



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS SÃO RAIMUNDO NONATO
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA**

KEYLA DOS SANTOS COSTA

**ANÁLISE TEÓRICA DOS ESPECTROS DE IMPEDÂNCIA E FASE DE UM
SISTEMA DE DOIS TERMINAIS BASEADA NO MODELO DE CIRCUITO
EQUIVALENTE $R \parallel (R||C)$**

SÃO RAIMUNDO NONATO

2025

KEYLA DOS SANTOS COSTA

ANÁLISE TEÓRICA DOS ESPECTROS DE IMPEDÂNCIA E FASE DE UM SISTEMA
DE DOIS TERMINAIS BASEADA NO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE $R||C$ -
(R||C)

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Licenciatura em Física
do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Piauí, Campus São Raimundo
Nonato.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Severino Mendes de
Araújo

SÃO RAIMUNDO NONATO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Costa, Keyla dos Santos

C837a Análise teórica dos espectros de impedância e fase de um sistema de dois terminais baseada no modelo de circuito equivalente $R_s - (R||C)$ / Keyla dos Santos Costa. - 2025.
29 p.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus São Raimundo Nonato, 2025.

Orientador : Prof Dr. Guilherme Severino Mendes de Araújo.

1. espectroscopia de impedância elétrica. 2. circuito equivalente. 3. impedância complexa. 4. dispositivos de dois terminais. I. Título.

CDD - 530

Elaborado por Uliscley Silva Gomes CRB 15/938

KEYLA DOS SANTOS COSTA

ANÁLISE TEÓRICA DOS ESPECTROS DE IMPEDÂNCIA E FASE DE UM SISTEMA
DE DOIS TERMINAIS BASEADA NO MODELO $R \parallel C$ - $(R||C)$

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Licenciatura em Física do
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus São Raimundo Nonato.

Aprovada em: 15/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Severino Mendes de Araújo (Orientador)
Instituto Federal do Piauí – Campus São Raimundo Nonato (IFPI - CASRN)

Prof. Dr. Antônio Sousa Ribeiro
Instituto Federal do Piauí – Campus São Raimundo Nonato (IFPI - CASRN)

Prof. Me. Railton Vieira dos Santos
Instituto Federal do Piauí – Campus São Raimundo Nonato (IFPI - CASRN)

Dedico este trabalho aos meus pais,
meus Avós, e tios por todo incentivo e todo apoio nessa
Jornada para mim chega até aqui. Obrigada!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela proteção e orientação em cada etapa desta jornada, pela força nos momentos de dificuldade. Cada experiência foi fundamental para minha chegada até aqui.

À minha família, em especial aos meus pais, Fernanda dos Santos Costa e Edgar da Costa, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor, apoio incondicional, incentivo e compreensão ao longo desses anos. O suporte de vocês foi essencial para meu sucesso. Ao meu filho, Ygor Guilherme Costa Rodrigues, dedico este trabalho. Sua chegada trouxe um novo propósito à minha vida, impulsionando-me a buscar mais conhecimento para lhe garantir um futuro melhor. Agradeço também a toda minha família pelo apoio constante.

Aos amigos do curso, minha gratidão por cada momento compartilhado, por toda a motivação e aprendizado. Ao Instituto Federal -Campus São Raimundo Nonato, agradeço a oportunidade de cursar minha graduação Licenciatura em Física e as bolsas ofertada (PIBID). Aos professores, meu reconhecimento pela dedicação e esforço em compartilhar seus conhecimentos, contribuindo para minha formação.

Ao meu orientador, Professor.Dr. Guilherme Severino Mendes de Araújo, expresso meu agradecimento pela paciência, ensinamentos e dedicação. Sua orientação foi imprescindível para a conclusão deste trabalho; seus ensinamentos levarão para a vida. Você foi essencial para minha formação e a de todos os alunos.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”

Marie Curie

RESUMO

Este trabalho apresenta uma abordagem teórica sobre a espectroscopia de impedância elétrica que é implementada através de uma tensão alternada senoidal e da análise da resposta em corrente. O estudo foca na aplicação de um modelo de circuito equivalente simples, composto por uma resistência série (R_s) associada a um circuito RC em paralelo, o qual representa dispositivos com estrutura metal/camada ativa/metal. Em especial, a camada ativa é composta por materiais no estado sólido. A partir desse modelo, são analisados os espectros de impedância e extraídos parâmetros como a resistência dos contatos, a resistência e a capacitância relativa à camada ativa. Para efeito de simulações foram utilizados valores de $50\ \Omega$ para a R_s , associada aos contatos elétricos, e variações de R , $1 \times 10^3\ \Omega$, $1 \times 10^4\ \Omega$ e $1 \times 10^5\ \Omega$, associada a resistência da camada ativa. Para efeito de simplificação C , capacitância associada a camada ativa, foi mantida a $1 \times 10^{-9}\text{ F}$. A partir desses dados foram plotados gráficos teóricos dos espectros de impedância e fase. Os resultados obtidos permitiram uma visualização didática do comportamento desses dispositivos e, assim, permitir os estudos de situações mais complexas de sistemas que, em geral, apresentam desvios do modelo estudado deste trabalho.

