

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Selso Rabelo

**ESTUDO DE CASO COM UMA REDE REDUZIDA EM BAIXA  
TENSÃO, A DOIS CONDUTORES, ALIMENTANDO CARGAS  
TRIFÁSICAS INDUTIVAS E RESISTIVAS**

Santa Maria, RS  
2021

**Selso Rabelo**

**ESTUDO DE CASO COM UMA REDE REDUZIDA EM BAIXA TENSÃO, A DOIS  
CONDUTORES, ALIMENTANDO CARGAS TRIFÁSICAS INDUTIVAS E  
RESISTIVAS**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Dr Ghendy Cardoso Junior

Santa Maria, RS  
2021

Rabelo, Selso

ESTUDO DE CASO COM UMA REDE REDUZIDA EM BAIXA TENSÃO,  
A DOIS CONDUTORES, ALIMENTANDO CARGAS TRIFÁSICAS  
INDUTIVAS E RESISTIVAS / Selso Rabelo.- 2021.

72 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2021

1. Transmissão Trifásica 2. Energia Rural 3.  
Distribuição de Energia 4. Corrente Elétrica no Solo 5.  
Transmissão de Eletricidade pelo Solo I. Cardoso Junior,  
Ghendy II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

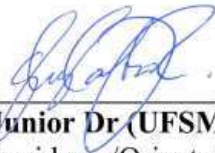
Declaro, SELSO RABELO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Selso Rabelo**

**ESTUDO DE CASO COM UMA REDE REDUZIDA EM BAIXA TENSÃO, A DOIS  
CONDUTORES, ALIMENTANDO CARGAS TRIFÁSICAS INDUTIVAS E  
RESISTIVAS**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 30 de setembro de 2021**



**Ghendy Cardoso Junior Dr (UFSM) - Videoconferência**  
(Presidente/Orientador)



**Ivan Paulo Canal Dr (IFFar) - Videoconferência**



**Gustavo Marchesan Dr (UFSM) - Videoconferência**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos os professores e professoras que fizeram parte de minha vida de estudante, desde o Jardim de infância, pois sempre foram insistentes e dedicados na transmissão de seus conhecimentos. Em especial, este trabalho é dedicado à minha família que nunca mediu esforços para me auxiliar no que fosse preciso. Aos meus amados irmãos, à minha amada esposa e ao meu amado filho, obrigado por todo apoio, em todos os momentos. À minha mãe, uma mulher sem igual, que nunca desistiu de nos guiar pelo caminho do conhecimento. Uma mulher que mesmo não sabendo ler nem escrever, sempre nos ensinou “que o estudo era o melhor caminho”, sempre sonhou em ver seus filhos na escola e bem formados. Te demos este orgulho mãe, você conseguiu que seguíssemos o bom caminho, e por isso dedicamos tudo o que conquistamos às tuas incansáveis orações por nós.

## AGRADECIMENTOS

Agradecer a Deus vida e por todas as oportunidades que me ofereceu ao longo da vida, e essa do Mestrado foi mais uma delas.

Agradecer à minha mãe, Brazilia Rabelo (*in memorian*), que mesmo sem saber ler e escrever sempre foi incansável na insistência de que o “estudo” era o melhor caminho. Obrigado minha amada por nunca ter nos deixado desistir da Educação.

Agradecer aos meus irmãos e irmãs por todo apoio, sempre incansável e incondicional.

Agradecer à minha amada esposa Daniele Rabelo, e ao meu amado filho Eduardo Rabelo, por seu sempre incondicional apoio, e por ter que suportar meus vários humores ao longo de toda minha formação.

Agradecer ao professor Ghendy Cardoso Junior pela oportunidade de cursar esse Mestrado e pela orientação durante o curso.

Agradecer a uma grande universidade, a UNIJUI, a todos os professores do DCEEng e em especial ao inestimável professor Eliseu Kotlinski, por todo apoio dispendido na realização das práticas realizadas para esta dissertação.

Agradecer ao sempre disposto e colaborador da UNIJUI, Engenheiro Maurício Baraciol Gasparim, por todo auxílio e disponibilidade dispendida na realização das práticas dessa dissertação.

