutividade estivesse estabilizada. Serão realizados novos ensaios para diferentes fios de alumínio posteriormente, para se tentar entender melhor a razão desses dois tipos de comportamento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A condutividade elétrica obtida para o cobre e o alumínio utilizando o método experimental apresentado neste trabalho proporcionou dados muito próximos dos valores presentes na literatura. Tanto do sistema internacional de unidade quanto no padrão internacional de cobre recozido, o erro entre os valores obtidos experimentalmente e os presentes na literatura foram inferiores a 10%, para ambos os metais a uma temperatura de ambiente de 20°C. Os dados obtidos em todos os ensaios de condutividade servem como forma de validação para o método experimental de medição de condutividade elétrica dos metais.

Os dados experimentais mostram claramente uma diminuição da condutividade elétrica do cobre e do Alumínio conforme a temperatura era elevada, isso confirma o fato de que a condutividade elétrica está relacionada com a temperatura, embora a temperatura não seja explicitamente mencionada na equação como um parâmetro. Conforme a temperatura do líquido utilizado no banho ultratermostático era elevada, os elétrons presentes em ambos os metais recebiam cada vez mais energia, que faziam com que eles vibrassem com uma amplitude maior gerando mais colisões e aumentando o nível de dificuldade da passagem da corrente elétrica. Esse comportamento é facilmente observado ao se analisar os gráficos de condutividade pela temperatura para as correntes de 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800 mA para ambos os metais, mostrando que a condutividade elétrica do cobre e do alumínio apresentam um mesmo comportamento para o aumento da temperatura, mantendo-se uma corrente elétrica fixa. Serão realizados novos ensaios com diferentes fios de alumínio e cobre para se entender melhor o comportamento que ambos demonstraram, quando se mantém a temperatura fixa e se eleva a intensidade da corrente elétrica.

A condutividade elétrica está inversamente relacionada com resistência elétrica como pode ser visto ao comparar os gráficos da condutividade elétrica pela temperatura com os gráficos da resistência elétrica pela temperatura para as correntes de 200 mA, 400 mA, 600 mA e 800mA, conforme a temperatura era aumentada, também ocorria uma elevação no valor da resistência elétrica, já a condutividade elétrica ia diminuindo. Será investigado em trabalhos posteriores o motivo da alteração do comportamento da condutividade elétrica em determinadas faixas de temperatura.

O método garante que o grupo de pesquisa em Grupo Multidisciplinar em Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico com Materiais Inteligentes da UFERSA Caraúbas possa dar continuidade a suas pesquisas de desenvolvimento de novas ligas utilizando esse método de

caracterização da condutividade elétrica de diversas ligas, basta manter o padrão dos fios utilizados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. Características Químicas e Físicas. *In: Características Químicas e Físicas*. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>. Acesso em: 5 jun. 2023.

ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. ALUMÍNIO: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS: LIGAS. *In: ABAL, Associação Brasileira do Alumínio. ALUMÍNIO: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E FÍSICAS: LIGAS*. [S. l.], 2017. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/>. Acesso em: 7 jun. 2023.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 5111: **Fios de cobre nus, de seção circular, para fins elétricos – Especificação**. 1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 5118: **Fios de Alumínio nus, de seção circular, para fins elétricos – Especificação**. 1985.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 6814: **Fios e cabos elétricos - Ensaio de resistência elétrica**. 1986.

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013. 874 p. v. 2.

ALUMÍNIO, Revista. **Especial Mineração de Bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil**. [S. l.], 30 set. 2019. Disponível em: <https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/>. Acesso em: 5 jun. 2023.

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS E TEORIA DE CIRCUITOS**. 11. ed. [S. l.]: Pearson Education, 2013. 784 p.

BROWN, Theodore L.; LEMAY, H. Eugene; BURSTEN, Bruce E.; MURPHY, Catherine J.; WOODWARD, Patrick M.; STOLTZFUS, Matthew W. **QUÍMICA: ACIÊNCIA CENTRAL**. 13. ed. [S. l.]: Abdr, 2016. 1226 p.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, Jr. David G. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS: UMA INTRODUÇÃO**. 8. ed. [S. l.]: Gen LTC, 2012. 845 p.

CORDEIRO, Mauricio. Diferença de RTD 2 fios, 3 fios e 4 fios. *In: Diferença de RTD 2 fios, 3 fios e 4 fios*. [S. l.], 27 dez. 2019. Disponível em: <https://mauriciooscordeiro.wixsite.com/instrumentacao/post/diferen%C3%A7a-de-rtd-2-fios-3-fios-e-4-fios>. Acesso em: 5 jun. 2023.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física - Vol. 3 - Eletromagnetismo, 9ª edição**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012.

