



34

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ATHOS PEREIRA BARROS MOURA**

**COMPENSAÇÃO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE  
TRANSMISSÃO LONGAS**

Palmas/TO  
2021

**ATHOS PEREIRA BARROS MOURA**

**COMPENSAÇÃO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE  
TRANSMISSÃO LONGAS**

Monografia foi avaliada e apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> M.<sup>a</sup> Gisele S. Parmezzani Marinho.

Palmas/TO  
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

M929c     Moura, Athos Pereira Barros.  
              Compensação do efeito Ferranti em linhas de transmissão longas.  
              / Athos Pereira Barros Moura. – Palmas, TO, 2021.

44 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins –  
Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica,  
2021.

Orientador: Gisele Souza Parmezzani Marinho

1. Efeito Ferranti. 2. Compensação de reativo. 3. Reator. 4. Motor  
síncrono. I. Título

**CDD 621.3**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de  
qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que  
citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime  
estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da  
UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

ATHOS PEREIRA BARROS MOURA

## COMPENSAÇÃO DO EFEITO FERRANTI EM LINHAS DE TRANSMISSÃO LONGAS

Projeto de Graduação foi avaliado e apresentado à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 13 / 05 / 2021

Banca Examinadora

Assinado de forma digital por Gisele Souza Parmezzani Marinho  
DN: cn=Gisele Souza Parmezzani Marinho, o=Universidade  
Federal do Tocantins - UFT, ou=Engenharia Elétrica - Campus de  
Palmas, email=giselemarinho@uft.edu.br, c=BR  
Dados: 2021.05.14 08:40:33 -03'00'  
Versão do Adobe Acrobat Reader: 2021.001.20155

Profª. Mª. Gisele Souza Parmezzani Marinho, UFT

Assinado de forma digital por Priscila Oliveira  
Dados: 2021.05.18 08:39:27 -03'00'

Profª Drª. Priscila da Silva Oliveira, UFT

Assinado digitalmente por ALCY MONTEIRO  
JUNIOR:02054783102  
Razão: Eu atesto a precisão e a integridade  
deste documento  
Localização: Palmas - TO  
Data: 2021.05.14 09:10:52-03'00'

Prof. Mº. Alcy Monteiro Junior, UFT

Palmas, 2021

## RESUMO

Os condutores das linhas de transmissão geram potência reativa devido a capacidade entre os cabos e o solo. Se essa energia reativa não for absorvida por dispositivos conectados em paralelo com a rede, como por exemplo, alguns motores síncronos ou reatores, a tensão ao longo de toda a linha irá aumentar ocasionando uma tensão no receptor maior do que a tensão no transmissor. Esse aumento de tensão é expressivo quanto maior for o comprimento da linha. Esse fenômeno é chamado de efeito Ferranti e pode danificar os equipamentos conectados à rede caso os mesmos não suportem por muito tempo essas sobretensões. Além disso, as perdas por efeito Joule na linha aumentam devido a alta corrente capacitativa que circula na rede. Este trabalho simula alguns desses efeitos e apresenta algumas soluções propostas por literaturas específicas existentes.

**Palavras-chaves:** Linhas de transmissão longas. Reatores. Motores síncronos. Efeito Ferranti. Compensação de reativo.

## **ABSTRACT**

The conductors of the transmission lines generate reactive power due to the capacitance between the cables and the ground, if this reactive does not stop absorbed by devices connected in parallel with the network, such as synchronous motors or reactors, the voltage along the entire line will increase, and the voltage at the receiver becomes greater than the voltage at the transmitter, this voltage increase is significant when greater for the line length. This phenomenon is called the Ferranti effect and can damage the equipment connected to the network if they do not support these overvoltages for a long time, as losses due to the Joule effect on the line increase due to the high capacitive current circulating in the network.

**Key-words:** Long transmission lines. Reactors. Synchronous motors. Ferranti effect. Reactive compensation.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Sistema de Transmissão de energia no Brasil.....                        | 12 |
| Figura 2- Transmissão de energia.....   | 15 |
| Figura 3- Parâmetros distribuídos em uma LT .....                                 | 15 |
| Figura 4- Fluxo de potência em uma LT .....                                       | 16 |
| Figura 5- Tensão e potências .....  | 17 |
| Figura 6- Geração e consumo de reativo adicional em uma LT.....                   | 18 |
| Figura 7- Ondas viajantes em uma linha de transmissão.....                        | 19 |
| Figura 8- Modelo $\pi$ de uma linha sem carga .....                               | 20 |
| Figura 9- Diagrama fasorial.....  | 21 |
| Figura 10- Efeito Ferranti .....  | 22 |
| Figura 11- Configuração esquemática dos bipolos alimentando a região Sudeste..... | 23 |
| Figura 12- Reator a seco com núcleo de ar e enrolamento encapsulado .....         | 24 |
| Figura 13- Reator com núcleo de ferro imerso a óleo .....                         | 24 |
| Figura 14- Compensação de uma LT em vazio por reatores em derivação .....         | 25 |
| Figura 15- Motor síncrono de dois polos .....                                     | 26 |
| Figura 16- Circuito equivalente por fase de um motor síncrono trifásico.....      | 26 |
| Figura 17- Efeito da variação da corrente de campo em um motor síncrono.....      | 27 |
| Figura 18- Triângulo de potências .....   | 28 |
| Figura 19- Tipos de fatores de potência .....                                     | 28 |
| Figura 20- Correção do fator de potência para uma carga indutiva .....            | 29 |
| Figura 21- Curva V de um motor sincrono.....                                      | 30 |
| Figura 22- Sistemas em estudo:Torre típica da LT Neves 1-Vespasiano 2.....        | 32 |
| Figura 23- LCC <i>template</i> .....  | 32 |
| Figura 24- Escolha do modelo da linha de transmissão.....                         | 33 |
| Figura 25- Parâmetros elétricos da linha .....                                    | 33 |
| Figura 26- Fonte de tensão trifásica .....  | 34 |
| Figura 27- Circuito simulado sem carga.....                                       | 34 |
| Figura 28- Efeito Ferranti no ATPDraw .....                                       | 35 |
| Figura 29- Aumento da tensão ao longo da linha de transmissão .....               | 36 |
| Figura 30- Comparaçao dos dados teóricos e simulados.....                         | 36 |
| Figura 31- Circuito com reator .....  | 37 |
| Figura 32- Reator com 3,2 H de indutância.....                                    | 38 |
| Figura 33- Carga puramente resistiva de 710 Ohm.....                              | 39 |
| Figura 34- Circuito com motor síncrono .....                                      | 39 |
| Figura 35- Dados do motor síncrono .....  | 40 |
| Figura 36- Compensação de reativo com Motor síncrono .....                        | 41 |

## **LISTA DE QUADROS**

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1- Valores dos parâmetros elétricos e da configuração da LT ..... | 31 |
| Quadro 2- Aumento da tensão ao longo da LT .....                         | 35 |
| Quadro 3- Valores comerciais de resistências .....                       | 38 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|         |  |
|---------|--|
| ATPDraw | Alternative Transients Program                                   |
| CGH     | Centrais Geradoras Hidrelétricas                                 |
| EPE     | Empresa de Pesquisa Energética                                   |
| LT      | Linha de Transmissão   |
| ONS     | Operador Nacional do Sistema Elétrico                            |
| PCH     | Pequenas Centrais Hidrelétricas                                  |
| SEP     | Sistema Elétrico de Potência                                     |
| SNPTEE  | Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica |
| UHE     | Usina Hidrelétrica   |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |  |
|------------|--|
| C          | Capacitância (C/km)                      |
| $E_A$      | Tensão de armadura do motor síncrono     |
| f          | Frequência (Hz)                          |
| G          | Condutância (S/km)                       |
| $I_{km}$   | Corrente de linha entre as barras k e m  |
| $K_{ru}$   | Coeficiente de reflexão de tensão        |
| L          | Indutância (H/km)                        |
| $N_s$      | Velocidade de rotação do motor (rpm)     |
| P          | Potência Ativa (W)                       |
| $P_0$      | Potência natural da linha (W)            |
| p          | Número de polos do motor                 |
| Q          | Potência Reativa (Var)                   |
| r          | Resistência ( $\Omega$ /km)              |
| S          | Potência Aparente (VA)                   |
| v          | Velocidade (m/s)                         |
| $V_k$      | Tensão na barra k                        |
| $V_m$      | Tensão na barra m                        |
| $V_s$      | Tensão no transmissor                    |
| $V_r$      | Tensão no receptor                       |
| $V_\Phi$   | Tensão terminal do motor síncrono        |
| $X_{km}$   | Reatância da linha entre as barras k e m |
| $\theta_m$ | Fase da tensão na barra m                |

## SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                              | <b>11</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Justificativa .....</b>                          | <b>11</b> |
| <b>1.2</b> | <b>Objetivos.....</b>                               | <b>12</b> |
| 1.2.1      | Objetivo Geral .....                                | 12        |
| 1.2.2      | Objetivos Específicos .....                         | 13        |
| <b>1.3</b> | <b>Metodologia .....</b>                            | <b>13</b> |
| <b>1.4</b> | <b>Estrutura da Dissertação .....</b>               | <b>13</b> |
| <b>2</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>                  | <b>15</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Relação entre tensão e potência reativa.....</b> | <b>16</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Efeito Ferranti.....</b>                         | <b>17</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Ondas Vaiajantes .....</b>                       | <b>18</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Efeito Capacitivo.....</b>                       | <b>20</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Comprimento da linha e efeito Ferranti.....</b>  | <b>21</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Problemas causados pelo efeito Ferranti.....</b> | <b>22</b> |
| <b>2.7</b> | <b>Reatores .....</b>                               | <b>23</b> |
| <b>2.8</b> | <b>Motores Síncronos .....</b>                      | <b>25</b> |
| <b>2.9</b> | <b>Correção do fator de potência .....</b>          | <b>27</b> |
| <b>3</b>   | <b>RESULTADOS .....</b>                             | <b>31</b> |
| <b>4</b>   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>                   | <b>42</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Trabalhos Futuros .....</b>                      | <b>42</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                            | <b>43</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é constituído por um conjunto de unidades geradoras de energia, subestações, transformadores, linhas e receptores ligados eletricamente, esses equipamentos operam simultaneamente com o objetivo de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica aos consumidores (LEÃO, 2009).

Um dos equipamentos supracitados são as linhas de transmissão, que de acordo com Fuchs (2015, p. 91) “o termo linha de transmissão é aplicável a todos os elementos de circuitos que se destinem ao transporte de energia independentemente da quantidade de energia transportada”. Nesse trabalho dar-se-á ênfase as linhas de transmissão longas que são linhas cujo comprimento é superior a 240 km.

No Brasil há uma predominância das linhas de transmissão longas devido a característica continental do país onde a região norte possui o maior potencial hidroelétrico com aproximadamente 67,7 GW enquanto as regiões de maior consumo são as regiões sul e sudeste que consomem juntas 67,8% da energia elétrica gerada no Brasil, a distância entre essas regiões favorece esse tipo de linha (EPE, 2020).

O efeito Ferranti ocorre principalmente em linhas de transmissão longas quando o receptor está a vazio ou com carga. Nessa situação ocorre um aumento da tensão ao longo da linha de transmissão e dessa forma a tensão no receptor torna-se maior do que a tensão no transmissor (MAXWELL, 2019).