Palavras-chave: espectroscopia de impedância elétrica, circuito equivalente, impedância complexa, dispositivos de dois terminais.

ABSTRACT

This work presents a theoretical approach to electrical impedance spectroscopy, a technique widely employed in the analysis of materials and electronic devices. By applying a sinusoidal alternating voltage and analyzing the resulting current response, it is possible to obtain information regarding resistive and capacitive processes within the system. The study focuses on the application of a simple equivalent circuit model, consisting of a series resistance (R_s) connected to a parallel RC circuit, which represents devices with a metal/active layer/metal structure. In particular, the active layer consists of solid-state materials. Based on this model, impedance spectra were analyzed, and parameters such as contact resistance, as well as the resistance and capacitance related to the active layer, were extracted. For simulation purposes, a value of $50\ \Omega$ was assigned to R_s , representing the electrical contacts, while the resistance associated with the active layer (R) was varied among $1 \times 10^3\ \Omega$, $1 \times 10^4\ \Omega$, and $1 \times 10^5\ \Omega$. For simplification purposes, the capacitance (C) associated with the active layer was fixed at $1 \times 10^{-9}\ \text{F}$. Based on these values, theoretical plots of the impedance and phase spectra were generated. The results provided a didactic visualization of the behavior of such devices, thus enabling further studies of more complex systems that often exhibit deviations from the model considered in this work.

Keywords: electrical impedance spectroscopy. equivalent circuit, complex impedance, two-terminal devices

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Modelo de circuito equivalente R_s em série a um capacitor C e um resistor R em paralelo para uma estrutura Metal/Camada Ativa/Metal.....	21
Figura 2 - Espectro da parte real da impedância Z' do modelo de circuito equivalente apresentado na Figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$	23
Figura 3 - Espectro da parte real da impedância Z' do modelo de circuito equivalente apresentado na Figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$	25
Figura 4 - Plot Argan-Gauss do modelo de circuito equivalente apresentado na figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$	26
Figura 5 - Espectro da fase do modelo de circuito equivalente apresentado na figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de R_s , R e C utilizados para a simulação dos gráficos, juntamente com os valores de f , ω e T	25
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OLED	Diodo Emissor de Luz Orgânico
OSC	Célula Solar Orgânica
CA	Corrente Alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	Permessividade Elétrica (F/m)
ε_0	Permessividade Elétrica no Vácuo (F/m)
ε_r	Permessividade Elétrica Relativa
V	Tensão (V)
I	Corrente elétrica (A)
R	Resistência elétrica (Ω)
C	Capacitância (F)
ϕ	Fase ($^\circ$)
$Z(\omega)$	Impedância Complexa (Ω)
$Z'(\omega)$	Parte real da impedância (Ω)
$Z''(\omega)$	Parte imaginária da impedância (Ω)
f	Frequência (Hz)
ω	Frequência angular (rad/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	TEORIA DA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA	17
2.2	RESISTÊNCIA ELÉTRICA E REATÂNCIA CAPACITIVA	18
2.2.1	Sistema resistivo puro	19
2.2.2	Sistema capacitivo puro	20
2.3	MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE	21
3	METODOLOGIA	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	23
5	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

O uso de dispositivos finos ou ultrafinos, em geral, desempenham um papel fundamental em uma ampla gama de aplicações tecnológicas tais como células solares orgânicas (OSC) [1], diodos emissores de luz orgânicos (OLEDs) [2], memórias resistivas [3] e capacitores [4]. Em geral, esses dispositivos, em especial no estado sólido, são objetos de estudo intenso atualmente, sendo as suas características elétricas um dos parâmetros mais importantes para o potencial uso no mercado. Particularmente, essas análises são realizadas em estruturas simples, onde os materiais são depositados entre dois eletrodos metálicos, ou entre óxidos semicondutores transparentes. Essa estrutura pode ser representada como metal/camada ativa/metal. Os materiais utilizados como camadas ativas também são amplos, em geral podem ser utilizados compostos orgânicos, inorgânicos, naturais ou sintéticos.