Agradecer a secretaria do PPGEE da UFSM, que sempre foi muito eficiente e solícita em todas as demandas buscadas.

Agradecer ao Programa de Institucional de Incentivo à Qualificação Profissional dos Servidores do Instituto Federal Farroupilha, pelo apoio prestado ao longo desta formação.

*“Ciência é conhecimento organizado.  
Sabedoria é vida organizada.”  
(Immanuel Kant)*

## RESUMO

### **ESTUDO DE CASO COM UMA REDE REDUZIDA EM BAIXA TENSÃO, A DOIS CONDUTORES, ALIMENTANDO CARGAS TRIFÁSICAS INDUTIVAS E RESISTIVAS**

AUTOR: Selso Rabelo

ORIENTADOR: Dr Ghendy Cardoso Junior

O destaque e o crescimento do agronegócio, no Brasil e no mundo, têm demandado que o setor energético se desenvolva de maneira que possa acompanhar e dar suporte no fornecimento de energia elétrica de maneira eficiente e econômica aos produtores do campo. Várias são as formas de distribuir energia com qualidade no meio rural. No entanto, há a necessidade de aliar a eficiência e a qualidade ao baixo custo neste fornecimento. Para atingir este fim, há muito se buscam soluções que satisfaçam as necessidades de quem vive e produz na zona rural, em especial àqueles que vivem a grandes distâncias dos centros urbanos. Inicialmente os sistemas monofásicos eram capazes de atender tais necessidades através de sistemas tais como o Monofásico com Retorno por Neutro (MRN) e também o Monofásico com Retorno por Terra (MRT). Com o advento de revoluções industriais, que aproximaram o agronegócio às máquinas e equipamentos modernos, passou a surgir a necessidade de aumentar o suprimento de energia no campo, com o aumento de número de fases na rede elétrica, e em especial a rede trifásica. Levar uma rede trifásica a longas distâncias implica um alto custo de instalação e, com o intuito de reduzir estes custos, surgem propostas inovadoras de distribuição de tensão trifásica que alie eficiência e baixo custo. A proposta deste trabalho é justamente a de distribuir tensão trifásica a longas distâncias, em áreas rurais por exemplo, de maneira que os custos de distribuição sejam inferiores ao custo de uma rede trifásica convencional a três fios. O trabalho propõe um estudo da condução de eletricidade pelo solo, ou seja, para a distribuição trifásica em meio rural, aproveitando-se a instalação existente para duas fases aéreas, e a 3ª fase é conduzida pelo solo. Com ênfase sobre o sistema de aterramento da 3ª fase, a proposta é desenvolvida com a montagem de uma rede elétrica reduzida em baixa tensão (BT) de forma que abasteça algumas cargas trifásicas equilibradas. São feitas medições dos níveis de aterramento com o intuito de verificar seu nível de influência na condução de corrente pelo solo. Ao final, os resultados obtidos a partir das medições obtidas na prática são comparadas com os resultados simulados, verificando que o sistema é totalmente viável.

Palavras-chave: Transmissão Trifásica. Energia Rural. Distribuição de Energia.



## ABSTRACT

### **CASE STUDY WITH A REDUCED NETWORK IN LOW VOLTAGE, TO TWO CONDUCTORS, FEEDING INDUCTIVE AND RESISTIVE THREE-PHASE LOADS**

