



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**PROCESSAMENTO DE DADOS  
MAGNETOTELÚRICOS COLETADOS NA PARTE  
ORIENTAL DA BACIA DO PARANÁ**

Marco Aurélio Dias Ferreira

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/INPE/CNPq), orientado pelo Dr. Antonio Lopes Padilha e Coorientado pelo professor Dr. Mauricio de Souza Bologna (IAG/USP).

INPE  
São José dos Campos  
Agosto de 2021

## SUMÁRIO

**Pág.**

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>v</b>
<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>06</b>
<b>2 – MÉTODOS.....</b>	<b>07</b>
2.1 Área de estudo.....	07
2.2 O Método Magnetotelúrico. ....	10
<b>3 – RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>14</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>15</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b><u>Pág.</u></b>
1 Condutividade eletromagnética no interior da Terra.....	7
2 Vento Solar transmitindo íons e cargas elétricas.....	8
3 Montagem dos equipamentos para coleta de dados MT.....	9
4 Área coberta pela Bacia do Paraná.....	11
5 Linhas de distribuição saindo da Central em Furnas.....	12
6 Linhas de Transmissão de Alta Tensão.....	12
7 Bacia do Paraná e seus períodos de formação.....	13
8 Dados de Coordenadas Coletados das Linhas de transmissão.....	14

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- 1 MT – Magnetotelúrico
- 2 DS - distribuição secundária
- 3 INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- 4 ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico)

## RESUMO

Este trabalho de iniciação científica fundamentou-se na análise e na recuperação de dados Magnetotelúricos (MT) contaminados por ruídos eletromagnéticos, ocasionados através de linhas de transmissão DS (distribuição secundária) de alta voltagem (HVDC). A porção estudada foi a parte oriental da Bacia do Paraná. O projeto segue a linha de pesquisa do Grupo de Geomagnetismo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Existem duas linhas de transmissão que afetam os dados coletados na região oriental da Bacia do Paraná, sendo uma dessas a de Itaipu, a título de exemplo as regiões de Araraquara e no Arco de Ponta Grossa. A análise consistiu em verificar a quantidade de estrago nos dados através de sua dependência em distância das sondagens em relação a essas linhas de transmissão (a partir de 3 skin-depths). A investigação leva em consideração que esses ruídos afetam a parte real das impedâncias, de forma que a utilização da transformada de Kramers-Kronig na parte imaginária é utilizada para prever a parte real da impedância magnetotelúrica. Além do aprendizado do processamento de dados MT, fez-se necessário aprender a utilizar o software QGIS para geração de mapas. O intuito final do presente trabalho foi realizar o reprocessamento de algumas estações MT a fim de melhorar suas respostas ao ruído advindo das linhas de transmissão.

## **1 - INTRODUÇÃO**

A técnica já muito conhecida do método MT visa obter, de forma passiva, dados de condutividade e resistividade elétrica no interior da terra, através da análise do campo geomagnético externo, o qual induz correntes elétricas em subsuperfície. Esse método é uma poderosa ferramenta de aquisição geofísica de dados eletromagnéticos, onde é possível a sondagem em grandes profundidades em subsuperfície. Duas outras importantes características do método MT é o fato de sua aplicação não gerar riscos de nenhuma natureza ao meio ambiente, e a outra é a sua facilidade de aplicação, por ser uma técnica rápida de aquisição e que fornece meios extensos para obtenção de informações da estratigrafia de áreas extensas, como a Bacia do Paraná.

Como em grande parte dos trabalhos de aquisição geofísica, existem ruídos indesejáveis que precisam ser analisados e filtrados, seja em levantamentos de sísmica, levantamentos eletromagnéticos e mesmo em métodos de campos Magnetotelúricos. Nesse trabalho foram analisadas duas linhas de transmissão atuais no Brasil (uma delas é a de Itaipu) que afetam dados coletados na região oriental da Bacia do Paraná, como exemplos as regiões de Araraquara e no Arco de Ponta Grossa. A quantidade de estrago nos dados depende da distância das sondagens em relação às linhas de transmissão. Nesse trabalho, realizou-se o reprocessamento de algumas estações MT a fim de obter melhores respostas ao ruído advindo das linhas de transmissão.

