



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS ALLAIN MARTINS SIQUEIRA MOURA

**RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE MALHAS RETICULADAS SUBMETIDAS A  
CORRENTES ELÉTRICAS NAS FREQUÊNCIAS DE TERRÔMETROS COMERCIAIS**

Recife  
2023

MATHEUS ALLAIN MARTINS SIQUEIRA MOURA

**RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE MALHAS RETICULADAS SUBMETIDAS A  
CORRENTES ELÉTRICAS NAS FREQUÊNCIAS DE TERRÔMETROS COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco, como re-  
quisito parcial para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Alexander Barros Lima

Coorientador(a): MSc. Ericles Mauricio Barbosa

Recife  
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Moura, Matheus Allain Martins Siqueira.

Resistência de aterramento de malhas reticuladas submetidas a correntes elétricas nas frequências de terrômetros comerciais / Matheus Allain Martins Siqueira Moura. - Recife, 2023.

66 : il., tab.

Orientador(a): Alexander Barros Lima

Coorientador(a): Ericles Mauricio Barbosa

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Resistência de Aterramento. 2. Impedância de Aterramento. 3. Malhas Reticuladas. 4. Aterramento de Subestações. 5. Alta Frequência. I. Lima, Alexander Barros. (Orientação). II. Barbosa, Ericles Mauricio. (Coorientação). III. Título.

MATHEUS ALLAIN MARTINS SIQUEIRA MOURA

**RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE MALHAS RETICULADAS SUBMETIDAS A  
CORRENTES ELÉTRICAS NAS FREQUÊNCIAS DE TERRÔMETROS COMERCIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Pernambuco, como re-  
quisito parcial para obtenção do grau de Bacharel  
em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 04/05/2023

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexander Barros Lima (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

MSc. Ericles Mauricio Barbosa (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Luiz Henrique Alves de Medeiros (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Lauro Rodrigo G. S. L. Novo (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu força e sabedoria para concluir este trabalho.

Aos meus pais, Daltêir e Ana Patrícia, por todo amor, carinho e apoio incondicional em todas as etapas da minha vida e, especialmente, durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos que me apoiaram de alguma maneira nessa caminhada. Cada um de vocês contribuiu de forma significativa para que eu pudesse concluir este trabalho com sucesso. Agradeço por toda ajuda, incentivo, apoio moral e amizade verdadeira que recebi ao longo deste processo.

Ao meu orientador, professor Alexander, e ao meu coorientador Ericles, por toda disponibilidade e dedicação na elaboração do trabalho. Sua orientação e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu crescimento acadêmico e profissional. Agradeço a paciência, orientação e pelas valiosas contribuições que fizeram ao longo do processo.

Por fim, gostaria de dedicar um agradecimento especial aos meus avós Hugo e Ana Ligia, que mesmo não estando mais entre nós, continuam a olhar por mim com muito amor e carinho. Seus ensinamentos e exemplos de vida me inspiraram e me ajudaram a chegar até aqui.

“A verdadeira medida de um homem não se vê na forma como se comporta em momentos de conforto e conveniência, mas em como se mantém em tempos de controvérsia e desafio” Martin Luther King Jr.

## RESUMO

Neste trabalho são realizadas análises em malhas de aterramento reticuladas, normalmente existentes em subestações. As análises têm por objetivo determinar a resistência de aterramento de malhas de dimensões variadas e em condições de solo (resistividade), também, variados. Em condições de campo, o procedimento comum é a medição utilizando equipamentos que operam com correntes próximas à frequência da rede. Contudo, mais recentemente, o uso de equipamentos de altas frequências têm sido mais comum. Contudo, a adequação da alta frequência nesta aplicação ainda não está bem estabelecida. Assim, neste trabalho é realizada uma análise comparativa dos dados obtidos considerando que correntes de baixa (100 Hz) e de alta frequência (25 kHz) são aplicados nas malhas. Os resultados indicam existir diferenças que podem ser significativas. Além disso, os valores podem variar dependendo da posição na qual a corrente é injetada.

**Palavras-chave:** Resistência de Aterramento; Impedância de Aterramento; Malhas Reticuladas; Aterramento de Subestações; Alta Frequência; Terrômetros.

## ABSTRACT

In this work, analyses are performed on grounding grids, usually existing in substations. The analysis aims to determine the grounding grid resistance considering a variety of dimensions and soil conditions (resistivity). Under field conditions, the common procedure is the measurement using equipment that operates with currents close to the electric power system frequency. However, more recently, the use of high-frequency equipment has become more common. However, the suitability of high frequency in this application is not yet well established. Thus, in this work, a comparative analysis of the data obtained is carried out considering that low (100 Hz) and high frequency (25 kHz) currents are applied to the grids. The results indicate that there are differences that can be significant. Furthermore, the values may vary depending on the position at which the current is injected.

**Keywords:** Grounding Resistance; Grounding Impedance; Grid Meshes; Substation Grounding; High Frequency; Ground Resistance Tester.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Eletrodo de aterramento horizontal, enterrado a uma profundidade = $d$ . .....	15
Figura 2 – Modelo T de representação de eletrodo no solo. ....	16
Figura 3 – Modelo para o aterramento submetido a correntes de baixa frequência. ....	17
Figura 4 – Impedância variando com a frequência. Malha enterrada à 0,5 m em um solo com $\rho = 100 \Omega m$ . ....	18
Figura 5 – Tensão desenvolvida no aterramento devido a uma corrente impulsiva. ....	18
Figura 6 – Curvas de potencial em uma malha reticulada: a) vista superior; b) vista tridimensional. ....	19
Figura 7 – Variação da distribuição de potencial em relação a dimensão dos retículos. ....	20
Figura 8 – Tensão de passo devido a corrente injetada no solo. ....	20
Figura 9 - Tipos de tensão presentes numa SE. ....	21
Figura 10 – Esquema para a medição da resistência com o FoP. ....	22
Figura 11 – Malha de aterramento com detalhe para um segmento do eletrodo. ....	24
Figura 12 – Segmento de eletrodo emissor $j$ e receptor $i$ . ....	25
Figura 13 - Malha reticulada com lado $L$ , retículo $D$ e pontos de medição $Q_n$ , $L_t$ e $C_n$ . ....	29
Figura 14 - Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 2. ....	33
Figura 15 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 5. ....	36
Figura 16 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 8. ....	39
Figura 17 - Impedâncias calculadas considerando posições variadas (Tabela 2 e Tabela 3). Parâmetros: $L = 20m$ , $D = 2m$ , $\rho = 100\Omega m$ . ....	44
Figura 18 - Impedâncias calculadas considerando posições variadas (Tabela 5 e Tabela 6). Parâmetros: $L = 60m$ , $D = 2m$ , $\rho = 100\Omega m$ . ....	51
Figura 19 - Impedâncias calculadas considerando posições variadas (Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10). Parâmetros: $L = 120m$ , $D = 2m$ , $\rho = 100\Omega m$ . ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequência de operação de equipamentos de medição (terrômetros). .....	23
Tabela 2 – Impedâncias calculadas considerando posições variadas. $L = 20m, D = 2m$ . .....	31
Tabela 3 - Impedâncias determinadas em posições variadas. $L = 20m, D = 5m$ .....	31
Tabela 4 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 2. ....	33
Tabela 5 - Impedâncias determinadas em posições variadas. $L = 60m, D = 2m$ .....	34
Tabela 6 - Impedâncias determinadas em posições variadas. $L = 60m, D = 5m$ .....	34
Tabela 7 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 5. ....	35
Tabela 8 – Impedâncias determinadas em posições variadas. $L = 120m, D = 2m$ .....	36
Tabela 9 - Impedâncias determinadas em posições variadas. $L = 120m, D = 5m$ .....	37
Tabela 10 - Impedâncias determinadas em posições variadas. $L = 120m, D = 10m$ .....	38
Tabela 11 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 8. ....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EA	Eletrodo de aterramento
EC	Eletrodo de corrente
EM	Equipamento de medição
EP	Eletrodo de potencial
FoP	<i>Fall-of-Potential</i>
HEM	<i>Hybrid Electromagnetic Model</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NBR	Norma Brasileira
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$E_s$	Tensão de passo
$E_t$	Tensão de toque
$I$	Corrente
$I_L$	Corrente longitudinal
$I_{Tj}$	Corrente transversal
$L$	Comprimento do segmento
$R_g$	Resistência de aterramento
$V$	Tensão elétrica
$\rho$	Resistividade elétrica
$\sigma$	Condutividade elétrica
$\mu$	Permeabilidade elétrica
$\varepsilon$	Permissividade elétrica
$\omega$	Frequência angular
$Z$	Impedância de aterramento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	13
1.1.1	Geral .....	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>15</b>
2.1	ATERRAMENTOS SUBMETIDOS A CORRENTES ELÉTRICAS: ASPECTOS GERAIS.....	15
2.2	ATERRAMENTOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES .....	19
2.3	MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO .....	22
2.4	MODELAGEM DAS MALHAS DE ATERRAMENTO .....	24
2.5	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO EM RELAÇÃO À FREQUÊNCIA.....	27
<b>3</b>	<b>RESPOSTAS DE MALHAS NAS FREQUÊNCIAS DE 100 HZ E 25 KHZ.....</b>	<b>29</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	29
3.2	MALHA DE 20M X 20M.....	30
3.3	MALHA DE 60M X 60M.....	33
3.4	MALHA DE 120M X 120M.....	36
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</b> .....	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>41</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>44</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O aterramento de uma subestação, fundamentalmente, visa assegurar a segurança das pessoas, sistemas e equipamentos. Além disso, o aterramento provê um caminho para a dispersão de correntes de falhas. Segundo padronizações que tratam do tema, o desempenho desejado de uma malha pode ser verificado por meio de parâmetros como tensão de toque, tensão de passo, elevação de potencial do solo e a resistência de aterramento [1,2]. As adequações desses parâmetros são avaliadas a partir de medições utilizando técnicas presentes em normas e padrões [3,4]. Em relação à resistência de aterramento, o procedimento comum é a medição utilizando equipamentos que operam com correntes de baixas frequências, próximas da frequência da rede elétrica comercial. Contudo, mais recentemente, o uso de equipamentos de altas frequências (25 kHz) tem se tornado mais comum, sobretudo, nos casos em que os cabos para-raios das linhas de transmissão estão conectados à malha de aterramento. A principal motivação, nesses casos, reside no fato de que em altas frequências a impedância do cabo já seria muito maior que a resistência da malha. Assim, a parcela da corrente injetada pelo equipamento de medição que sobe pelo cabo seria desprezível. Com isso, praticamente toda a corrente de medição seria direcionada para o aterramento da subestação. Essa condição, certamente, é desejável, já que em baixas frequências a parcela da corrente de medição que sobe pelo cabo para-raios pode ser significativa, levando a erros grosseiros nos resultados [5]. Contudo, a adequação da alta frequência nesta aplicação ainda não está bem estabelecida. Este trabalho insere-se neste contexto, onde são realizadas simulações computacionais para se determinar a impedância de malhas de aterramento em baixa (100 Hz) e em alta (25 kHz) frequência. Para conferir maior generalidade às análises, são avaliadas malhas de diversas dimensões e características variadas (tamanho do retículo e resistividade do solo).

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Geral

Avaliar a resistência de aterramento de malhas reticuladas submetidas a correntes elétricas de baixa e de alta frequência utilizada por terrômetros comerciais.

## **1.2 Organização do Trabalho**

Esse trabalho foi dividido em 4 capítulos, sendo este primeiro de introdução.

No Capítulo 2, será feita uma breve revisão bibliográfica de modo a introduzir os conceitos básicos de aterramento e suas repostas quando submetidos a correntes de altas frequências, assim como as características de aterramentos em subestações e técnicas de medição.

No Capítulo 3, serão realizadas simulações da resposta de malhas de aterramento reticuladas de tamanhos variados de retículos e de lado quando submetidas a correntes em frequências típicas de terrômetros comerciais e em solos de diversas resistividades diferentes.

No Capítulo 4, são apresentadas as conclusões obtidas assim como sugestões para futuros trabalhos sobre o tema.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

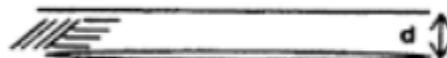
Neste capítulo, é apresentada uma revisão da bibliografia que trata das características gerais sobre aterramentos elétricos, sendo abordado os aspectos relacionados a aterramentos submetidos a correntes elétricas de baixas e altas frequências, tensões de toque-passo e resistência de aterramento.

### 2.1 Aterramentos submetidos a correntes elétricas: aspectos gerais

A palavra aterramento se refere à terra propriamente dita, de modo que quando se faz menção sobre um sistema estar aterrado, significa que pelo menos um de seus elementos está, de algum modo, propositalmente conectado eletricamente à terra [6]. Os aterramentos são utilizados em um amplo espectro de aplicações, contudo, no contexto da engenharia elétrica seu uso mais comum está relacionado a duas funções: *i*) desempenho de sistemas; *ii*) segurança de seres vivos e equipamentos. No caso do desempenho de sistemas, como exemplo, cita-se os aterramentos das estruturas das linhas de transmissão, que visam mitigar a ocorrência de arcos elétricos sobre as cadeias de isoladores. Já no caso da proteção aos seres vivos e equipamentos, como exemplo, cita-se o aterramento de SE que promovem uma distribuição segura de potencial na superfície do solo.

Os aterramentos são constituídos basicamente de três componentes, sendo o eletrodo de aterramento, a conexão elétrica que interliga o sistema ao eletrodo (cabo de aterramento) e o solo que envolve os eletrodos [7]. Os arranjos de eletrodos também são bastante variados, dependendo da aplicação, sendo muito comum a utilização de hastes e de eletrodos horizontais enterrados em profundidades de, aproximadamente, 0,5 m.

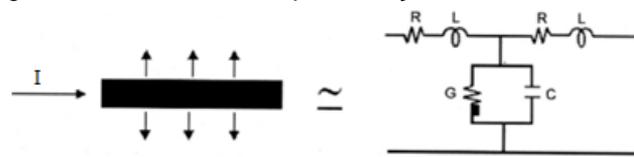
Figura 1 – Eletrodo de aterramento horizontal, enterrado a uma profundidade =  $d$ .



Fonte: retirado de [7].

Na Figura 2 é apresentado um modelo para o eletrodo sob a terra, quando por ele passa uma corrente. Como se pode verificar, a corrente que entra no eletrodo apresenta duas componentes: *i*) componente transversal, associada a parcela da corrente que é dissipada no solo e que apresenta natureza condutiva (G) e capacitiva (C); *ii*) componente longitudinal, associada a parcela da corrente presente ao longo do comprimento do eletrodo. Essa componente produz perdas internas (R), normalmente desprezadas, e estabelece um campo magnético em torno do eletrodo (L).

Figura 2 – Modelo T de representação de eletrodo no solo.



Fonte: adaptado de [7].

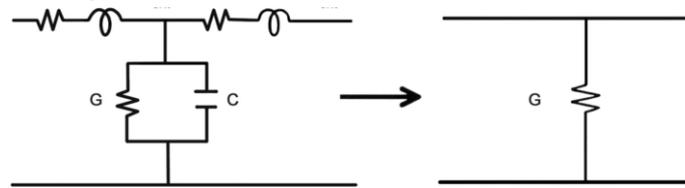
Esse modelo caracteriza a oposição à entrada e dispersão de correntes elétricas no solo, tratando-se, portanto, de uma impedância. Disso decorre que, a impedância é definida para cada frequência de corrente na qual é submetida, onde [8,9].

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.1)$$

sendo,  $Z$  a impedância do aterramento [ $\Omega$ ],  $V$  a tensão desenvolvida [V],  $I$  a corrente de entrada no aterramento [A] e  $\omega$  a frequência angular da corrente [rad/s].

Assim, é importante observar que nos casos em que o aterramento é submetido a correntes de baixas frequências, como é o caso da frequência da rede (60 Hz), a reatância indutiva é considerada muito pequena e a capacitiva é considerada muito elevada, de modo que a corrente de dispersão para o solo é devido apenas a componente de natureza condutiva (G), dando origem ao conceito de resistência de aterramento,  $R_g$ , como mostra a Figura 3.

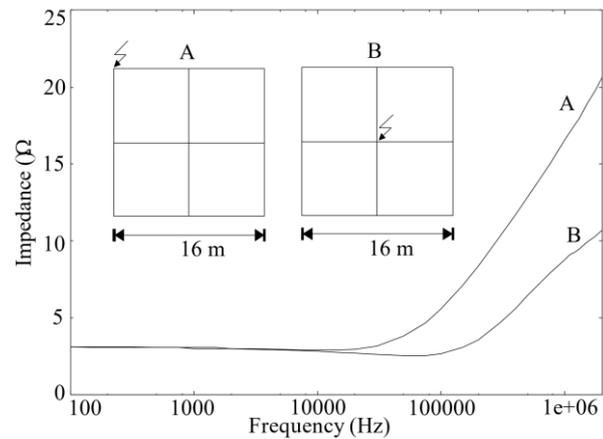
Figura 3 – Modelo para o aterramento submetido a correntes de baixa frequência.



Fonte: adaptado de [7].

Por outro lado, à medida que a frequência da corrente vai aumentando, os efeitos reativos vão se tornando mais expressivos, ficando evidente que o aterramento passa a apresentar características de uma impedância. A dificuldade, neste caso, é determinar a frequência a partir da qual os efeitos reativos passam a ser significativos. Além disso, no âmbito das aplicações mais comuns da engenharia elétrica, as frequências mais elevadas estão associadas a eventos de natureza impulsiva, sendo a descarga atmosférica um dos mais importantes, de modo que o aterramento não é submetido a uma frequência específica, mas sim ao espectro associado a este fenômeno natural. De fato, estudos realizados em aterramentos com correntes impulsivas mostram que não há uma maneira simples de se determinar essa frequência de transição. Isso porque essa frequência depende de parâmetros como a geometria e a dimensão do eletrodo/malha, além da resistividade do solo. Adicionalmente, no caso dos aterramentos reticulados utilizados em SE, há, ainda, a dependência da posição na qual a corrente é injetada [10,11,12]. Grcev [13], apresenta resultados de uma análise onde é determinada a resposta em frequência de um aterramento reticulado com dimensões de 16m x 16m (ver Figura 4). São consideradas situações em que a corrente é injetada na malha em diferentes posições. Os dados evidenciam existir diferenças nas impedâncias, dependendo do ponto de injeção de corrente. As curvas relativas aos casos A e B, ambas, apresentam valores de impedância muito próximos na condição em que as frequências são baixas ( $< \sim 15$  kHz). Verifica-se, também, que os efeitos resistivos preponderam nessa região do espectro. Em frequências mais altas, maiores que  $\sim 15$  kHz, há um aumento crescente no valor da impedância no caso A (corrente na quina da malha). Já em relação ao ponto B, também em frequências mais altas, a impedância apresenta uma leve tendência de redução, mas começa a aumentar rapidamente a partir de  $\sim 100$  kHz. Como a resistividade do solo, nos casos avaliados, não varia com a frequência, o aumento da impedância ocorre em razão do aumento da parcela reativa.

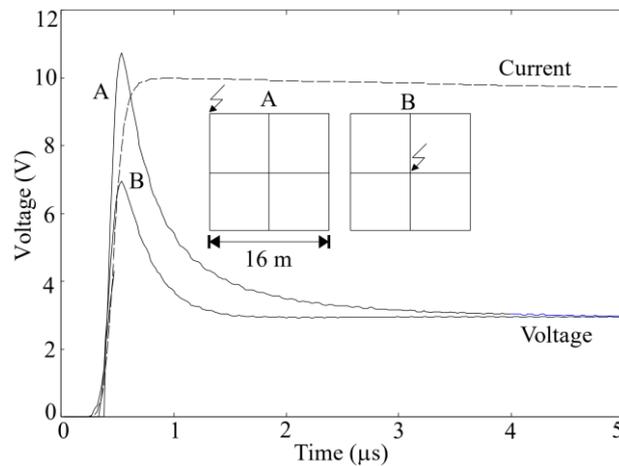
Figura 4 – Impedância variando com a frequência.  
Malha enterrada à 0,5 m em um solo com  $\rho = 100 \Omega m$ .



Fonte: adaptado de [13].

Ainda neste trabalho, também, foi avaliada a condição em que uma corrente impulsiva é injetada nos pontos A e B, como apresentado na Figura 5. Na Figura 5, são apresentadas as curvas de tensão desenvolvida, onde se verifica que a tensão no ponto A é significativamente maior que a tensão no ponto B, evidenciando que as impedâncias são diferentes e, portanto, dependentes do ponto de injeção da corrente.

Figura 5 – Tensão desenvolvida no aterramento devido a uma corrente impulsiva.



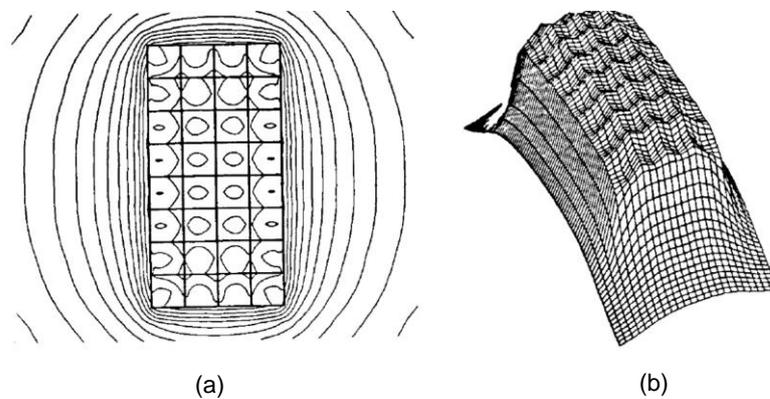
Fonte: adaptado de [13].

## 2.2 Aterramentos elétricos em subestações

Os projetos de malhas de aterramentos em SE são balizados por Normas e Padrões, visando o controle das tensões de passo e de toque, além de um baixo valor de  $R_g$  [1,2]. É importante ressaltar que os padrões normativos atuais não especificam um limite máximo para o valor de  $R_g$ , contudo, é comum assumir que esse valor seja de  $10 \Omega$  [14]. De fato, a recomendação da ABNT NBR 15751-2013 é que “o projeto de aterramento deve garantir níveis de corrente de curto-circuito fase-terra suficientes para permitir a atuação da proteção de retaguarda”

As malhas de aterramento são projetadas de modo que os potenciais desenvolvidos sejam equilibrados na superfície do solo de uma subestação (SE). Apesar de tal condição, sempre irão ocorrer gradientes de potencial na ocorrência de correntes escoando para solo. Entretanto, desde que a malha tenha sido adequadamente dimensionada, os potenciais máximos não serão excedidos [15]. A distribuição de potencial em uma malha reticulada simples, é apresentada na Figura 6.

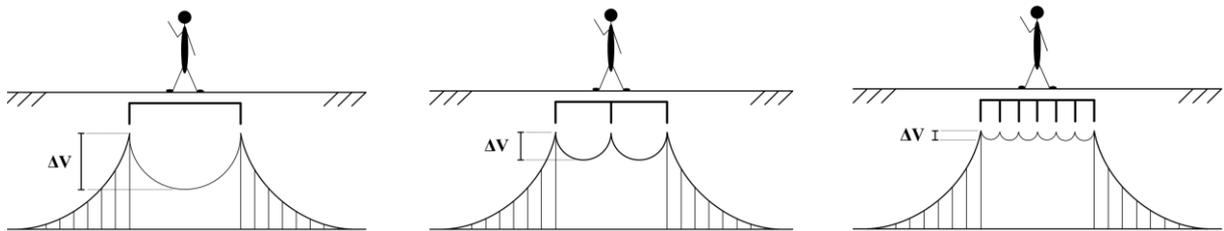
Figura 6 – Curvas de potencial em uma malha reticulada: a) vista superior; b) vista tridimensional.



Fonte: adaptado de [2].

No interior da malha, por onde podem circular pessoas e há equipamentos instalados, a distribuição do potencial deve permanecer dentro dos limites considerados aceitáveis, valores esses definidos nas padronizações. Nesse sentido, esse controle é realizado por meio do adequado dimensionamento dos retículos, onde quanto maior a sua dimensão, maior será a tensão em seu interior [2]. Na Figura 7 é apresentada uma ilustração da variação de potencial em relação à dimensão dos retículos.

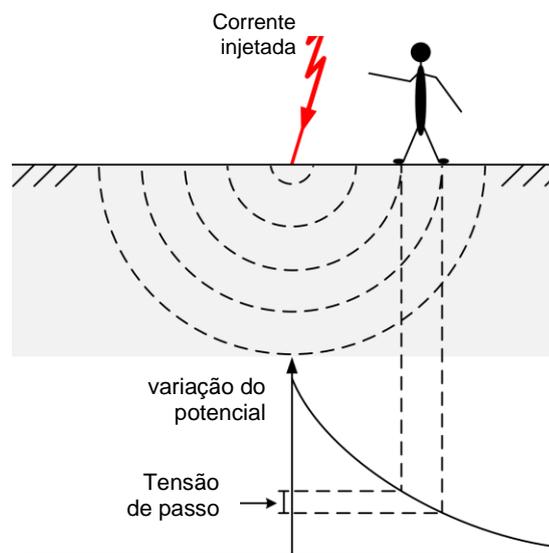
Figura 7 – Variação da distribuição de potencial em relação a dimensão dos retículos.