AUTHOR: Selso Rabelo

ADVISOR: Dr Ghendy Cardoso Junior

The importance and growth of agrobusiness in Brazil and the world requires the energetic sector to develop in such a way that it can keep up with and support the demand for electrical energy by efficient and economic means to the field producers. There are many forms to effectively distribute energy in the countryside. However, there is also the need to ally efficiency and quality to low cost supply. To achieve this goal, for long there have been researches in order to find solutions that could fit the necessities of those who live and produce in the rural area, in particular those who reside at great distances from urban centers. Initially, monophasic systems were capable of complying with such necessities through systems as the Monophasic with Neuter Return (MNR) and also the Monophasic with Ground Return (MGR). With the advent of industrial revolutions, which have approximated the agrobusiness to the machines and modern equipments, there came into being the necessity of enhancing the supply of energy at the field, with the increase of phases in the electrical grid, especially the three-phase grid. Extending a three-phase grid for long distances implies a high installation cost and, to reduce these costs, occur innovative proposes that ally efficiency and low cost at triphasic tension distribution. The purpose of this paper is precisely to present how to distribute triphasic tension to long distances, in rural areas, for example, so that the expense of the distribution becomes way inferior than a conventional three-phase three wired grid. The paper proposes a study of the conduction of electricity through the ground, in other words, for the triphasic distribution in the countryside to be, the already existing two overground phases are employed so that the 3<sup>o</sup> phase is conducted through the soil. With emphasis on the 3<sup>o</sup> phase grounding system, the proposal is developed with the mounting of a low tension (LV) reduced electrical grid, so that it supplies a few equilibrated triphasic loads. There are made measurements of the grounding in order to verify its level of influence on the conduction of the ground current. At the end, the results obtained from the measurements in the practical mounting are compared to the simulated results, verifying that the system is totally viable.

Keywords: Three-phase Transmission. Rural Energy. Energy Distribution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Resistividade do solo .....	20
Figura 2: Representação de um condutor aéreo e sua imagem no solo.....	20
Figura 3: Representação das linhas de campo magnético ao redor de um condutor.....	21
Figura 4: Representação da corrente elétrica no solo .....	21
Figura 5: Representação das linhas de corrente elétrica no solo .....	25
Figura 6: MRT sem transformador isolador .....	31
Figura 7: MRT com transformador isolador.....	32
Figura 8: MRT com neutro parcial .....	32
Figura 9: MRT com transformador de isolamento .....	33
Figura 10: Distribuição por PRE de MV para LV a 4 fios .....	35
Figura 11: Duas fases aéreas e uma aterrada.....	36
Figura 12: Relação de transformação usando tensão de linha.....	37
Figura 13: Tensão de linha na entrada no transformador isolador.....	37
Figura 14: Tensão de linha no secundário do transformador isolador.....	38
Figura 15: Tensão de linha no primário do transformador do consumidor .....	38
Figura 16: Tensão de linha no secundário do transformador do consumidor.....	39
Figura 17: Tensão de fase do lado do consumidor .....	39
Figura 18: Transformador trifásico conectado em $\Delta/Y$ , pelo lado do distribuidor .....	40
Figura 19: Grupo de transformadores monofásicos, pelo lado do consumidor.....	41
Figura 20: Gráfico das tensões pelo lado do consumidor.....	44
Figura 21: Gráfico das correntes pelo lado do consumidor $I_a=1,0$ A; $I_b=1,7$ A; $I_c=0,7$ A .....	45
Figura 22: Terrômetro.....	45
Figura 23: Resistência de aterramento do transformador isolador.....	46
Figura 24: Resistência de aterramento do transformador consumidor.....	46
Figura 25: Aterramento do prédio .....	47
Figura 26: Aterramento com 2 barras .....	47
Figura 27: Tensões para o motor trifásico do quadro 6 .....	48
Figura 28: Correntes para o motor trifásico do quadro 6 .....	48
Figura 29: Tensões para carga resistiva 1 .....	49
Figura 30: Correntes para carga resistiva 1 .....	49
Figura 31: Tensões para carga resistiva 2 .....	49
Figura 32: Correntes para carga resistiva 2 .....	50
Figura 33: Aterramento com 5 barras distintas no lado do consumidor.....	51
Figura 34: Tensões de fase a vazio .....	51
Figura 35: Tensões para carga indutiva .....	52
Figura 36: Correntes para carga indutiva .....	52
Figura 37: Fasor da tensão para carga indutiva .....	53
Figura 38: Tensões para carga resistiva 1 .....	53
Figura 39: Fasores da tensão para carga resistiva 1.....	54
Figura 40: Tensões para carga resistiva 1 e carga indutiva.....	54
Figura 41: Correntes para a carga resistiva 1 e carga indutiva .....	55
Figura 42: Fasor das tensões para as cargas resistiva 1 e carga indutiva .....	55
Figura 43: Correntes elétricas simuladas e medidas para 1º caso, carga indutiva.....	56
Figura 44: Tensões de fase simuladas e medidas para 2º caso, carga indutiva.....	57
Figura 45: Correntes elétricas simuladas e medidas para 2º caso, carga indutiva.....	57
Figura 46: Tensões de fase simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 1 .....	57
Figura 47: Correntes elétricas simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 1 .....	58