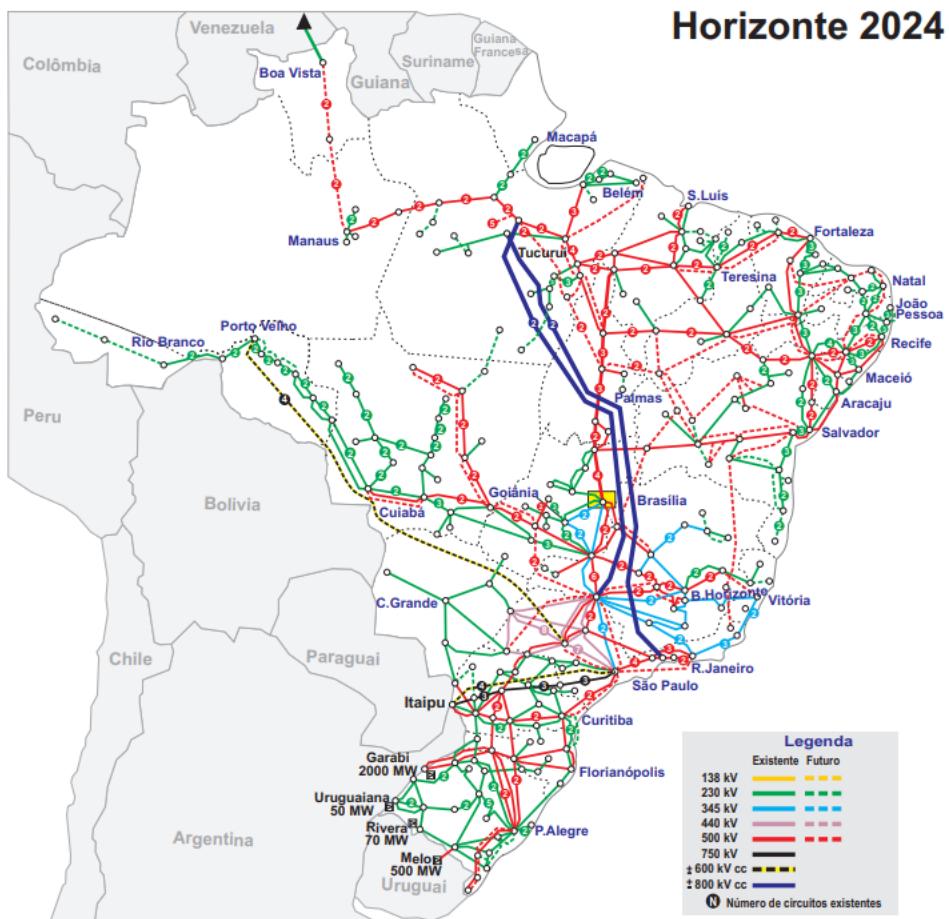
Esse efeito causa vários problemas no projeto e na instalação de linhas de transmissão, como por exemplo, a necessidade de aumentar o nível de isolamento, aumentando o custo do projeto, aumento das perdas por efeito corona e por efeito Joule reduzindo a eficiência da linha de transmissão (BOVOLATO, 2009).

### 1.1 Justificativa

A principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil é a fonte hidráulica composta por UHE, PCH e CGH, que corresponde a 63% da energia elétrica gerada no país em 2019. A região com maior consumo de energia é a região sudeste que consome 50,7% e a região com o menor consumo é a região norte que consome 6,9% da energia gerada, esse comportamento de consumo se manteve praticamente constante durante os últimos oito anos (EPE, 2020).

As hidrelétricas da região Norte se conectam a região sudeste através de linhas de transmissão longas; observa-se também que as linhas de transmissão se concentram nas regiões de maior consumo, conforme pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Sistema de Transmissão de energia no Brasil



Fonte: ONS, 2020.

As linhas de transmissão no Brasil, como observado na figura 1, são na sua maioria de comprimento longo, logo deve-se fazer a compensação de reativo para evitar que o efeito Ferranti provoque prejuízos aos equipamentos ligados ao SEP, outro fator importante para as concessionárias é a análise financeira das soluções desse problema e as vantagens e desvantagens de cada solução.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui por finalidade investigar o fenômeno da elevação de tensão no receptor de uma linha de transmissão longa quando a linha opera a vazio ou com carga leve, as consequências dessa sobretensão para o SEP e métodos utilizados para corrigir esse problema.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Simular e comparar as formas de onda das tensões antes e após a aplicação de reatores shunts em uma linha longa operando a vazia.
- Simular e comparar as formas de onda das tensões antes e após a aplicação de um motor síncrono junto ao terminal da linha a vazia.
- Comparar a eficiência dos dois métodos utilizados na compensação da linha de transmissão

### 1.3 Metodologia

Para a execução desse trabalho foi feito uma revisão bibliográfica a partir de livros, artigos e monografias sobre o efeito Ferranti, compensação reativa, reatores shunt e motores síncronos. Na parte prática será utilizado o software ATPDraw para a simulação de uma linha de transmissão, reatores shunts e motores síncronos, esse software foi escolhido por ser livre, de fácil manuseio e pela sua interface gráfica que permite a visualização das formas de onda de tensão.

### 1.4 Estrutura da Dissertação

O trabalho está organizado em quatro capítulos correlacionados. O Capítulo 1, apresenta uma breve introdução sobre o sistema elétrico de potência, os equipamentos que fazem parte desse sistema em especial as linhas de transmissão, o capítulo aborda sobre o fenômeno do aumento da tensão em linhas de transmissão longas, quando as mesmas estão operando à vazia ou com carga leve e os problemas causados desse efeito para o SEP, neste capítulo encontra-se a justificativa do trabalho, os objetivos gerais e específico e a metodologia adotada.

O Capítulo 2 aborda sobre o efeito Ferranti, a influência do comprimento da linha de transmissão, os problemas causados pelo mesmo, os métodos utilizados para a solução desse problema, os aspectos construtivos dos reatores e motores.

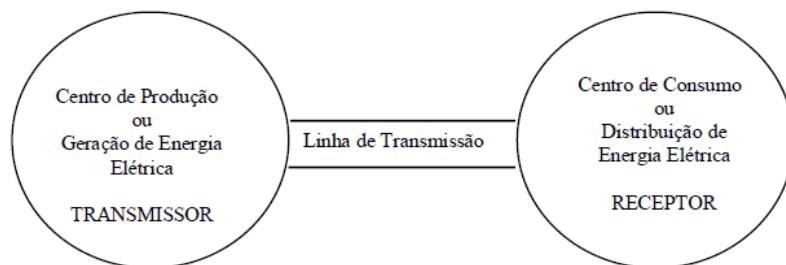
O Capítulo 3 mostra as simulações feitas no software ATPDRaw de uma linha de transmissão baseada na linha real LT Neves 1 – Vespasiano 2 de propriedade da CEMIG, localizada no município de Vespasiano, Minas Gerais, foram simulados a linha sem carga, e a mesma linha com compensação de reativo utilizando um reator e um motor, também foi analisado se o efeito Ferranti apareceria com uma carga resistiva conectada no receptor da linha.

No capítulo 4 encontram-se as conclusões obtidas através das simulações feitas do capítulo 3, foram feitas comparações entre os resultados e foram feitas as considerações a cerca deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transmissão de energia elétrica ocorre de uma fonte de energia (transmissor) para o receptor que é o consumidor de energia, essa energia não é irradiada, mas guiada através de linhas de transmissão por onde circulam correntes elétricas mantidas sob diferença de potencial elétrico, esse sistema de transmissão forma um circuito fechado, onde alguns casos o solo é usado como condutor de retorno, esse sistema pode ser observado na figura 2 (FUCHS, 2015, p. 92).

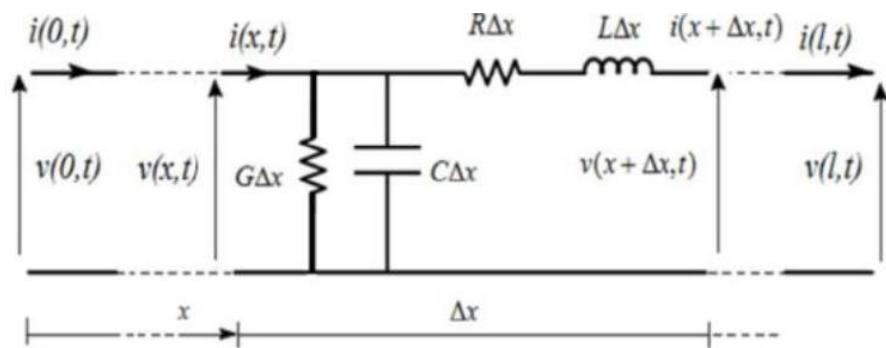
Figura 2: Transmissão de energia



Fonte: Bovolato, 2009.

No estudo das linhas de transmissão são utilizados parâmetros distribuídos que são: resistência  $r$  [Ohm/km], indutância  $L$  [Henry/km], capacitância  $C$  [Farad/km] e a condutância  $g$  [Siemens/km], esses parâmetros estão representados na figura 3 e são utilizados pois cada trecho da linha por menor que seja, possui resistência, indutância, capacitância e correntes de fuga, devido a esses parâmetros a tensão varia ao longo da linha, podendo acontecer que a tensão no receptor seja maior que a do emissor (FUCHS, 2015, p. 92-93).

Figura 3: Parâmetros distribuídos em uma LT

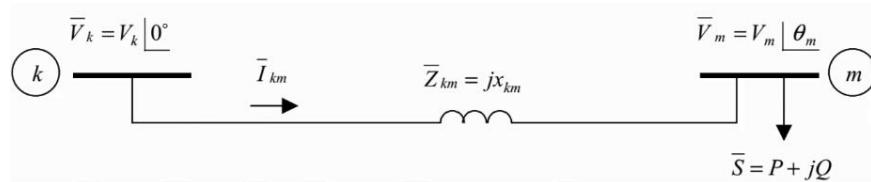


Fonte: Silva, 2017.

## 2.1 Relação entre tensão e potência reativa

O sistema elétrico de potência da figura 4 não tem perdas de potência ativa e a barra k foi tomada como referência.

Figura 4: Fluxo de potência em uma LT



Fonte: Haffner, 2007.

Aplicando-se a lei de Kirchhoff das tensões, obtemos a tensão na barra k, expressa na equação 1:

$$V_k = V_m + j(x_{km} I_{km}) \quad (1)$$

Onde:  $V_K$  é a tensão na barra k

$V_m$  é a tensão na barra m

j é a unidade imaginária que equivale a  $\sqrt{-1}$

$x_{km}$  é a reatância indutiva da linha de transmissão

$I_{km}$  é a corrente que circula entre as barras k e m

A corrente na linha de transmissão é dada pela equação 2:

$$I_{km} = \left( \frac{S}{V_k} \right)^* = \frac{P - jQ}{V_k} \quad (2)$$

Onde: S é a potência complexa da barra m

P é a potência ativa da barra m

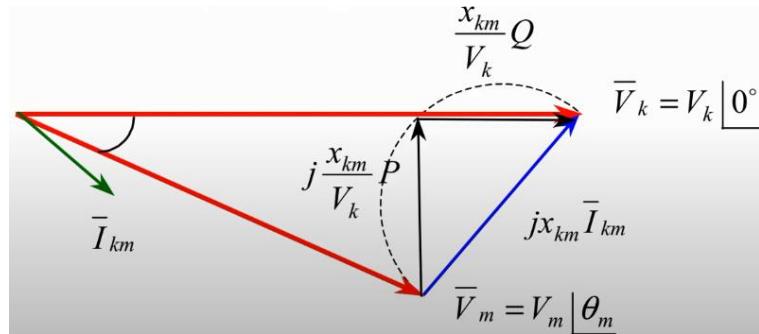
Q é a potência reativa da barra m

Substituindo a equação 2 em 1, obtemos a equação 3:

$$V_k = V_m + \frac{x_{km}}{V_k} Q + j \frac{x_{km}}{V_k} P \quad (3)$$

A partir da equação 3 constrói-se um diagrama fasorial das tensões no sistema:

Figura 5: Tensão e potências



Fonte: Haffner, 2007

Observa-se que uma variação da potência ativa (P) consumida pela carga causa uma variação maior na fase da tensão no receptor ( $V_m$ ) do que no seu módulo, quanto maior o ângulo  $\theta_m$  maior é a potência ativa (P) consumida pela carga (HAFFNER, 2007).

Nota-se que uma variação da potência reativa (Q) consumida pela carga causa uma variação maior no módulo de  $V_m$  do que na fase, quanto maior a potência reativa (Q) consumida maior será o módulo da tensão  $V_m$ , esse é o motivo pelo qual é utilizada a compensação de reativo para o controle do módulo da tensão no receptor de uma linha de transmissão (HAFFNER, 2007).