Dentre as técnicas de medidas elétricas para a caracterização desses dispositivos podemos citar a espectroscopia de impedância [5]. Ela é baseada na aplicação de uma tensão alternada senoidal, onde é obtida a corrente elétrica como resposta, essa relação possibilita a análise da impedância, capacitância e deslocamento de fase elétricas com o auxílio de modelos de circuito equivalente. A espectroscopia de impedância pode ser representada através das grandezas elétricas descritas no espaço dos números complexo [5]. A relação entre tensão e corrente é expressa por uma forma complexa da lei de Ohm, onde a impedância (Z) assume uma representação com partes real e imaginária.

Neste trabalho, será destacado a aplicação de um modelo de circuito equivalente simples, composto por uma resistência em série (R_s) a uma resistência (R) e uma capacitância (C) em paralelo. Comumente, esse modelo é utilizado para estudar dispositivos com estrutura metal/camada ativa/metal. A análise desse circuito possibilita identificar regimes de baixa frequência, nos quais predominam a resistência da camada ativa. Por outro lado, no regime de altas frequências predomina a resistência dos contatos elétricos. Essas características podem ser visualizadas através dos espectros de impedância e fase elétrica. Para a análises do modelo utilizamos valores de $50\ \Omega$ para a R_s , associada aos contatos elétricos, e variações de R , $1 \times 10^3\ \Omega$, $1 \times 10^4\ \Omega$ e $1 \times 10^5\ \Omega$, associada a resistência da camada ativa. Para

efeito de simplificação C , capacitância associada a camada ativa, foi mantida a 1×10^{-9} F.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo geral: realizar uma análise teórica realizado de maneira didática/pedagógica dos espectros de impedância e fase. Os objetivos específicos são: Elaborar uma abordagem didática/pedagógica para alunos da graduação sobre impedância; aplicar a espectroscopia de impedância à análise de dispositivos dielétricos; estudar o comportamento elétrico em diferentes regimes de frequência e simular os espectros com variações de resistência R e interpretar os resultados e identificar as contribuições resistiva e capacitiva a partir dos espectros gerados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão apresentadas e discutidas a teoria da espectroscopia de impedância aplicada a um sistema simples constituído por um resistor em série a um capacitor com um resistor em paralelo.

2.1 TEORIA DA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA

A espectroscopia de impedância elétrica é uma ferramenta usada para investigar materiais por meio da aplicação de uma tensão alternada senoidal e observar a resposta em corrente elétrica. Nessa situação, a configuração do sistema está no domínio ou regime, de corrente alternada. As soluções para as todas as grandezas Físicas envolvidas são do tipo estacionárias, ou seja, serão desconsiderados os efeitos transientes nesses sistemas [6]. Nesse sentido, é conveniente utilizar-se a notação complexa $e^{i\omega t}$ para descrever as grandezas físicas que variam com o tempo. Para realizar essa análise, aplica-se uma tensão do tipo [3,6]:

$$\hat{V}(t) = \bar{V}e^{i\omega t} \quad (1)$$

onde $\bar{V} = V_0 e^{i\theta}$ é a amplitude da tensão ($\hat{V}(t)$) e ω é a frequência angular. Aqui, vale destacar que a equação 1 trata-se de uma tensão de uma fonte externa que é aplicada na amostra.

Quando um dielétrico é submetido a uma tensão representada pela equação 1, espera-se que a corrente elétrica apresente um comportamento descrito por [3,6]

$$\hat{I}(t) = \bar{I}e^{i(\omega t - \phi)}. \quad (2)$$

De forma análoga a equação 1, $\bar{I} = I_0 e^{i\theta}$ é a amplitude complexa de $\hat{I}(t)$, ϕ é a defasagem da corrente em relação a tensão elétrica aplicada. Pode-se observar que $\hat{I}(t)$ apresenta um fator extra $e^{-i\phi}$ quando comparada a $\hat{V}(t)$. Será visto mais adiante que esse termo está associado a resposta elétrica da amostra. A partir da análise de ϕ podemos interpretar se o sistema apresenta comportamento capacitivo, resistivo ou

indutivo. Entretanto, para os sistemas estudados neste trabalho restringiremos apenas a análise dos dois primeiros.