Figura 48: Tensões de fase simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 2 .....	58
Figura 49: Correntes elétricas simuladas e medidas para 2º caso, carga resistiva 2 .....	59
Figura 50: Tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, carga indutiva.....	59
Figura 51: Correntes elétricas simuladas e medidas para 3º caso, carga indutiva.....	59
Figura 52: Tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, carga resistiva R1 .....	60
Figura 53: Tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, carga indutiva e resistiva 1..	60
Figura 54: Correntes elétrica simuladas e medidas para o 3º caso, carga indutiva e resistiva 1 .....	60
Figura 55: Tensão e corrente elétrica simuladas para $R_{aterramento}=7,7 \Omega$ , carga indutiva .....	61
Figura 56: Tensão e corrente elétrica simuladas para $R_{aterramento}=7,7 \Omega$ , resistiva 1 .....	61
Figura 57: Tensão e corrente elétrica simuladas para $R_{aterramento}=7,7 \Omega$ , carga resistiva 2 .....	62
Figura 58: Tensão e corrente elétrica simuladas para $R_{aterramento}=7,7 \Omega$ , carga indutiva e resistiva 1 .....	62

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resistividade média do solo .....	19
Quadro 2: Distribuição da corrente alternada no solo .....	23
Quadro 3: Resistência do solo e dimensões de condutor equivalente .....	28
Quadro 4: Resistências e indutâncias do transformador isolador, por fase .....	41
Quadro 5: Resistências e indutâncias do transformador do consumidor, por fase .....	42
Quadro 6: Cargas aplicadas ao sistema .....	44
Quadro 7: Desequilíbrio de tensão para as cargas do quadro 6.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MRN	Monofásico com Retorno por Neutro
MRT	Monofásico com Retorno pela Terra
PRE	Para-raios Energizado
<i>SWS</i>	<i>Shield Wire Scheme</i>
ELETROBRÁS	Centrais Elétricas Brasileiras
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
EUA	Estados Unidos da América
ESCELSA	Espírito Santo Centrais Elétricas S/A
CEB	Companhia Energética de Brasília
CFLCL	Companhia Força e Luz Cataguazes-Leopoldina
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
ENERSUL	Empresa Energética do Mato Grosso do Sul
CEPEL	Centro de Pesquisas em Energia Elétrica
DCEEng	Departamento de Ciências Exatas e Engenharias
UNIJUI	Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
RIC	Regulamento das Instalações Consumidoras
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema
CV	Cavalo Vapor
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
HV	Alta Tensão
MV	Média Tensão
BT	Baixa Tensão
V	Volt
kVA	Quilo Volt Ampère