## 2.2 Efeito Ferranti

A potência aparente é composta de duas parcelas de potências:

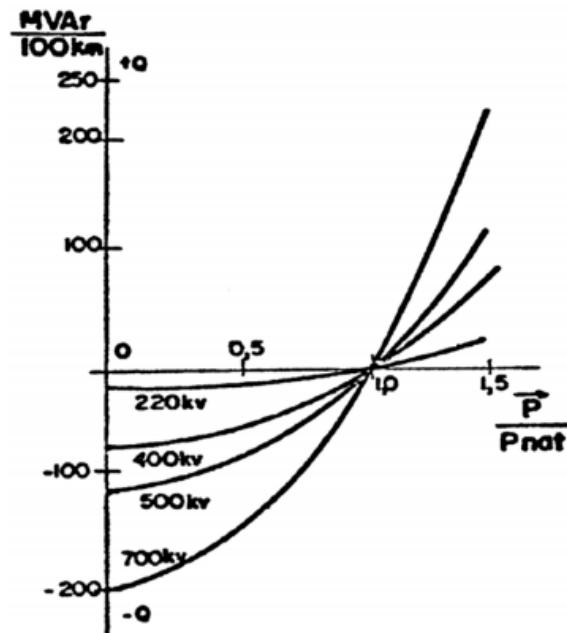
- Potência Ativa: É utilizada para realizar trabalho, gerando movimento, luz, calor, etc, é medida em [W]
- Potência reativa: É utilizada para criar e manter os campos eletromagnéticos, medida em [Var].

A figura 6 mostra a geração e o consumo de potência reativa adicional para o transporte de potência ativa a cada 100 km de linha de transmissão, observa-se que o único caso em que não é necessário gerar ou consumir potência reativa adicional é quando a linha transporta uma potência ativa igual a sua potência natural  $P_0$  (FUCHS, 2015, p.137).

Quando a linha de transmissão transmite uma potência ativa inferior a  $P_0$ , a linha gera mais reativo como está representado na região -Q do gráfico, se esse adicional de reativo não

for absorvido por algum banco de reatores ou máquina síncrona, a tensão ao longo da linha irá aumentar, esse fenômeno é conhecido como efeito Ferranti (FUCHS, 2015).

Figura 6: Geração e consumo de reativo adicional em uma LT



Fonte: Fuchs, 2015.

Quando LTs longas operam em vazio, ou com cargas leves, o efeito capacitivo se torna predominante, provocando elevações indesejáveis de tensão – resultantes dos efeitos das ondas refletidas no extremo receptor e do balanço de energia entre os campos elétrico e magnético, haja vista a reduzida energia armazenada no campo magnético (FUCHS, 2015).

Visando à neutralização do efeito Ferranti e à melhoria da estabilidade, são ligados reatores indutivos em derivação, com comutadores automáticos incorporados, a ambas as extremidades e/ou em pontos intermediários da linha (FUCHS, 2015).

### 2.3 Ondas Viajantes

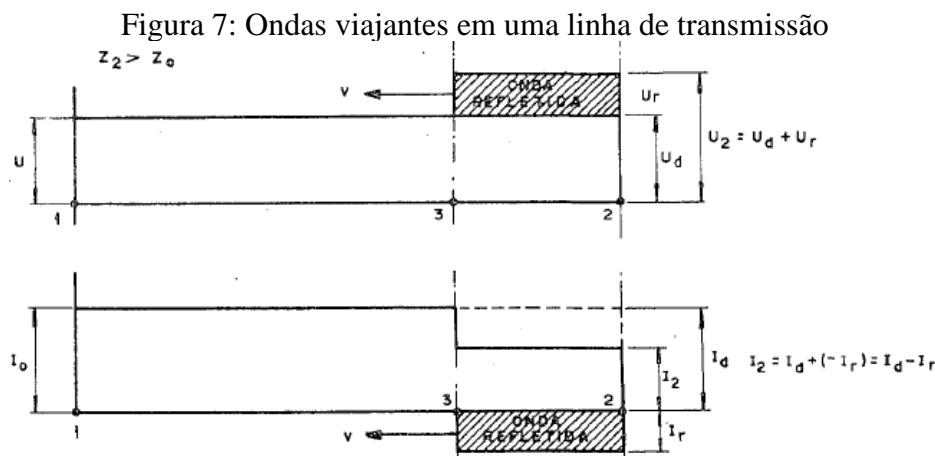
De acordo com Fuchs (2015), as tensões e correntes se estabelecem ao longo das linhas de transmissão sob a forma de ondas que se propagam do transmissor para o receptor com velocidade  $v$  [m/s], próximo ao valor da velocidade da luz no vácuo, as ondas de tensão são sempre acompanhadas de ondas de corrente.

Existem pontos de descontinuidade na linha de transmissão, são pontos onde ocorrem mudanças em sua impedância natural, essas mudanças podem ocorrer no receptor da linha, se a impedância da carga for diferente da impedância natural da linha por exemplo, nesses

pontos de descontinuidade ocorrem surgimento de novas ondas de tensão e de corrente (FUCHS, 2015).

Ao atingirem um ponto de descontinuidade, as ondas de tensão e de corrente, também chamada de ondas incidentes, sofrem um processo de “reflexão”, originando ondas “refletidas” de tensão e de corrente, essas ultimas ondas somam-se as primeiras, definindo valores de tensão e de corrente nos pontos de descontinuidade (FUCHS, 2015).

A figura 7 mostra a reflexão das ondas de tensão e de corrente quando a carga conectada no receptor é maior do que a impedância natural da linha



Fonte: Fuchs, 2015.

Onde  $Z_0$  é a impedância natural da linha

$Z_2$  é a impedância da carga conectada no receptor da linha

$U_d$  é a onda de tensão que propaga do transmissor para o receptor

$U_r$  é a onda de tensão refletida no receptor

$I_d$  é a onda de corrente que propaga do transmissor para o receptor

$I_r$  é a onda de corrente refletida no receptor

Quando a impedância da carga no receptor é maior do que a impedância natural da linha, há um aumento no valor da tensão e uma diminuição no valor da corrente no receptor como se observa na figura 7, as ondas de tensão são refletidas com a mesma polaridade das ondas incidentes, o que implica um aumento na tensão no receptor, já as ondas de corrente refletem-se com polaridade oposta às ondas incidentes, o que indica uma diminuição no valor da corrente (FUCHS, 2015).

As ondas incidentes e refletidas de tensão estão relacionadas com o coeficiente de reflexão (FUCHS, 2015), mostrado na equação 4:

$$K_{ru} = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0} \quad (4)$$

$K_{ru}$  é o coeficiente de reflexão de tensão

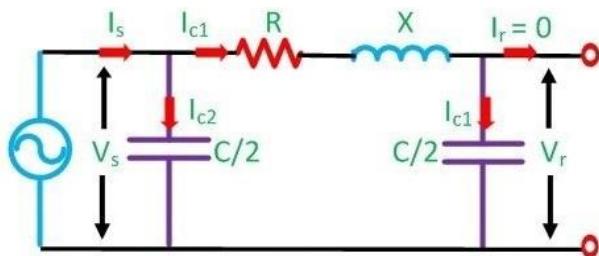
$Z_2$  é a impedância conectada no receptor da linha

$Z_0$  é a impedância natural da linha

## 2.4 Efeito Capacitivo

Na figura 8, o receptor está sem carga e, portanto, a corrente que passa pelo mesmo é nula ( $I_r=0$ ), ao aplicar a lei dos nós no receptor descobrimos que a corrente capacitativa ( $I_{c1}$ ) é a mesma corrente que passa pelo resistor ( $R$ ) e indutor ( $X$ ).

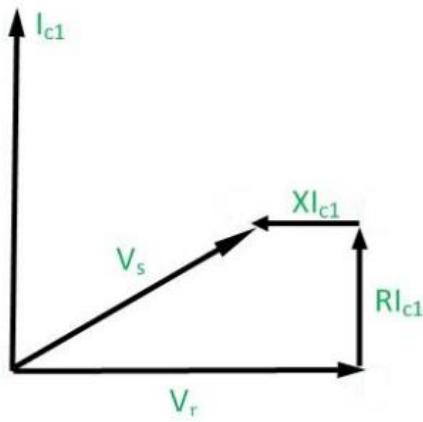
Figura 8: Modelo  $\pi$  de uma linha sem carga



Fonte: Illustrationprize, 2020.

Na figura 9, a tensão no receptor ( $V_r$ ) foi tomada como referência, o vetor  $I_{c1}$  está adiantado  $90^\circ$  em relação ao vetor  $V_r$ , pois em um capacitor a corrente está adiantada  $90^\circ$  em relação a tensão. A queda de tensão no resistor é dada pela lei de Ohm que no caso é  $RI_{c1}$ , o vetor  $RI_{c1}$  é paralelo ao vetor  $I_{c1}$  pois num resistor a corrente e a tensão estão em fase (ILLUSTRATIONPRIZE, 2020).

Figura 9: Diagrama fasorial



Fonte: Illustrationprize, 2020.

Onde  $V_r$  é um vetor que representa a tensão no receptor

$I_{c1}$  é um vetor que representa a corrente que passa pela resistência R e indutância X

$RI_{c1}$  é um vetor que representa tensão na resistência R

$XI_{c1}$  é um vetor que representa a tensão na indutância X

$V_s$  é um vetor que representa a tensão no transmissor

O vetor  $XI_{c1}$  está adiantado  $90^\circ$  em relação ao vetor  $I_{c1}$ , pois em um indutor a tensão está adiantada  $90^\circ$  em relação a corrente e por fim a tensão no transmissor ( $V_s$ ) é a soma vetorial das tensões no resistor, indutor e receptor, nota-se no diagrama fasorial da figura 9 que a tensão no receptor ( $V_r$ ) é maior do que a do transmissor ( $V_s$ ) (ILLUSTRATIONPRIZE, 2020).

## 2.5 Comprimento da Linha e efeito Ferranti

A tensão no transmissor pode ser calculada através da equação 5 (FUCHS, 2015):

$$V_s = AV_r + BI_r \quad (5)$$

$V_s$  é a tensão no transmissor

$V_r$  é a tensão no receptor

$I_r$  é a corrente no receptor

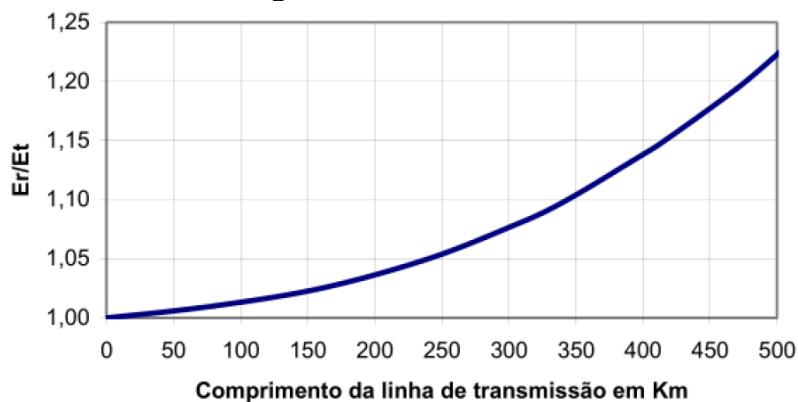
A e B são constantes

Reorganizando os termos da equação 5 e lembrando que quando o receptor está sem carga,  $I_r=0$ , obtemos a equação 6:

$$\frac{V_r}{V_s} = \frac{1}{A} \quad (6)$$

Para linhas longas o inverso da constante A é um número maior do que 1, o que conclui-se que  $V_r > V_s$ , ou seja a tensão no receptor a vazio é maior que a tensão no transmissor, esse crescimento da tensão torna-se mais expressivo a medida que o comprimento da linha aumenta, conforme mostra o gráfico da figura 10 (MAXWELL, 2019).

Figura 10: Efeito Ferranti



Fonte: Maxwell, 2019.