A fim de simplificação, será utilizado uma equação análoga a lei de Ohm para os estudos dos sistemas. Nessa condição, a impedância complexa ($Z(\omega)$) está relacionada com a tensão e a corrente através da equação 3 [3,6]:

$$\hat{V}(t) = Z(\omega)\hat{I}(t). \quad (3)$$

Substituindo as equações 1 e 2 em 3, temos [3,6]:

$$Z(\omega) = \frac{\hat{V}(t)}{\hat{I}(t)} = \frac{V_0 e^{i\theta} e^{i\omega t}}{I_0 e^{i\theta} e^{i(\omega t - \phi)}} = \left(\frac{V_0}{I_0}\right) e^{i\phi} = Z_0(\omega) e^{i\phi}, \quad (4)$$

onde $Z_0(\omega)$ é o módulo de $Z(\omega)$. Assim, a impedância pode apresentar partes real ($Z'(\omega)$) e imaginária ($Z''(\omega)$) [3,6]

$$Z(\omega) = Z'(\omega) + iZ''(\omega), \quad (5)$$

com módulo e fase [3.6]:

$$|Z(\omega)| = \sqrt{(Z'(\omega))^2 + (Z''(\omega))^2} \quad (6)$$

e

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''(\omega)}{Z'(\omega)} \right), \quad (7)$$

respectivamente.

2.2 Resistência Elétrica e Reatância Capacitiva

A seção 2.2 aborda os conceitos fundamentais de resistência elétrica e reatância capacitiva em circuitos elétricos. São discutidas as relações matemáticas que descrevem o comportamento resistivo (R) e o efeito dos capacitores da reatância capacitiva (X_c)

2.2.1 Sistema Resistivo Puro

Nesta secção será descrito o comportamento elétrico de um sistema com somente um resistor num circuito alimentado por uma fonte AC. Especificamente, será analisado a relação entre deslocamento de fase (ou somente, fase) da corrente com relação a tensão elétrica descrita pela equação 2. Assim, para esse sistema, de acordo com a lei de Ohm [3,6]

$$\hat{V}(t) = R\hat{I}(t). \quad (8)$$

Substituindo as equações 1 na equação 8, tem-se [3,6]

$$\begin{aligned} \bar{V}e^{i\omega t} &= R.\hat{I}(t) \\ \hat{I}(t) &= \frac{\bar{V}}{R}e^{i\omega t} \\ \hat{I}(t) &= \bar{I}e^{i\omega t}; \bar{I} = \frac{\bar{V}}{R}. \end{aligned} \quad (9)$$

Com isso, pode-se perceber que o deslocamento de fase da corrente com relação a tensão é igual a zero. Para visualizar isso, basta comparar o resultado da equação 9 com a equação 1. Esse resultado pode ser interpretado em termos de cargas elétricas oscilando na mesma fase que a tensão aplicada.

2.2.2 Sistema Capacitivo Puro

Nesta seção o objetivo é descrever o comportamento da defasagem da corrente elétrica com relação a tensão de um sistema constituído por um capacitor alimentado por uma fonte AC com a equação 1. Para obter um resultado análogo ao realizado na seção anterior, será utilizada a equação do capacitor para determinar $\hat{I}(t)$, logo [3,6]:

$$\begin{aligned} \hat{q}(t) &= C.\hat{V}(t) \\ \hat{q}(t) &= C.\bar{V}e^{i\omega t} \rightarrow \\ \rightarrow \hat{I}(t) &= \frac{d\hat{q}(t)}{dt} = C.\bar{V}i\omega e^{i\omega t}; i = e^{\frac{i\pi}{2}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\hat{I}(t) &= C \cdot \bar{V} e^{i\pi/2} \omega e^{i\omega t} \\
\hat{I}(t) &= \omega C \cdot \bar{V} e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \\
\hat{I}(t) &\equiv \frac{\bar{V}}{X_C} e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})}; X_C \equiv \frac{1}{\omega C} \\
\hat{I}(t) &= \bar{I} e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})}; \bar{I} = \frac{\bar{V}}{X_C},
\end{aligned} \tag{10}$$

X_C representa a reatância capacitiva [6,7,8].

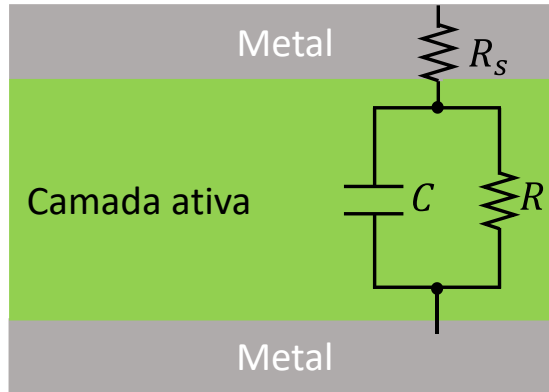
Observa-se que o valor do deslocamento de fase da corrente com relação a tensão é 90° , ao comparar as equações 10 com a equação 2 observa-se que $\phi = -90^\circ$.