Fonte: retirado de [16].

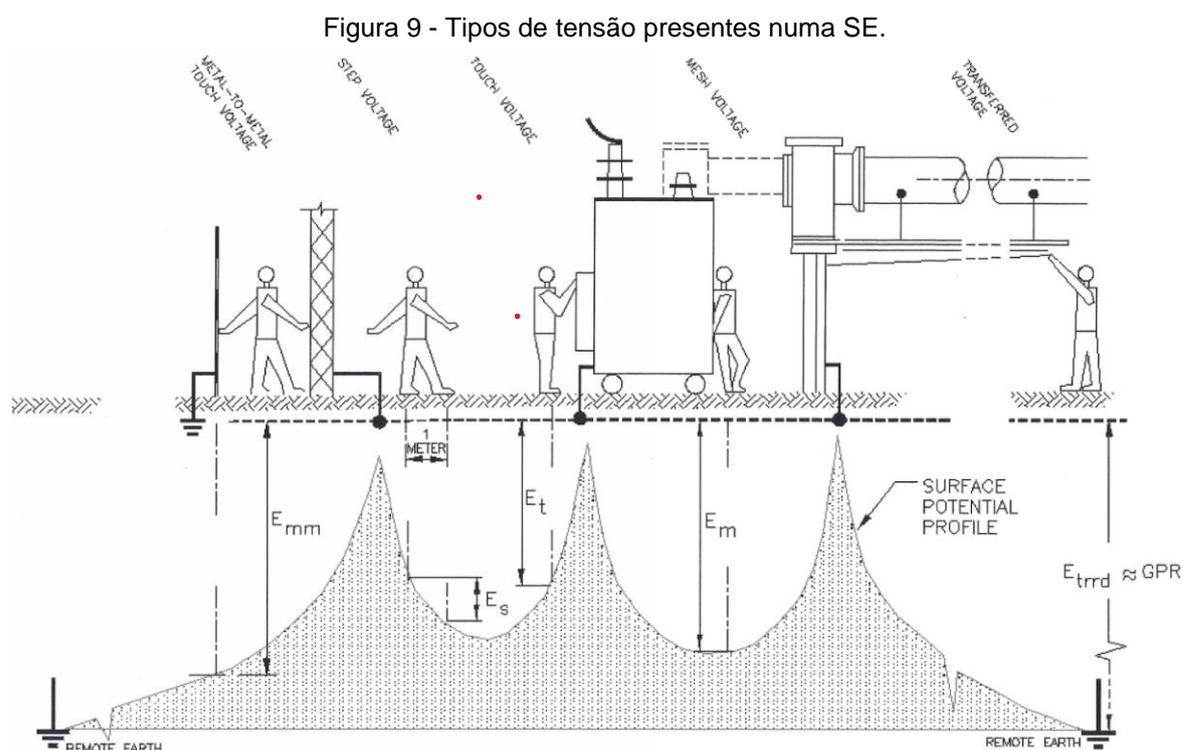
A circulação de corrente pelo solo leva a uma distribuição de potencial que pode ser analisada a partir de superfícies equipotenciais. A tensão de passo advém dessa condição. Assim, quando uma pessoa está sobre duas linhas de contorno de superfícies equipotenciais, ele fica submetido a uma diferença de potencial. Na Figura 8, esta condição é ilustrada. Conceitualmente, a tensão de passo é definida como sendo a diferença de potencial entre dois pontos do solo, distanciados em 1 m, produzida pela passagem de uma corrente elétrica. Em uma SE, a corrente de curto-circuito é a que produz tais efeitos, por ocorrência de uma falta para a terra [2,4].

Figura 8 – Tensão de passo devido a corrente injetada no solo.



Fonte: adaptado de [16].

O fato de as partes metálicas internas a uma SE serem aterradas também leva a necessidade de se avaliar os riscos associados à diferença de potencial que é desenvolvida entre estas partes metálicas e a superfície do solo por ocasião do escoamento de uma corrente do sistema para o aterramento local. Essa condição dá origem ao conceito de *tensão de toque*, definida como sendo a diferença de potencial entre uma estrutura metálica aterrada e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Por definição, considera-se esta distância igual a 1 m [1,2]. Na Figura 9 é apresentada uma ilustração, onde são representadas tanto a tensão de toque ( $E_t$ ), como a tensão de passo ( $E_s$ ). Adicionalmente, são apresentadas condições também relevantes neste local, sendo: *i*) tensão entre metais, ocorrendo quando a pessoa entra em contato com dois objetos metálicos distintos que estejam aterrados; *ii*) tensão de malha, sendo o valor máximo para a tensão de toque dentro da malha de aterramento; *iii*) tensão transferida, que é um caso especial da tensão de toque, onde é a elevação de potencial total da malha referida a infinito. Constitui-se no potencial no qual ficaria submetida uma pessoa posicionada no terra remoto que tivesse contato com uma parte metálica eventualmente conectada com os eletrodos do aterramento durante o fluxo de corrente pelo mesmo [7,17,3].

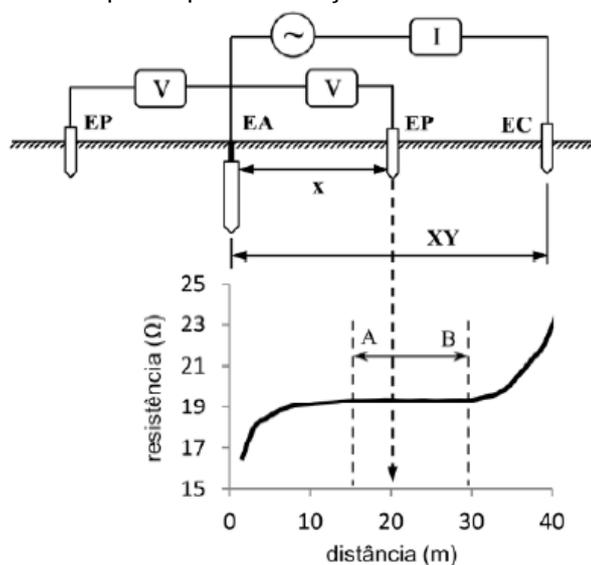


Fonte: retirado de [2].

### 2.3 Medição da resistência de aterramento

O Método da Queda de Potencial (*Fall-of-Potential* – FoP) é a técnica mais amplamente utilizada em medições da resistência de aterramento nas SE. As medições são realizadas em duas circunstâncias: *i*) imediatamente após a instalação da malha, normalmente, com a SE ainda desenergizada. Neste caso, o objetivo é verificar se a resistência da malha está em concordância com o valor de projeto; *ii*) medições de inspeção. Nesta situação, as medições são realizadas dentro de uma programação e com a SE já em operação. O objetivo é verificar, dentre outros parâmetros, se a resistência da malha permanece dentro daquilo que foi o valor de projeto [18]. Neste tipo de medição (ver Figura 10), uma corrente alternada circula em um circuito constituído pelo aterramento sob ensaio, representado por uma haste (EA), o solo e o eletrodo auxiliar de corrente (EC). A corrente que circula nas proximidades desses eletrodos produz uma elevação de potencial no solo que é detectada pelo eletrodo de potencial (EP) [19]. Ao se deslocar EP ao longo do segmento de reta XY com espaçamentos aproximadamente constantes, registra-se o perfil de potencial. A relação entre a tensão desenvolvida e a corrente injetada pelo equipamento de medição (EM), em cada posição de medição, determina a resistência do aterramento. Na curva apresentada na Figura 10, verifica-se a região entre os pontos A e B, onde o valor da resistência é aproximadamente constante. Essa é a região que se caracteriza o valor da resistência de aterramento da malha,  $R_g$ , região essa, também, chamada “patamar” [7].

Figura 10 – Esquema para a medição da resistência com o FoP.



Fonte: Retirado de [19].

Uma consideração importante em relação ao uso do FoP, é o cuidado que se deve ter com a distância na qual o EC deve ficar do EA. Recomenda-se que o EC esteja a uma distância mínima de 3 a 5 vezes o maior comprimento linear da malha de aterramento sob teste [4,3]. Tal medida visa evitar o acoplamento entre EA e EC. Além disso, o EP é geralmente posicionado na mesma direção de EC, contudo, pode ser posicionado na direção oposta para se evitar ou mitigar o acoplamento entre os circuitos de corrente e o de tensão. Isso é particularmente importante em circuitos com cabos longos, como é o caso de medições em SE. Ma e Dawalibi [20] mostraram que para sistemas de aterramento concentrados ou de pequenas dimensões os efeitos do acoplamento são desprezíveis, porém, para correntes de altas frequências e/ou em sistemas de grandes dimensões o acoplamento entre os circuitos pode levar a erros significativos. Com o intuito de atenuar esse efeito, Wang *et al.* [21] propuseram utilizar o EP na direção oposta ao EC (ver Figura 10).

Outro efeito que pode levar a erros está relacionado às correntes espúrias presentes no solo. Essas correntes podem produzir elevações de potencial na malha, prejudicando sinal/ruído de medição. Além disso, os equipamentos de medição devem operar com correntes em frequências diferentes das utilizadas no sistema elétrico. Nesse sentido, são encontrados no mercado equipamentos operando em frequências que variam, no geral, entre 90 Hz e 25 kHz, como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Frequência de operação de equipamentos de medição (terrômetros).

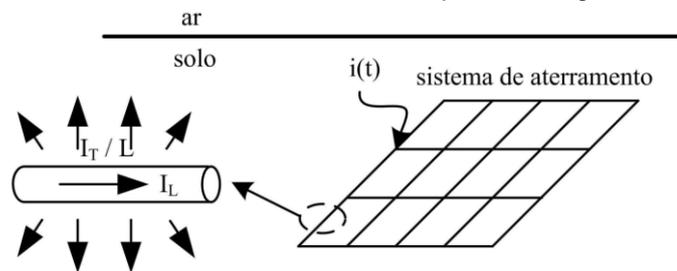
Fabricante	Modelo	Frequências [Hz]
Megabras	TM25R	25000
Megabras	EM4058 MTD 20KWe	270, 570 870, 1170, 1479 1420
Highmed	HMTR-30	94, 105, 111, 128
Minipa	MTR-1520D	40 - 500
	MTR-1530	820
	MTR-1540	820
	MTR-2300	94, 105, 111, 128
	ET-4310	1000
Instrump	ITTMD 20KW	105
	MTR-200	1000
Hikari	HTE-770	40 – 500
Victor-Ruoshui	4108	94/105/111/128 Aut/Man
AEMC	6472	40 a 513

Fonte: Próprio autor.

## 2.4 Modelagem das malhas de aterramento

A malha de aterramento de uma subestação é formada por um eletrodo com geometria reticulada e condutor cilíndrico, ficando enterrada a certa profundidade no solo (ver Figura 11). Nesse modelo, cada segmento de eletrodo de comprimento  $L$  é uma fonte de uma densidade de corrente transversal  $I_T/L$  que se dispersa no solo e de corrente longitudinal,  $I_L$ , que propaga ao longo do eletrodo. É importante ressaltar que ambas as fontes de campo, apresentam valores uniformes ao longo do segmento de eletrodo. Estes valores, porém, podem variar para cada segmento.

Figura 11 – Malha de aterramento com detalhe para um segmento do eletrodo.



Fonte: retirado de [22].

Nas análises, considera-se que o meio no qual o eletrodo está enterrado é homogêneo e isotrópico, de modo que possa ser caracterizado por uma constante de propagação  $\gamma$ , sendo

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad (2.2)$$

onde,  $\mu$ ,  $\sigma$  e  $\varepsilon$  são a permeabilidade magnética, a condutividade elétrica e a permissividade elétrica do meio, respectivamente, e  $\alpha$  e  $\beta$  correspondem à constante de atenuação e à constante de fase, respectivamente.

Com o eletrodo dividido em  $N$  segmentos, torna-se necessário determinar o acoplamento entre eles. Segundo Visacro [23], a fonte de corrente transversal, por apresentar caráter divergente, não apresenta efeito magnético, causando apenas a elevação de potencial em seu entorno. Já a corrente longitudinal, produz a queda de potencial ao longo do próprio condutor e em outros segmentos do eletrodo. Considerando uma fonte de corrente  $j$  e um receptor  $i$  submetido aos campos eletromagnéticos produzidos por essa fonte

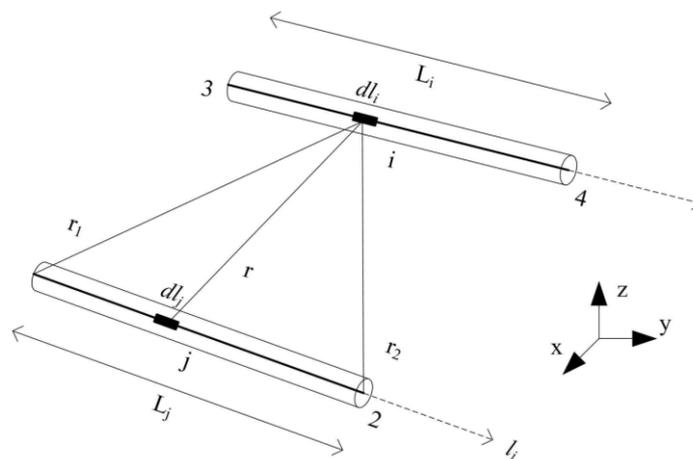
(ver Figura 12), a equação (2.3) quantifica a elevação de potencial média gerada no elemento  $i$ , devido à corrente transversal  $I_{Tj}$  do elemento  $j$ . De modo similar, a equação (2.4) quantifica a tensão induzida no elemento  $i$ , devido à corrente longitudinal  $I_{Lj}$  que propaga ao longo do elemento  $j$ .

$$V_{ij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_jL_i} \int_{L_i} \int_{L_j} I_{Tj} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i \quad (2.3)$$

$$\Delta V_{ij} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} I_{Lj} \frac{e^{-\gamma r}}{r} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i \quad (2.4)$$

onde,  $dl_i$  e  $dl_j$  são os comprimentos diferenciais do elemento fonte  $j$  e do elemento receptor  $i$ , respectivamente;  $d\vec{l}_i$  e  $d\vec{l}_j$  são os vetores de comprimento diferencial do elemento fonte  $j$  e do elemento receptor  $i$ , respectivamente;  $L_j$  e  $L_i$  são os comprimentos do elemento fonte  $j$  e do elemento receptor  $i$ ;  $r$  corresponde a distância entre os condutores.

Figura 12 – Segmento de eletrodo emissor  $j$  e receptor  $i$ .



Fonte: retirado de [22].

O acoplamento transversal está associado à impedância transversal,  $Z_{Tij}$ , existente entre dois eletrodos. Já o acoplamento longitudinal é determinado pela impedância longitudinal,  $Z_{Lij}$ , entre os segmentos longitudinais de eletrodo. Essas impedâncias, podem ser determinadas a partir do potencial escalar médio e do potencial vetor magnético, respectivamente, em um dado ponto P. Neste caso, o comprimento do eletrodo deve ser tão

pequeno quanto necessário de modo a se assegurar que a corrente transversal apresente uma distribuição uniforme em direção ao solo e a corrente longitudinal seja uniforme ao longo do segmento [23].

A aplicação das equações (2.3) e (2.4) aos N segmentos do eletrodo de aterramento leva a um sistema de equações lineares, sendo

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}_T \mathbf{I}_T \quad (2.5)$$

$$\Delta \mathbf{V} = \mathbf{Z}_L \mathbf{I}_L \quad (2.6)$$

onde, em (2.5)  $\mathbf{V}$  é o vetor elevação de potencial médio em relação ao infinito em cada elemento,  $\mathbf{I}_T$  é o vetor de corrente transversal em cada elemento e  $\mathbf{Z}_T$  é a matriz de impedâncias transversais. Em (2.6),  $\Delta \mathbf{V}$  é o vetor relativo as quedas de potencial em cada elemento,  $\mathbf{I}_L$  é o vetor de corrente longitudinal em cada elemento e  $\mathbf{Z}_L$  é a matriz de impedâncias longitudinais. Aplicando o método dos Momentos, conforme descrito em [24,25,26], as impedâncias transversais são determinadas por

$$Z_{T_{ij}} = \frac{V_{ij}}{I_{T_j}} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)L_j L_i} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl_j dl_i \quad (2.7)$$

A impedância  $Z_{T_{ij}}$  é igual ao potencial médio no elemento receptor, devido à fonte de corrente transversal no elemento emissor, dividido pela corrente transversal deste último. Essa impedância representa fisicamente os acoplamentos de natureza capacitiva e condutiva, próprio e mútuo, entre o par de elementos. De modo similar, a impedância longitudinal é determinada por

$$Z_{L_{ij}} = \frac{\Delta V_{ij}}{I_{L_j}} = -j\omega \frac{\mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma r}}{r} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i \quad (2.8)$$

A impedância  $Z_{L_{ij}}$  é determinada pela tensão induzida no elemento receptor, devido à fonte de corrente longitudinal no elemento emissor, dividido pela corrente longitudinal deste último. Essa impedância representa fisicamente os acoplamentos de natureza indutiva (magnéticos) próprio e mútuo entre eles. Por fim, é importante ressaltar que as impedâncias longitudinal e transversal dependem apenas da geometria do aterramento e

das características eletromagnéticas do solo, uma vez que as análises não consideram efeitos como a ionização do solo (não linear).

## 2.5 Variação dos parâmetros elétricos do solo em relação à frequência

Em 1987, Visacro e Portela apresentaram resultados experimentais obtidos em laboratório utilizando três tipos de solo distintos. Os resultados evidenciaram a variação da resistividade e da permissividade elétrica com a frequência. As análises foram realizadas na faixa de frequências entre 40 Hz e 2 MHz [27]. Durante os ensaios, a umidade do solo variou entre 15% e 2,5%, sendo controlada pela adição de água destilada. A efetividade do modelo proposto foi verificada por meio de comparações com resultados obtidos em condições de campo. Neste trabalho, os autores concluíram que os erros associados à permissividade eram inferiores a 20% em baixas frequências, reduzindo-se para ~10% para frequências superiores a 20 kHz. No caso da resistividade, os desvios foram pequenos nas faixas extremas de frequência, superior 1 MHz e inferior 100 Hz. No intervalo central, para frequências na faixa de kHz, os erros foram maiores. Em razão do número de amostras ser considerada pequena, os autores optaram por não generalizar os resultados obtidos. Contudo, é importante ressaltar que esse trabalho, possivelmente, foi o primeiro a destacar a importância de se determinar um modelo para o solo que contemple a variação dos parâmetros com a frequência em aplicações que visam objetivamente avaliar as condições transitórias de um aterramento submetido a correntes impulsivas.

Anos mais tarde, Portela apresentou alguns trabalhos onde propôs um novo modelo que descrevesse a variação dos parâmetros elétricos do solo permissividade elétrica e resistividade. A faixa de frequências variou entre 100 Hz e 2 MHz, naturalmente motivada por fenômenos transitórios rápidos associados às descargas atmosféricas. Utilizando uma técnica bastante elaborada de medição em 68 amostras e, também, análises estatísticas, a seguinte equação foi proposta [28,29]

$$\sigma_{solo} \pm j\omega\varepsilon_{solo} = \sigma_0 + \Delta i \left[ \cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \pm j \right] (f \times 10^{-6})^\alpha \quad (2.9)$$

sendo,  $\omega$  a frequência angular (rad/s);  $\sigma_0$  a condutividade elétrica do solo medida em baixa frequência (100 Hz) (S/m);  $\alpha$  o parâmetro da parcela dependente da frequência;  $\Delta i$

a corresponde a variação de  $\omega\varepsilon$  medidos em 100Hz e 1MHz;  $\sigma_{solo}$  a condutividade do solo em função da frequência (S/m) e  $\varepsilon_{solo}$  a permissividade elétrica do solo (F/m).

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\Delta i$ , são obtidos por meio de uma técnica de medição que se encontra detalhada em [28]. Contudo, é importante salientar que esses parâmetros apresentam distribuição estatística conhecida, de modo que existindo dificuldades nos procedimentos de medição, tal distribuição pode ser utilizada como base para se determinar razoavelmente esses parâmetros.

Considerando-se os resultados das avaliações de desempenho de sistemas de aterramento submetidos à injeção de correntes de descargas atmosféricas, sugerem-se para solos com valores intermediários de resistividade elétrica ( $100\Omega\text{m} < \rho < 10.000\Omega\text{m}$ ) os seguintes valores [30]:

- Para obtenção de valores medianos:

$$\alpha \cong 0,706 \text{ e } \Delta i \cong 11,71$$

- Para obtenção de valores razoavelmente seguros:

$$\alpha \cong 0,806 \text{ e } \Delta i \cong 9,23$$

$$\alpha \cong 0,856 \text{ e } \Delta i \cong 7,91$$

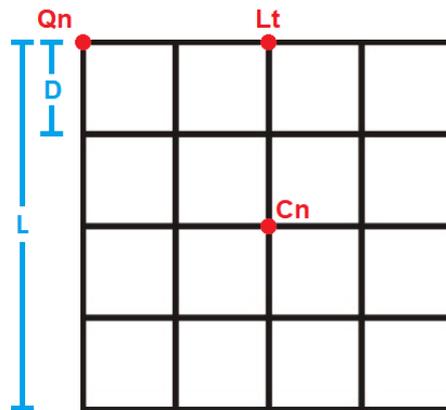
Avaliando a equação (2.9), verifica-se que, em relação à permissividade elétrica, é observada a sua redução na faixa superior do espectro de frequências (>100kHz). Essa redução, no entanto, não leva, necessariamente, a uma diminuição da corrente capacitiva, já que a dependência está associada ao produto da permissividade pela frequência,  $\omega\varepsilon$ . Quanto à resistividade do solo, verifica-se uma sensível diminuição com a frequência. Notoriamente, verifica-se a diferença entre os valores nas faixas de frequências dominantes em fenômenos transitórios e aqueles na faixa de frequências em que usualmente a resistividade é medida (baixa frequência). Assim, o efeito global da variação de  $\rho$  e  $\varepsilon$  com a frequência é redução da impedância de aterramento. Em alguns casos essa redução é próxima de 10%, podendo chegar a 30% [31].

### 3 RESPOSTAS DE MALHAS NAS FREQUÊNCIAS DE 100 Hz e 25 kHz

#### 3.1 Considerações iniciais

Para se analisar a resposta do aterramento a correntes de frequências típicas de terrômetros comerciais foram consideradas malhas de lados com comprimentos iguais ( $L = L_x = L_y$ ) tendo 20, 60 e 120 metros; retículos de comprimento  $D$  igual a 2, 5 e 10 metros. Em todos os casos, foram avaliados 3 pontos de medição e injeção de corrente diferentes: quina (Qn), lateral (Lt) e centro (Cn) (ver Figura 13).

Figura 13 - Malha reticulada com lado  $L$ , retículo  $D$  e pontos de medição Qn, Lt e Cn.



Fonte: Próprio autor.

Apesar de o interesse direto deste trabalho estar nas frequências de 100 Hz e de 25 kHz, visando conferir maior generalidade aos resultados, as simulações foram realizadas em uma ampla faixa de frequências compreendida entre 10 Hz e 1 MHz. A malha é constituída por eletrodo de raio 7 mm, enterrado a uma profundidade de 0,5 m em solos de resistividade variando entre  $100 \Omega \cdot m$  e  $10000 \Omega \cdot m$ . Os parâmetros resistividade do solo,  $\rho$ , e permissividade elétrica do solo,  $\epsilon$ , variam com a frequência de acordo com a equação (2.9), sendo considerados  $\sigma_o = 2,78 \times 10^{-3} S/m$ ,  $\Delta_i = 4,65 \times 10^{-3} S/m$  e  $\alpha = 0,60$ , de modo a considerar solos de condições medianas [32].

As simulações computacionais se deram por meio da linguagem de programação Julia, sendo implementado o Modelo Eletromagnético Híbrido (*Hybrid Electromagnetic Model* – HEM), cuja fundamentação foi apresentada na seção 2.4, amplamente utilizado

para modelar aterramentos [33,34,35]. A resposta em frequência de todos os casos avaliados, na faixa de frequências mais ampla, é apresentada nos apêndices deste trabalho. Contudo, devido ao interesse direto em apenas duas frequências (100 Hz e 25 kHz), neste capítulo, os resultados são apresentados em tabelas explicitando o valor da impedância em coordenada polar e retangular.