## 2.6 Problemas causados pelo efeito Ferranti

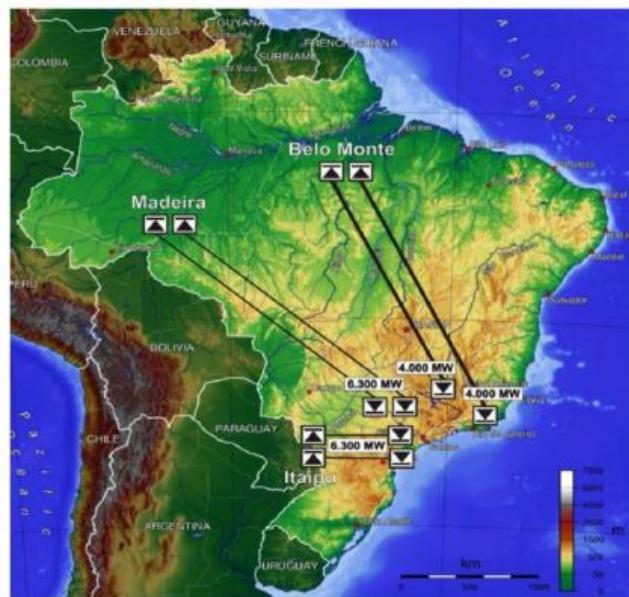
Conforme Rubens Dario Fuchs (2015), os principais problemas causados pelo efeito Ferranti são:

- Com o aumento da tensão pelo efeito Ferranti há a necessidade de aumentar o nível de isolamento das linhas e dos equipamentos próximos ao receptor.
- O efeito corona aumenta devido à elevação da tensão.
- A corrente capacitativa, sendo esta muito elevada, limita por capacidade térmica, a capacidade de transporte de corrente na linha, sendo necessário aumentar a área da seção transversal dos condutores o que ocasiona aumento nos custos de projeto e de operação.

Esses problemas podem ser solucionados instalando um banco de reatores em derivação (reatores shunt) ou de uma máquina síncrona. A linha quando opera a vazio ou com cargas leves se comporta como um capacitor, fornecendo energia reativa adicional, esse excedente de reativo pode ser neutralizado pelos reatores ou máquinas síncronas que absorvem esse reativo adicional (FUCHS, 2015, p. 212).

A figura 11 mostra alguns exemplos de linhas longas que existem no Brasil, no mapa encontram-se quatro exemplos de linhas de transmissão que interligam usinas hidroelétricas da região norte com subestações das regiões sudeste/Centro-Oeste, segundo dados da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) essas linhas ultrapassam 2000 km de extensão.

Figura 11: Configuração esquemática dos bipolos alimentando a região Sudeste



Fonte:EPE, 2014.

## 2.7 Reatores

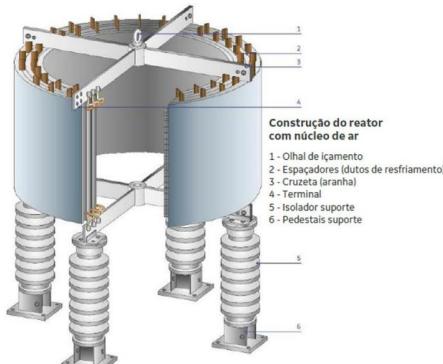
Os reatores são equipamentos fabricados semelhantemente aos transformadores, consistindo de um conjunto de bobinas enroladas em torno de um material ferromagnético, denominado núcleo. São construídos com o objetivo de introduzir uma indutância em um circuito (LOPES, SILVA e CHAVES, 2014).

A indutância do reator depende das características físicas construtivas como o número de espiras, distância entre elas, a forma como foram enroladas, formato do reator (área e comprimento), permeabilidade do material usado no núcleo. Suportam diferentes níveis de tensão do tipo de transmissão, distribuição ou industrial e podem ser dimensionados para suportar os mais variados níveis de corrente (LOPES, SILVA e CHAVES, 2014).

São classificadas pelo seu núcleo e pelo seu método de resfriamento, que podem ser reatores a seco com núcleo de ar e reatores imersos em óleo, as principais características desses reatores são:

- Reator a seco com núcleo de ar: No passado, os reatores somente poderiam ser do tipo enrolamento aberto. Os reatores mais modernos possuem os seus enrolamentos encapsulados e as espiras são isoladas com esmalte dielétrico, fibras ou filme (Figura 12). As principais vantagens são: sua robustez, baixo custo de fabricação e instalação, ausência de manutenção e fácil inspeção visual. A desvantagem é que há indução devido aos campos magnéticos intensos nas proximidades do reator (NOGUEIRA, 1999).

Figura 12: Reator a seco com núcleo de ar e enrolamento encapsulado



Fonte: GEGridSolutions, 2017.

- Reator imerso a óleo: Seu resfriamento é feito em óleo mineral e suas espiras são enroladas em torno de um núcleo de ferro, conforme figura 13. As principais vantagens são: campo magnético extremamente baixo nas vizinhanças do equipamento, isso se deve a sua proteção eletromagnética e ausência de poluição magnética. As desvantagens são: necessidade de inspeção e manutenção, alto custo de fabricação e instalação (NOGUEIRA, 1999).

Figura 13: Reator com núcleo de ferro imerso a óleo



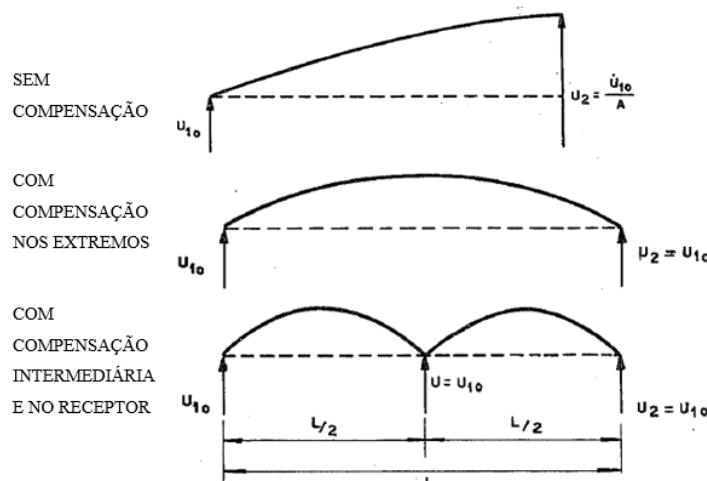
Fonte: Siemens AG, 2005.

Os reatores shunt pode ser conectados diretamente à linha de transmissão no final ou em um ponto intermediário da linha, podem ser conectados através do terciário de um

transformador ligado à linha de transmissão ou podem ser conectados ao barramento de uma subestação, a figura 14 mostra o comportamento da tensão em linhas de transmissão com ou sem compensação de reativo em diferentes pontos da linha (JÚNIOR, 2012).

Conforme pode ser observado na figura 14 quando os reatores são utilizados nas extremidades da linha, não há eliminação da elevação da tensão no meio dela, para diminuir as elevações em pontos intermediários é necessário adicionar reatores em pontos intermediários da linha (FUCHS, 2015).

Figura 14: Compensação de uma LT em vazio por reatores em derivação.



Fonte: Fuchs, 2015.

## 2.8 Motores Síncronos

Segundo Chapman (2013), um motor síncrono é composto por uma parte fixa denominada estator, o estator é alimentado em corrente alternada por um sistema de tensões trifásicas equilibradas. O rotor é a parte girante da máquina síncrona, onde comporta o enrolamento de campo ou de excitação, energizado em corrente contínua através de um sistema de anéis coletores e escovas de carvão.

A velocidade de rotação do motor é dada pela equação 7:

$$N_s = \frac{120 * f}{p} \quad (7)$$

$N_s$  é a velocidade de rotação em rpm

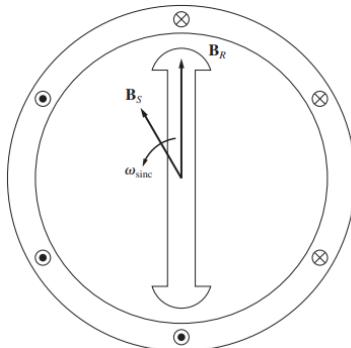
$f$  é frequência da tensão de entrada aplicada na armadura em Hz

$p$ -número de polos do motor

O princípio de funcionamento está esquematizado na figura 15, as tensões trifásicas aplicadas nos enrolamentos do estator produz um campo magnético girante  $B_s$ . A corrente contínua  $I_f$  aplicado no enrolamento de campo produz um campo magnético  $B_r$  no rotor, o campo produzido pelo rotor ( $B_r$ ) tende a alinhar-se com o campo produzido pelo estator  $B_s$  (CHAPMAN, 2013).

Como o campo magnético do estator está girando, o campo do rotor e o próprio rotor tenderão constantemente a se alinhar, o princípio básico de operação do motor síncrono é que o rotor persegue em círculo o campo magnético girante do estator sem nunca conseguir alinhar com ele (CHAPMAN, 2013).

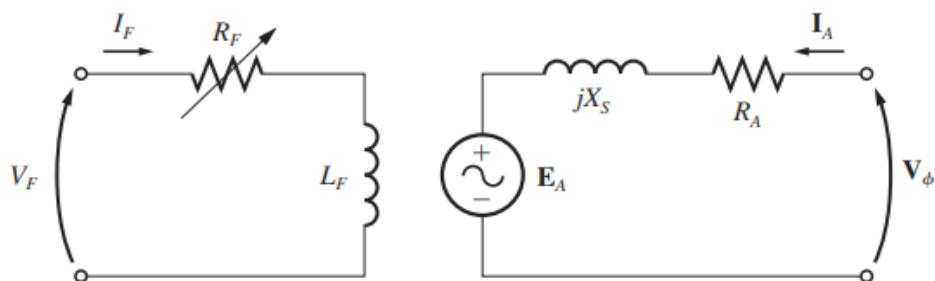
Figura 15: Motor síncrono de dois polos



Fonte: Chapman, 2013.

O circuito equivalente por fase de um motor síncrono está representado na figura 16:

Figura 16: Circuito equivalente por fase de um motor síncrono trifásico

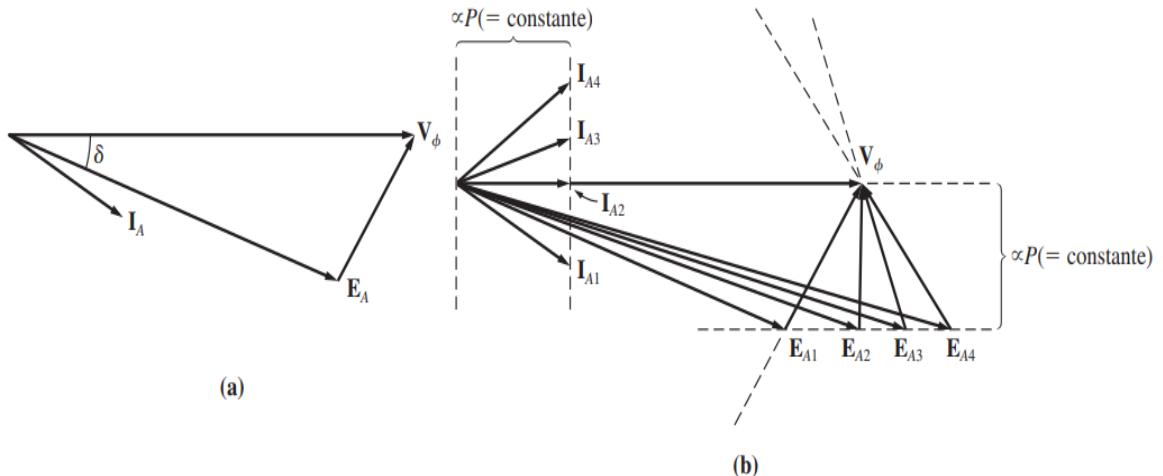


Fonte: Chapman, 2013.

Observa-se o comportamento do motor variando a corrente de campo ( $I_f$ ), para isto considere um motor síncrono operando inicialmente com fator de potência atrasado (conforme pode ser visto na parte a da figura 17), aumentando a corrente de campo  $I_f$ , aumenta-se o módulo da tensão  $E_A$ , pois a tensão interna gerada ( $E_A$ ) é proporcional ao fluxo gerado pela corrente de campo ( $I_f$ ). A tensão terminal  $V_t$  não muda pois ela é mantida pela fonte de tensão

que alimenta os terminais do estator, a potência ativa permanece constante, pois a corrente de campo não altera a velocidade de rotação do eixo e nem o conjugado da máquina (CHAPMAN, 2013).