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....</b>	<b>18</b>
<b>2 A UTILIZAÇÃO DA TERRA COMO CONDUTOR DE ELETRICIDADE .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 A RESISTÊNCIA DE TERRA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 A INDUTÂNCIA NO SOLO.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3 A IMPEDÂNCIA DO SOLO .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 CONDUTOR EQUIVALENTE AO SOLO.....</b>	<b>27</b>
<b>3 SISTEMAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL .....</b>	<b>29</b>
<b>3.1 MONOFÁSICO COM RETORNO PELO NEUTRO .....</b>	<b>30</b>
<b>3.2 MONOFÁSICO COM RETORNO POR TERRA.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 PARARAIOS ENERGIZADO .....</b>	<b>33</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA PROPOSTA.....</b>	<b>36</b>
<b>4.1 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA.....</b>	<b>37</b>
<b>4.2 OS TRANSFORMADORES PROPOSTOS AO SISTEMA.....</b>	<b>40</b>
<b>4.3 O ATERRAMENTO DO SISTEMA.....</b>	<b>42</b>
<b>4.4 O DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>4.5 DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA EXPERIMENTAL EM BT .....</b>	<b>43</b>
<b>4.5.1 O 1º caso .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5.2 O 2º caso .....</b>	<b>46</b>
<b>4.5.3 O 3º caso .....</b>	<b>50</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
<b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>63</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>8 APÊNDICES .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de crescimento e desenvolvimento econômico tem passado, cada vez mais, pelo desenvolvimento da área primária de produção. Assim, o desenvolvimento do campo passa pelo adequado suporte no fornecimento de energia elétrica, o que vem sendo preocupação do setor energético, há anos. O sistema monofásico, a 1 condutor, há tempos não tem conseguido atender as demandas do setor rural, fazendo surgir diversos caminhos e teorias para atender o aumento de demanda energética para esse setor de produção. Inicialmente, o sistema monofilar com retorno por terra (MRT) foi solução para levar energia a longas distâncias, para áreas rurais, por ser prático e possuir baixo custo. Em seguida, se passou para o sistema bifásico, e trifásico com retorno por terra em diversas topologias, cada um com suas vantagens e respectivas desvantagens (ELETROBRÁS, RER 05). A proposta de para-raios energizado (PRE), por Ramos (2010) e Rose (1997) também surgem como alternativas para distribuição de energia usando o retorno por terra. Experiências de técnicas, em Gana, bem sucedidas são descritas por Iliceto et al (2005) através do uso do *Shield Wire Scheme (SWS)*, onde novamente explora o retorno da corrente elétrica por terra. Todas as propostas com mais ou com menos vantagens, em seus sistemas de retorno por terra, acaba por envolver alguns arranjos eletromecânicos para converter os sistemas em trifásicos.

### 1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Historicamente, o suprimento de energia em áreas rurais tem sido feito, na maioria das situações por linhas monofásicas em tensão média, a qual é rebaixada aos níveis de baixa tensão por transformadores monofásicos instalados localmente. O que tem acontecido é que com o aumento gradativo das quantidades de cargas nessas localidades, esses sistemas têm sido, cada vez menos, capazes de suprir a demanda. O uso, principalmente de motores trifásicos em sistemas de bombeamento de água, produção de rações e no aumento do consumo de energia elétrica para produção de insumos, faz com que seja cada vez mais urgente o aumento da capacidade de fornecimento de energia a estes locais. Os sistemas de conversão baseados em eletrônica de potência, que convertem em trifásica uma linha monofásica, também passam a ser insuficientes para atender as necessidades de aumento de cargas, pois têm capacidade de atender apenas necessidades pontuais de cada consumidor rural. Assim, há a necessidade de estudo de novas técnicas, que possibilitem de forma rápida e de baixo custo, a instalação de uma rede elétrica que seja capaz de atender as necessidades desses consumidores. Várias propostas têm

surgido ao longo dos últimos anos, baseadas na transmissão a dois fios, no entanto o que diferencia esta das outras, é que aqui se propõe o uso da terra como um terceiro condutor, a exemplo do que foi proposto por Borges (2017). No entanto, neste trabalho é dada uma especial atenção ao estudo da resistência de aterramento. Ou seja, o trabalho se propõe a verificar, na prática, qual a influência que o nível de resistência de aterramento tem na condução de corrente elétrica.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Como objetivo principal, pretende-se verificar a viabilidade de transmissão trifásica de energia elétrica a dois fios aéreos, e usando o solo como terceiro condutor, para abastecer cargas indutivas e resistivas.

Como objetivos específicos, pretende-se verificar:

- A capacidade do solo para transmissão de corrente.
- O valor máximo da resistência de aterramento, de forma que atenda a demanda.
- O desequilíbrio de tensão ocasionado pela presença das cargas.

## 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora a história da eletricidade para a humanidade tenha começado bem antes, foi Thomas Edison que transmitiu produziu e transmitiu eletricidade pela primeira vez em 1882, através da fundação de sua companhia *Edison Illuminating Company*, para vender eletricidade aos compradores de suas lâmpadas. A produção de corrente contínua, no entanto, dificultava a transmissão por longas distâncias, assim, em 1895 Nicolas Tesla em uma aposta na corrente alternada construiu a usina hidrelétrica das cataratas de Niágara, em parceria com o industrial George Whestinghouse, para transmissão de eletricidade a uma distância de 40 km.