2.3 Modelo de Circuito Equivalente

O sistema de dois terminais com um dielétrico inserido entre eles pode ser estudado na espectroscopia de impedância de acordo com os modelos de circuito equivalente. Neste trabalho, a descrição do sistema meta/camada ativa/metal será restrita ao modelo de circuito equivalente mais simples. Com isso, analisar os espectros de impedância e fase a fim de realizar uma abordagem teórica mais didática para a compreensão das interpretações Físicas. Além disso, será mostrado também que as análises desses espectros em conjunto são realizadas de forma a serem complementares.

Em geral, os dispositivos de dois terminais apresentam a estrutura mais simples que será descrita aqui em uma forma genérica meta/camada ativa/metal. A figura ilustra essa estrutura de acordo com um modelo de circuito equivalente com um resistor em série (R_s) a um capacitor (C) e um resistor (R) em paralelo. As quantidades R_s , C e R representam a resistência dos contatos elétricos, capacitância e resistência da camada ativa, respectivamente.

Figura 1 - Modelo de circuito equivalente R_s em série a um capacitor C e um resistor R em paralelo para uma estrutura Metal/Camada Ativa/Metal.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Inicialmente, o objetivo é determinar o valor da impedância complexa desse sistema. Para isso, a tensão de alimentação do circuito será descrita de acordo com a equação 1. Logo, a tensão total aplicada a esse circuito é [3,6]

$$\hat{V}(t) = \hat{V}_s(t) + \hat{V}_{RC}(t), \quad (11)$$

onde $\hat{V}_s(t)$ é a tensão nos terminais de R_s e $\hat{V}_{RC}(t)$ é a tensão em RC em paralelo. Logo, a equação 11 resulta em [3]:

$$\begin{aligned} \hat{V}(t) &= R_s \hat{I}(t) + Z_{RC} \hat{I}(t) \\ Z \hat{I}(t) &= R_s \hat{I}(t) + Z_{RC} \hat{I}(t) \\ Z &= R_s + Z_{RC}. \end{aligned} \quad (12)$$

A corrente que entra pelo nó do circuito RC é dividida entre o resistor e o capacitor, de tal forma que [3]:

$$\hat{I}_{RC}(t) = \hat{I}_R(t) + \hat{I}_C(t),$$

onde

$$\hat{I}_C(t) = C \frac{d\hat{V}_{RC}}{dt} = Ci\omega \bar{V}_{RC} e^{i\omega t} = Ci\omega \hat{V}_{RC}.$$

Logo,

$$\begin{aligned}
\frac{\hat{V}_{RC}(t)}{Z_{RC}} &= \frac{\hat{V}_{RC}(t)}{R} + Ci\omega\hat{V}_{RC} \\
\frac{1}{Z_{RC}} &= \frac{1}{R} + Ci\omega \\
Z_{RC} &= \frac{R}{(1 + iRC\omega)}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Finalmente, das equações 12 e 13 pode-se determinar a impedância complexa do circuito equivalente [3]:

$$Z(\omega) = R_s + \frac{R}{(1 + iRC\omega)} = Z'(\omega) + iZ''(\omega), \tag{14}$$

onde

$$Z'(\omega) = R_s + \frac{R}{(1 + (RC\omega)^2)} \tag{15}$$

e

$$Z''(\omega) = -\frac{R^2C\omega}{(1 + (RC\omega)^2)}. \tag{16}$$

são as partes real e imaginária da impedância, respectivamente. Para calcular as equações 15 e 16 basta multiplicar e dividir o segundo termo da soma da equação 14 por $(1 - iRC\omega)$ e fazer as manipulações para separar partes as partes real e imaginária.

A relação entre $Z'(\omega)$ e $Z''(\omega)$ pode ser determinada manipulando as equações 15 e 16, que resultam em [3]:

$$\left(Z'(\omega) - R_s - \frac{R}{2}\right)^2 + (Z''(\omega))^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2. \tag{17}$$