## 2 – MÉTODOS

### 2.1 - Área de estudo

O presente trabalho trata-se de um estudo aprofundado do Método Magnetotelúrico (MT), por meio da aquisição geofísica, bem como as influências das linhas de transmissão de alta tensão gerando ruídos nos sinais MT coletados. Dentre esses objetivos, buscou-se realizar a análise e a recuperação de dados Magnetotelúricos (MT) contaminados por ruídos eletromagnéticos na parte oriental da Bacia do Paraná.

O estudo partiu do princípio do funcionamento do Método MT, de que em um meio homogêneo, a resistividade elétrica é determinada pelo método MT através da razão entre os campos elétrico e magnético medidos simultaneamente na superfície.

O método estuda as correntes telúricas geradas no interior da Terra, e, portanto, é utilizado para inferir a distribuição espacial da condutividade elétrica no interior da Terra. A figura abaixo mostra como ocorre a distribuição das correntes telúricas em subsuperfície.

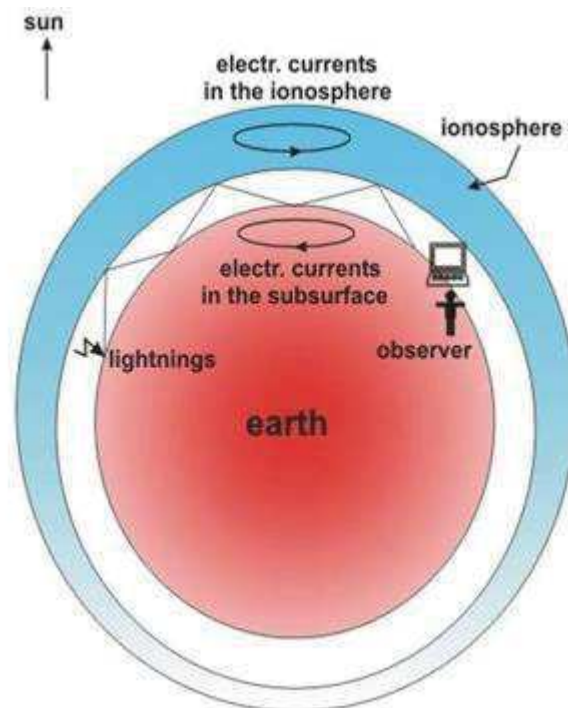


Figura 1 - Condutividade eletromagnética no interior da Terra

Existe uma relação direta entre as correntes que circulam o interior da terra e a Ionosfera, região do espaço onde estão presentes grandes quantidades de elétrons e

íons, e que são transmitidos ao planeta a partir da Magnetosfera. Essas correntes que partem da Ionosfera chegam ao planeta através de relâmpagos e descargas elétricas, conforme figura abaixo:

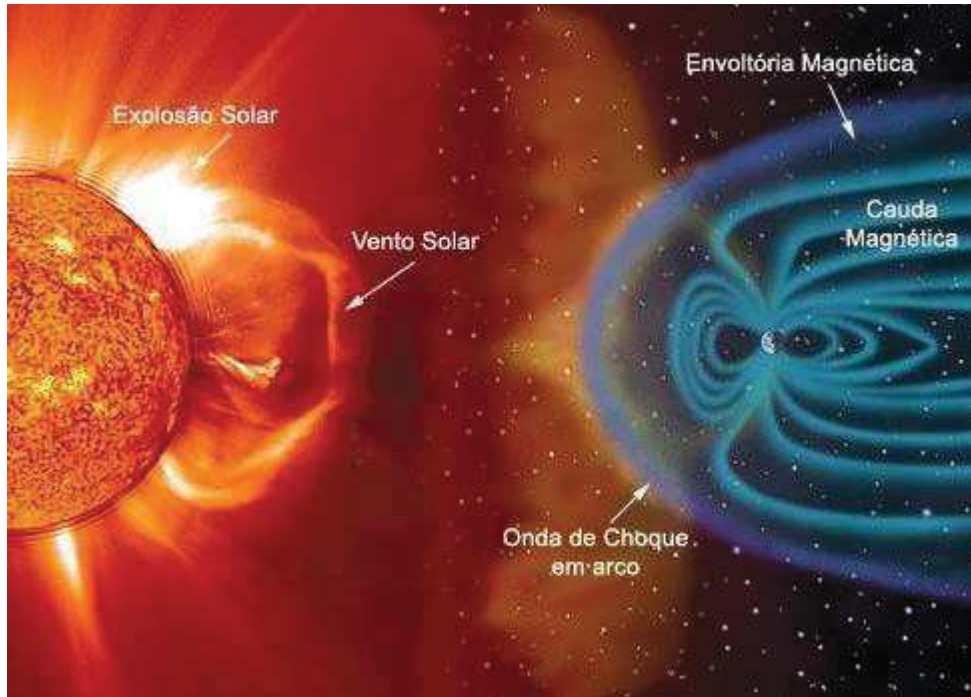


Figura 2 – Vento Solar transmitindo íons e cargas que interagem com o campo magnético da Terra

Dessa forma, as cargas elétricas circulantes no interior da Terra que chegam através da Ionosfera, se comportam de tal modo no interior do planeta que podemos considerá-lo como Ôhmico. Além disso, os dados obtidos através do método MT frequentemente têm como resposta uma influência de ruídos advindos de meios artificiais. As linhas de transmissão de energia de alta tensão, ocasionam ruídos nas impedâncias dos dados dos campos elétricos e magnéticos coletados nas regiões de influência dessas linhas. Como o processamento dos dados MT é derivar funções que são o tensor de impedâncias de transferência entre os campos elétrico e magnéticos ortogonais no interior da terra, os dados coletados devem ter uma mínima influência dos meios externos a essas medições. Assim, quando temos elementos como um tempo muito chuvoso e com muitas descargas elétricas, não somente linhas de transmissão podem causar interferência na coleta dos dados, como esses meios interferem e impedem a leitura correta dos campos elétricos e magnéticos, a fim de se calcular as impedâncias.



A figura abaixo mostra um esquema da montagem dos equipamentos em terra para as medições MT.

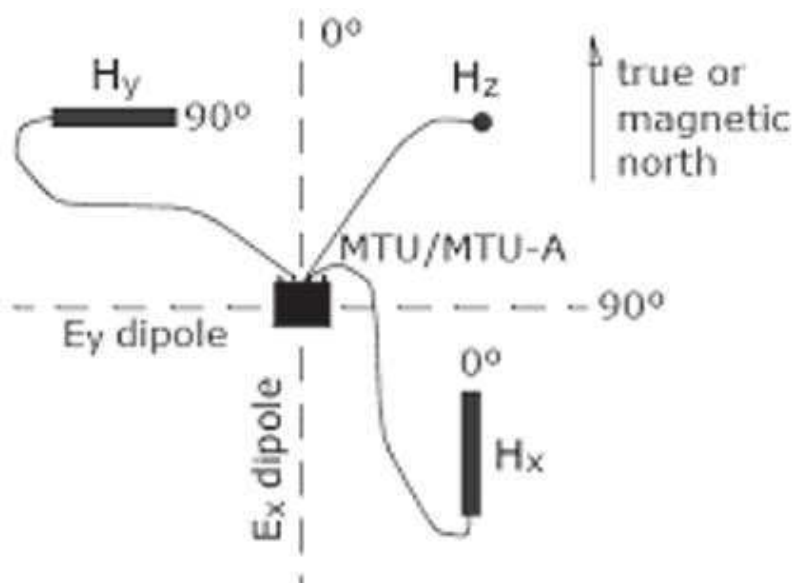


Figura 3 – Esquema de montagem dos equipamentos para coleta de dados MT

Uma das características da montagem do arranjo MT é o alinhamento do Campo Elétrico  $E_x$  e do Campo Magnético  $E_y$  com o Norte Magnético. A configuração da montagem é feita em um sistema de correlação cruzada entre os Campos Elétricos e Magnéticos. São medidas duas componentes do Campo Elétrico ( $E_x$  e  $E_y$ ) através de eletrodos instalados na superfície da Terra, e três componentes do Campo Magnético ( $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ ) que são medidos através de bobinas de alta sensibilidade.