Uma das alternativas usuais para transmissão de energia em zonas rurais, com vistas à implantação do sistema trifásico é explorado com a utilização da tecnologia do para-raios energizado PRE, proposto por Ramos (2010).

Rudenberg (1950, p.393) em seu livro intitulado *Transient Performance of Electric Power Systems*, descreve matematicamente o comportamento da corrente elétrica sob o solo. Demonstra que a densidade da corrente elétrica é mais significativa na região sob o condutor aéreo, devido à ação do campo magnético formado ao redor do mesmo. Ainda, que a resistência



elétrica do solo ( $R_G$ ) tem dependência direta com a frequência da tensão alternada que está sendo transmitida.

Para sistemas de transmissão de média ou alta tensão, deve-se levar em conta, entre outras grandezas, as impedâncias, em particular a impedância mútua formada pela corrente elétrica se propagando nos condutores. Tal descrição matemática, com o uso de cálculo diferencial é feita por Carson (1926), onde demonstra soluções técnicas apresentadas pelo retorno de corrente pelo solo.

Estudos de ordem técnica e econômica comparando os sistemas tradicionais MRT e MRN, de transmissão de energia em áreas rurais, são apresentados por Silva (2006). Nos estudos são considerados fatores relativos à demanda energética, sobretudo em unidades consumidoras ligadas a partir do programa de universalização do atendimento de energia.

Experiências bem sucedidas com o uso do esquema “*Shield Wire Scheme*” (SWS), relatado por Iliceto et al (2005) no artigo *Rural Electrification In Ethiopia With The Shield Wire Scheme*, destacam o retorno da corrente por terra, em situações de abastecimento de pequenas cidades e aldeias nas proximidades das linhas de transmissão Alta Tensão (HV). Em seu artigo, Iliceto destaca ainda que o caminho de retorno pela terra é um conceito muito econômico, pois mesmo onde a resistividade do solo seja bastante alta, ela acaba por ter valor baixo quando comparada a um condutor de alumínio, por exemplo.

No Brasil, experiências bem sucedidas com o uso do PRE e com retorno de correntes elétricas pelo solo, em sistemas de transmissão implantados pela Eletronorte e Ceron, são descritos por Rose (1997).

Uma carga rural trifásica, com retorno de corrente pelo solo, também pode ser atendida pelo sistema proposto por Fandi et al (2014), através de um sistema de transmissão por 2 fios aéreos, usando a rede monofásica existente. A 3ª fase é obtida através de arranjo eletromagnético no transformador do consumidor, com a terceira fase aterrada. Nesse caso o sistema parte da premissa de existência de rede monofásica a dois condutores, em um sistema de retorno por neutro (MRN).

Borges (2017) trata da condução de eletricidade pelo solo, repotencializando uma rede de transmissão rural, através de “Uma Proposta Não Convencional Usando Dois Fios Aéreos e o Solo como Terceiro Condutor”. A proposta visa atender cargas trifásicas rurais através do uso de grupos de transformadores, com o aproveitamento da rede monofásica existente, com transmissão em 13,8 kV.

## 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Visando uma melhor organização e um melhor desempenho da proposta, este trabalho ficou dividido em 6 capítulos.

O capítulo 1 trata da introdução do assunto abordado, bem como os objetivos do trabalho e sua revisão bibliográfica.

O capítulo 2 mostra considerações, principalmente de estudos anteriores, a respeito do uso do solo como condutor de eletricidade.

O capítulo 3 faz um apanhado geral, tratando dos sistemas já existentes de eletrificação rural e suas especificidades.

O capítulo 4 apresenta a proposta deste trabalho, bem como o desenvolvimento da proposta experimental. Apresenta as especificidades e as particularidades de cada caso no desenvolvimento do trabalho em BT.

O capítulo 5 trata dos resultados encontrados e discussões acerca dos mesmos.