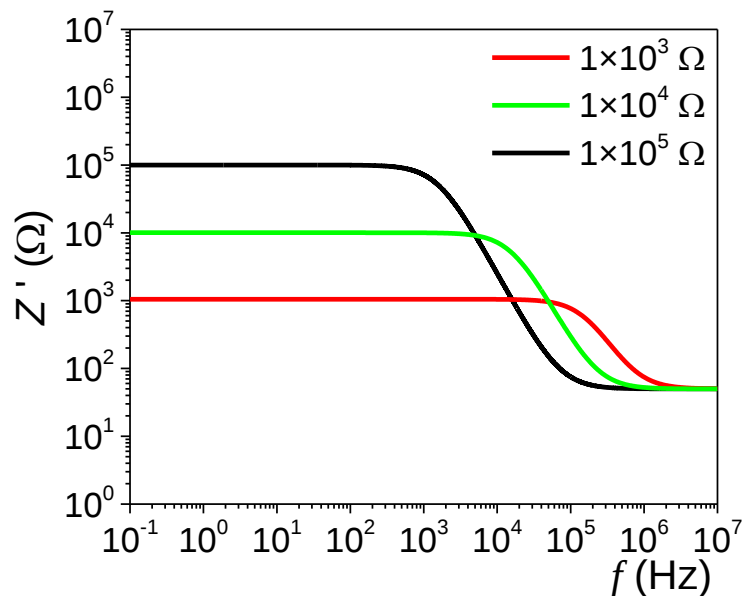
3 METODOLOGIA

Para uma interpretação simples dos resultados serão elaboradas simulações com diferentes valores de resistência (R) da camada ativa. Os valores utilizados serão $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$, com valor de resistência R_s de 50Ω . O valor da capacitância C do dispositivo será atribuído valor de $1 \text{ nF} = 1 \times 10^{-9} \text{ F}$. Esses valores são próximos figura aos valores reais comumente apresentados em espectros de impedância medidos na faixa de 100 mHz a 10 MHz, valores utilizados nas simulações. Para uma espessura de 100 nm , a área ativa deve ser aproximadamente 4 mm^2 para obter 1 nF de capacitância com constante dielétrica $\epsilon_r = 3$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 2 apresenta os gráficos da parte real da impedância do circuito equivalente referente ao sistema representado pela Figura 1, associado a equação 15. No regime de baixas frequências todas as curvas Z' apresentam diferentes platôs, seguido de transições para baixas frequências e, finalmente, todas convergindo para um segundo platô em altas frequências.

Figura 2 - Espectro da parte real da impedância Z' do modelo de circuito equivalente apresentado na Figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$.



Fonte: de ARAÚJO, Guilherme Severino Mendes (2024)

Esses resultados são coerentes com as características de Z' nos limites

assintóticos. Da equação 15 é possível observar que, no limite de $\omega \rightarrow 0$, $Z'(\omega \rightarrow 0) \rightarrow R_s + R$; para $\omega \rightarrow \infty$, $Z'(\omega \rightarrow \infty) \rightarrow R_s$. Isso significa que no regime de baixas frequências a parte real da impedância está associada a resistência R da camada ativa. Em outras palavras, em baixas frequências predomina a característica do regime DC do circuito equivalente. Por outro lado, no limite de altas frequências, a parte real da impedância converge para a resistência associada aos contatos elétricos (R_s).

Os resultados de Z' na figura gráfico, pode-se observar que em baixas frequências, Z' converge para os valores teóricos das resistências R ($1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$), ao passo que no regime de altas frequências Z' converge para o valor da resistência R (50Ω). Nesse sentido, a partir do espectro de impedância pode-se extrair informações prévias importantes a fim de compreender a estrutura interna do dispositivo de dois terminais.

A Figura 3 apresenta os gráficos da parte imaginária da impedância do circuito equivalente referente ao sistema representado pela Figura 1, associado a equação 16. A curva característica apresenta um valor máximo(pico) nos três espectros, que se deslocam para altas frequências quando os valores de resistência R diminuem.

Os valores máximos de Z'' podem ser analisados derivando a equação 16 e igualando a zero. Nessa situação,

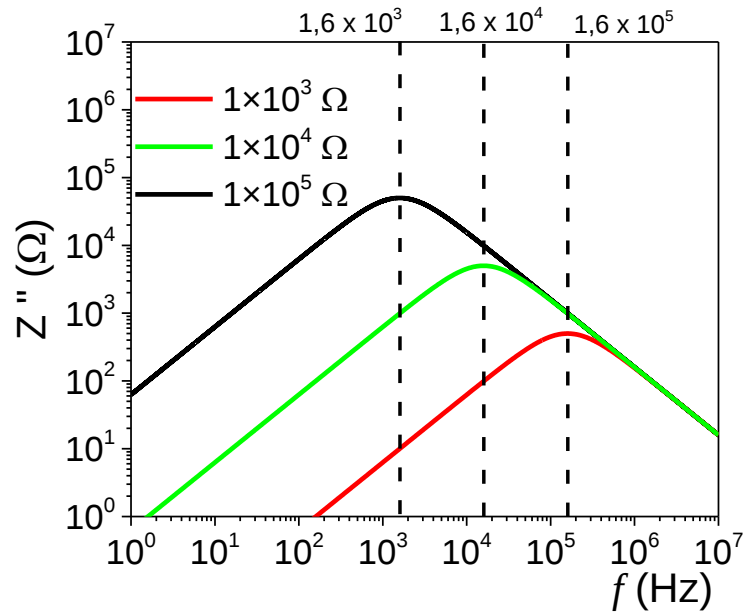
$$\omega = 2\pi f = \frac{1}{RC} \equiv \frac{1}{\tau} \quad (18)$$

e

$$\tau \equiv RC \quad (19)$$

são obtidos e definidos como frequência (f), frequência angular e tempo de relaxação (τ).