Figura 17: Efeito da variação da corrente de campo em um motor síncrono



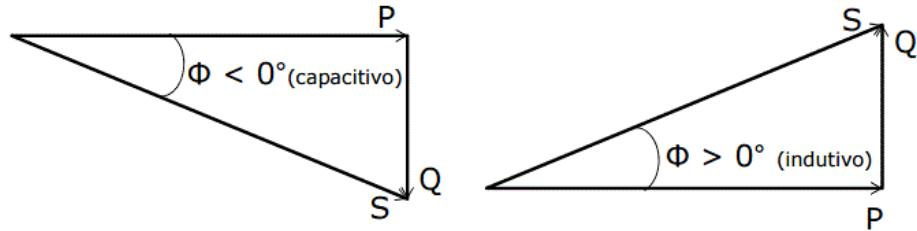
Fonte: Chapman, 2013.

Observando a figura 17, nota-se que quando o módulo da tensão  $E_A$  aumenta, a corrente de armadura inicialmente diminui e depois cresce novamente. Com valores baixos de  $E_A$  a corrente de armadura está atrasada e o motor se comporta como uma carga indutiva, consumindo potência reativa  $Q$ , aumentando a corrente de campo, a corrente de armadura acaba alinhando-se com a tensão terminal e o motor se comporta como uma resistência pura, quando a corrente de campo é aumentada novamente a corrente de armadura torna-se adiantada e o motor se comporta como uma carga capacitativa, fornecendo potência reativa  $Q$ , sub-excitando o motor pode usá-lo como compensador de reativo em uma linha de transmissão a vazio (CHAPMAN, 2013).

## 2.9 Correção do fator de potência

Segundo a fabricante WEG, o fator de potência é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente, esse valor representa o cosseno do ângulo entre a tensão e a corrente de um circuito (ângulo  $\varphi$ ). A figura 18 mostra o triângulo de potências e a equação 8 mostra como calcular o fator de potência.

Figura 18: Triângulo de potências



Fonte: IFTO Santa Catarina, 2017.

$$fp = \cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Onde fp é o fator de potência

$\varphi$  é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente de um circuito

P é a potência ativa medida em kW

S é a potência aparente medida em kVA

Segundo Moura, Moura e Rocha (2018), em um circuito de fator de potência indutivo a corrente está atrasada em relação a tensão e em um circuito de fator de potência capacitivo a corrente está adiantada em relação a tensão, quando o fator de potência é igual a 1 a tensão e a corrente estão em fases, a figura 19 mostra os tipos de fatores de potência e os possíveis valores.

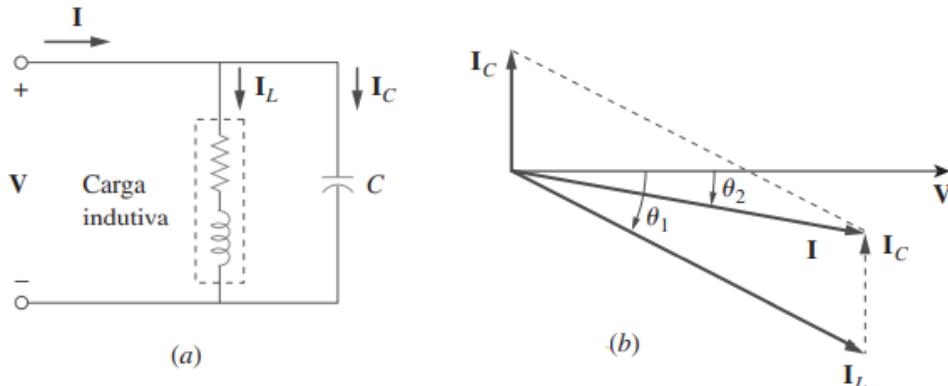
Figura 19: Tipos de fatores de potência



Fonte: Moura, Moura e Rocha, 2018.

Conforme Sadiku, normalmente as cargas domésticas e industriais são indutivas, essas cargas operam com baixo fator de potência, embora não se pode alterar a natureza da carga, pode-se aumentar o fator de potência, para corrigir o fator de potência de cargas indutivas instala-se um banco de capacitores em paralelo com a carga. Ao corrigir o fator de potência o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente diminui conforme mostra a figura 20.

Figura 20: Correção do fator de potência para uma carga indutiva



Fonte: Sadiku, 2013.

Onde V é a tensão da fonte

I é a corrente que passa pela linha

$I_L$  é a corrente que passa pela carga indutiva

$I_C$  é a corrente do banco de capacitores

$\theta_1$  é o ângulo de defasagem da corrente e da tensão antes da correção do fator de potência

$\theta_2$  é o ângulo de defasagem da corrente e da tensão depois da correção do fator de potência

Antes da correção do fator de potência do circuito da figura 20, a corrente que passava pela linha era  $I_L$ , depois da correção do fator de potência a nova corrente que passa pela linha é I, pelo diagrama de fasores, percebe-se que a corrente I é menor que a corrente  $I_L$ .

Uma consequência da diminuição da corrente de linha é que as perdas de potência ativa também diminuem com o quadrado da corrente, já que  $P=R*(I_L)^2$ , segundo Sadiku, para as concessionárias é interessante reduzir as perdas, minimizando a corrente de linha ou mantendo o fator de potência próximo da unidade.

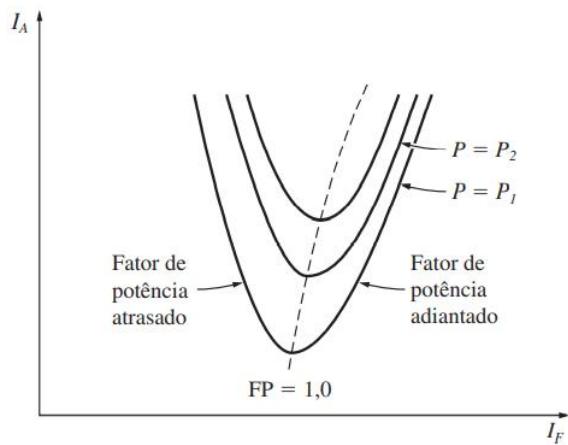
Conforme Fuchs, no receptor de uma linha de transmissão há basicamente dois tipos de problemas, a linha pode necessitar de geração de reativo para o sistema alimentado e em outros casos a absorção de excesso de energia reativa da linha, ou seja, há a necessidade de se fazer a compensação de reativo nos terminais de uma linha.

Os equipamentos que podem fazer a compensação de reativo são de dois tipos: os rotativos e os estáticos, os primeiros são basicamente motores síncronos e os segundos são banco de capacitores e de reatores indutivos, que podem ser separados ou associados.

Quando um motor síncrono está subexcitado, a máquina não tem energia magnética suficiente para o seu funcionamento, nesse caso a mesma absorve da rede a energia reativa necessária se comportando como um reator indutivo.

A figura 21 mostra a curva V de um motor síncrono, para valores baixos de  $I_F$  o motor opera com fator de potência atrasado ou indutivo e para valores altos de  $I_F$  o motor opera com fator de potência adiantado ou capacitivo.

Figura 21: Curva V de um motor síncrono



Fonte: Chapman, 2013.

### 3 RESULTADOS

A linha de transmissão simulada no ATPDraw foi inspirada na LT Neves 1 – Vespasiano 2 de propriedade da CEMIG, localizada no município de Vespasiano, Minas Gerais, é uma linha de 500km de comprimento com 500kV de tensão, a disposição das fases é horizontal, cada fase possui 3 condutores, separados de 0,457 m (Ruddy 900 MCM), os cabos para-raios são do tipo EHS 3/8”, os demais dados utilizados na simulação encontram-se no quadro 1.

Quadro 1: Valores dos parâmetros elétricos e da configuração da LT

| LINHA DE TRANSMISSÃO 500kV               |                       |                         |           |
|--|-----------------------|-------------------------|-----------|
| Componentes                              |                       |                         |           |
| Frequência                               | 60Hz                  |                         |           |
| Resistividade do solo                    | 2400 $\Omega \cdot m$ |                         |           |
| Resistência do condutor<br>CA 60Hz 75 °C | 0,077 $\Omega/Km$     |                         |           |
| Reatância indutiva do condutor           | 0,3374 $\Omega/Km$    |                         |           |
| Resistência CA do cabo guarda            | 3,81 $\Omega/Km$      |                         |           |
| Raio do condutor                         | 1,437 cm              |                         |           |
| Raio do cabo guarda                      | 0,476 cm              |                         |           |
| Altura da fase A                         | 26,26 m               | Deslocamento horizontal | -12 m     |
| Altura da fase B                         | 26,26 m               | Deslocamento horizontal | 0 m       |
| Altura da fase C                         | 26,26 m               | Deslocamento horizontal | 12 m      |
| Altura dos cabos guardas                 | 35 m                  | Deslocamento horizontal | $\pm 9$ m |

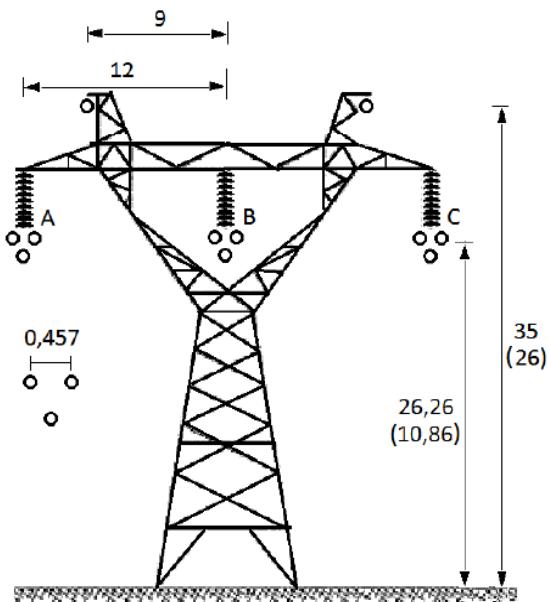
Fonte: Própria.

A figura 22 mostra a configuração dos condutores da linha de transmissão (disposição horizontal), bem como as dimensões da estrutura e as distâncias entre os consutores utilizadas na simulação desse trabalho

No software ATPDraw para a simulação da linha de transmissão deve-se criar um novo projeto, na nova área que aparece, clica-se com o botão direito do mouse e seleciona-se a opção “*Lines/Cables*”, logo após seleciona a opção “*LCC template*” conforme mostra a figura 23.

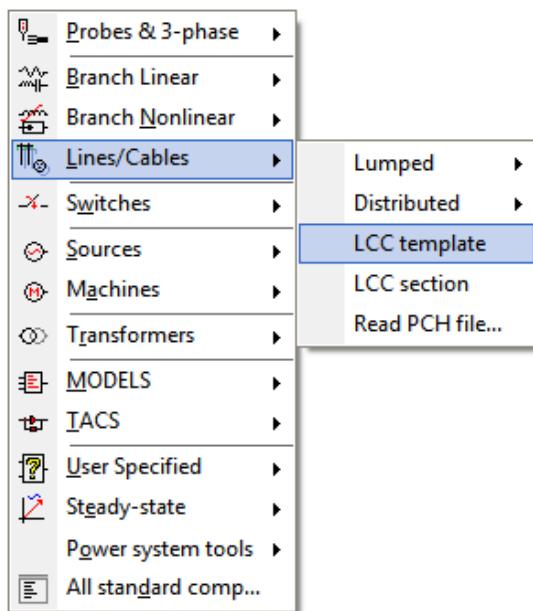
Na nova janela que se abre foi escolhido o modelo Bergeron. Esse modelo foi desenvolvido por Luis Bergeron, onde considera que os parâmetros elétricos estão distribuídos ao longo da linha, esse modelo é mais preciso do que modelos que utiliza parâmetros concentrados, por esse motivo optou se por esse modelo.