Por fim, o capítulo 6 traz as conclusões e as sugestões para os trabalhos futuros.

## 2 A UTILIZAÇÃO DA TERRA COMO CONDUTOR DE ELETRICIDADE

A condução da eletricidade pela terra já é conhecida e usada há mais de 50 anos, na Austrália, por exemplo Silva (2015), através de seu uso como retorno de corrente elétrica. Utilizar a terra para conduzir eletricidade traz diversos benefícios ao sistema elétrico, principalmente no que diz respeito à redução de custos. Conforme descrito nos itens seguintes, a terra pode substituir condutores de 290 mm<sup>2</sup> se for de cobre, e 473 mm<sup>2</sup> se for de alumínio, em uma frequência de 60 Hz.

### 2.1 A RESISTÊNCIA DE TERRA

A resistência ( $R_G$ ) de terra existe devido à sua resistividade ( $\rho$ ) natural, varia com a distância e com a profundidade e pode variar de um tipo de solo para outro pelo fato de não ser homogênea. Isso pode dificultar a análise da distribuição de corrente na mesma. Quando não são efetuadas medições específicas para um ponto definido do solo, podem ser usados valores médios definidos por tabelas, obtidos de medições anteriores. No caso do quadro 1, estão especificados 4 tipos de solo e suas respectivas resistividades naturais ( $\rho$ ).

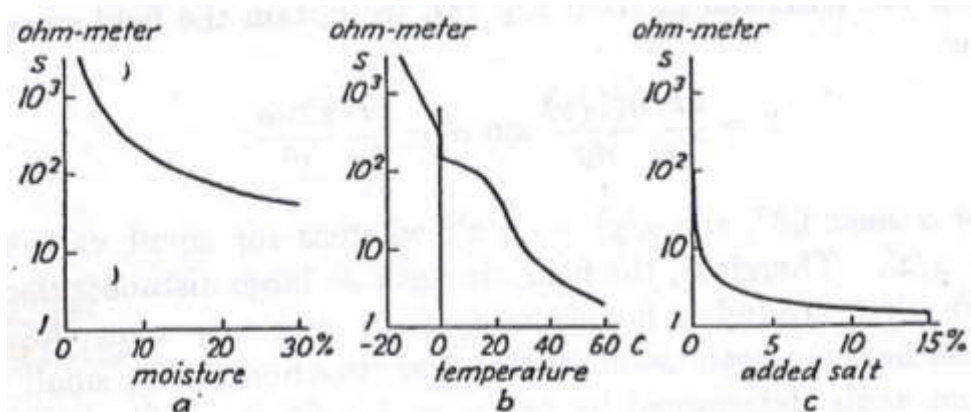
Quadro 1: Resistividade média do solo

Tipo de solo	Orgânico úmido	Úmido	Seco	Rochoso	Unidade
Resistividade ( $\rho$ )	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	$\Omega.m$

Fonte: Adaptado de Transient Performance of Electric Power Systems (Rudenberg, 1950)

Além de variar com o tipo de solo e com a umidade, a resistividade varia também com a temperatura, de maneira inversa. Nesse caso, destaca-se a importância dos eletrodos de aterramento que podem alcançar locais mais úmidos, com a maior profundidade, e também de temperatura maior e mais estável para locais mais frios. Segundo Rudenberg (1950), a resistividade do solo varia com a temperatura em escala logarítmica, ou seja, quanto maior a temperatura do solo, menor sua resistividade. Na figura 1, a e b ilustram esse fato de acordo com o teor de umidade e a temperatura, e na figura c, pode-se perceber a significativa redução da resistividade com a adição de sal. Ou seja, quando as condições do solo não são ideais, é possível alterá-lo para que satisfaça a necessidade de projeto.