Figura 3 - Espectro da parte real da impedância Z' do modelo de circuito equivalente apresentado na Figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$.



Fonte: de ARAÚJO, Guilherme Severino Mendes (2024)

A tabela 1 apresenta os valores de R_s , R e C utilizados para a simulação dos gráficos, juntamente com os valores de f , ω e τ .

Tabela 1 - Valores de R_s , R e C utilizados para a simulação dos gráficos, juntamente com os valores de f , ω e τ .

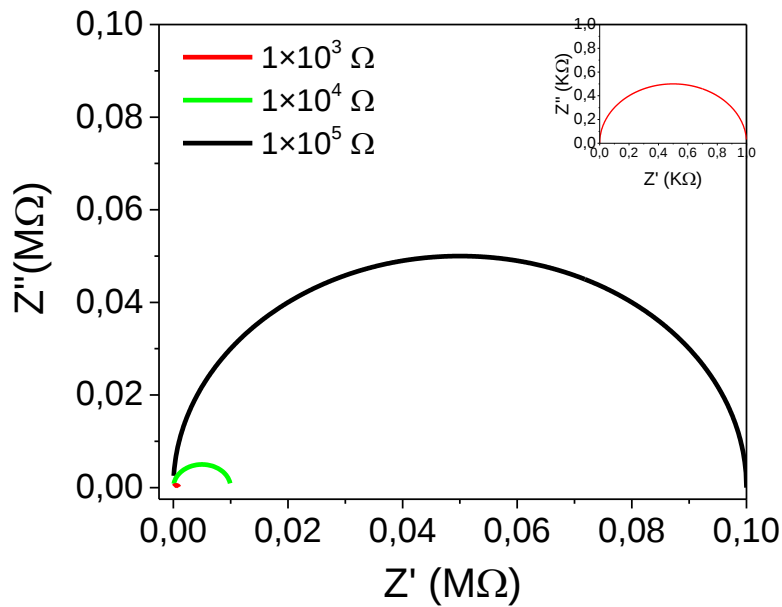
$R(k\Omega)$	C (nF)	$\omega(\times 10^3 \text{ rad/s})$	$f(\times 10^3 \text{ Hz})$	$\tau(\mu\text{s})$
1	1	1000	~ 160	1
10	1	100	~ 16	10
100	1	10	$\sim 1,6$	100

Particularmente os valores de f podem ser observados no gráfico da figura 3 e, como esperado, identificados como os valores que as curvas Z'' apresentam valor máximo.

A figura apresenta o plot Argand (Z'' - Z') relativo aos espectros com diferentes valores de resistência R . A relação semi-circular apresentada no gráfico é identificada na equação 17, com os valores de $R/2$ identificado como o raio do semicírculo. Devido a escala linear entre Z'' e Z' no gráfico da figura é possível notar com maior clareza a profunda discrepância entre os valores de R (evidenciado pelo inset do gráfico da

Figura 4), ao contrário do que se observa quando os gráficos analisados anteriormente em escala logarítmica.

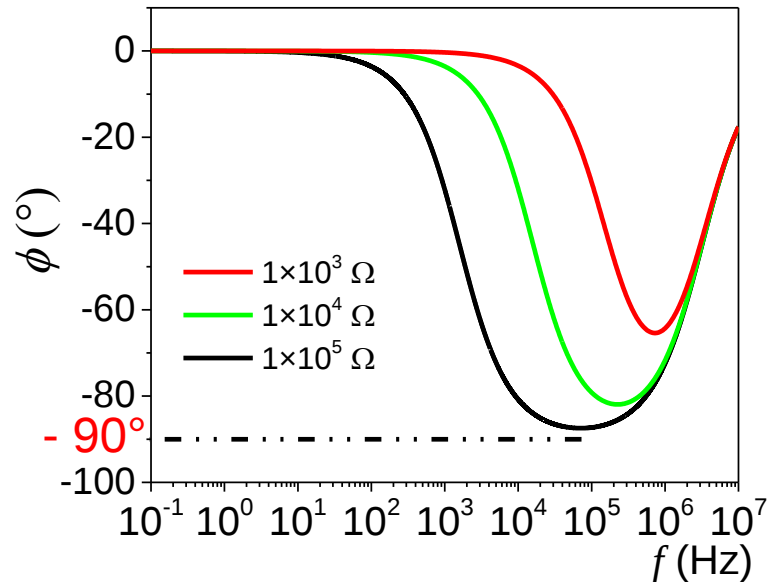
Figura 4 - Plot Argan-Gauss do modelo de circuito equivalente apresentado na figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$.