As frequências trabalhadas no Método MT são baixas e variam normalmente entre  $10^{-4}$  e  $10^{-4}$  Hz.

As redes de distribuição de energia normalmente são formadas por bandas bastante estreitas que normalmente dominam o espectro natural de suas frequências, sendo que no Brasil, a fração da rede de distribuição de energia está em uma faixa de aproximadamente 60Hz.

## 2.2 - O Método Magnetotelúrico (MT)

O Método Magnetotelúrico (MT) tem como principal aplicação a obtenção de dados de condutividade elétrica em subsuperfície terrestre. Através desse método é possível medir as variações temporais das componentes horizontais dos campos elétrico e magnético naturais sobre a superfície da Terra (Wannamaker & Hohmann, 1991).

No interior do nosso planeta existem campos eletromagnéticos naturais de baixa frequência e de larga escala, conhecidos como campos Magnetotelúricos. Esses campos induzem ao que chamamos de correntes telúricas, que são correntes elétricas naturais alternadas que circulam pelo interior da Terra, que por sua vez podem ser medidas através do método MT. Através das diferenças de potencial que as correntes telúricas causam entre pontos na superfície terrestre, a técnica utiliza eletrodos não polarizados ou mesmo placas feitas de uma substância química inerte, a exemplo o chumbo.

Os dados obtidos através do método MT frequentemente têm como resposta uma influência de ruídos advindos de meios artificiais, por exemplo linhas de transmissão de alta tensão, bem como meios naturais, como o próprio campo eletromagnético terrestre. Esses ruídos são capazes de contaminar a real aquisição desses dados. Dessa forma, a eliminação desses ruídos é importante para se obter um autêntico perfil no subsolo alvo analisado.

Uma grande característica desse método quando comparado com outros métodos de aquisição geofísica é o fato de conseguir sondar não só porções rasas da Terra, mas também partes profundas em subsuperfície. Assim, é possível obter dados em centenas de quilômetros abaixo da área alvo estudada. Essa capacidade é dependente da frequência com que se analisa o sinal e também da condutividade elétrica do meio. Os dados obtidos são correlacionados com um tensor de impedância através de indução eletromagnética.

A Bacia do Paraná é formada dentro dos limites territoriais e políticos da Tríplice Fronteira Argentina-Brasil-Paraguai, em uma área de aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros quadrados. Ela possui a maior produtora de energia hidráulica, a Usina Hidrelétrica de Itaipu, conhecida também como Itaipu Binacional. Esta foi originada na década de 70 por meio de um acordo entre Brasil e Paraguai e está localizada na

cidade de Foz do Iguaçu, no estado do Paraná, e na Ciudad del Est, no Paraguai. As informações atuais das estruturas geológicas em subsuperfície da Bacia do Paraná são mínimas em comparação à sua vasta extensão ainda inexplorada, de modo que a região é muito estudada pelos pesquisadores. Como o Brasil é extremamente rico em recursos minerais, faz-se necessário realizar esse desbravamento, a fim de se ampliar cada vez mais os conhecimentos geofísicos e geológicos do nosso território nacional. A Bacia do Paraná se desenvolveu no interior da Placa Sul-Americana a partir do período Ordoviciano. Abaixo temos uma foto em destaque da área coberta pela Bacia do Paraná, com destaque também à sua porção lateral, a Bacia Chaco-Paraná.



Figura 4 – Área coberta pela Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná é formada por um conjunto misto de rochas sedimentares e vulcânicas que estão sobre rochas mais antigas com mais de 500 milhões de anos. Sua formação está relacionada a diferentes ambientes, como desertos, mares e rios, bem como pela influência do clima (glacial, temperado e desértico) em diferentes momentos de sua existência.

As linhas de transmissão que passam pela parte Oriental da Bacia do Paraná, geram

altas tensões de campos eletromagnéticos. A estação de origem estudada é a de Furnas, cujas linhas de transmissão podem ser identificadas na figura abaixo.