Figura 22: Sistemas em estudo: Torre típica da LT Neves 1 – Vespasiano 2;



Fonte: SNPTEE, 2005.

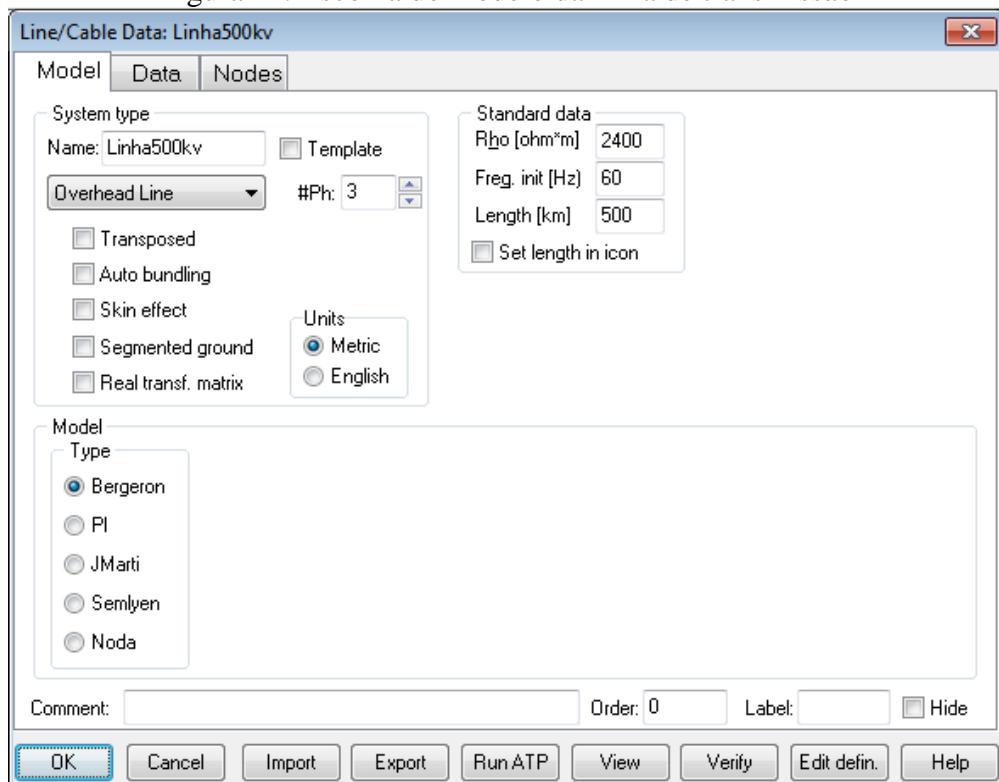
Figura 23: LCC template



Fonte: Própria.

As figuras 24 e 25 mostram as configurações dos parâmetros elétricos da linha no ATPDraw.

Figura 24: Escolha do modelo da linha de transmissão



Fonte: Própria.

Figura 25: Parâmetros elétricos da linha

**Line/Cable Data**

**Data**

| # | Ph.no. | React       | Rout  | Resis       | Horiz | Vtower | Vmid  |
|---|--------|-------------|-------|-------------|-------|--------|-------|
|   |        | [ohm/km AC] | [cm]  | [ohm/km AC] | [m]   | [m]    |       |
| 1 | 1      | 0.3374      | 1.437 | 0.077       | -12   | 26.26  | 26.26 |
| 2 | 2      | 0.3374      | 1.437 | 0.077       | 0     | 26.26  | 26.26 |
| 3 | 3      | 0.3374      | 1.437 | 0.077       | 12    | 26.26  | 26.26 |
| 4 | 0      | 0           | 0.476 | 3.81        | -9    | 35     | 35    |
| 5 | 0      | 0           | 0.476 | 3.81        | 9     | 35     | 35    |

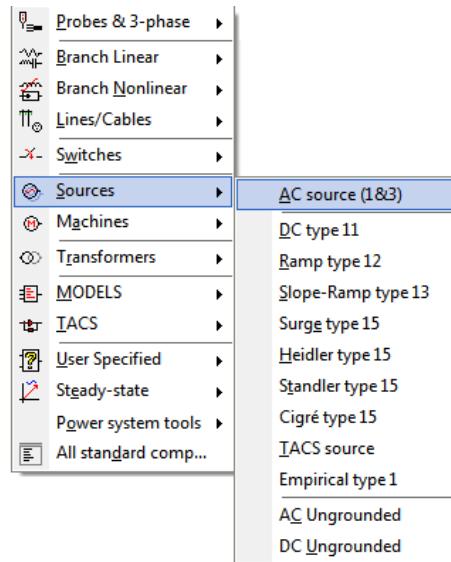
Add row   Delete last row   Insert row copy    Move

OK   Cancel   Import   Export   Run ATP   View   Verify   Edit defin.   Help

Fonte: Própria.

Para implementar a fonte de tensão no programa deve-se clicar com o botão direito do mouse e escolher a opção “sources” e em seguida escolhe a opção “AC source (1&3)”, conforme mostra a figura 26:

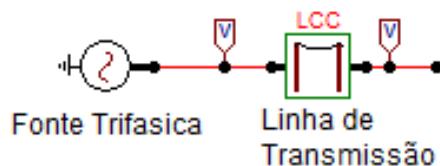
Figura 26: Fonte de tensão trifásica



Fonte: Própria.

Para simular o efeito Ferranti no ATPDraw foi construído um circuito com uma fonte de tensão trifásica e uma linha de transmissão conforme mostra a figura 27.

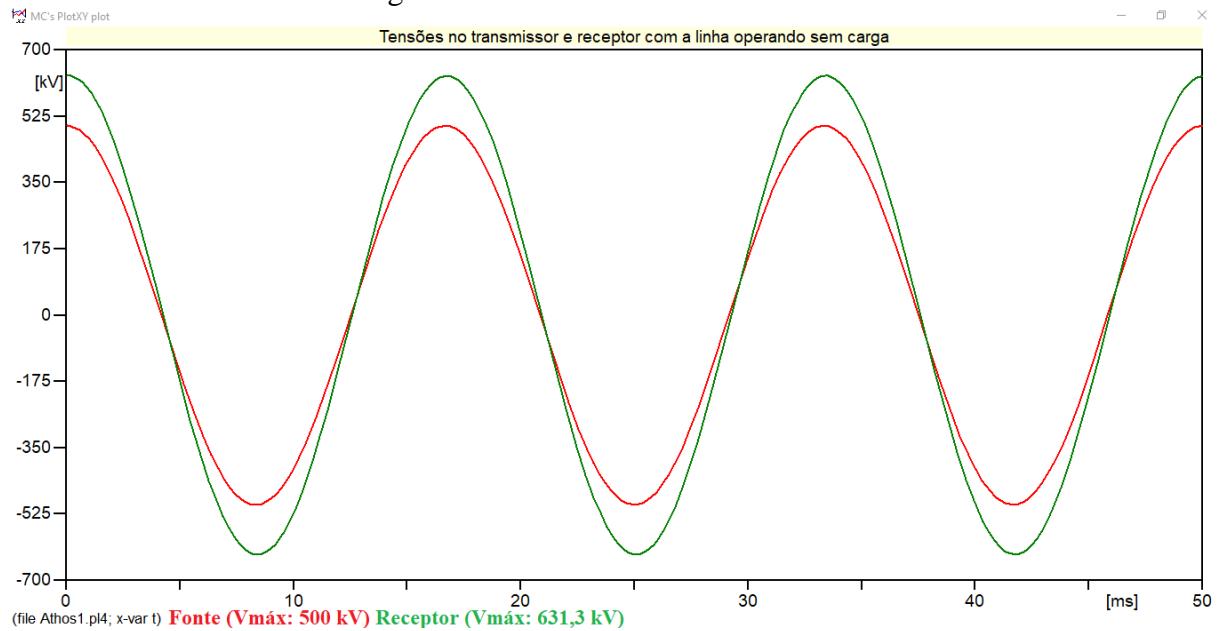
Figura 27: Circuito simulado sem carga



Fonte: Própria.

Na figura 28, observa-se que houve um aumento da amplitude da tensão no receptor em comparação com a tensão no transmissor.

Figura 28: Efeito Ferranti no ATPDraw



Fonte: Própria.

Em seguida utilizando o mesmo circuito da figura 27, foi modificado o comprimento da linha de transmissão, com variações de 25 em 25 km, para cada comprimento foi calculado o percentual de aumento da tensão, os dados coletados encontram-se no quadro 2.

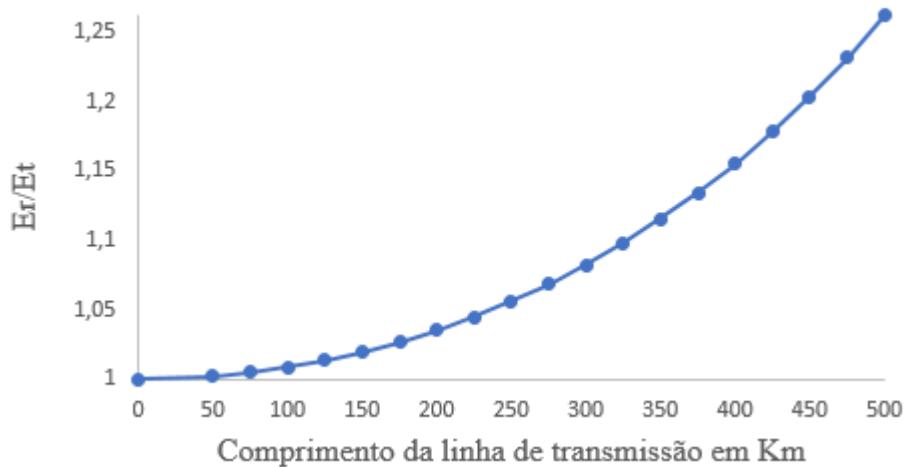
Quadro 2: Aumento da tensão ao longo da LT

| Comprimento (Km) | Tensão no receptor (kV) | Er/Et (%) |
|------------------|-------------------------|-----------|
| 50               | 501,1                   | 100,22    |
| 75               | 502,4                   | 100,48    |
| 100              | 504,3                   | 100,86    |
| 125              | 506,8                   | 101,36    |
| 150              | 509,8                   | 101,96    |
| 175              | 513,4                   | 102,68    |
| 200              | 517,7                   | 103,54    |
| 225              | 522,5                   | 104,50    |
| 250              | 528,1                   | 105,62    |
| 275              | 534,3                   | 106,86    |
| 300              | 541,3                   | 108,26    |
| 325              | 549,1                   | 109,82    |
| 350              | 557,7                   | 111,54    |
| 375              | 567,2                   | 113,44    |
| 400              | 577,7                   | 115,54    |
| 425              | 589,2                   | 117,84    |
| 450              | 601,9                   | 120,38    |
| 475              | 615,9                   | 123,18    |
| 500              | 631,3                   | 126,26    |

Fonte: Própria.

A partir do quadro 2 foi construído um gráfico apresentado na figura 29, que mostra a influencia do comprimento da linha no efeito Ferranti.

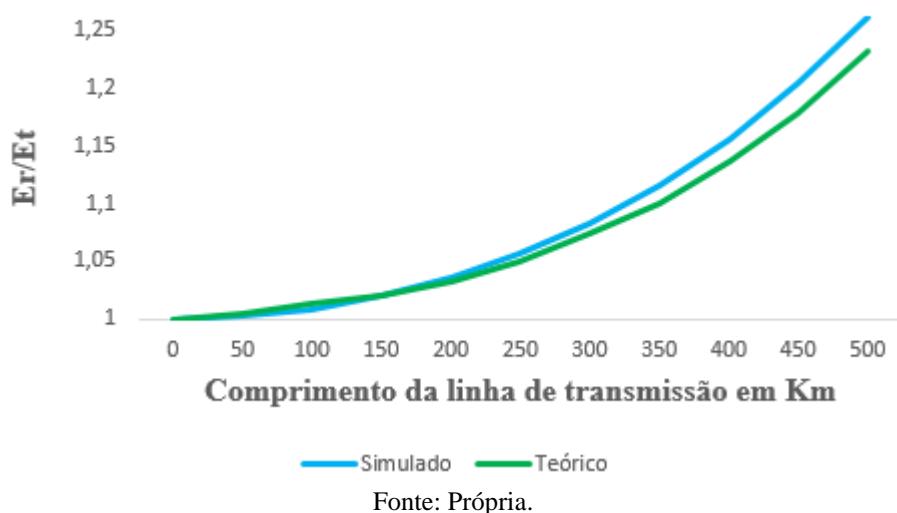
**Figura 29: Aumento da tensão ao longo da linha de transmissão  
Simulação do Efeito Ferranti no ATPDraw**



Fonte: Própria.