### 3.2 Malha de 20m x 20m

No primeiro caso analisado o retículo da malha é de 2 m. Os resultados são apresentados na Tabela 2, onde se verifica que em baixa frequência a impedância ( $Z_{100\text{Hz}}$ ) é, aproximadamente, a mesma qualquer que seja o ponto de medição na malha (Qn, Lt ou Cn). Assim, por exemplo, a impedância é de  $\sim 2,1 \Omega$  para o solo de 100  $\Omega\text{m}$ , qualquer que seja a posição considerada. Observa-se, ainda, que a parcela reativa das impedâncias em 100 Hz é desprezível em comparação a parcela ativa, o que evidencia o comportamento resistivo dos aterramentos em baixas frequências ( $Z_{100\text{Hz}}$ ). Já em alta frequência ( $Z_{25\text{kHz}}$ ), são verificadas diferenças entre os valores obtidos em cada uma das posições quando a resistividade é de 100  $\Omega\text{m}$  (2,0334 $\Omega$  em Qn; 1,74861 $\Omega$  em Lt e 1,6072 $\Omega$  em Cn). Para as demais resistividades ( $\rho \geq 500 \Omega\text{m}$ ), essa variação já não acontece. Contudo, se comparado aos valores de  $Z_{100\text{Hz}}$ , as diferenças (erros) passam a ser significativos, sobretudo para resistividades maiores ou igual 500  $\Omega\text{m}$ . É importante ressaltar, também, que os equipamentos de altas frequências, normalmente, disponibilizam o recurso de compensação de reativo. Dessa forma, somente a parte real da impedância é considerada, na expectativa de que esse valor seja representativo para a resistência de aterramento. Assim, por exemplo, para a resistividade de 5000  $\Omega\text{m}$ , o módulo da impedância  $Z_{25\text{kHz}}$  é de  $\sim 26\Omega$ , contudo o valor compensado é de 18,6829 $\Omega$ . Ressalta-se, contudo, que em baixa frequência a impedância é de  $\sim 99\Omega$ , de modo que o erro é significativo qualquer que seja a condição, compensado ou não.

Tabela 2 – Impedâncias calculadas considerando posições variadas.  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ .

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{100\text{ Hz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	2,1115-0,029j	2,1117	2,1115-0,0317j	2,1117	2,1115-0,0338j	2,1118
500	10,5866-0,1616j	10,5878	10,5866-0,1643j	10,5879	10,5866-0,1664j	10,5879
1000	21,0679-0,4786j	21,0733	21,0679-0,4813j	21,0734	21,0679-0,4834j	21,0734
2500	51,6419-2,4653j	51,7007	51,6419-2,468j	51,7008	51,6419-2,4701j	51,7009
5000	99,5627-8,8565j	99,9558	99,5627-8,8592j	99,9561	99,5627-8,8613j	99,9563
10000	183,9323-30,3362j	186,4172	183,9323-30,3389j	186,4176	183,9323-30,341j	186,4180

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{25\text{ kHz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	1,8712+0,7959j	2,0334	1,7322+0,2391j	1,7486	1,5988-0,1644j	1,6072
500	7,6909-1,211j	7,7857	7,6238-1,8461j	7,8441	7,5575-2,3299j	7,9085
1000	12,3655-4,5903j	13,1900	12,3127-5,2402j	13,3814	12,2603-5,736j	13,5358
2500	17,4349-12,3278j	21,3530	17,3917-12,989j	21,7068	17,3487-13,4992j	21,9819
5000	18,6829-18,1479j	26,0461	18,6429-18,8135j	26,4859	18,6031-19,3283j	26,8265
10000	18,5703-22,1279j	28,8877	18,532-22,796j	29,3784	18,4938-23,3132j	29,7578

Fonte: Próprio autor.

Já para o caso presente na Tabela 3, com retículo de lado 5 m, verifica-se que, analogamente ao caso presente anteriormente, em baixa frequência os valores não dependem das posições da malha, não ocorrendo variações significativas. Em alta frequência, também, é constatado a mesma tendência verificada na Tabela 2, estando presente uma variação dos valores medidos com os locais de medição para valores de baixa resistividade do solo e uma queda considerável do módulo quando comparado ao valor de referência em 100 Hz. Fica evidente, também, que os resultados em 25 kHz se tornam discrepantes daqueles determinados em 100 Hz.

Tabela 3 - Impedâncias determinadas em posições variadas.  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ .

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{100\text{ Hz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	2,2552-0,0284j	2,2554	2,2551-0,0313j	2,2553	2,2551-0,0336j	2,2554
500	11,0115-0,165j	11,0127	11,0115-0,1678j	11,0128	11,0115-0,17j	11,0128
1000	21,9119-0,4935j	21,9175	21,9119-0,4963j	21,9175	21,9118-0,4985j	21,9175
2500	53,7072-2,5573j	53,7680	53,7072-2,5601j	53,7682	53,7072-2,5622j	53,7683
5000	103,5412-9,2011j	103,9492	103,5412-9,2039j	103,9495	103,5412-9,2061j	103,9497
10000	191,2784-31,5344j	193,8604	191,2784-31,5371j	193,8608	191,2784-31,5393j	193,8612

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{25\text{ kHz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	2,0463+0,9863j	2,2716	1,8941+0,3793j	1,9317	1,7437-0,0626j	1,7448
500	8,043-1,175j	8,1284	7,9739-1,8255j	8,1802	7,9044-2,3256j	8,2394
1000	12,9189-4,6835j	13,7417	12,865-5,3489j	13,9327	12,8107-5,8642j	14,0891
2500	18,2118-12,7283j	22,2189	18,1679-13,405j	22,5780	18,1239-13,9319j	22,8599
5000	19,5213-18,7833j	27,0905	19,4809-19,4645j	27,5386	19,4403-19,996j	27,8884
10000	19,4113-22,9253j	30,0394	19,3725-23,609j	30,5398	19,3337-24,143j	30,9302

Fonte: Próprio autor.

Para evidenciar as diferenças existentes entre os resultados obtidos em baixa e em alta frequência, são apresentados na Tabela 4 e na Figura 14 os erros entre os módulos da impedância  $Z_{100\text{Hz}}$  e da impedância  $Z_{25\text{kHz}}$ . É considerado, também, o erro associado da parcela real da impedância  $Z_{25\text{kHz}}$  e o módulo da impedância  $Z_{100\text{Hz}}$  para a malha com retículos de 2 m (Tabela 2). Na tabela, verifica-se que os erros crescem significativamente à medida que a resistividade aumenta, contudo, como já mencionado anteriormente, por razões de ordem prática, os resultados para as resistividades menores que  $500 \Omega \cdot m$  podem ser considerados satisfatórios.

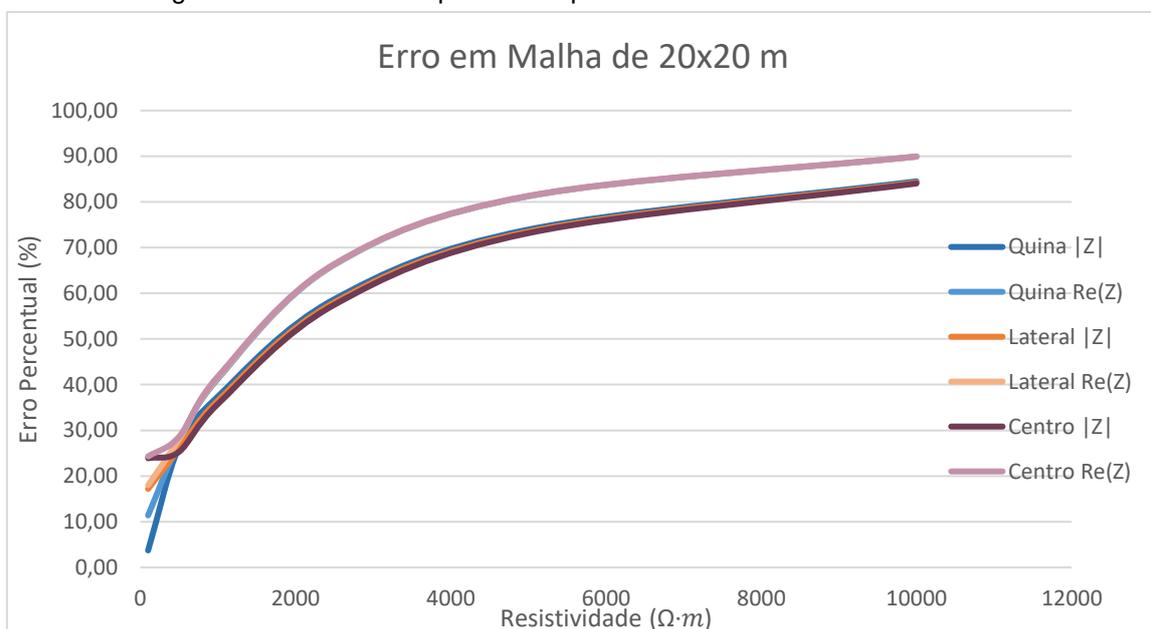
A partir dos resultados obtidos podem ser feitas considerações sobre a compensação de reativos, que é realizada por equipamentos de 25 kHz com a intenção de melhorar os resultados de medições nessa frequência. Verifica-se, a partir dos erros em relação à parcela real, que a compensação pode ser considerada adequada para a malha de 20m x 20m e solos abaixo de  $1000 \Omega \cdot m$ , levando em conta erros entre 20% e 30%. Para as demais resistividades, verifica-se que esse artifício não apresenta efetividade. Contudo, a efetividade da compensação em baixas frequências depende da capacidade do equipamento realizar compensação de indutivo e de capacitivo, sendo que, em geral, esta última não é realizada por estes equipamentos. Assim, levando em conta que o equipamento só tenha a capacidade de compensar reatâncias indutivas, somente para a resistividade de  $100 \Omega \cdot m$  a compensação seria efetiva e se ela fosse realizada nos pontos correspondentes à quina e à lateral da malha.

Tabela 4 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 2.

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	Quina (%)		Lateral (%)		Centro (%)	
	Z	Re(Z)	Z	Re(Z)	Z	Re(Z)
100	3,71	11,38	17,20	17,96	23,89	24,28
500	26,47	27,35	25,91	27,99	25,31	28,61
1000	37,41	41,31	36,50	41,56	35,77	41,81
2500	58,70	66,24	58,01	66,32	57,48	66,41
5000	73,94	81,24	73,50	81,28	73,16	81,32
10000	84,50	89,90	84,24	89,92	84,04	89,95

Fonte: Próprio autor.

Figura 14 - Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 2.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3 Malha de 60m x 60m

Para a malha com retículo de 2 m, como apresentado na Tabela 5, verifica-se, mais uma vez, que em baixa frequência a malha apresenta comportamento mais próximo a uma resistência de aterramento, uma vez que a parcela reativa das impedâncias é pequena em relação a parcela ativa. Isso também ocorre para os módulos das impedâncias, que apresentam valores próximos às parcelas reais da impedância. Para os resultados em alta frequência, verifica-se novamente que a parcela reativa das impedâncias não é desprezível em comparação à ativa. Observa-se, ainda, que a impedância varia com maior significância a depender da posição da malha, principalmente para as resistividades

de 100 e 500  $\Omega \cdot m$ . Comparando-se os valores obtidos nas duas frequências, há uma discrepância significativa, que se acentuam com o aumento da resistividade.

Tabela 5 - Impedâncias determinadas em posições variadas.  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ .

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{100\text{ Hz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	0,6889-0,0137j	0,6890	0,6887-0,0218j	0,6890	0,6884-0,028j	0,6890
500	3,5099-0,0836j	3,5109	3,5098-0,0918j	3,5110	3,597-0,0982j	3,5983
1000	7,0116-0,2088j	7,0147	7,0115-0,2171j	7,0149	7,0115-0,2234j	7,0151
2500	17,2443-0,9118j	17,2684	17,2443-0,92j	17,2688	17,2442-0,9264j	17,2691
5000	33,2998-3,0952j	33,4433	33,2989-3,1035j	33,4432	33,2997-3,1099j	33,4446
10000	61,5832-10,354j	62,4475	61,5832-10,3622j	62,4489	61,5831-10,3687j	62,4499

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{25\text{ kHz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	1,5676+1,5343j	2,1935	0,9229+0,78j	1,2084	0,483+0,3908j	0,6213
500	3,1564+2,1246j	3,8048	2,5334+0,6112j	2,6061	1,957-0,4184j	2,0012
1000	4,2989+1,3374j	4,5021	3,7597-0,3835j	3,7792	3,2403-1,6249j	3,6249
2500	5,4864-0,9481j	5,5677	5,0277-2,8265j	5,7677	4,5759-4,231j	6,2322
5000	5,6493-2,7307j	6,2747	5,2234-4,6703j	7,0068	4,8012-6,1383j	7,7930
10000	5,4649-3,9511j	6,7436	5,0564-5,9234j	7,7881	4,65-7,4255j	8,7613

Fonte: Próprio autor.

Para a malha com retículo de 5 m (ver Tabela 6), verifica-se uma tendência semelhante ao apresentado no caso em que o retículo é de 2 m, onde a tendência em baixa frequência se aproxima de uma resistência de aterramento, com uma pequena parcela reativa quando comparado com a ativa. Essa tendência semelhante a malha com retículo de 2 m se repete também para o caso em alta frequência, com uma pequena mudança no que diz respeito a variação dos valores medidos de acordo com o local de medição, onde no caso da malha com retículo de 5 m existe uma variação um pouco maior quando comparado ao caso anterior, o que somente deixa mais evidente a discrepância dos casos de alta e baixa frequência.

Tabela 6 - Impedâncias determinadas em posições variadas.  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ .

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{100\text{ Hz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	0,7144-0,0121j	0,7145	0,7141-0,0208j	0,7144	0,7139-0,0273j	0,7144
500	3,5933-0,0833j	3,5943	3,5932-0,0919j	3,5944	3,5931-0,0984j	3,5944
1000	7,1772-0,2108j	7,1803	7,1771-0,2193j	7,1804	7,177-0,2259j	7,1806
2500	17,6495-0,9289j	17,6739	17,6494-0,9374j	17,6743	17,6494-0,944j	17,6746
5000	34,0803-3,1619j	34,2267	34,0803-3,1705j	34,2275	34,0802-3,1771j	34,2280
10000	63,0243-10,5881j	63,9075	63,0243-10,5967j	63,9089	63,0243-10,6033j	63,9100

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	$Z_{25\text{ kHz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	1,7344+1,7991j	2,4990	1,0217+0,9733j	1,4111	0,5389+0,5616j	0,7783
500	3,2888+2,3579j	4,0467	2,6359+0,7699j	2,7460	2,032-0,2987j	2,0538
1000	4,4505+1,5624j	4,7168	3,8911-0,2409j	3,8985	3,3525-1,53j	3,6851
2500	5,6654-0,775j	5,7182	5,1943-2,7396j	5,8725	4,7305-4,1962j	6,3234
5000	5,8342-2,6015j	6,3879	5,3989-4,6282j	7,1111	4,9673-6,1495j	7,9051
10000	5,647-3,8526j	6,8360	5,2306-5,9126j	7,8942	4,8164-7,4684j	8,8868

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 7 e na

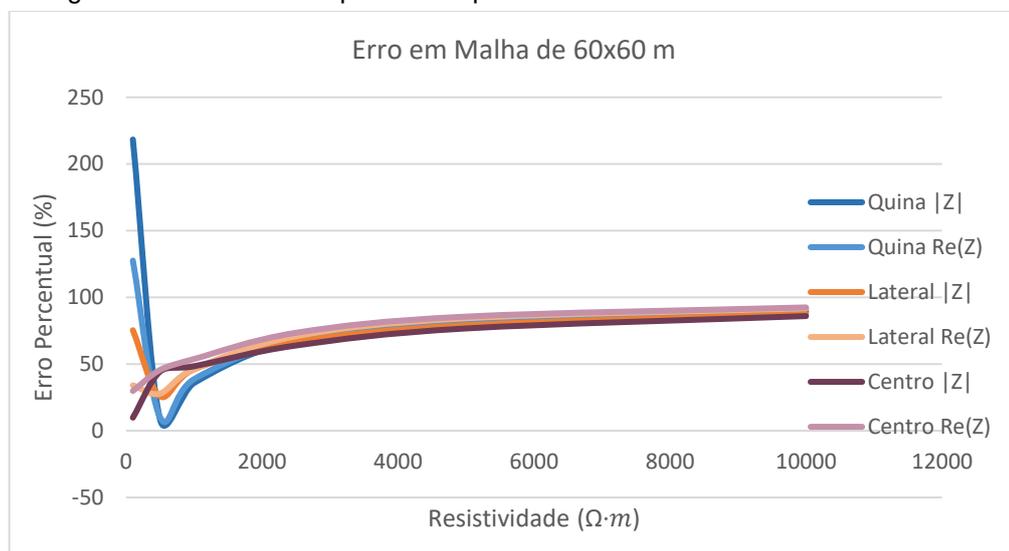
Figura 15 são apresentados os erros entre os módulos e as partes reais da impedância de  $Z_{25\text{ kHz}}$  em relação a  $Z_{100\text{ Hz}}$  para a malha com retículo de 2 m. Ressalta-se novamente a grande discrepância entre os valores obtidos em 25 kHz em relação aos obtidos em 100 Hz com o aumento da resistividade. Outro ponto a ser observado é a grande dependência da localização da malha para a realização da compensação de reativo, o que torna esse artifício não recomendado para malhas de 60x60 m.

Tabela 7 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 5.

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	Quina (%)		Lateral (%)		Centro (%)	
	Z	Re(Z)	Z	Re(Z)	Z	Re(Z)
100	218,34	127,55	75,36	34,00	9,82	29,83
500	8,37	10,07	25,77	27,81	44,38	45,59
1000	35,81	38,68	46,12	46,37	48,32	53,78
2500	67,75	68,18	66,60	70,84	63,91	73,46
5000	81,23	83,03	79,04	84,31	76,69	85,58
10000	89,20	91,12	87,52	91,78	85,97	92,44

Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 5.



Fonte: Próprio autor.

### 3.4 Malha de 120m x 120m

Para a malha com retículos de 2 m, cujos resultados são apresentados na Tabela 8, verifica-se novamente a predominância da parcela ativa da impedância em 100 Hz, o que caracteriza a malha como uma resistência de aterramento. Em relação a 25 kHz, verifica-se agora que a diferença entre os valores de impedância nos três pontos torna-se significativa em todas as resistividades e, mais uma vez, tem-se que os valores são bastante diferentes dos obtidos em baixa frequência.

Tabela 8 – Impedâncias determinadas em posições variadas.  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ .

Resistividade	$Z_{100 Hz}$
---------------	--------------

$(\Omega \cdot m)$	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	0,3314+0,0047j	0,3314	0,3303-0,0109j	0,3305	0,3293-0,0229j	0,3301
500	1,7236-0,0485j	1,7243	1,7231-0,0646j	1,7243	1,7227-0,0771j	1,7244
1000	3,4625-0,125j	3,4648	3,4622-0,1413j	3,4651	3,4619-0,154j	3,4653
2500	8,5583-5,1604j	9,9937	8,5581-0,52j	8,5739	8,5579-0,5328j	8,5745
5000	16,5669-1,6244j	16,6463	16,5668-1,6409j	16,6479	16,5666-1,6536j	16,6489
10000	30,687-5,2918j	31,1399	30,6869-5,3083j	31,1426	30,6868-5,3211j	31,1447

Resistividade $(\Omega \cdot m)$	$Z_{25 \text{ kHz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Quina (Qn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	1,5935+1,5181j	2,2009	0,9052+0,9166j	1,2882	0,5057+0,5607j	0,7551
500	3,4413+2,9378j	4,5247	1,9753+1,3639j	2,4004	0,9601+0,5885j	1,1261
1000	4,3846+3,4404j	5,5732	2,7068+1,2686j	2,9893	1,339+0,0877j	1,3419
2500	5,1604+3,472j	6,2197	3,3506+0,6532j	3,4137	1,6838-1,1013j	2,0120
5000	5,2537+3,2273j	6,1658	3,4051+0,0943j	3,4064	1,6316-1,9726j	2,5599
10000	5,1511+3,023j	5,9726	3,2858-0,2957j	3,2991	1,4609-2,5538j	2,9421

Fonte: Próprio autor.

Ao se analisar a malha com retículo de 5 m (ver Tabela 9), observa-se que, como na malha com retículo de 2 m, em baixas frequências há uma aproximação de uma resistência de aterramento com uma pequena parcela reativa em relação à ativa. Já em altas frequências, constatou-se uma discrepância significativa nos valores de impedância em todos os pontos, independentemente da resistividade. Mais uma vez, os dados exibiram consideráveis divergências quando comparados com aqueles obtidos em baixas frequências.

Tabela 9 - Impedâncias determinadas em posições variadas.  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ .

Resistividade $(\Omega \cdot m)$	$Z_{100 \text{ Hz}}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	0,3393-0,0071j	0,3394	0,3383-0,0095j	0,3384	0,3372-0,022j	0,3379
500	1,7504-0,0471j	1,7510	1,7499-0,0639j	1,7511	1,7495-0,0767j	1,7512
1000	3,5158-0,1245j	3,5180	3,5154-0,1413j	3,5182	3,5151-0,1543j	3,5185
2500	8,6886-0,5079j	8,7034	8,6884-0,5249j	8,7042	8,6882-0,5379j	8,7048
5000	16,8178-1,6446j	16,8980	16,8176-1,6616j	16,8995	16,8175-1,6747j	16,9007
10000	31,1502-5,3659j	31,6090	31,1501-5,3829j	31,6118	31,15-5,3961j	31,6139

Resistividade	$Z_{25 \text{ kHz}}$
---------------	----------------------

$(\Omega \cdot m)$	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	1,76+1,7801j	2,5033	1,0073+1,1187j	1,5054	0,5706+0,741j	0,9352
500	3,601+3,199j	4,8167	2,063+1,5509j	2,5809	1,0042+0,7518j	1,2544
1000	4,5582+3,752j	5,9038	2,8078+1,4729j	3,1707	1,3876+0,2474j	1,4095
2500	5,3341+3,824j	6,5632	3,4604+0,8666j	3,5673	1,7406-0,9591j	1,9874
5000	5,4188+3,5911j	6,5007	3,5132+0,306j	3,5265	1,6901-1,8448j	2,5019
10000	5,3073+3,391j	6,2981	3,3898-0,0869j	3,3909	1,5184-2,4362j	2,8706

Fonte: Próprio autor.

No caso da malha com retículo de 10 m, presente na Tabela 10, verifica-se, assim como nas malhas com retículos de 2 ou 5 m, que em baixas frequências há uma tendência para uma resistência de aterramento com uma pequena parcela reativa em relação à ativa. Já em altas frequências, novamente verificamos um comportamento semelhante ao das malhas com retículos menores, com uma discrepância significativa nos valores de impedância em todos os pontos, independente da resistividade. É importante ressaltar que, mais uma vez, os dados apresentam divergências significativas quando comparados com aqueles obtidos em baixas frequências. Tais constatações reforçam a necessidade de avaliações detalhadas e precisas dos resultados obtidos em diferentes contextos, a fim de garantir a excelência na análise de dados.

Tabela 10 - Impedâncias determinadas em posições variadas.  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ .

Resistividade $(\Omega \cdot m)$	$Z_{100 Hz}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	0,3533+0,0109j	0,3535	0,3522-0,0071j	0,3523	0,3511-0,0205j	0,3517
500	1,8126-0,0444j	1,8131	1,8122-0,0623j	1,8133	1,8119-0,0759j	1,8135
1000	3,6394-0,1234j	3,6415	3,6391-0,1414j	3,6418	3,6387-0,1551j	3,6420
2500	8,991-0,5181j	9,0059	8,9909-0,5363j	9,0069	8,9907-0,5501j	9,0075
5000	17,4005-1,6918j	17,4826	17,4003-1,71j	17,4841	17,4002-1,7239j	17,4854
10000	32,2262-5,5381j	32,6986	32,2261-5,5564j	32,7016	32,226-5,5702j	32,7039

Resistividade $(\Omega \cdot m)$	$Z_{25 kHz}$					
	Quina (Qn)		Lateral (Lt)		Centro (Cn)	
	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo	Retangular	Módulo
100	2,0463+2,0894j	2,9245	1,2021+1,3807j	1,8307	0,7157+1,001j	1,2305
500	3,9695+3,7355j	5,4508	2,2757+1,9315j	2,9849	1,1174+1,0815j	1,5551
1000	4,6933+4,4057j	6,4372	3,0524+1,8974j	3,5941	1,5082+0,5715j	1,6128
2500	5,7426+4,5745j	7,3419	3,7256-1,3167j	3,9514	1,8777-0,6741j	1,9950
5000	5,8076+4,3703j	7,2683	3,7738+0,7546j	3,8485	1,8304-1,5928j	2,4264
10000	5,6754+4,1811j	7,0492	3,6404+0,3562j	3,6578	1,656-2,2073j	2,7594

Fonte: Próprio autor.