Fonte: de ARAÚJO, Guilherme Severino Mendes (2024)

A Figura 5 apresenta o espectro da fase para o circuito equivalente para os circuitos com diferentes valores de R. Em baixa frequência todos as curvas convergem para os valores de fase igual a zero. À medida que a frequência aumenta as curvas tendem a apresentar um vale, com a curva correspondente a $1 \times 10^5 \Omega$ com valor de fase aproximadamente -90° .

Figura 5 - Espectro da fase do modelo de circuito equivalente apresentado na figura 1, com valor de capacitância 1 nF e diferentes resistências $1 \times 10^3 \Omega$, $1 \times 10^4 \Omega$ e $1 \times 10^5 \Omega$.



Fonte: de ARAÚJO, Guilherme Severino Mendes (2024)

Os resultados da fase apresentados no gráfico podem ser interpretados em termos do deslocamento de fase apresentado nas seções 2.2.1 e 2.2.2. Foi visto que o deslocamento de fase para o resistor apresenta defasagem igual entre a fase da corrente elétrica e a tensão. Ao passo que a defasagem para o capacitor apresenta valor de -90° . Logo, em baixas frequências o que predomina são os efeitos resistivos do circuito, especificamente a resistência R como visto na análise de Z' . À medida que a frequência aumenta há as contribuições relativas ao capacitor, com a tendência da fase em convergir para -90° .

5 CONCLUSÃO

A partir da análise teórica desenvolvida, pode-se concluir que a espectroscopia de impedância elétrica se apresenta como uma ferramenta para investigar a resposta elétrica de dispositivos dielétricos e sistemas de dois terminais. Por meio da modelagem com circuitos equivalentes simples, como o circuito composto por uma resistência série (R_s) associada a um ramo RC em paralelo, é possível interpretar o comportamento do sistema em diferentes faixas de frequência. A partir da separação entre as partes real e imaginária da impedância, observa-se que, em baixas frequências, predominam os efeitos resistivos associados à resistência da camada dielétrica (R), enquanto em altas frequências a resposta é dominada pela resistência ôhmica dos contatos elétricos (R_s).

Esse comportamento evidencia a capacidade da técnica em diferenciar distintos processos físicos presentes no sistema. Além disso, a análise dos espectros de impedância, fase e do diagrama de Argand permitiu a identificação das contribuições resistiva e capacitiva. Isso possibilita as interpretações relativas a estrutura interna dos dispositivos. Assim, a espectroscopia de impedância se apresenta como uma técnica para a caracterização elétrica básica de sistemas metal/camada ativa/metal.

REFERÊNCIAS

- [1] ROSA, Eduardo Henrique dos Santos; TOLEDO, Luiz Felipe Ribeiro Barrozo. Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, e20200519, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/JHDX9twPQtpXqH6ZKJP6Rcs/?lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2025. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0519>.
- [2] SANTOS JÚNIOR, José Pereira dos. *Caracterização elétrica e eletroluminescente de OLEDs à base de MEH-PPV*. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2016.
- [3] de ARAÚJO, Guilherme Severino Mendes. Caracterização elétrica da eletroformação e da comutação resistiva de memristores orgânicos ITO/MEH-PPV/Al, Tese de doutorado, Programa de Pós- Graduação em Física da UFPI, junho de 2024.
- [4] OLIVEIRA, Rafael Furlan de. *Desenvolvimento de dispositivos eletrônico-orgânicos e sua aplicação como sensores em meio aquoso*. 2014. 124 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências, Bauru; Faculdade de Ciência e Tecnologia, Presidente Prudente, 2014.
- [5] CHINAGLIA, D. L.; GOZZI, G.; ALFARO, R. A. M.; HESSEL, R. *Espectroscopia de impedância no laboratório de ensino*. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 4, p. 4504, 2008.
- [6] NUSSENZVEIG, Herch Moysés. *Curso de física básica. Volume 3: eletromagnetismo*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015. 296 p.
- [7] YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. *Física 3: eletromagnetismo*. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015. Tradução: Lucas Pilar da Silva e Daniel Vieira. Revisão técnica: Adir Moysés Luiz. (Sears e Zemansky). ISBN 978-85-430-1591-0.
- [8] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física: eletromagnetismo* [v. 3]. 9. ed. traduzido por Ronaldo Sérgio de Biasi. São Paulo: LTC, 2012. 375 p. ISBN 978-85-216-2229-1.