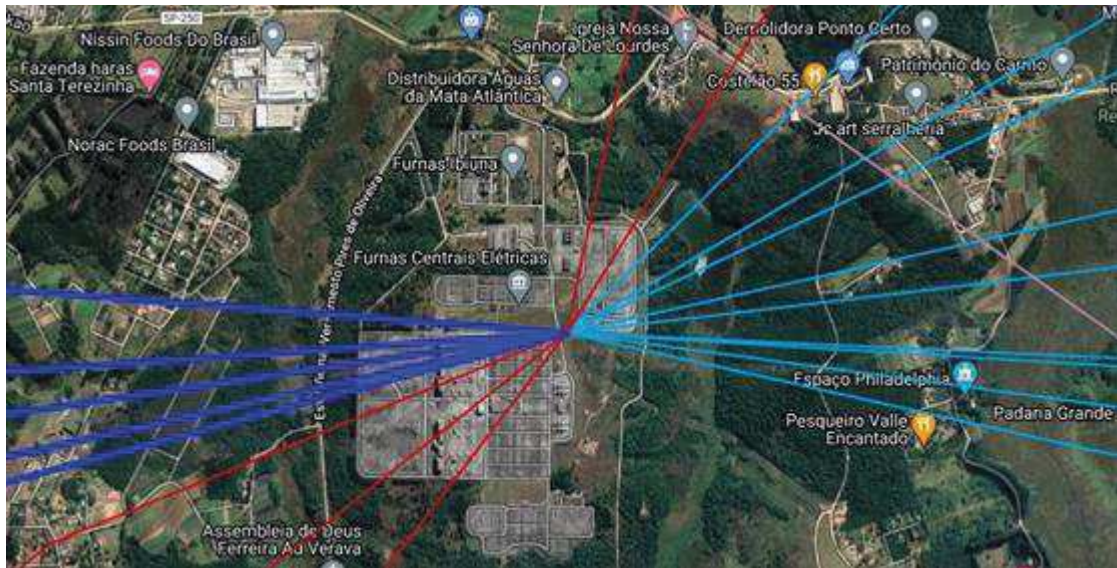


Figura 5 – Linhas de distribuição saindo da Central em Furnas

Essas linhas de Transmissão possuem centenas de quilômetros de extensão e alimentam diversas regiões do estado de São Paulo, passando por regiões como o Arco de Ponta Grossa e Araraquara. Os dados principais foram coletados a partir da base de dados da ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Um detalhe dessas linhas em algumas regiões pode ser observado na figura seguinte.



Figura 6 – Linhas de Transmissão de Alta Tensão

Nas sondagens MT nessas regiões de influência das Linhas de Transmissão, a medida do Tensor de Impedância é feita de maneira indireta pelas medidas da razão entre as componentes ortogonais do campo elétrico pelo campo magnético resulta no que denominamos tensor de impedância:

$$|Z| = \frac{E}{H}$$

Onde:

$|Z|$  é o Módulo do Tensor de Impedância

E é o Campo Elétrico medido

H o Campo Magnético

Quando observamos uma Bacia extensa como do Paraná, um dos maiores interesses na aplicação do método MT está na prospecção da resistividade das rochas e das interfaces a grandes profundidades, sendo, portanto, as frequências abaixo de 1Hz as de maior interesse. Dessa forma, consegue-se, através do conceito de Skin-Depth, fazer a conversão dos dados coletados e determinar a profundidade do embasamento daquela área estudada. A figura abaixo mostra um esquema onde as regiões cobertas pelo símbolo (+) são locais do embasamento na Bacia do Paraná.