O gráfico da figura 29, obtido a partir dos dados das simulações foi comparado com a figura 10 que mostra o gráfico teórico encontrado na literatura. Na figura 30 observa se que os dois gráficos apresentam comportamentos semelhantes. O aumento mais expressivo ocorreu na linha de 500 Km de comprimento, o valor teórico do aumento da tensão é de 23% e nos dados obtidos das simulações é 26,26%.

**Figura 30: Comparação dos dados teóricos e simulados  
Efeito Ferranti Teórico vs Simulado**



Fonte: Própria.

Para corrigir esse aumento de tensão, foi instalado um reator ao final da linha conforme mostra a figura 31, como o reator é um equipamento indutivo, no ATPDraw

escolhe-se uma carga RLC trifásica, os valores das resistências e capacitâncias das fases são zerados na simulação, o reator foi considerado um elemento puramente indutivo nesse trabalho.

Figura 31: Circuito com reator



Conforme a fabricante SIEMENS as potências dos reatores variam de 10 MVar a 300 MVar. O valor da indutância do reator pode ser calculado a partir da equação 9:

$$L = \frac{V_f^2}{2\pi f Q} \quad (9)$$

Onde L é o valor da indutância em H

$V_f$  é a tensão em V

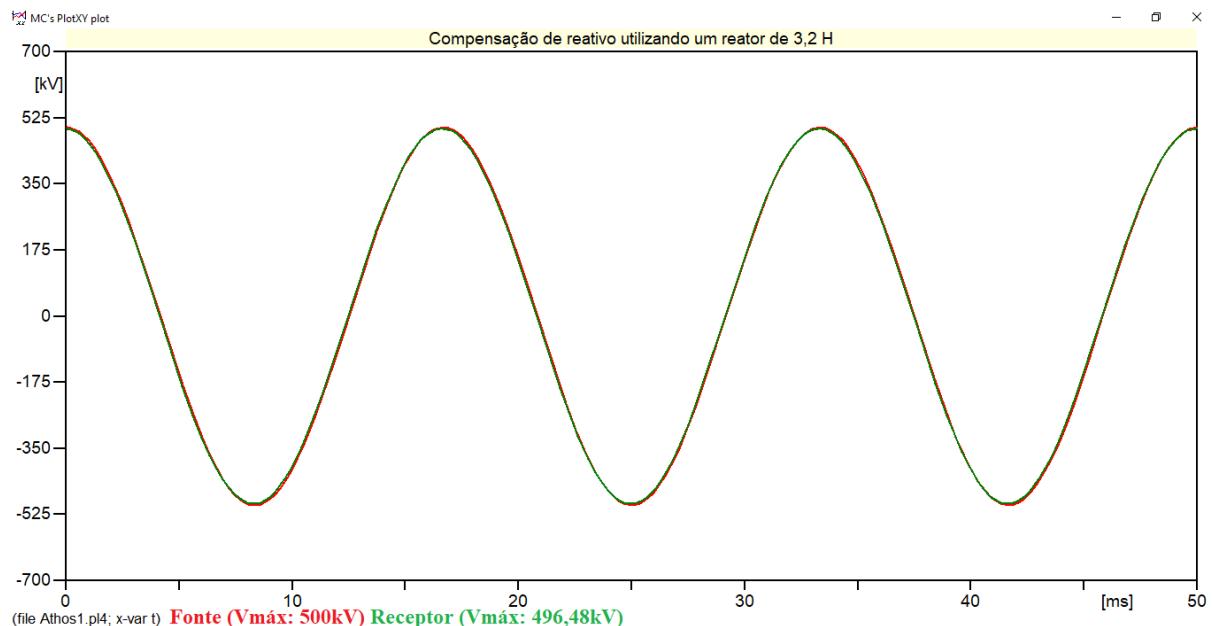
$f$  é a frequência em Hz

$Q$  é o valor da potência reativa em Var

Operando a uma frequência de 60 Hz e tensão de 500 kV, a indutância do reator de 300 MVar é 2,21H e a do reator de 10 MVar é de 66,31 H, valores estes calculados usando a equação 9.

Foram simulados vários valores diferentes de indutâncias dentro deste intervalo e o reator que melhor corrigia o efeito Ferranti era o reator de 3,2 H de indutância, o resultado da simulação encontra-se na figura 32.

Figura 32: Reator com 3,2 H de indutância



Fonte: Própria.

Em seguida foi simulado como que a tensão se comportaria com uma carga puramente resistiva, foi consultado os valores comerciais de resistência, esses valores encontram-se no quadro 3, a partir desses dados de resistências, foram simuladas várias cargas resistivas no software ATPDraw, a figura 33 mostra o comportamento da tensão para uma carga de  $560 \Omega$ .

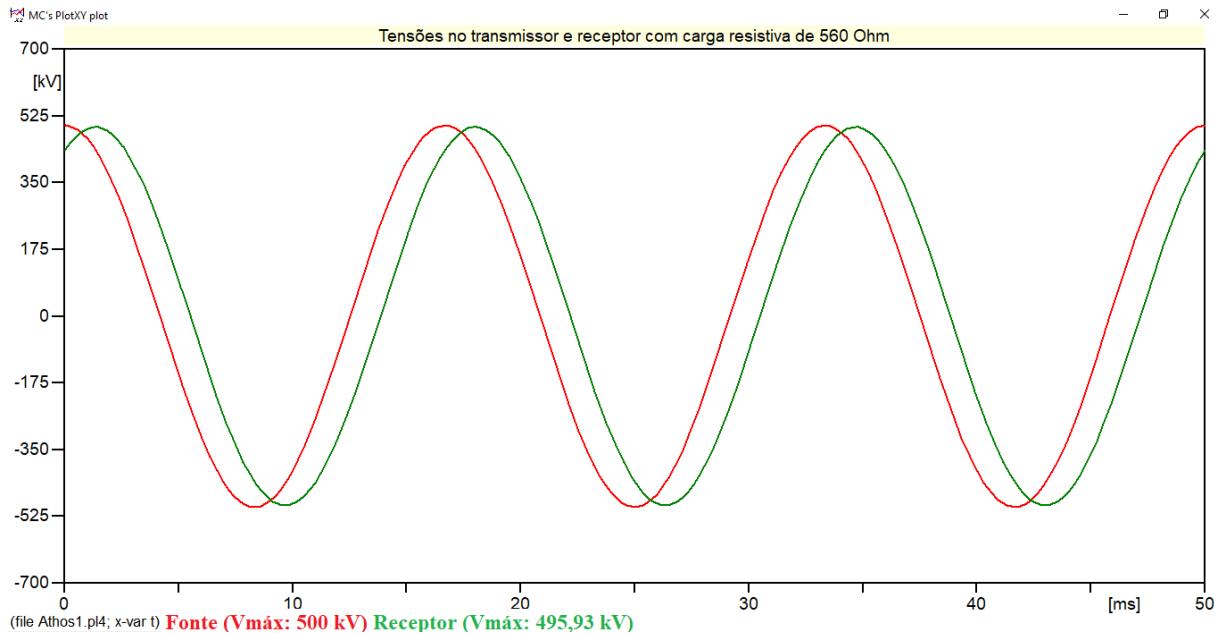
Quadro 3: Valores comerciais de resistências

| $1 \Omega$   | $1,1 \Omega$ | $1,2 \Omega$ | $1,3 \Omega$ |
|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $1,5 \Omega$ | $1,6 \Omega$ | $1,8 \Omega$ | $2,0 \Omega$ |
| $2,2 \Omega$ | $2,4 \Omega$ | $2,7 \Omega$ | $3,0 \Omega$ |
| $3,3 \Omega$ | $3,6 \Omega$ | $3,9 \Omega$ | $4,3 \Omega$ |
| $4,7 \Omega$ | $5,1 \Omega$ | $5,6 \Omega$ | $6,2 \Omega$ |
| $6,8 \Omega$ | $7,5 \Omega$ | $8,2 \Omega$ | $9,1 \Omega$ |

Fonte: Djones Boni, 2018.

Os demais valores de resistência devem ser multiplicados por  $10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5$  ou  $10^6$ .

Figura 33: Carga puramente resistiva de 560 Ohm



Fonte: Própria.

Observando a figura 33 nota-se que o efeito Ferranti não aparece pois segundo Sadiku em uma carga resistiva há uma queda de tensão proporcional a corrente  $i$  que atravessa pelo resistor, o que pode ser calculado através da lei de ohm dada pela equação 10:

$$V = R * i \quad (10)$$

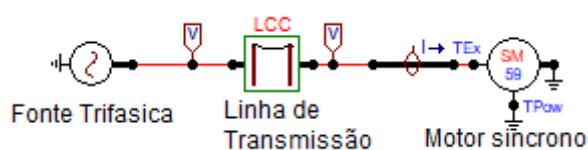
Onde  $V$  é queda de tensão sobre o resistor

$R$  é o valor da resistência do resistor

$i$  é a corrente que passa pelo resistor

Em seguida foi feito a compensação de reativo utilizando um motor síncrono conforme mostra a figura 34, para adicionar o motor síncrono no ATPDraw basta clicar com o botão direito do mouse e escolher a opção “Machines” e em seguida a opção “SM 59/58”.

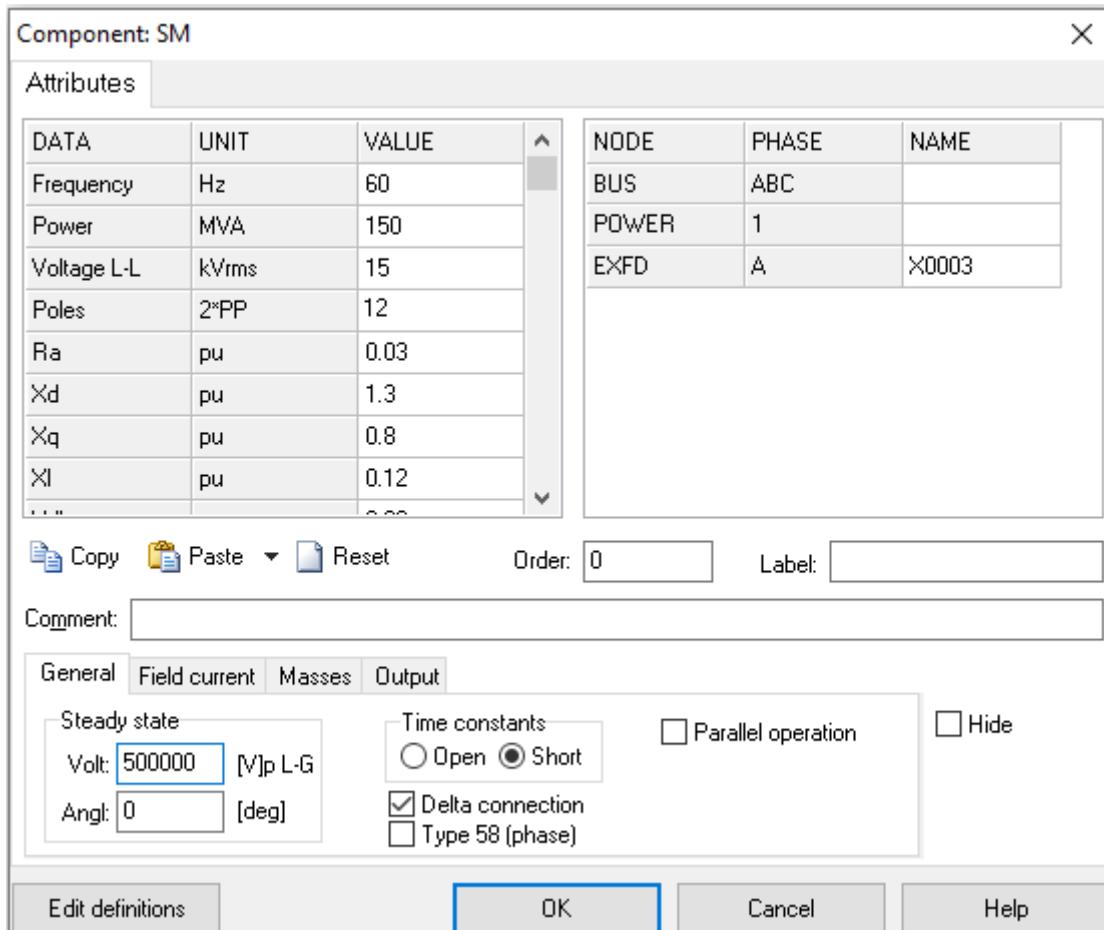
Figura 34: Circuito com motor síncrono



Fonte: Própria.