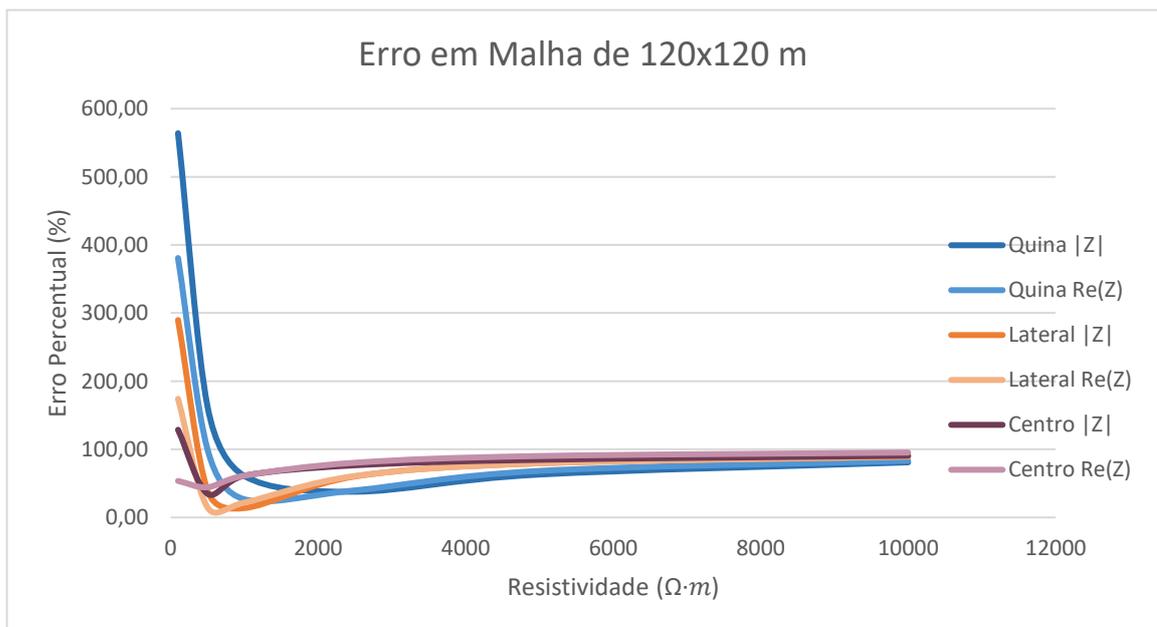
Na Tabela 11 e na Figura 16, são apresentados os erros entre os módulos e as partes ativas de  $Z_{25\text{ kHz}}$  em relação a  $Z_{100\text{ Hz}}$  para a malha com retículo de 2 m. É importante destacar mais uma vez a significativa discrepância entre os valores registrados em 25 kHz e 100 Hz com o aumento da resistividade. Além disso, destaca-se novamente a notável influência da localização do ponto de medição na malha para a compensação de reativo, tornando-se um artifício pouco recomendado para malhas com dimensões de 120x120 m.

Tabela 11 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 8.

Resistividade ( $\Omega \cdot m$ )	Quina (%)		Lateral (%)		Centro (%)	
	Z	Re(Z)	Z	Re(Z)	Z	Re(Z)
100	564,05	380,84	289,81	174,05	128,74	53,57
500	162,41	99,66	39,21	14,64	34,70	44,27
1000	60,86	26,63	13,73	21,82	61,28	61,32
2500	37,76	39,70	60,19	60,85	76,54	80,32
5000	62,96	68,29	79,54	79,45	84,62	90,15
10000	80,82	83,21	89,41	89,29	90,55	95,24

Fonte: Próprio autor.

Figura 16 – Erro relativo percentual para os resultados mostrados na Tabela 8.



Fonte: Próprio autor.

## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

A medição da resistência de aterramento de subestações é de extrema importância para a adequada operação do SEP, uma vez que por meio dela se garante a correta gradação das funções de proteção presentes nos relés digitais. Se a resistência de aterramento não for determinada adequadamente, apresentando valores abaixo do valor real como foi o caso em algumas das simulações apresentadas, corre-se o risco de uma corrente de falta não sensibilizar um relé de proteção adequadamente, o que poderá levar a sua não atuação, causando danos ao sistema. No geral, os resultados indicaram existir limites para o uso de correntes de altas frequências, sendo adequado o seu uso em malhas de pequenas dimensões e solos de baixa resistividade. Nos casos avaliados, a dimensão ficou limitada a malhas de  $20 \times 20 \text{ m}^2$  e solos de resistividade menores que  $500 \Omega\text{m}$ . Chama a atenção, também, o fato de a impedância em altas frequências apresentar valores muito próximos, qualquer que seja a posição da malha. Isso aconteceu em diversas condições de dimensão de malha e resistividade do solo. Em uma situação de campo, essa convergência de valores daria ao operador do equipamento de medição a impressão de que as medições foram realizadas com êxito. Contudo, apesar dessa convergência, os resultados evidenciaram a existência de um erro percentual bastante elevado se comparado aos valores obtidos em baixa frequência. Assim, essa falsa expectativa de uma boa qualidade em uma campanha de medição é bastante preocupante. Diante disso, fica evidente a necessidade de se ampliar os estudos voltados ao uso dessa frequência aplicados em medições para se determinar a resistência de malhas de aterramento reticuladas.

Como sugestão para trabalhos futuros sugere-se:

- Utilizar mais outros modelos que descrevem a variação de parâmetros do solo com a frequência.
- Analisar quão graves podem ser os impactos no sistema a partir do uso incorreto desses terrômetros.
- Validar as simulações através de medições em malhas construídas em ambiente controlado.
- Simular as malhas em ferramentas computacionais 3D.

## REFERÊNCIAS

1. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS. **NBR 15751: Sistemas de aterramentos de subestações - Requisitos**. Rio de Janeiro, p. 47. 2013.
2. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. **IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)**, p. 1-226, 15 May 2015.
3. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro, p. 55. 2009.
4. INSTITUTE OF ELECTRIC AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE Std 81-2012: IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system**. New York, p. 86. 2012.
5. BARBOSA, E. et al. Influence of Overhead Ground Wires at Substation Grounding Grids Resistance Measurement. **Ground2023 & 10th LPE**, Belo Horizonte/MG, May. 2023.
6. MORENO, H.; COSTA, P. F. **Aterramento Elétrico**. Procobre. São Paulo, p. 28. 1999.
7. VISACRO FILHO, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber, 2002.
8. LINS POMPEU, J.; DE CAMARGO WITT, R. N. **Análise da distribuição de corrente em malhas de aterramento ante a utilização de terrômetros de alta frequência**. UFPR. Curitiba, p. 81. 2018.
9. BARROS LIMA, A. **Método para o cálculo da impedância de aterramento de torres de linhas de transmissão**. UFMG. Belo Horizonte, p. 124. 2010.
10. PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. Criteria for using 25 kHz grounding meters to measure grounding grids. **Ground 2020/2021 & 9th LPE**, Belo Horizonte/Brazil, jun. 2021.
11. PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. Effect of the integration path on grounding measurements. **Electric Power Systems Research**, v. 194, mai. 2021.
12. BARBOSA, E. et al. Analysis of substation grounding grids response to currents at frequencies of 100 Hz and 25 kHz. **Ground2023 & 10th LPE**, Belo Horizonte/Brazil, May 2023.
13. GRCEV, L. Improved earthing system design practices for reduction of transient voltages. **CIGRE**, Macedonia, 1998. 6.
14. POPOVIC, L. M. Efficient reduction of fault current through the grounding grid of substation supplied by cable line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 556-561, April 2000.
15. YU, C. et al. Configuration Detection of Substation Grounding Grid Using Transient Electromagnetic Method. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 8, p. 6475-6483, Aug. 2017.
16. DIAS, A. D. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: medições e análises**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). [S.l.], p. 132. 2011.

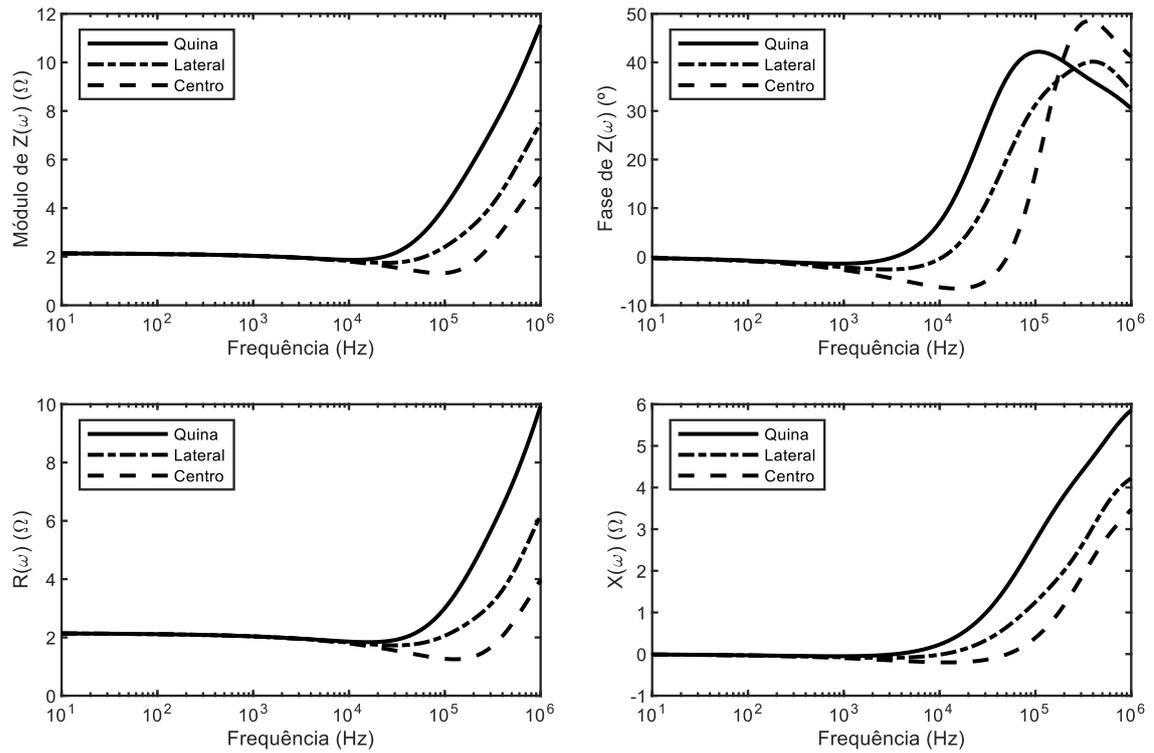
17. BALEV, V.; CHARAN, P. **Substation grounding optimization**. California State University. Sacramento, p. 82. 2013.
18. CAETANO, C. E. F. Caracterização de arranjos de aterramento através de medições no domínio do tempo. 2019. **Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2019.
19. LIMA, A. B. Medição da impedância e da resistência de aterramento usando ondas impulsivas e condutores de pequeno comprimento nos circuitos de tensão e de corrente. 2015. **Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2015.
20. MA, J.; DAWALIBI, F. P. Influence of inductive coupling between leads on ground impedance measurements using the fall-of-potential method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 4, p. 739-743, Out. 2001.
21. WANG, C.-G. et al. Grounding resistance measurement using fall-of-potential method with potential probe located in opposite direction to the current probe. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 4, p. 1128-1135, Out. 1998.
22. ALÍPIO, R. S. et al. Modelagem de aterramentos elétricos para fenômenos de alta frequência e comparação com resultados experimentais. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 22, n. 1, p. 89-102, fev. 2011.
23. FILHO, S. V. Modelagem de Aterramentos Elétricos. **Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFRJ, Rio de Janeiro**, julho 1992.
24. GRCEV, L.; DAWALIBI, F. An electromagnetic model for transients in grounding systems. **IEEE Trans. on Power Delivery**, v. 5, n. 4, p. 1773-1781, Oct. 1990.
25. HARRINGTON, R. F. **Field Computation by Moment Methods**. New York: Wiley-IEEE Press, 1993. 240 p.
26. ALÍPIO, R. S. Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. **Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG**, Belo Horizonte, 2008.
27. VISACRO, S.; PORTELA, C. M. **Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in Electric Power Systems**. Proceedings of Sym. High Voltage Engineering. Braunschweig, Alemanha: [s.n.]. 1987.
28. PORTELA, C. M. Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. **Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, Seattle, 02-06 ago. 1999. p.1004-1009.
29. PORTELA, C. M. Statistical aspects of soil electromagnetic behavior in frequency domain. **Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing (GROUND' 2000)**, Belo Horizonte, Brasil, jun. 2000. p.99-104.
30. PORTELA, C. M. Influence in lightning effects of soil electromagnetic behavior in frequency domain. **Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, Cracow, Poland, v.1, set. 2002. p.394-399.
31. VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, p. 381-386, jan. 2007.

32. PORTELA, C. M. **Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior.** [S.I.]. 1999.
33. VISACRO, S.; SOARES, A. A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Abril 2005. 1206-1208.
34. ALIPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência.** Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG. [S.I.]. 2008.
35. CAMPOS SEGANTINI, R. **Comportamento de Malhas de Aterramento de Subestação de Energia frente a Descargas Atmosféricas: Ênfase na Av. UFSJ.** Belo Horizonte, p. 56. 2018.

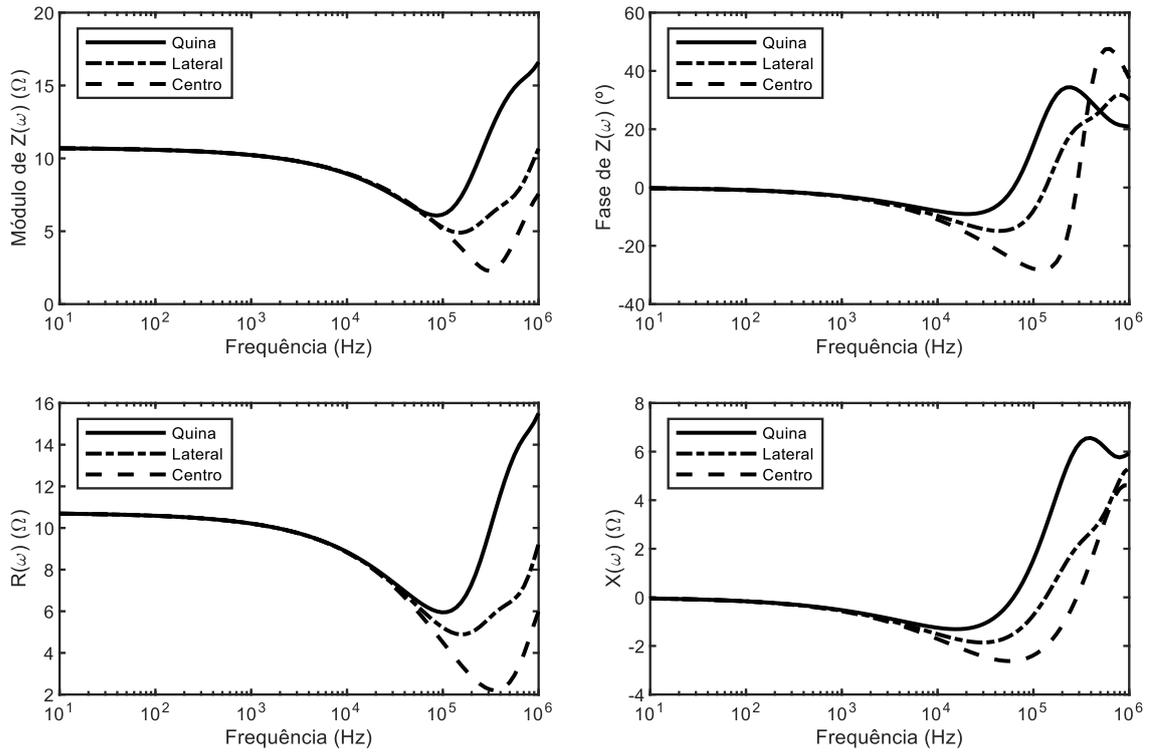
## APÊNDICES

### APÊNDICE A – IMPEDÂNCIAS HARMÔNICAS PARA MALHAS DE 20m x 20m.

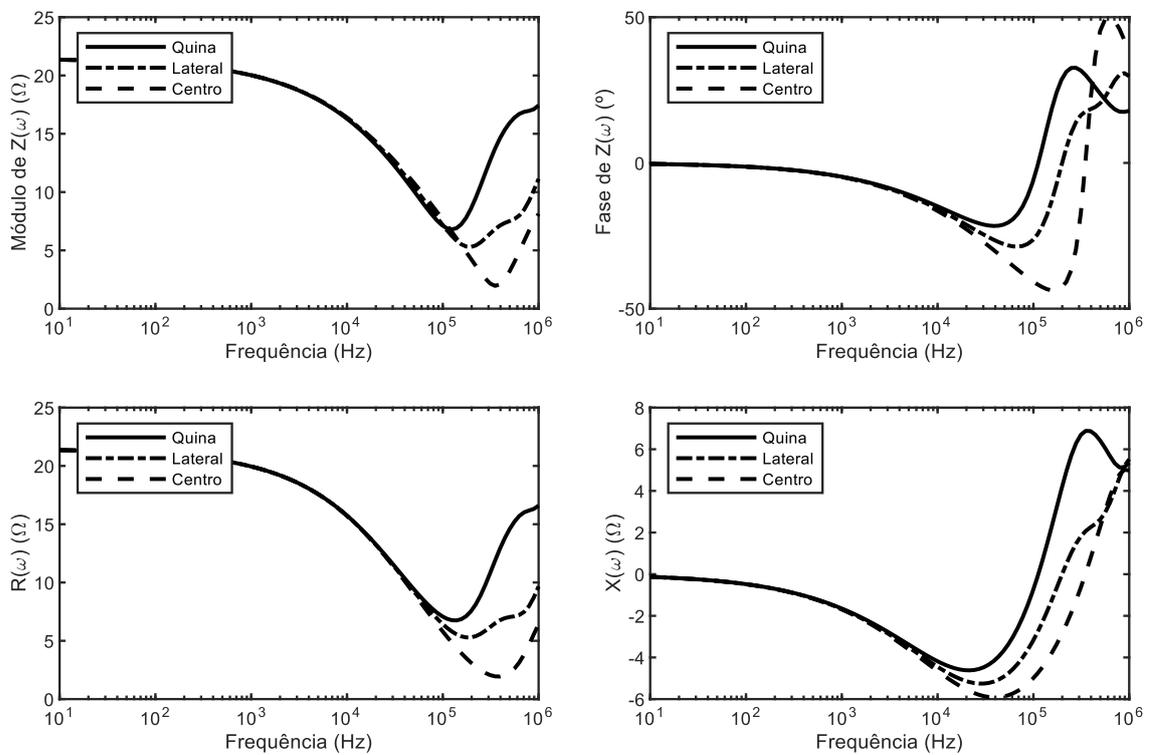
Figura 17 - Impedâncias calculadas considerando posições variadas (Tabela 2 e Tabela 3).  
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



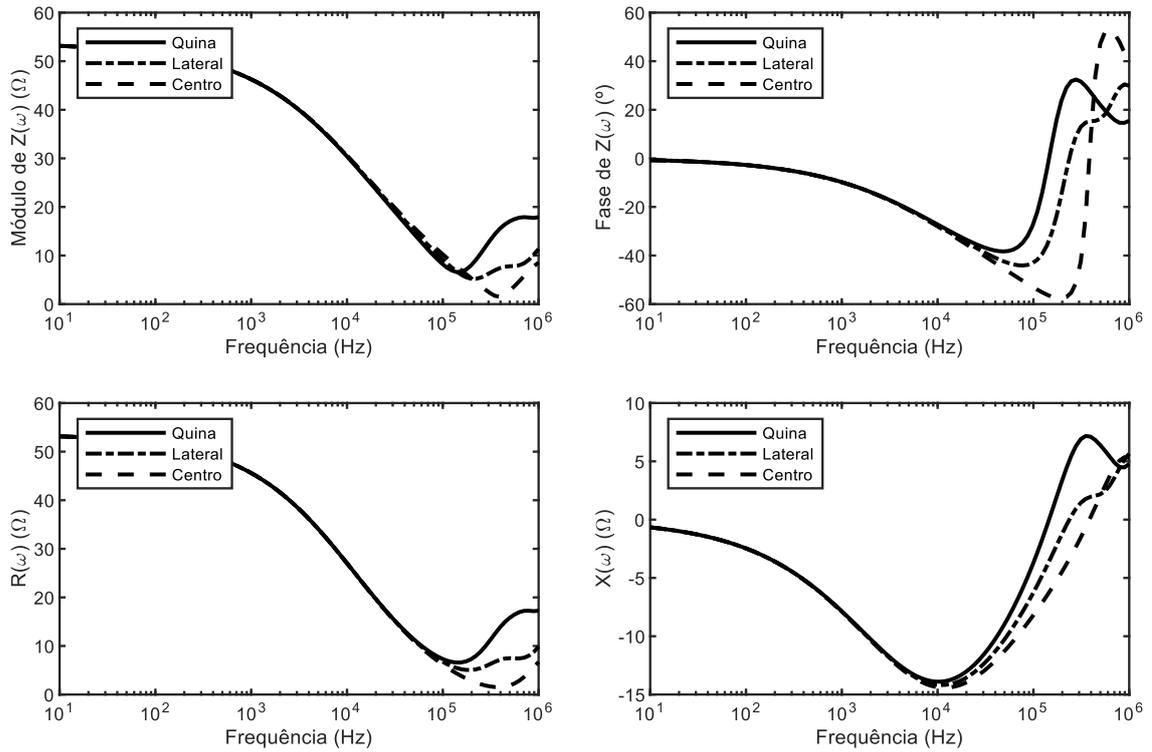
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



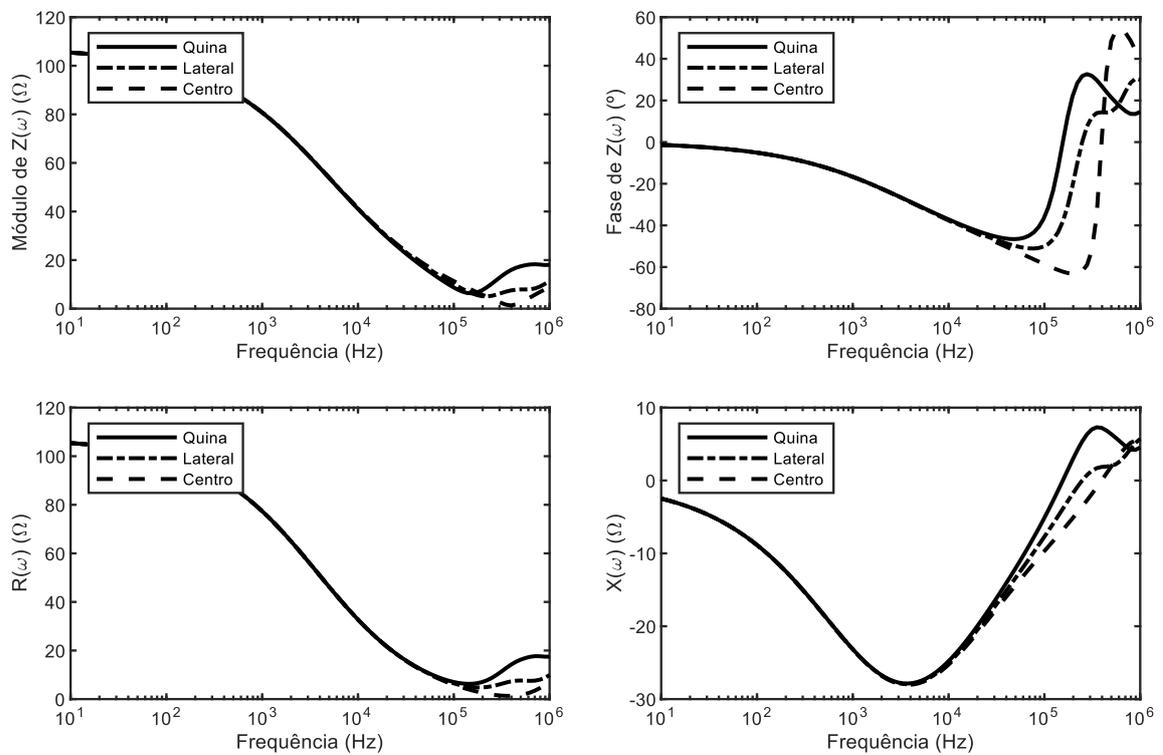
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