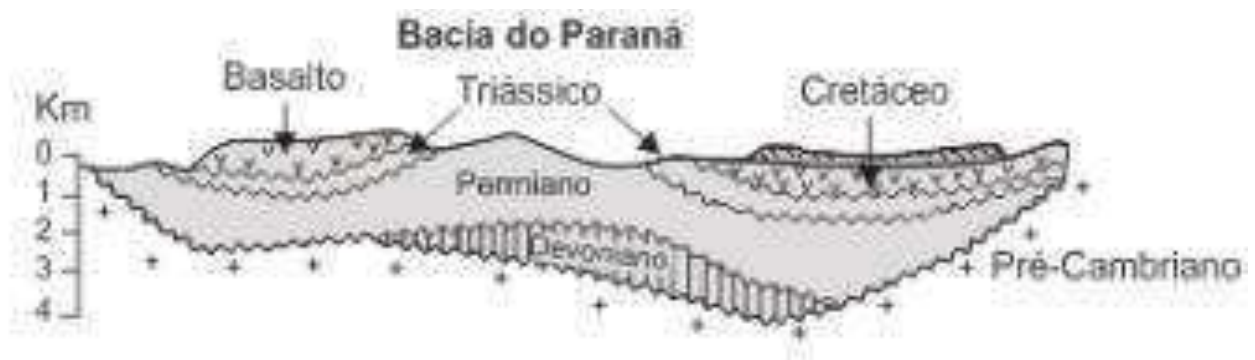


Figura 7 – Bacia do Paraná e seus períodos de formação



### 3 – RESULTADOS E CONCLUSÕES

A análise dos dados se estendeu a partir da coleta de coordenadas das Linhas de Transmissão de Alta Tensão ao longo das centenas de quilômetros. Um exemplo dos dados coletados podem ser observados na figura abaixo.

PONTOS DE TRANSMISSÃO								
L1	Linha LT 600 kV F.IGUACU 50HZ / IBIUNA C 4 PR/SP		L2	Linha LT 600 kV F.IGUACU 50HZ / IBIUNA C 3 PR/SP		L3	Linha LT 600 kV F.IGUACU 50HZ / IBIUNA C 1 PR/SP	
	LATITUDE	LONGITUDE		LATITUDE	LONGITUDE		LATITUDE	LONGITUDE
T1	25°28'0.21"S	54°32'28.64"O	T1	25°28'0.21"S	54°32'28.64"O	T1	25°28'0.21"S	54°32'28.64"O
T2	25°19'15.54"S	54°30'29.31"O	T2	25°19'52.19"S	54°29'45.74"O	T2	25°20'45.52"S	54°28'44.11"O
T3	24°14'4.28"S	51°42'0.80"O	T3	24°15'22.41"S	51°42'12.12"O	T3	24°16'28.77"S	51°42'5.08"O
T4	23°46'29.55"S	49° 7'42.32"O	T4	23°47'39.88"S	49° 8'27.27"O	T4	23°48'29.78"S	49° 8'9.58"O
T5	23°39'35.01"S	47°10'42.27"O	T5	23°39'54.69"S	47° 6'6.10"O	T5	23°39'54.69"S	47° 6'6.10"O
T6	23°39'54.69"S	47° 6'6.10"O						

Figura 8 - Dados de Coordenadas Coletados das Linhas de transmissão estudadas.

Os dados coletados são basicamente processados utilizando-se atualmente a Transformada de Kramers-Kronig (TKK), muito utilizadas em situações que causam ruídos extremos, como foi o caso do projeto. Essa Transformada possui a seguinte relação:

$$H_i(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H_r(u)}{\omega - u} du$$

$$H_r(\omega) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{H_i(u)}{\omega - u} du$$

Na aplicação computacional da Transformada de Kramers-Kronig, verifica-se que o ruído coerente e contínuo contamina todo o espectro do sinal MT e impede a determinação das regiões onde o sinal natural predomine. A sua utilização obtém ótimas respostas na eliminação dos ruídos para a determinação dos sinais MT

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PÁDUA, M. B. **Obtenção das Componentes do Tensor de Impedâncias do Método Magnetotelúrico Usando a Transformada de Kramers-Kronig**, 2019. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TD7FP8>>. Acesso em: 16 abr. 2021.

DE LUGAO, P. P ; SENDEROWITZ, Stephanie. **A importância do método Magnetotelúrico na exploração das bacias terrestres brasileiras**. Disponível em: <[https://www.sbgf.org.br/home/images/stories/Artigo\\_Lugao-Senderowitz\\_completo-CORR.pdf](https://www.sbgf.org.br/home/images/stories/Artigo_Lugao-Senderowitz_completo-CORR.pdf)>. Acesso em: 16 abr. 2021.

VOZOFF, K. **The magnetotelluric method**. In: NABIGHIAN, M. (ed), Electromagnetic methods in applied geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, vol. 2, part B, 1991, p. 641-711.