HAYT JR., William H.; BUCK, Jonh A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 597 p.

JOHNSON, David E.; HILBURN, Jonh L.; JOHNSON, Johnny R. **Fundamentos de Análise de Circuitos Elétricos Capa comum**. 4. ed. [S. l.]: LTC, 1993. 552 p.

LOPES, Guilherme Henrique Molinari. **ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA POR MEIO DO ENSAIO DE CORRENTES PARASITAS DA LIGA WASPALOY SUBMETIDA A TRATAMENTO TÉRMICO**. Orientador: Dr. Anderson Marenda Pukasiewicz. 2018. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2018. Disponível em: https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16276/1/PG_DAMEC_2018_2_18.pdf. Acesso em: 9 jun. 2023.

MESQUITA, Almir Zacarias. **PROJETO DE UM INSTRUMENTO ELETRÔNICO PARA TESTES PELO MÉTODO DE CORRENTES DE FOUCAUL**. Orientador: Adolpho Soares. 1981. 135 p. Tese (Ciências) - Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1981. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/13/692/13692620.pdf. Acesso em: 9 jun. 2023.

NUNES, Ana Gabriele Pereira. **ESTUDO DA PRECIPITAÇÃO DE ELEMENTOS DE TRANSIÇÃO ATRAVÉS DA ADIÇÃO DE BORO PARA MELHORAR A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DE LIGAS DE ALUMÍNIO**. 2014. 24 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas - MG, 2014.

NUSSENZVEIG, H. Moyses. **CURSO DE FÍSICA BÁSICA: Eletromagnetismo**. 1. ed. [S. l.]: Edgard Blucher, 1997. 323 p. v. 3.

OLIVEIRA, Kleber Bittencourt. **ESTUDO DA EXTRAÇÃO DE COBRE UTILIZANDO CONTACTORES COM MEMBRANAS COMO ALTERNATIVA AO PROCESSO CONVENCIONAL DE EXTRAÇÃO POR SOLVENTE**. 2013. 142 p. Tese (Doutorado em engenharia de Recursos Naturais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais, Belém, 2013. Disponível em: <https://proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Kleber.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2023.

ONDER, Vanessa Dall. **ANÁLISE DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7050 NA CONDIÇÃO DE TRATAMENTO TÉRMICO DE ENVELHECIMENTO INTERROMPIDO**. Orientador: Juliana De Paula Martins. 2015. 34 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16457/1/PG_COENQ_2015_1_05.pdf. Acesso em: 7 jun. 2023.

PANDA, Sneha. Medição da resistência do fio Kelvin 4: 11 fatos importantes. *In: Medição da resistência do fio Kelvin 4: 11 fatos importantes*. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://pt.lambdageeks.com/kelvin-4-wire-resistance-measurement-kelvin-bridge/>. Acesso em: 21 maio 2023.

ROBERT, Renê. Efeito Pelicular. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s. l.], v. 22, p. 1-5, 2 jun. 2000. Disponível em: http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_285.pdf. Acesso em: 13 out. 2023.

RODRIGUES, Mônica Aparecida; SILVA, Priscila Pereira; GUERRA, Wendell. **Elemento Químico: Cobre**. In: ELEMENTO Químico: Cobre. [S. l.: s. n.], 2012. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc34_3/10-EQ-37-10.pdf. Acesso em: 31 maio 2023.

SCHLESINGER, M. E., KING, M. J., SOLE, K. C., DAVENPOR, W. G., 2011, **Extractive Metallurgy of Copper**, Elsevier B.V, 5st ed., Amsterdam, The Netherlands.

SCHMIDT, Walfredo. **Materiais Elétricos: Volume I** condutores e semicondutores. 2. ed. [S. l.: s. n.], 1979.

SILVA, Abel Garcia Gonçalves da. **Cadeia Produtiva do Cobre**. Orientador: Rísia Magriotis Papini. 2011. 89 p. Trabalho de conclusão de curso (Curso de especialização em engenharia de recursos minerais) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C9GJ8/1/monografia_benef_min_cu_abel_risia_ufmg.pdf. Acesso em: 8 out. 2023

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros: Eletricidade e Magnetismo, Óptica**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 556 p. v. 2.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. **FÍSICA III: Eletromagnetismo**. 14. ed. [S. l.]: Pearson Education, 2016. 490 p. v. 3.