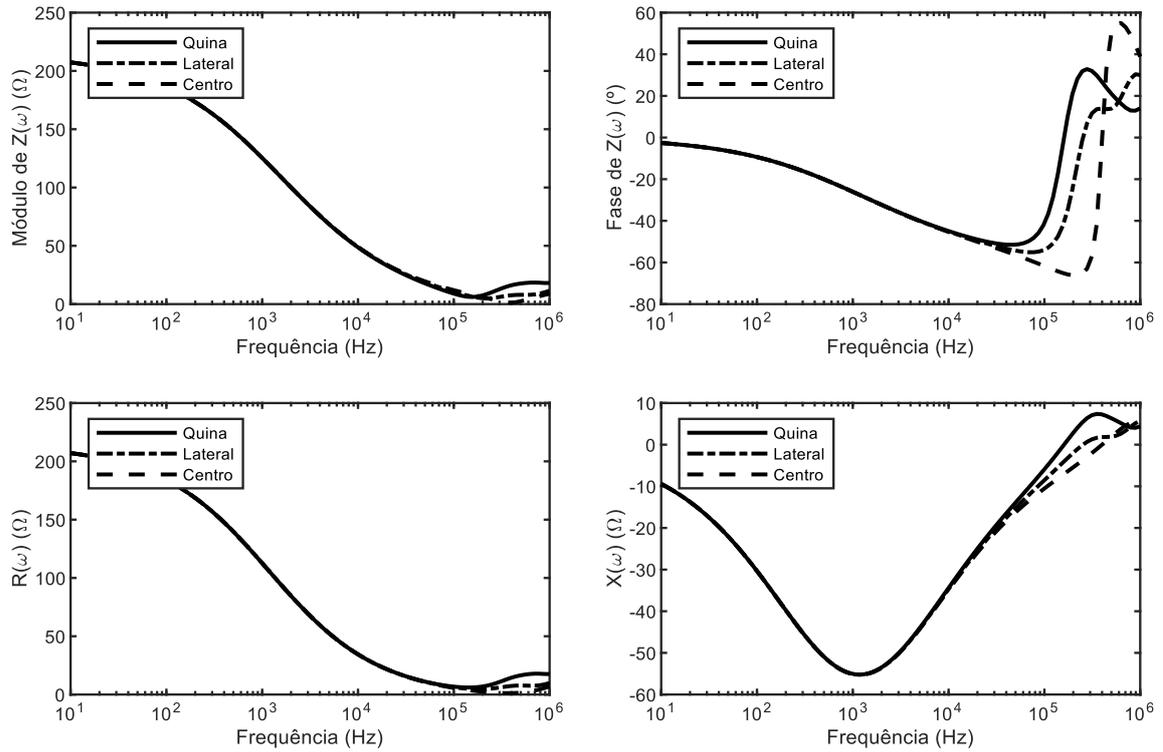
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



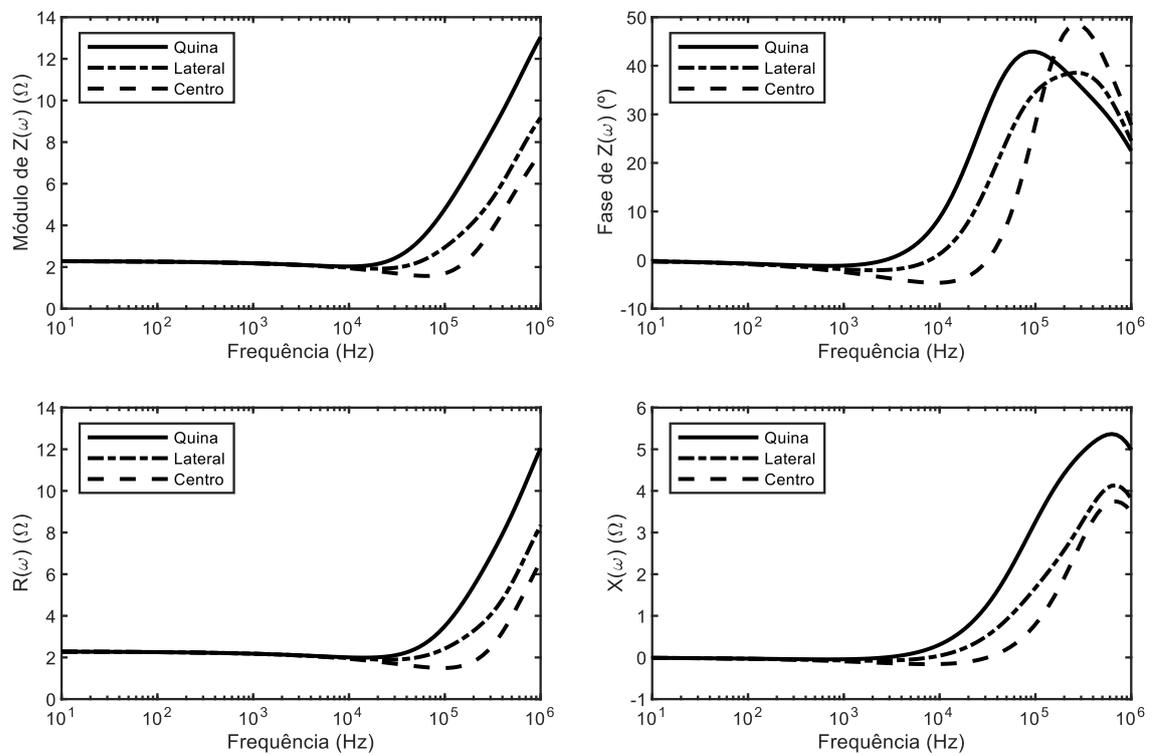
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .



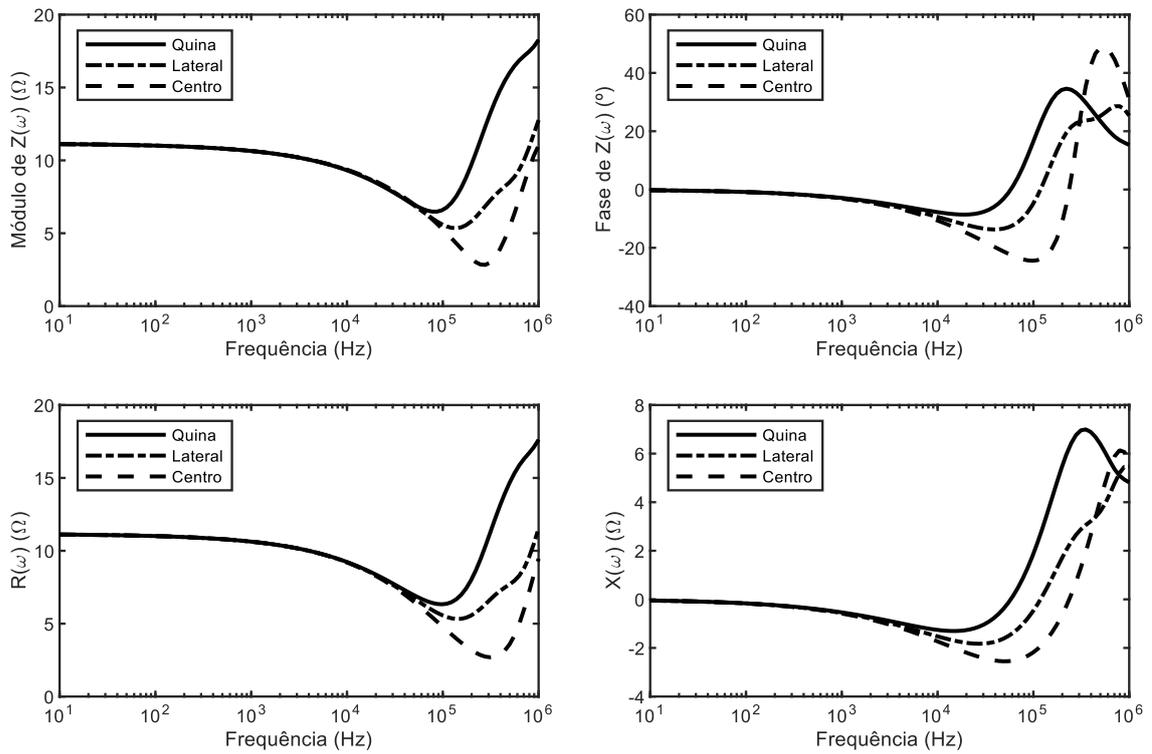
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .



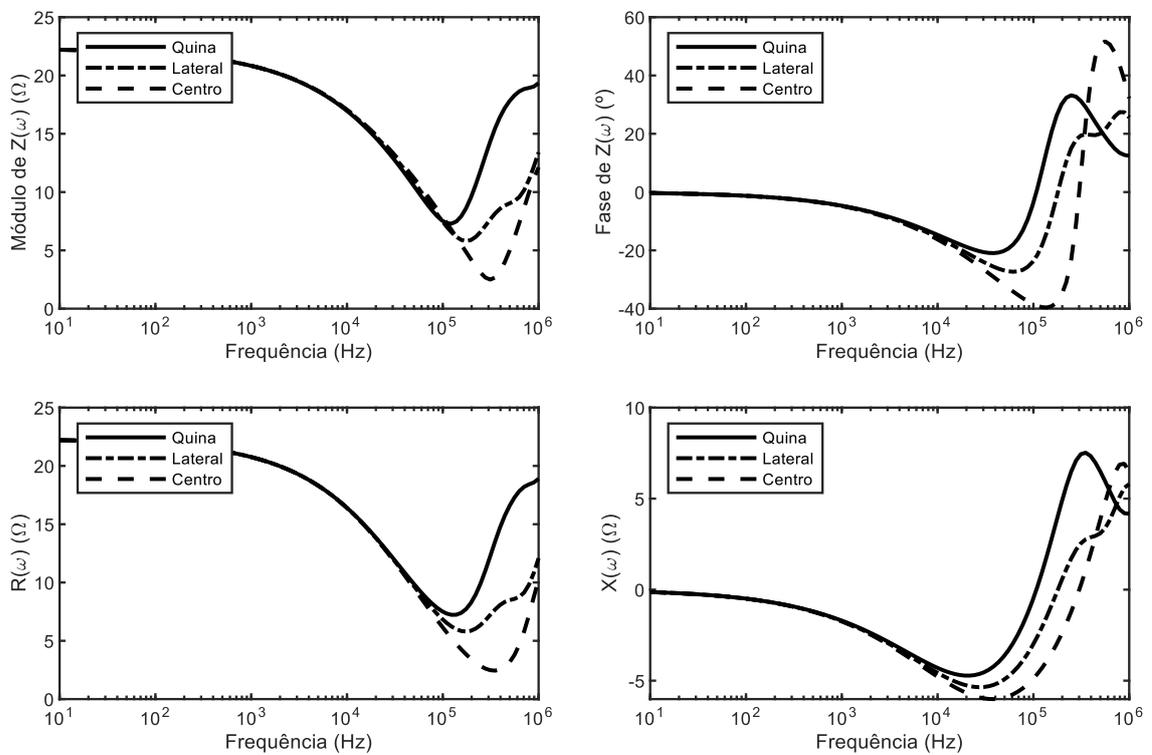
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



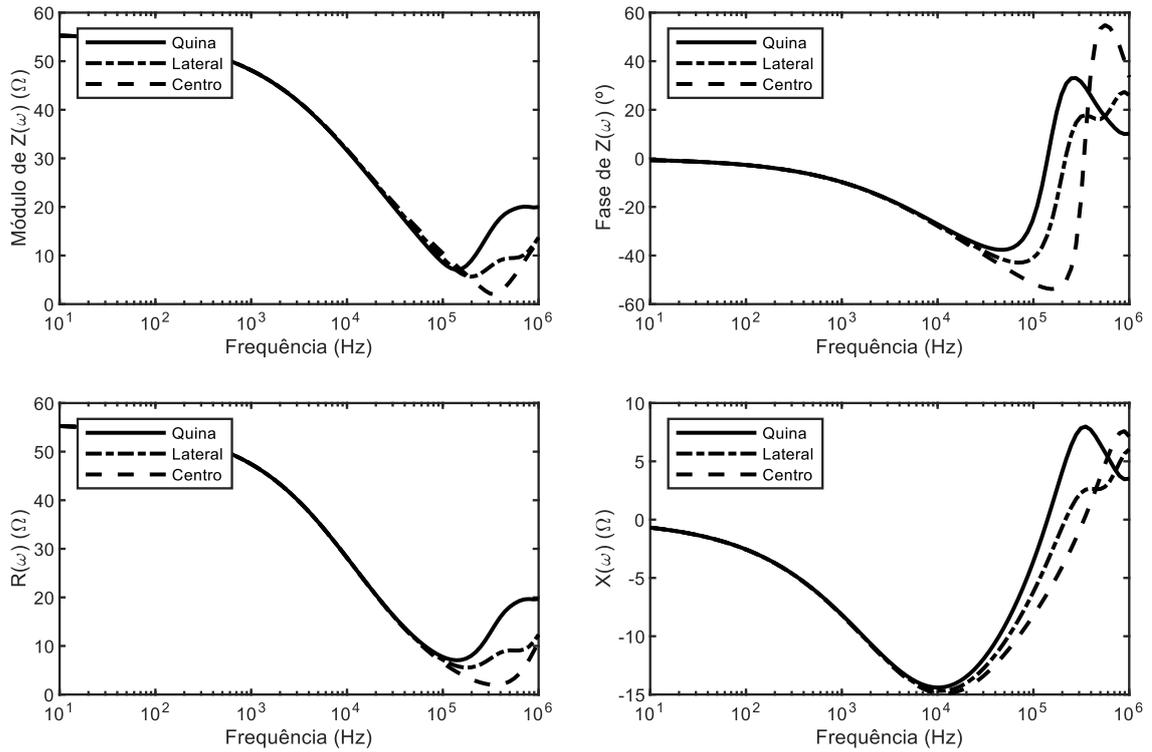
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



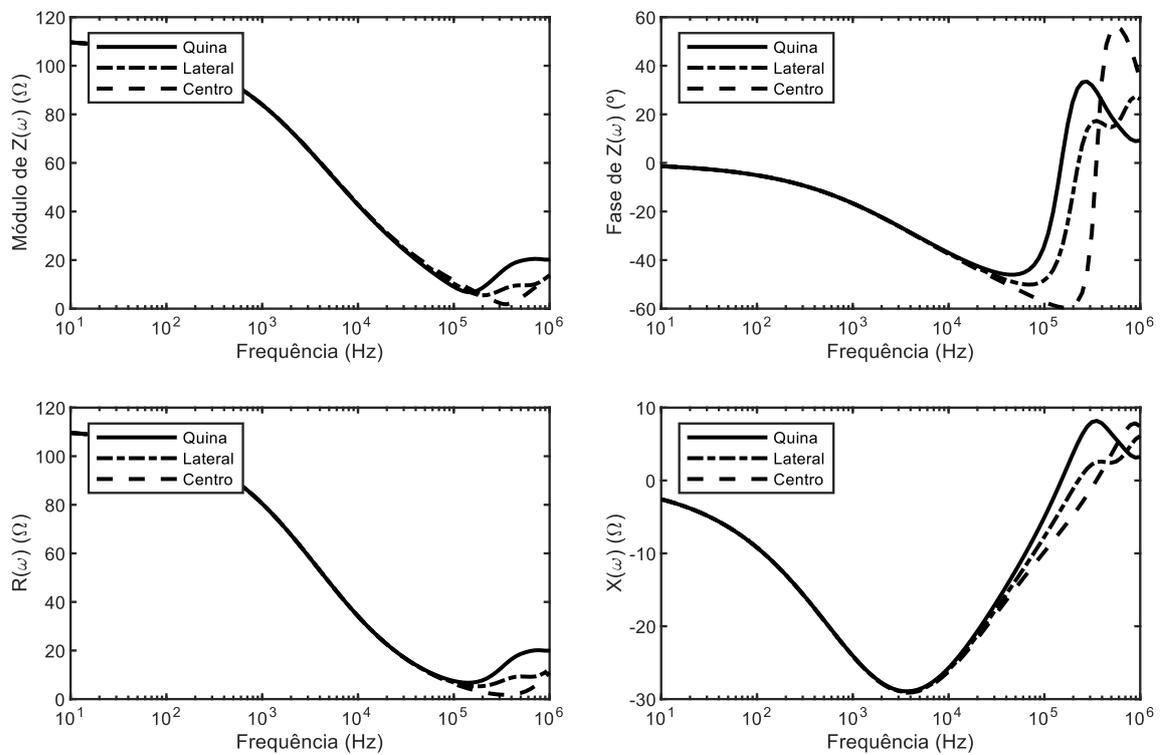
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



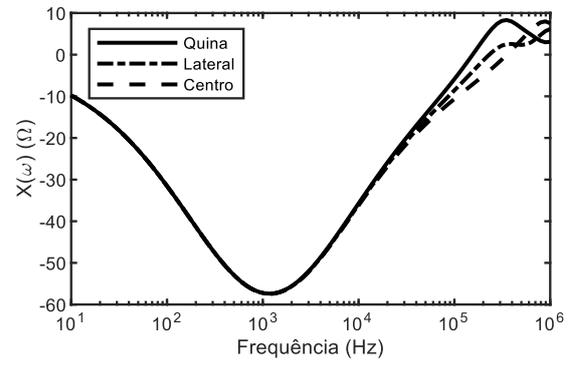
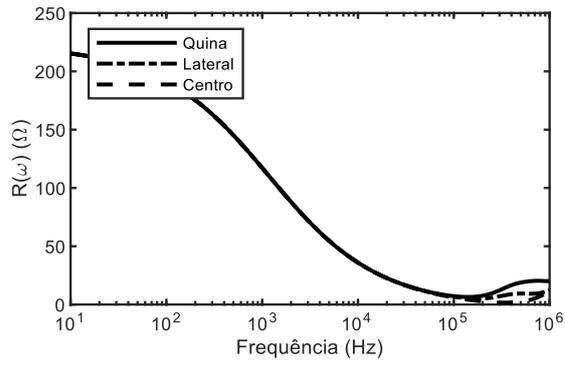
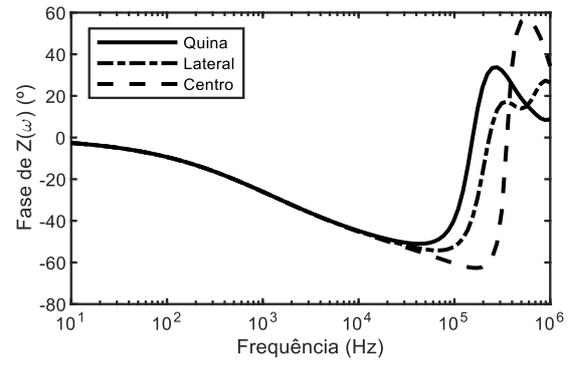
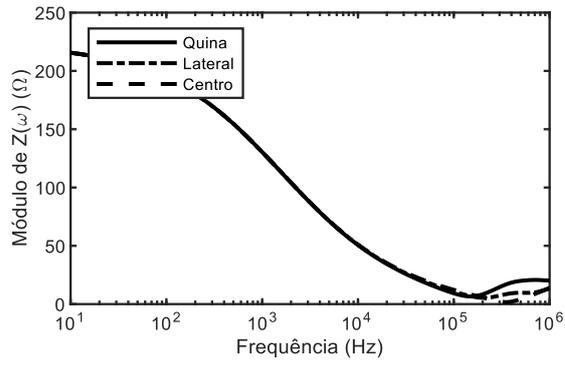
Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .

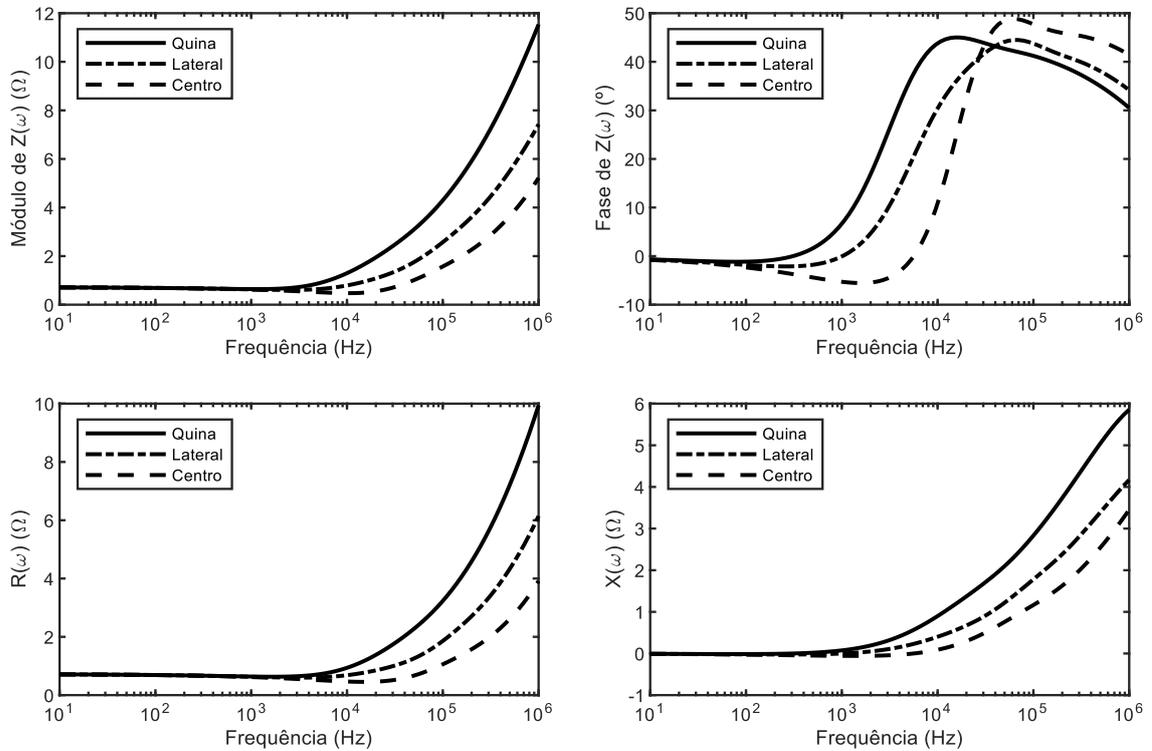


Parâmetros:  $L = 20m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .

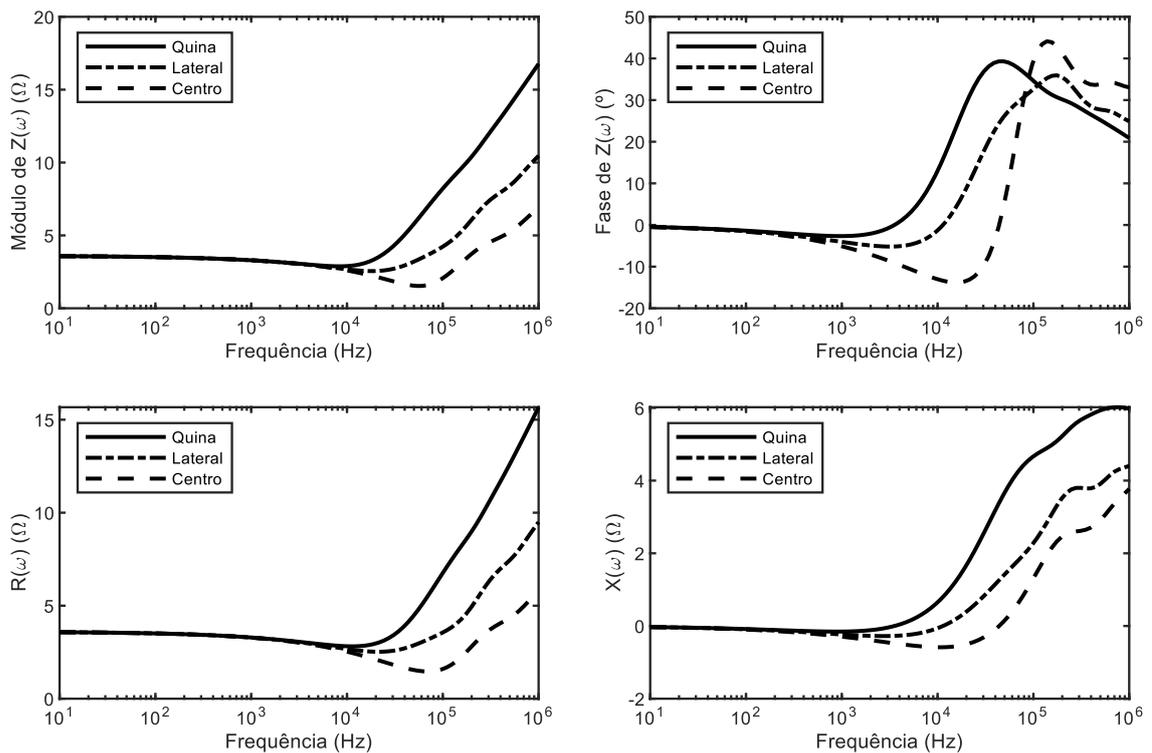


## APÊNDICE B – IMPEDÂNCIAS DETERMINADAS EM MALHA DE 60m x 60m

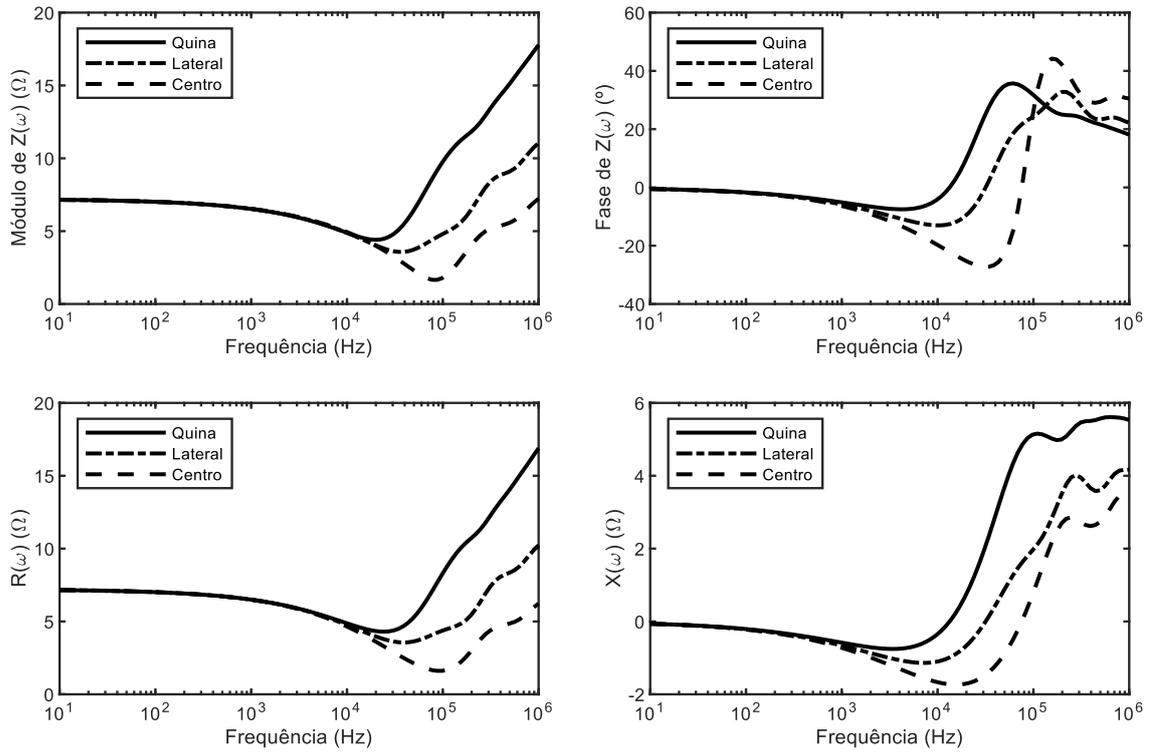
Figura 18 - Impedâncias calculadas considerando posições variadas (Tabela 5 e Tabela 6).  
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



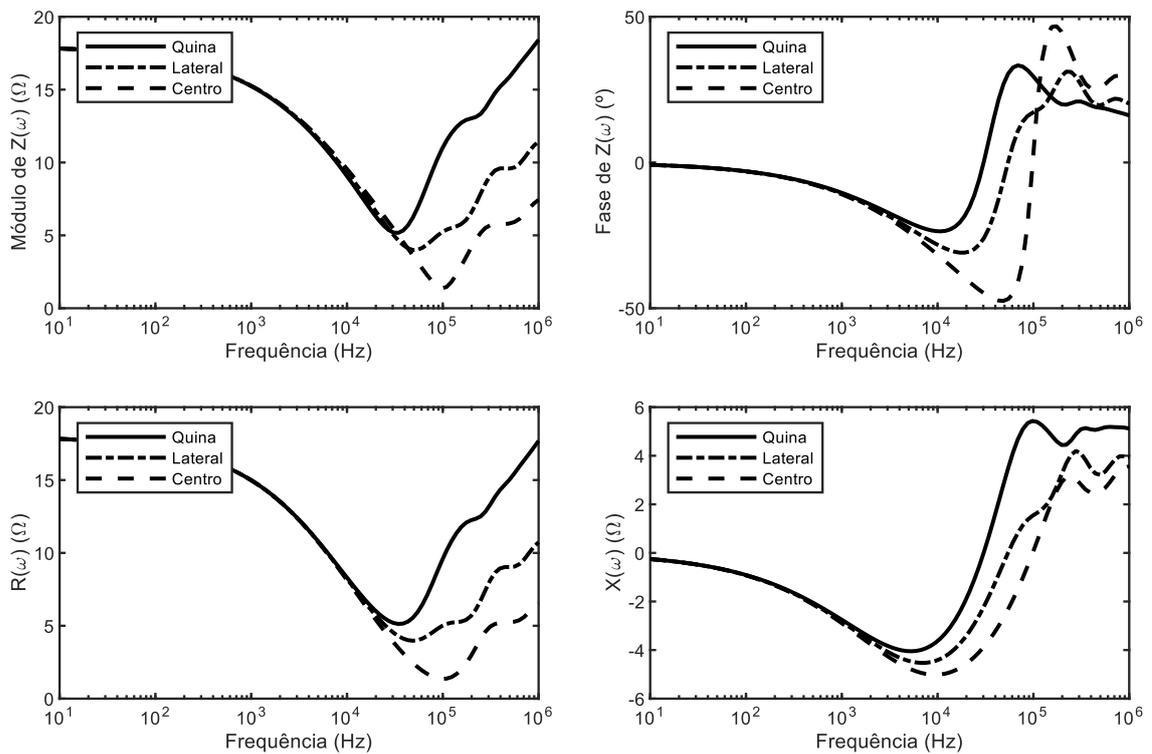
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



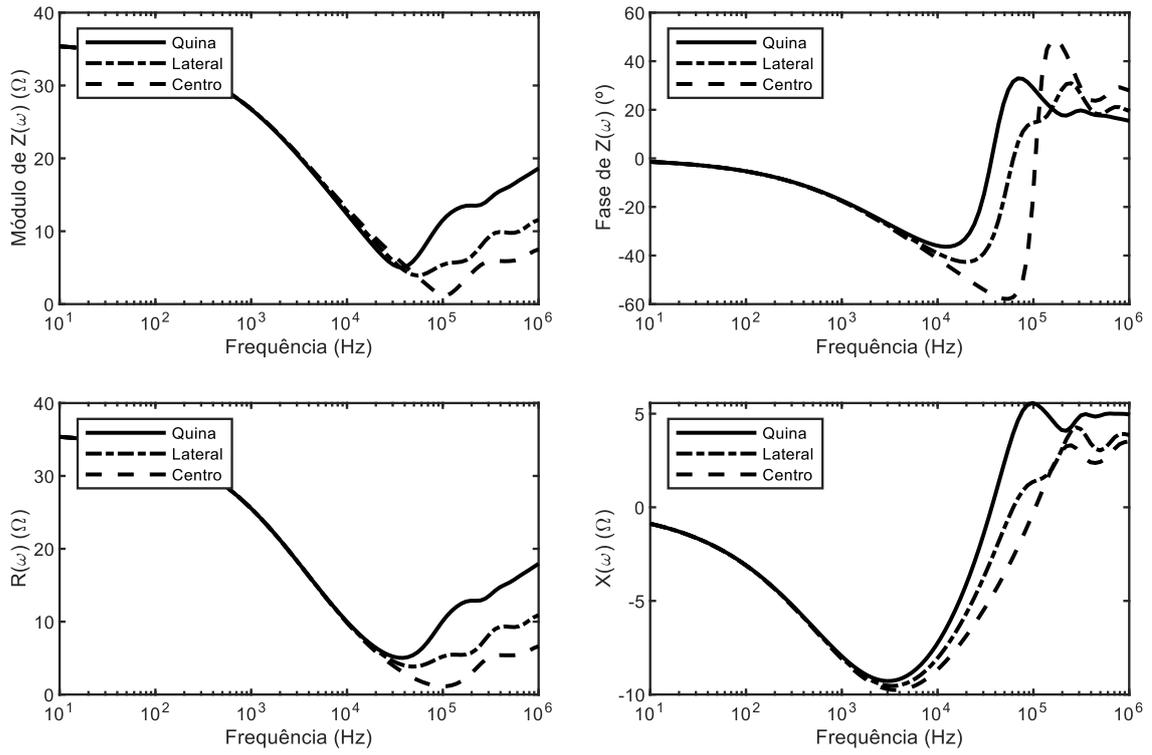
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



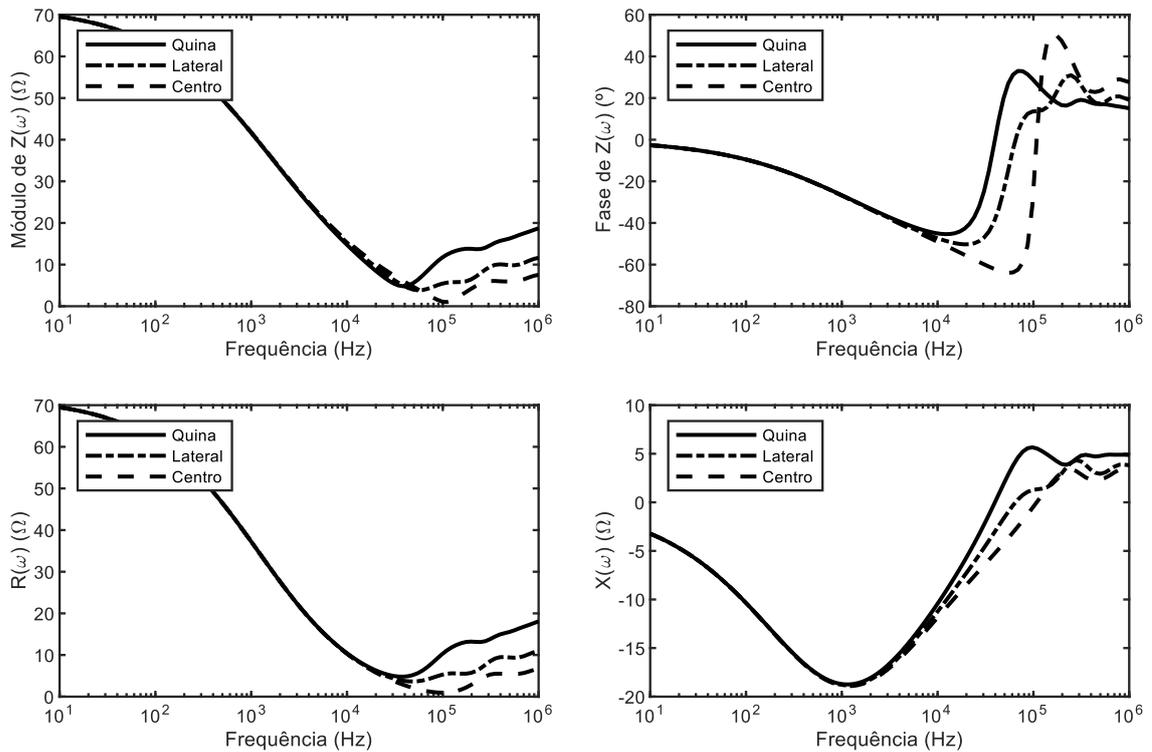
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



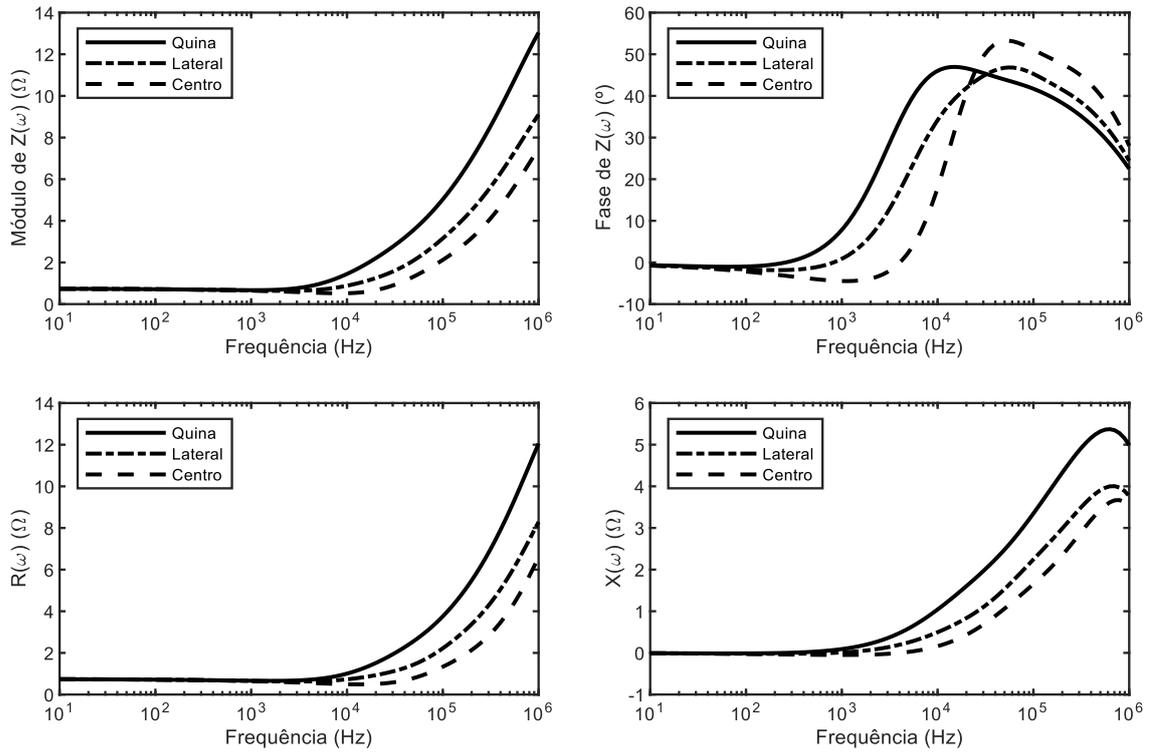
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .



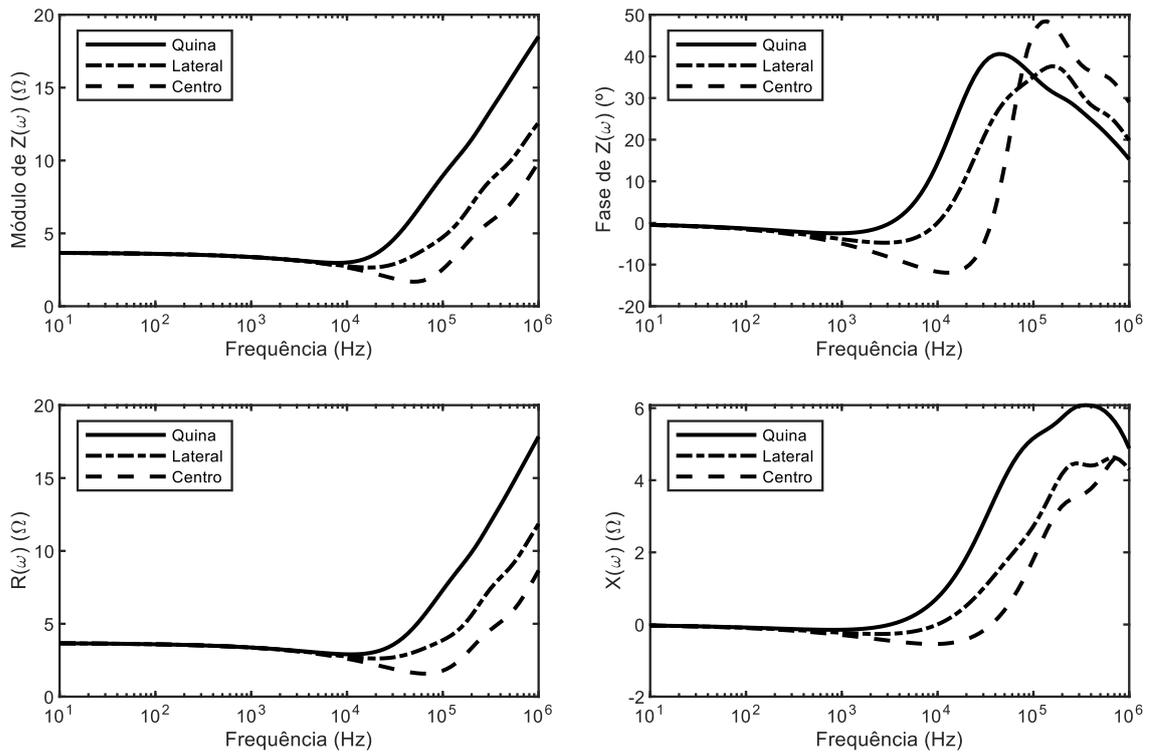
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .



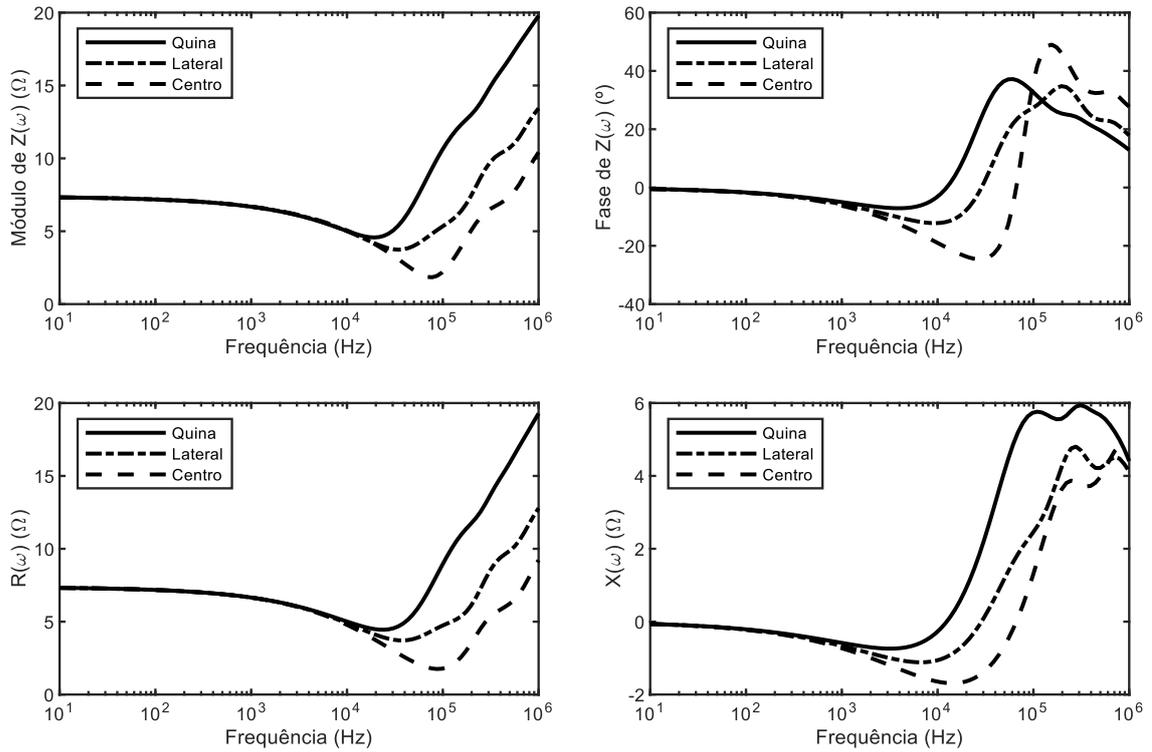
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



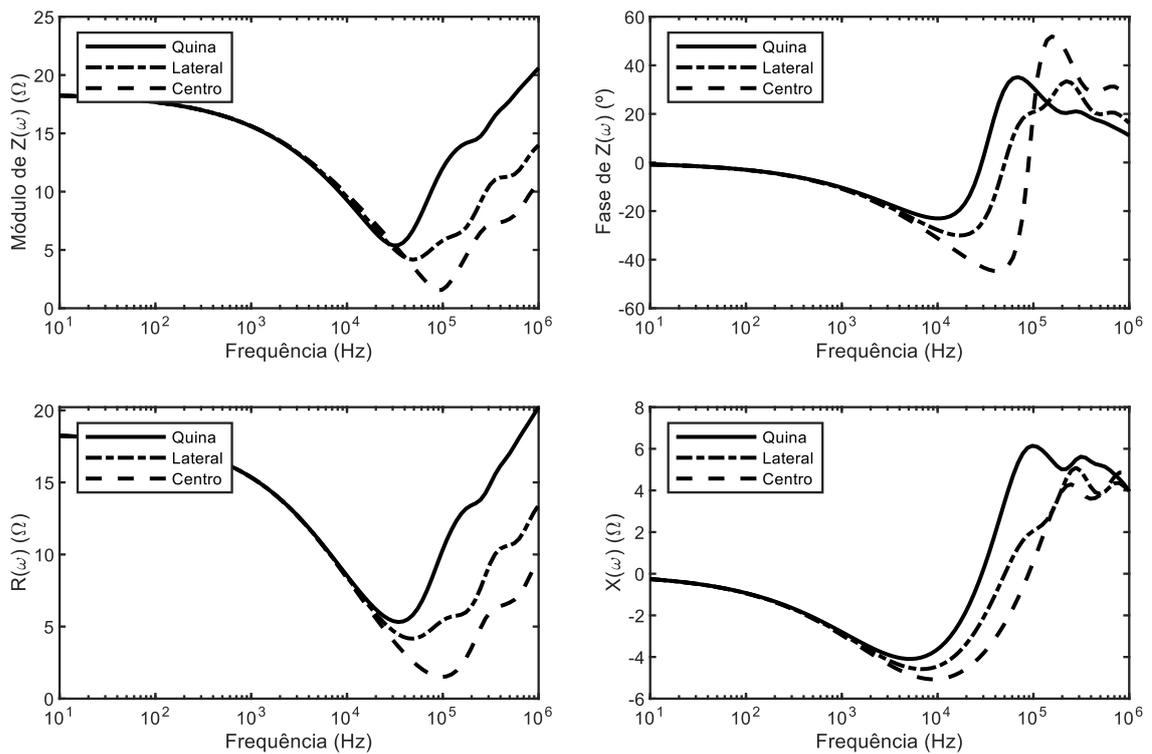
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



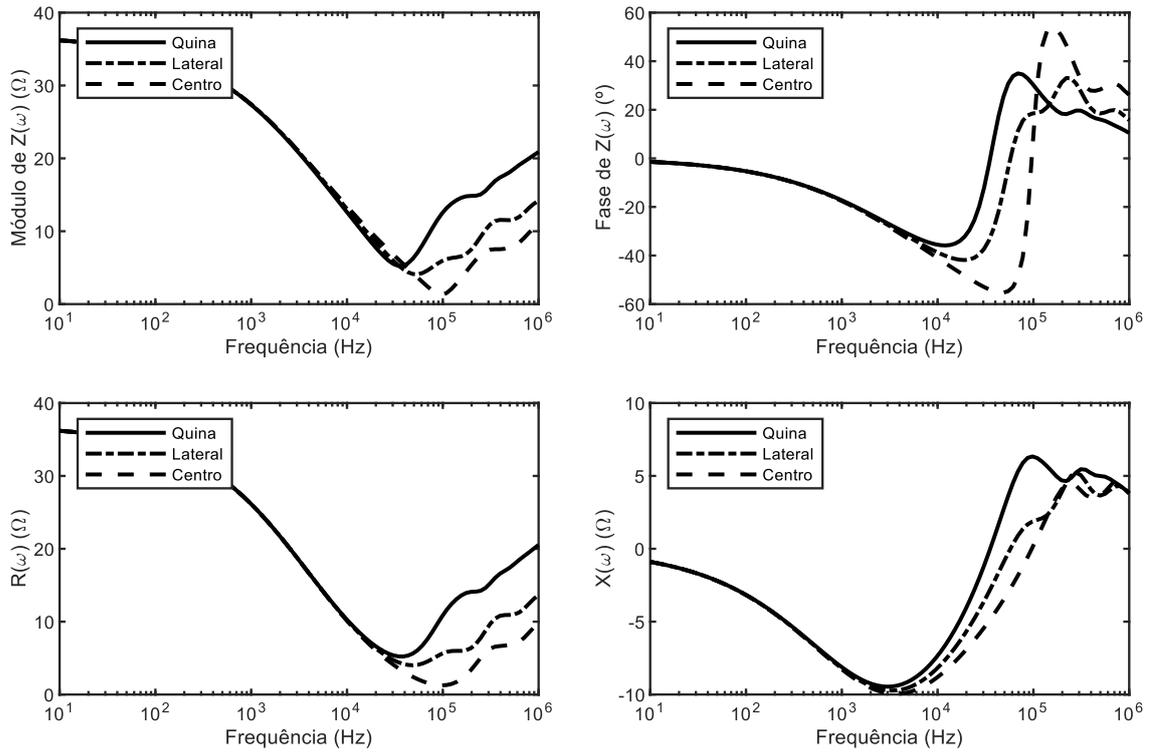
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



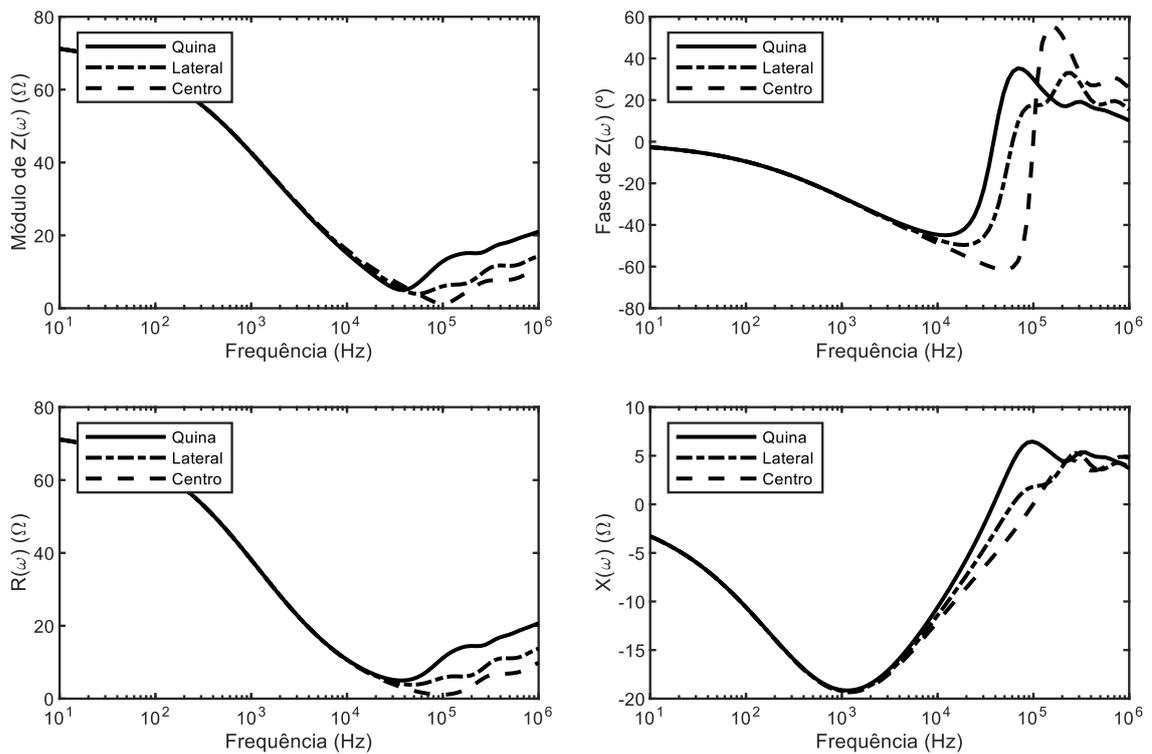
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .



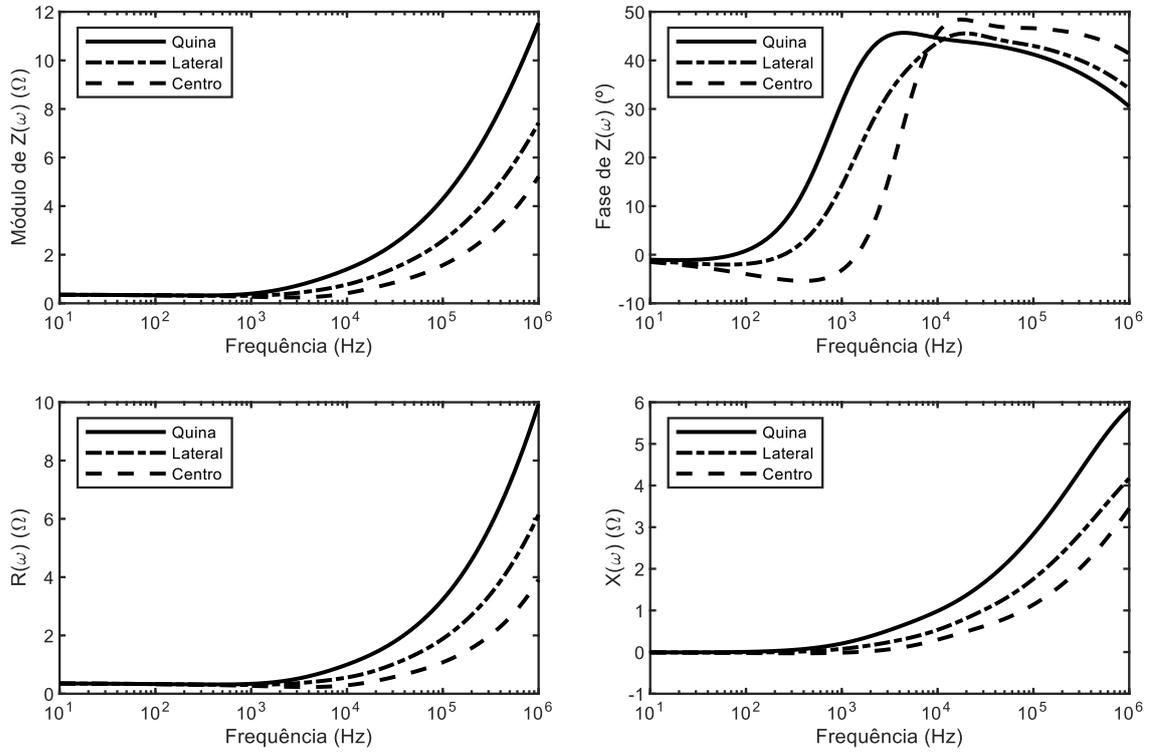
Parâmetros:  $L = 60m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .



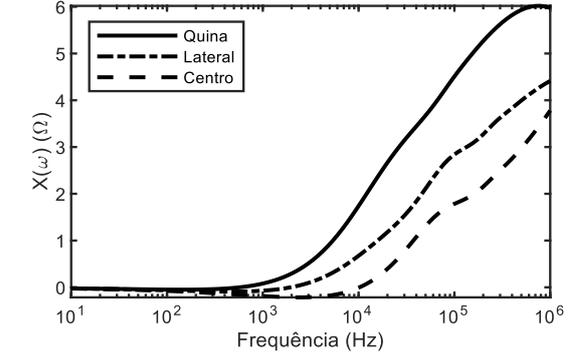
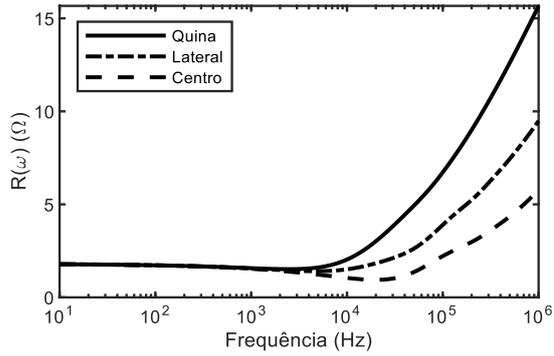
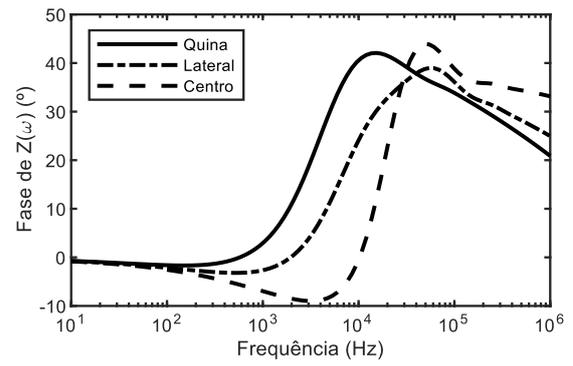
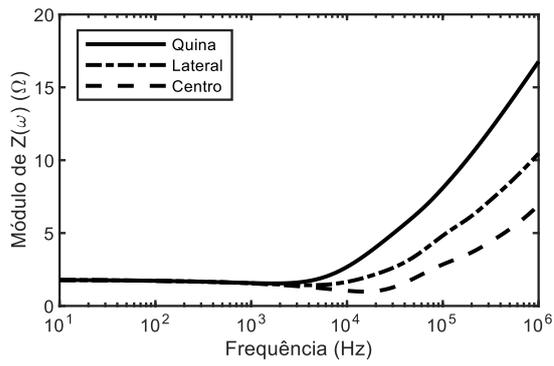
## APÊNDICE C – IMPEDÂNCIAS DETERMINADAS EM MALHA DE 120m x 120m

Figura 19 - Impedâncias calculadas considerando posições variadas (Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10).

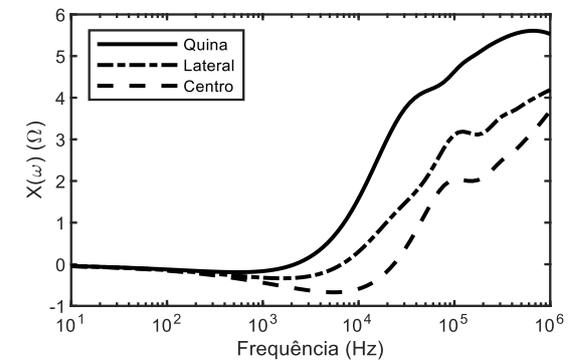
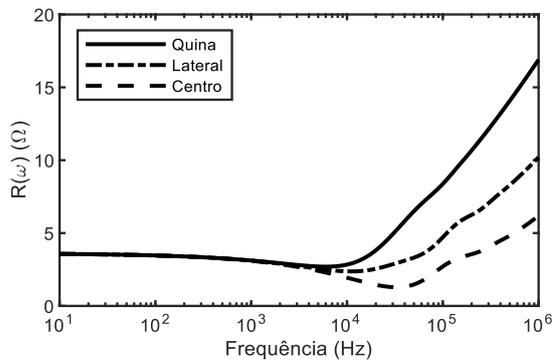
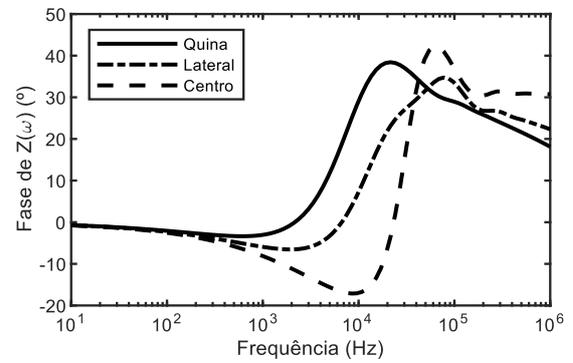
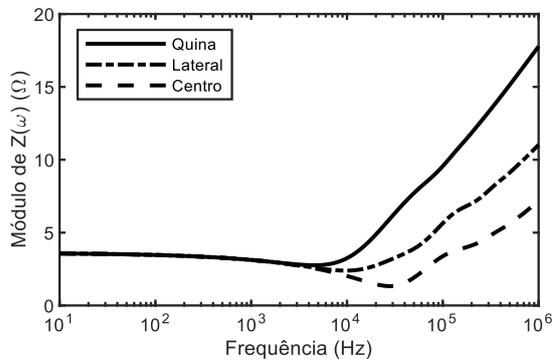
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



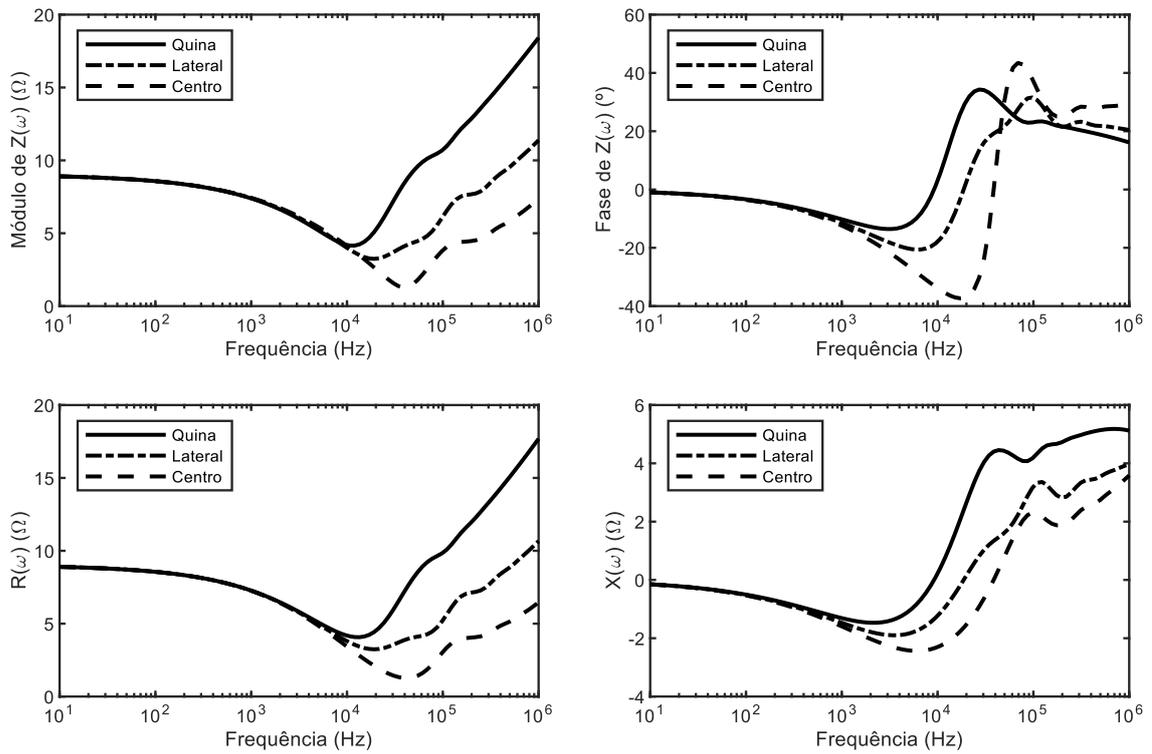
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



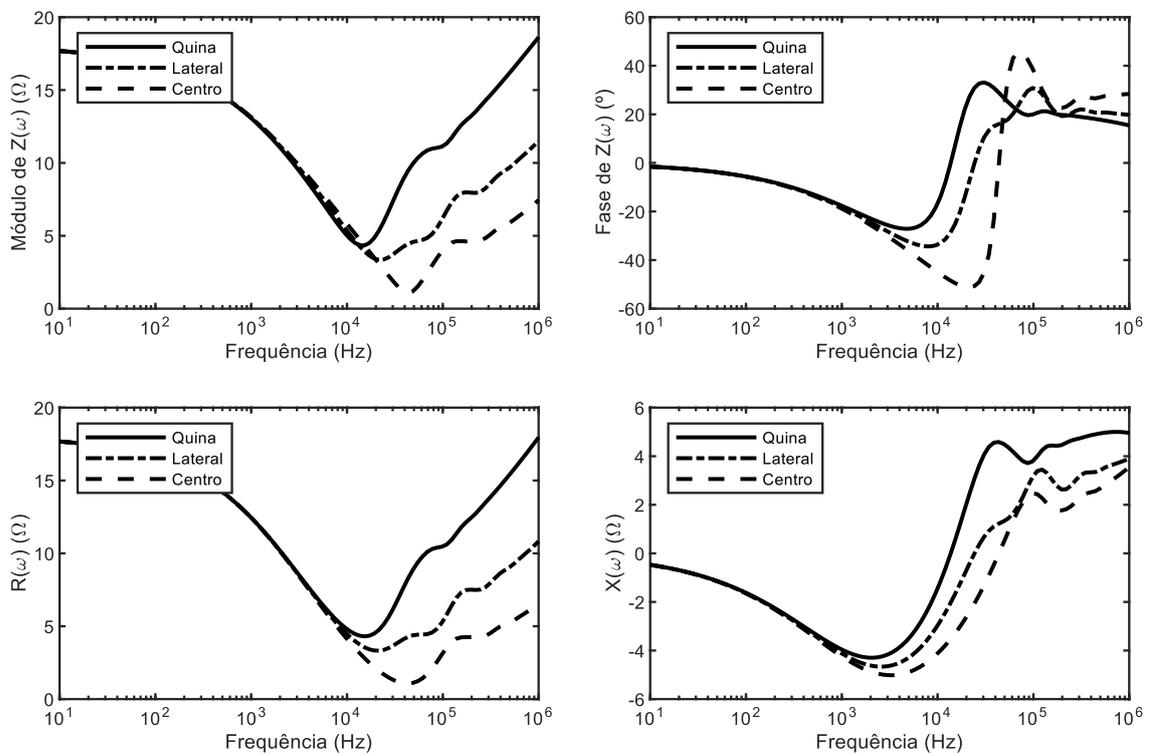
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



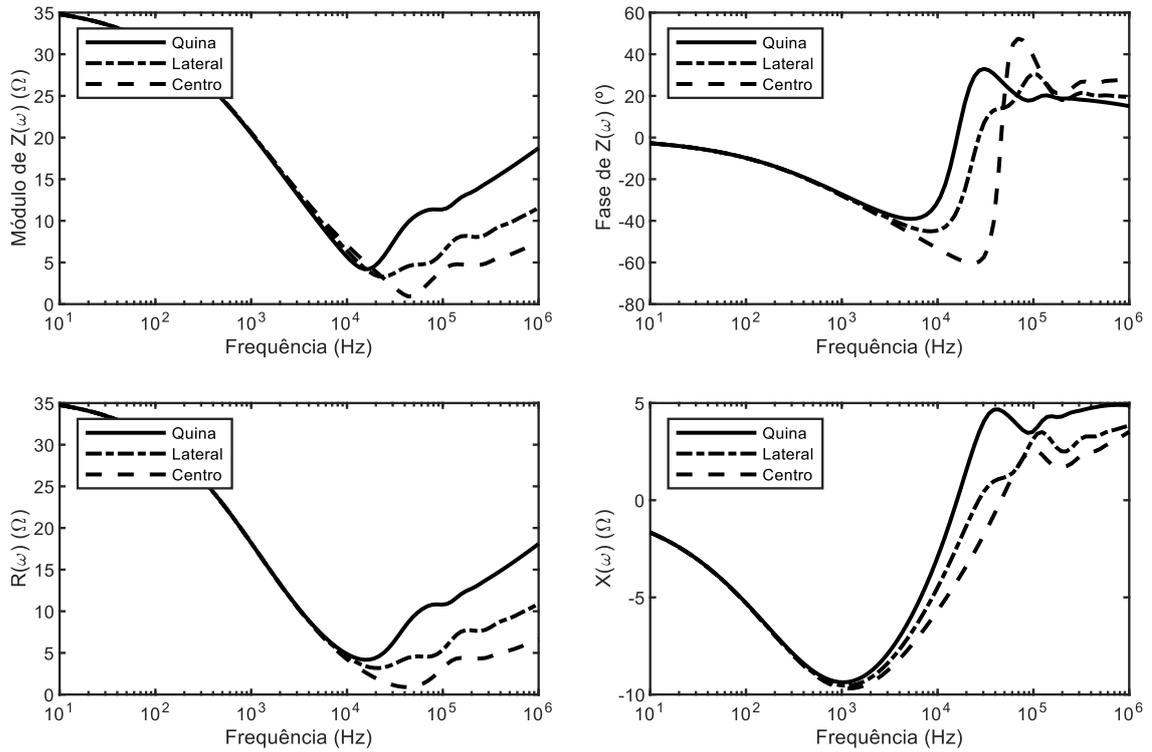
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



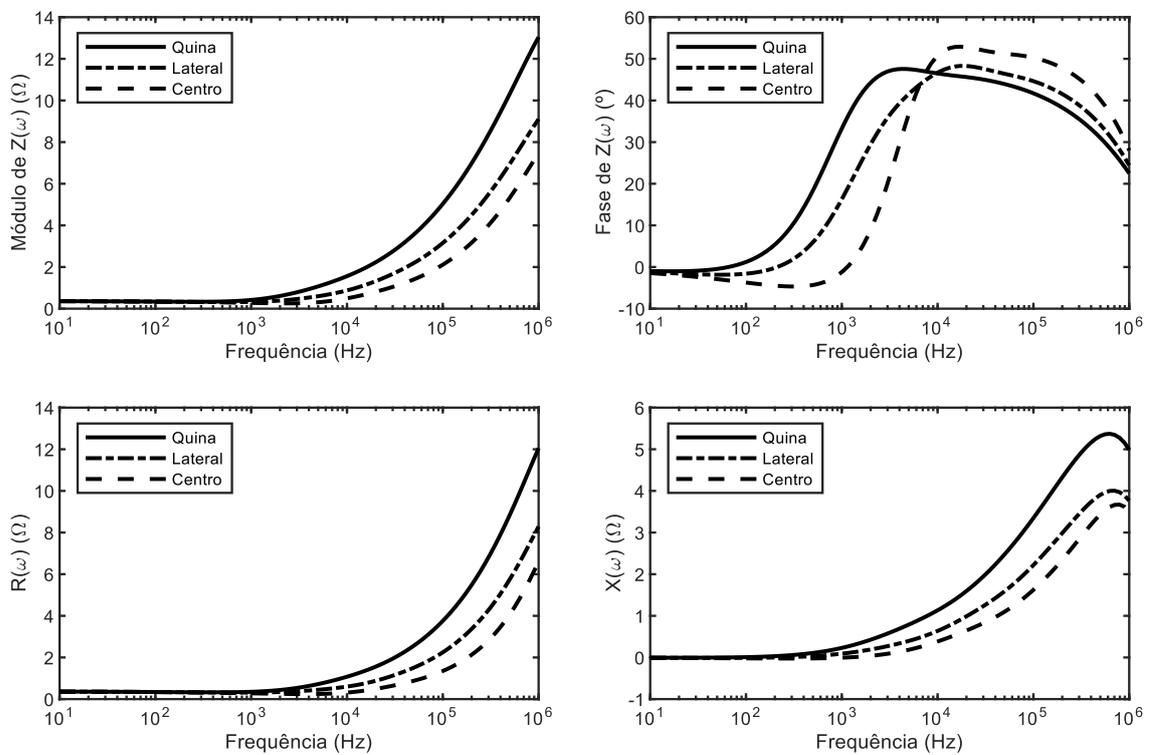
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .



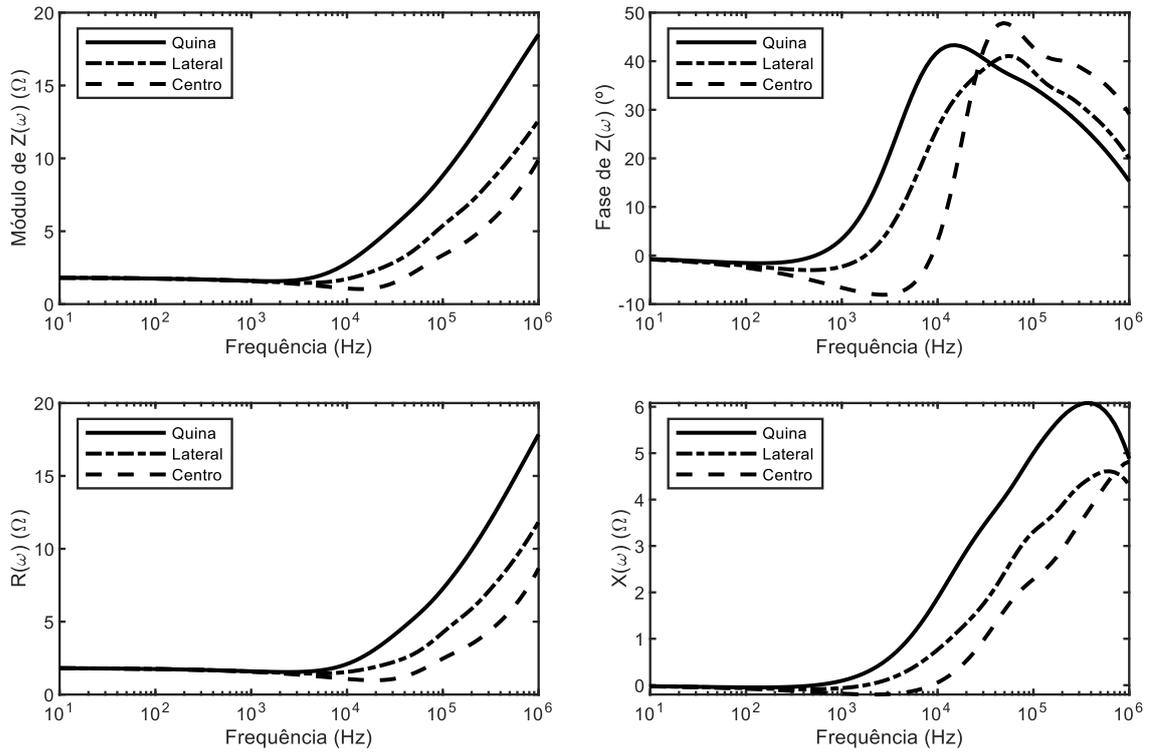
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 2m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .



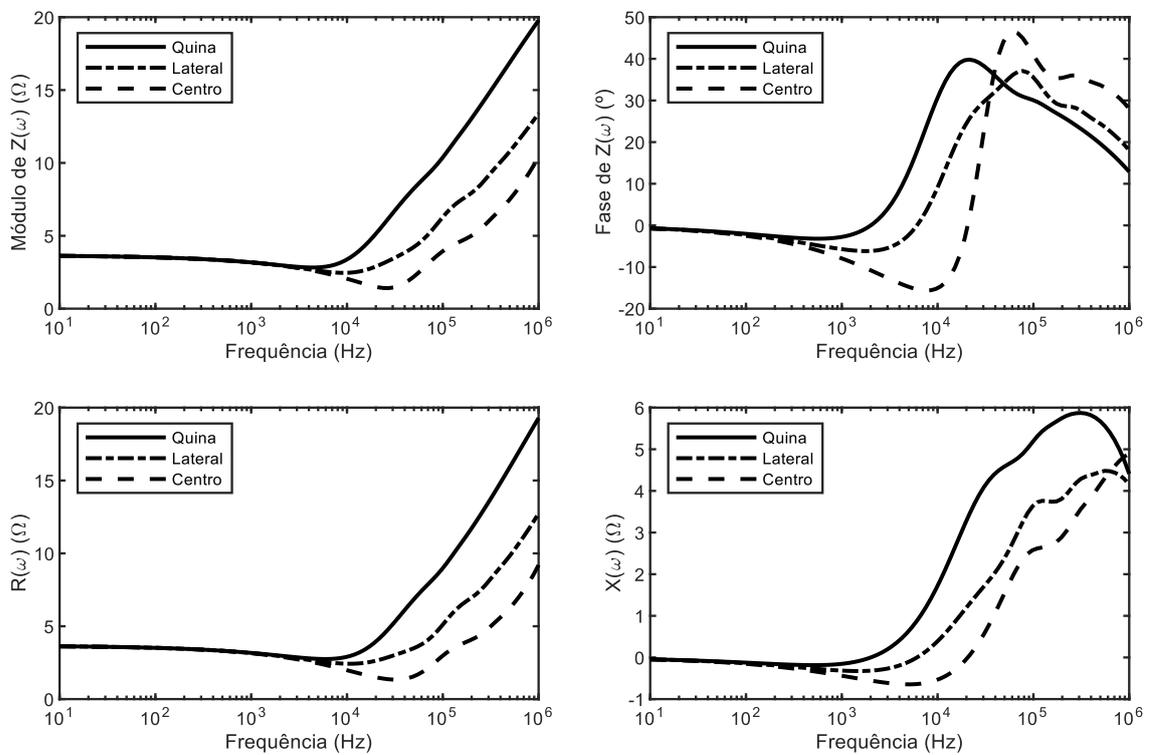
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



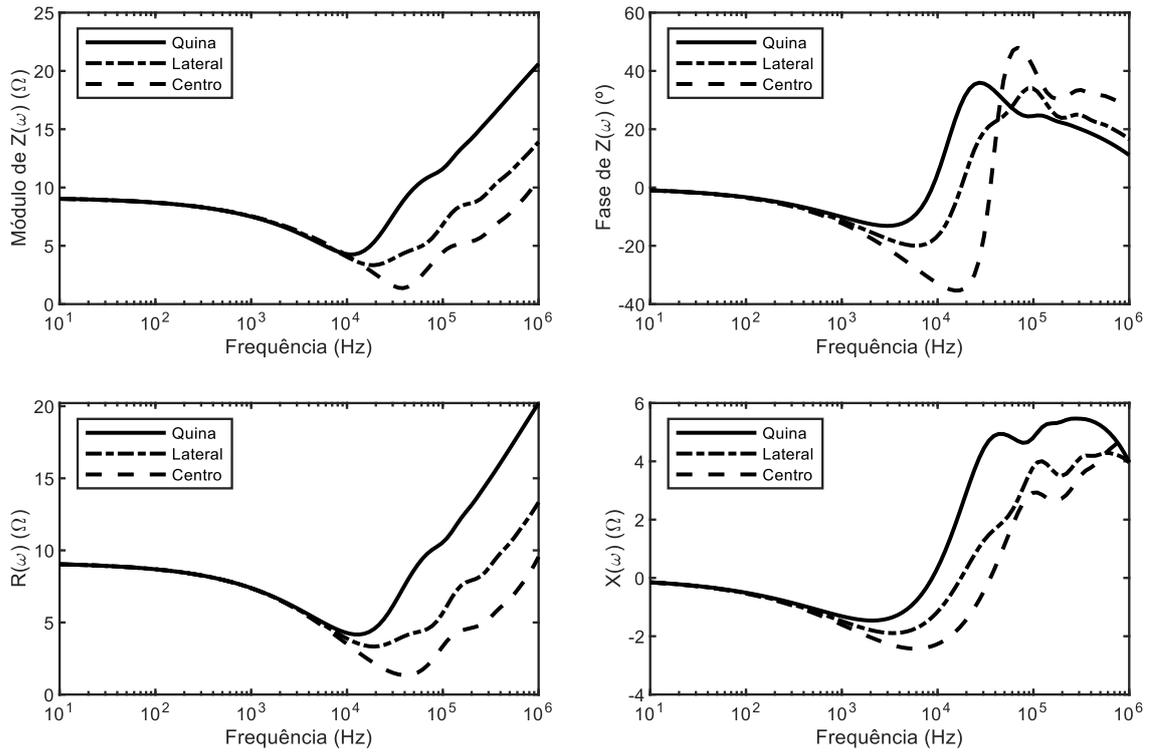
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



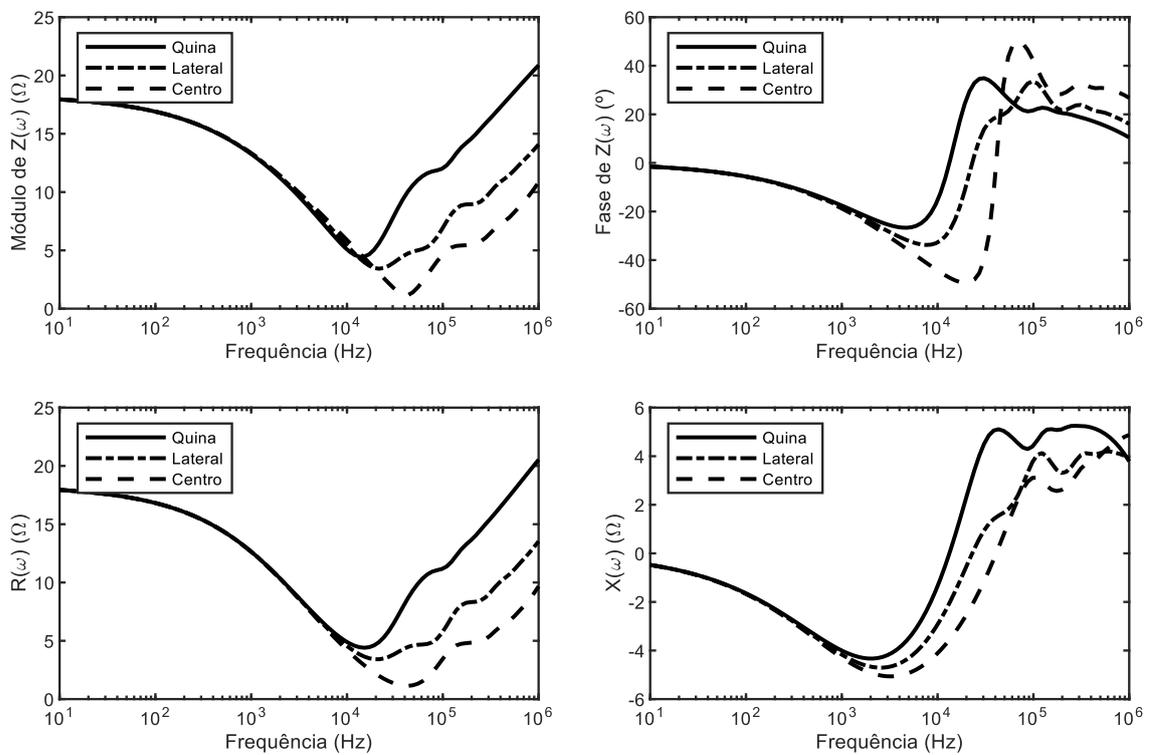
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



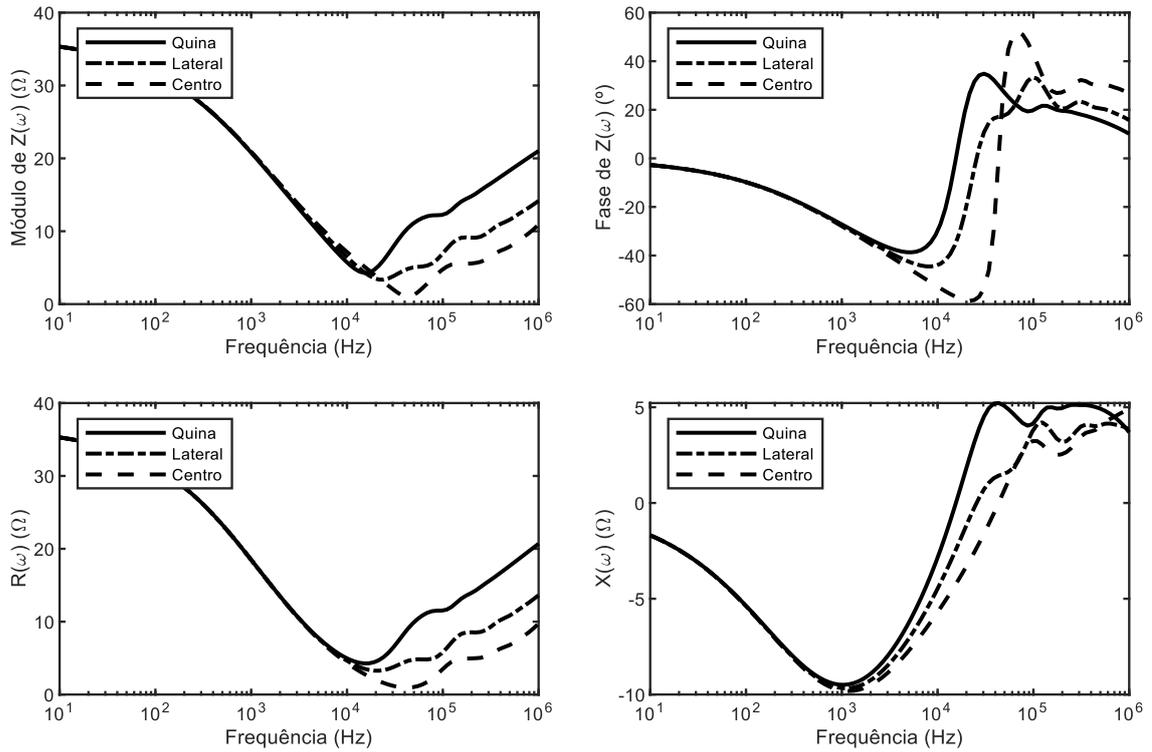
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



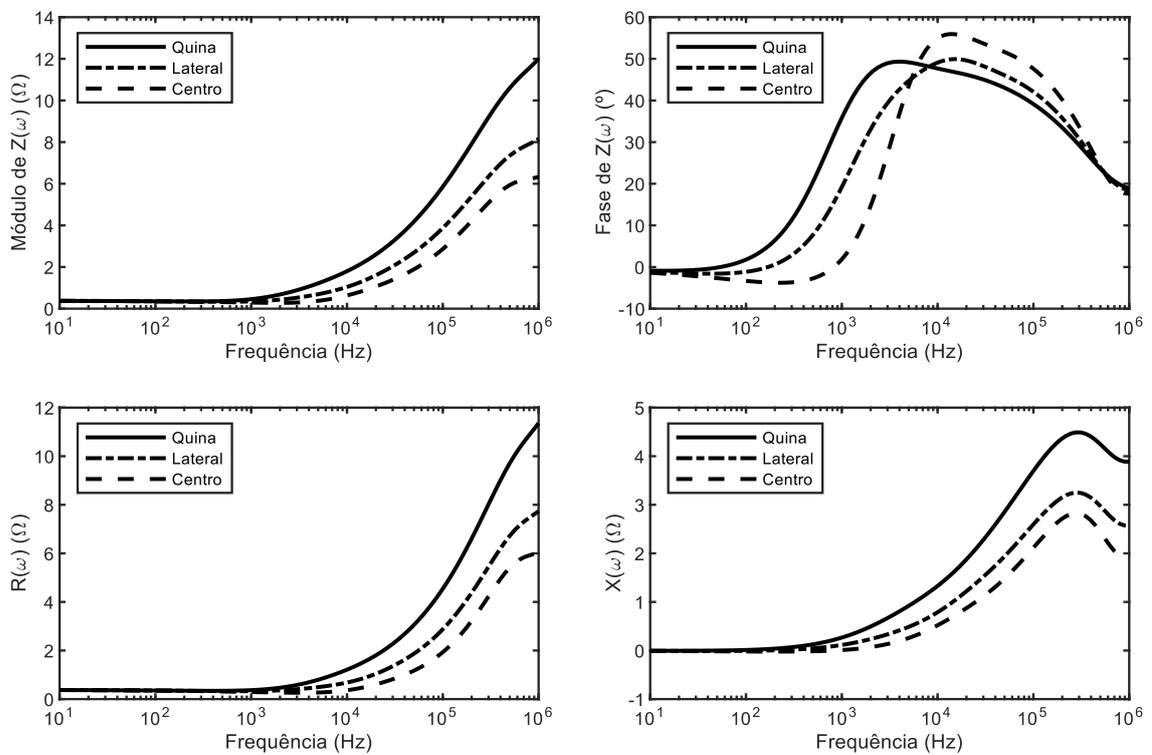
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .



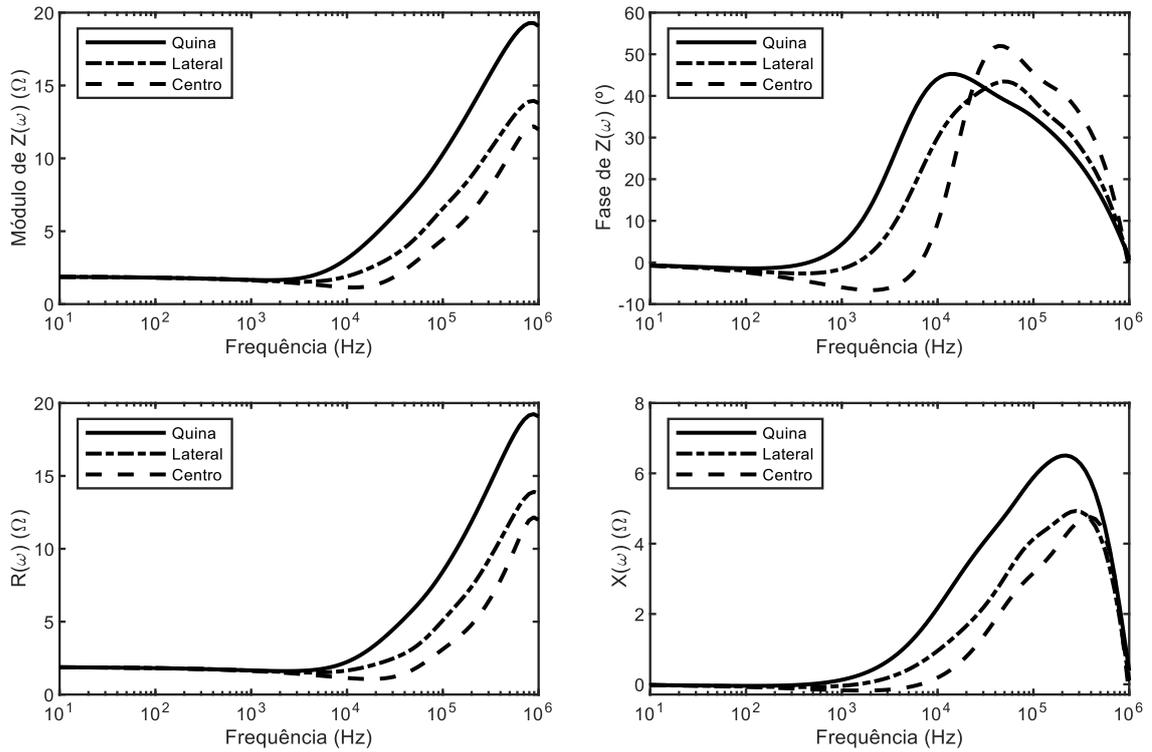
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 5m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .



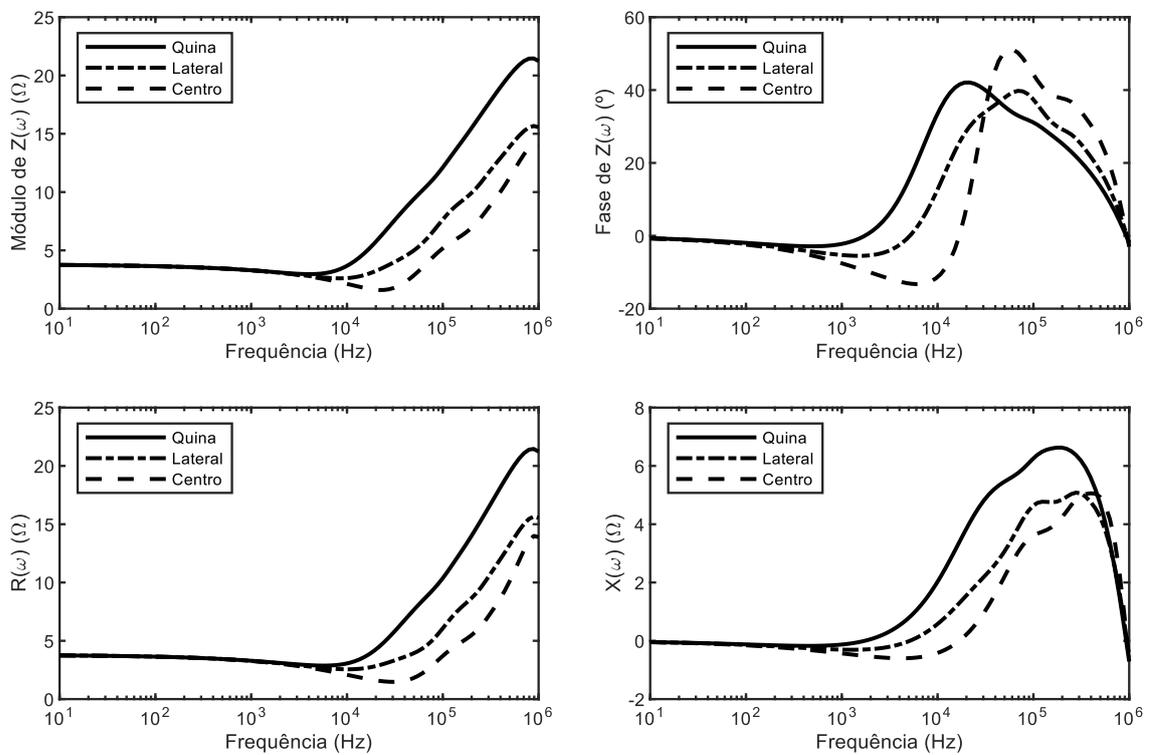
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ ,  $\rho = 100\Omega m$ .



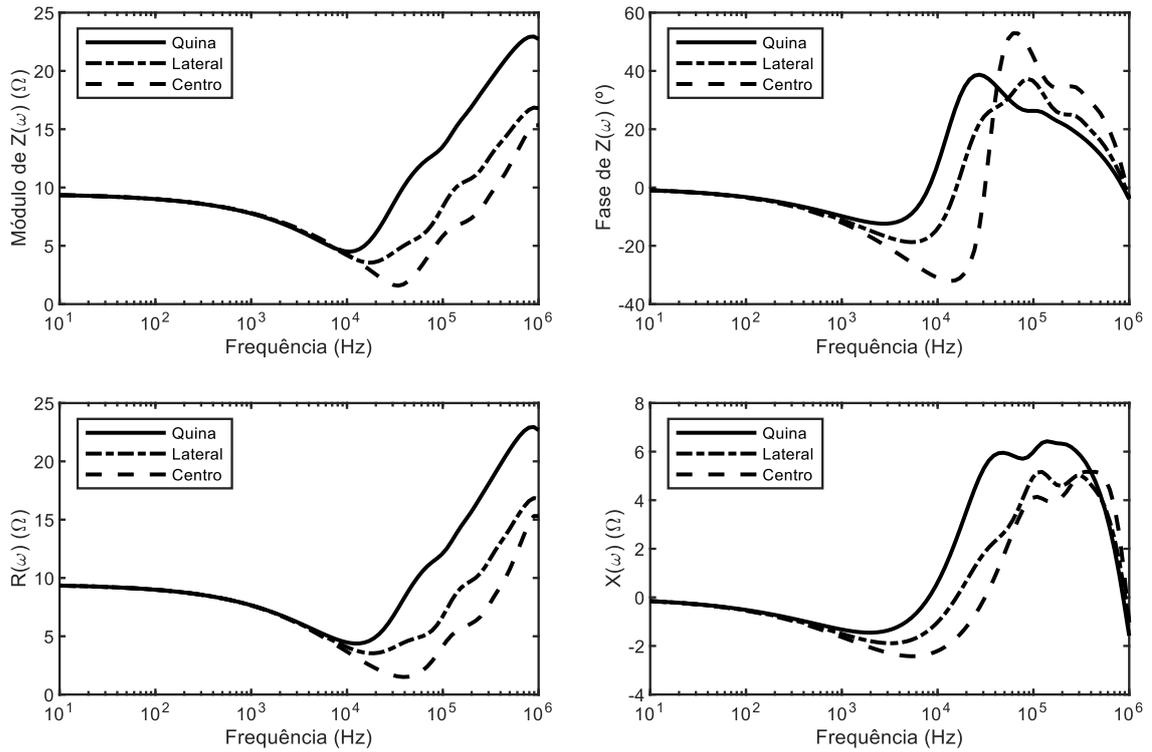
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ ,  $\rho = 500\Omega m$ .



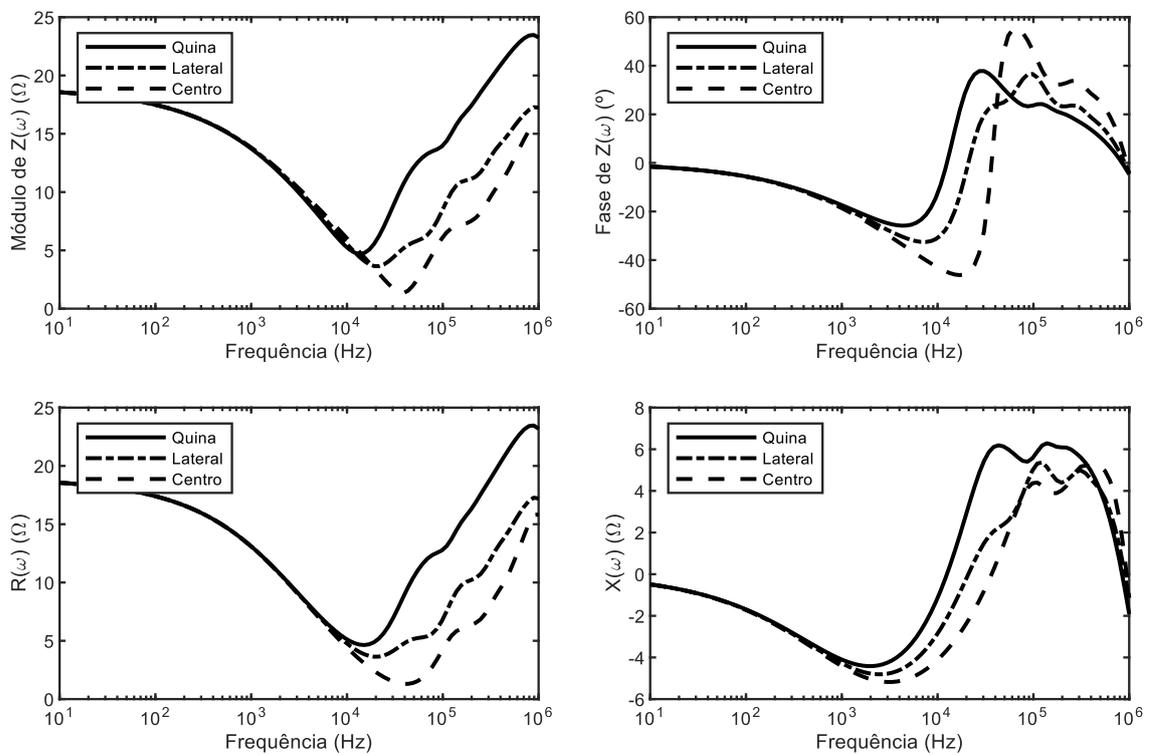
Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ ,  $\rho = 1000\Omega m$ .



Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ ,  $\rho = 2500\Omega m$ .



Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ ,  $\rho = 5000\Omega m$ .



Parâmetros:  $L = 120m$ ,  $D = 10m$ ,  $\rho = 10000\Omega m$ .