A fabricante WEG, produz compensadores síncronos de 15 kV com potências de até 150 MVar operando a 60Hz, esses dados foram utilizados na simulação do motor, os demais dados como o de resistência e reatância de armadura só podem ser obtidos através de ensaios à vazio e de curto circuito, para esses dados foram utilizados os pré-configurados pelo programa conforme mostra a figura 35.

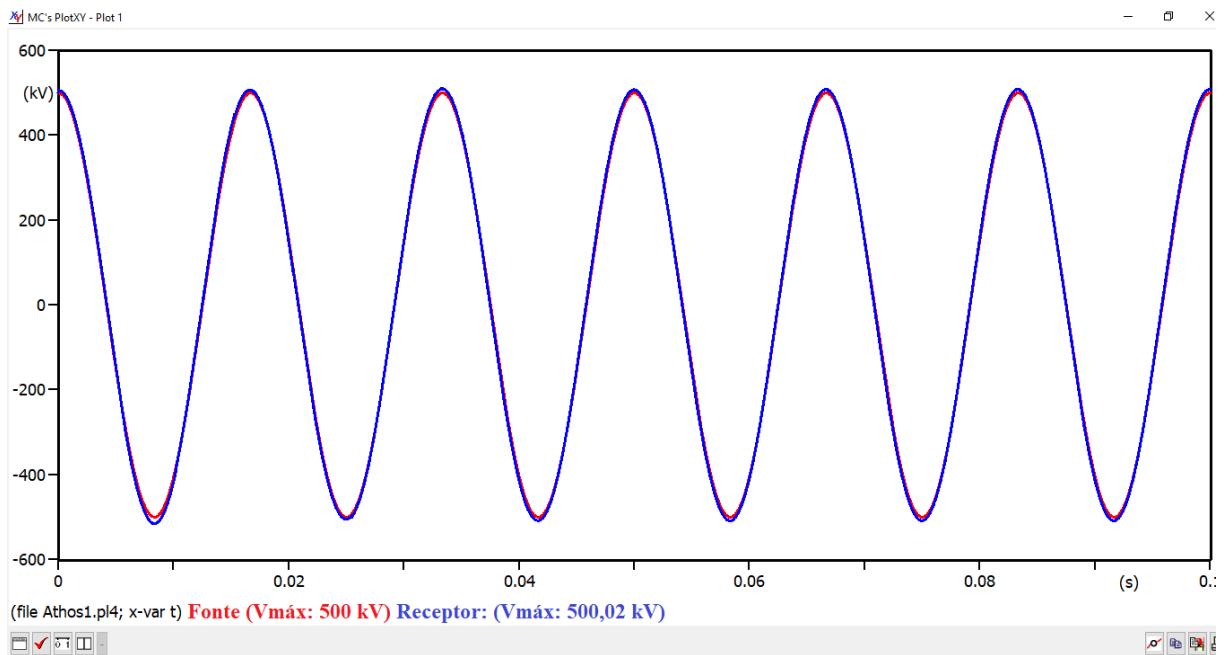
Figura 35: Dados do motor síncrono



Fonte: Própria.

O resultado da compensação utilizando o motor encontra-se na figura 36.

Figura 36: Compensação de reativo com Motor síncrono



Fonte: Própria.

Observa-se das simulações que quando se utiliza um reator ou um motor síncrono, as tensões do transmissor e receptor estão em fase, mas quando se utiliza uma carga resistiva, há uma defasagem entre as tensões, isso acontece por que não é utilizada uma carga resistiva para correção de fator de potência ou compensação de reativo.

Segundo a teoria do capítulo 2 ao corrigir o fator de potência também diminui o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente e não há defasagem se o fator de potência for unitário. Como cargas resistivas só consomem potência ativa e não reativa é por isso que não são utilizadas em compensação de reativo.

## **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Nas simulações obtidas no ATPDraw, observa-se um aumento de 26% da tensão ao final da linha à vazia, se fosse em uma linha de transmissão real, essa sobretensão elevada poderia causar diversos problemas nos equipamentos conectados à rede como transformadores, relés, etc., esses equipamentos poderiam ser danificados caso não suportassem essa sobretensão.

Um dos resultados obtido mostra que quando o comprimento da linha aumenta o efeito Ferranti se torna mais expressivo e em linhas de comprimento longo esse problema não pode ser desprezado. Foram apresentadas duas soluções para esse problema, a primeira utilizando um reator e a segunda utilizando um motor síncrono, ambas soluções foram simuladas.

Utilizando um reator ou um motor síncrono, os resultados obtidos nas simulações foram semelhantes pois ambos são basicamente cargas indutivas. Foi observado também que o efeito Ferranti não aparece quando o receptor está com uma carga resistiva, pois haverá uma queda de tensão sobre o mesmo.

### **4.1 Trabalhos Futuros**

Outra solução para o efeito Ferranti é a utilização de SVC (Static Var Compensator) que é composto de chaves tiristorizadas e é uma solução eficiente no fornecimento de potência reativa dinâmica, com tempo de resposta rápido e baixo custo de manutenção, uma possível continuação seria a comparação entre a compensação de reativos utilizando reatores, motores e SVC.

## REFERÊNCIAS

BOVOLATO, Luiz Fernando; BOVOLATO, Mariângela de Carvalho. **Geração, Transmissão e Distribuição de energia elétrica.** MÊS ANO, Notas de aula. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP – Campus de Ilha Solteira.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas.** Tradução: Anatólio Laschuck. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. Tradução de: Electric Machinery Fundamentals, 5th Edition.

CHARLES K. Alexander; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos.** Tradução: José Lucimar do Nascimento. 5 ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Eletronica.org. **Valores comerciais de Resistores, Capacitores, Indutores e Fusíveis.** Disponível em: <<http://www3.eletronica.org/dicas-e-hacks/valores-comerciais-de-resistores-capacitores-indutores-e-fusiveis>> Acesso em: 03 maio 2021

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020.** Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/EPEFactSheetAnuario.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2020.

FUCHS, Rubens Dario. **Transmissão de Energia Elétrica:** linhas aéreas. volume 2, 3 ed. rev. e ampl. Uberlândia: EDUFU, 2015. 550 p.

GRID SOLUTIONS. **Reatores com Núcleo de Ar.** Disponível em: <[https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/grid-pea-l3-acr-0585-2017\\_04-pt.pdf](https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/grid-pea-l3-acr-0585-2017_04-pt.pdf)> Acesso em: 3 nov. 2020.

HAFFNER, Sergio. **Modelagem e Análise de Sistemas Elétricos em Regime Permanente.** Disponível em: <<https://sites.google.com/site/sistemasdeenergia1/notas-de-aula>>. Acesso em: 20 nov. 2020.

IFTO Santa Catarina. **Aula 12 Circuitos 2 Enegenharia.** 1 figura. Disponível em: <[https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA\\_12\\_-\\_Circuitos\\_2\\_-\\_Engenharia](https://wiki.ifsc.edu.br/mediawiki/index.php/AULA_12_-_Circuitos_2_-_Engenharia)>. Acesso em 03 maio 2021

Illustrationprize. **Efeito Ferranti.** 2 Figuras. Disponível em: <<https://illustrationprize.com/pt/498-Ferranti-effect.html>>. Acesso em: 13 out. 2020.

JÚNIOR, José Vicente de Oliveira. **Reatores para controle do fluxo de potência e suas consequências para a qualidade de energia.** 2012. 55f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em:<[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9BVFGP/1/monografia\\_jose\\_vicente\\_versao\\_final.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9BVFGP/1/monografia_jose_vicente_versao_final.pdf)>. Acessos em: 20 nov. 2020.

LEÃO, Ruth. **GTD - Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica.** Departamento de Engenharia Elétrica – UFC, Ceará, 2009. Disponível em <<https://docplayer.com.br/5904246-Gtd-geracao-transmissao-e-distribuicao-de-energia-eletrica.html>>. Acesso em: 26 out. 2020.

**LOPES, I. L.; SILVA, T. B.; CHAVES, F. S. O Uso de Compensadores Estáticos na Qualidade da Energia Elétrica.** Belo Horizonte, MG. Disponível em: <[https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/tcc\\_definitivo\\_mod\\_para\\_artigo\\_0.pdf](https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/tcc_definitivo_mod_para_artigo_0.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2020.

**MAXWELL. Controle de Tensão em Sistemas Elétricos de Potência.** PUC-Rio. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11488/11488\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11488/11488_3.PDF)>. Acesso em: 25 nov. 2020.

**MOURA, Ailson P. de; MOURA, Adriano Aron F de; ROCHA, Ednardo P da. Análise de Circuitos em Corrente Alternada para Sistemas de Potência.** Editora Artliber, 1<sup>a</sup> Edição. 2018.

**NOGUEIRA, Murilo Magalhães, Análise Técnico-econômica do Uso de Reatores para Limitação do Nível de Curto-Circuito Trifásico no Sistema Distribuidor 13,8kv da Light.** p.2, 1999.

**ONS. Mapas Dinâmicos do SIN.** Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 24 nov. 2020.

**Professor Elétrico. Valores comerciais de resistores.** Disponível em:<<https://professoreletrico.com/cursos/circuitos/valores-comerciais-de-resistores/>>. Acesso em: 03 maio 2021

**REZENDE, Paulo H. O.; SANTILHO, Fabrício P.; VASCONCELOS, Lucas E.; SILVA, Thiago V. Compensação de Reativos em Linhas de Transmissão Utilizando Compensadores Estáticos Fixos.** Uberlândia. Disponível em: <[https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013\\_065.pdf](https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2013/ceel2013_065.pdf)>. Acesso em: 1 nov. 2020.

**RODRIGUES, João Paulo Carneiro; SILVA, Laríssa de Paiva. Avaliação da Proteção de Reatores Shunt de Linhas de Transmissão.** 93 f. Trabalho de Conclusão de curso – Departamento de Engenharia Elétrica – UnB, Brasília, 2014. Disponível em: <[https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13522/1/2014\\_JoaoPauloCarneiroRodrigues\\_LarissadePaivaSilva.pdf](https://bdm.unb.br/bitstream/10483/13522/1/2014_JoaoPauloCarneiroRodrigues_LarissadePaivaSilva.pdf)>. Acesso em: 03 nov. 2020.

**SIEMENS.** Disponível em: <<http://new.siemens.com/global/en/products/energy/high-voltage/transformers/reactors.html>>. Acesso em 2 abr. 2021.

**SNPTEE.** Disponível em:<<https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/Caracterizac%CC%A7a%CC%83o-do-Ambiente-Eletromagne%CC%81tico-em-Uma-Linha-de-Transmissa%CC%83o-de-500KV-Ca%CC%81lculos-e-Medic%CC%A7o%CC%83es.pdf>>. Acesso em 5 abr. 2021.

**WEG. Compensadores síncronos rotativos.** Disponível em:<<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h75/hde/WEG-compensadores-sincronos-rotativos-50041259-catalogo-portugues.pdf>>. Acessos em 20 abr. 2021.