Figura 1: Resistividade do solo



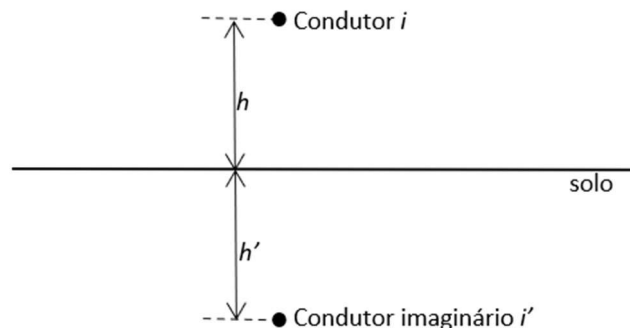
Fonte: Rudenberg, 1950

## 2.2 A INDUTÂNCIA NO SOLO

Já a Indutância (L) ocorre devido ao campo magnético ( $\vec{B}$ ) que surge devido à distribuição da densidade superficial de corrente elétrica existente no local.

Como a indutância (L) é resultado do campo magnético ( $\vec{B}$ ) que surge radialmente nas proximidades do condutor devido à corrente elétrica que o percorre, em um condutor aéreo, seu efeito contribui para que a corrente no solo se mantenha em um caminho logo abaixo do mesmo, ou seja, a corrente no solo percorre o mesmo caminho da linha aérea. Para todo condutor aéreo, existe seu homólogo, espelhado, sob a superfície do solo, como mostrado na Figura 2.

Figura 2: Representação de um condutor aéreo e sua imagem no solo

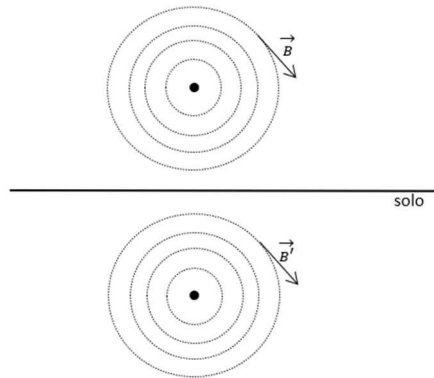


Fonte: Autor

A partir da experiência idealizada por Oersted (1820), se sabe que ao redor de todo condutor percorrido por uma corrente elétrica há um campo magnético ( $\vec{B}$ ), concêntrico, cujo

centro é o centro do próprio condutor. Independentemente se esse condutor é aéreo (*overhead line*) ou sob o solo (*underground line*), a Figura 3 mostra a disposição das linhas de  $\vec{B}$ , em uma situação que demonstra o que acontece em linhas de transmissão reais de corrente alternada.

Figura 3: Representação das linhas de campo magnético ao redor de um condutor

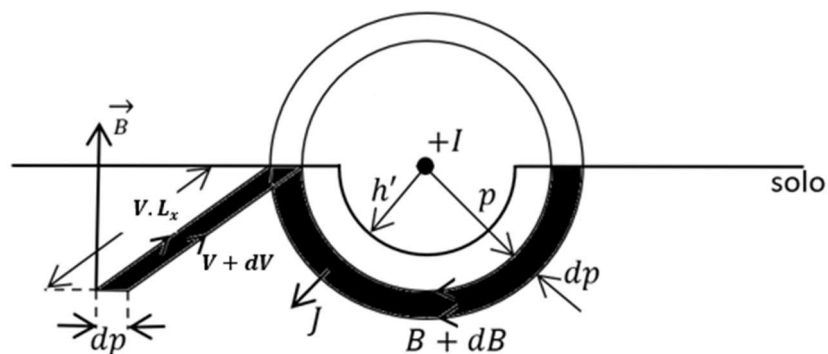


Fonte: Autor

Com o objetivo de demonstrar o comportamento da corrente elétrica alternada que percorre o solo, e verificar de que fatores essa corrente sofre influência, principalmente sua autoindutância, se supõe que ela flui no centro de um semicírculo de profundidade  $h'$ .

Para que seja possível resolver as equações diferenciais da corrente elétrica, a Figura 4, mostra apenas duas linhas de força magnéticas concêntricas, onde o centro representa a posição do condutor hipoteticamente disposto no solo.

Figura 4: Representação da corrente elétrica no solo



Fonte: Adaptado de Transient Performance of Electric Power Systems (Rudenberg, 1950)

Aplicando a lei de Ampère da magnetização para a parte sombreada, e a lei de Faraday para a força eletromotriz induzida ao longo de uma estreita faixa de comprimento  $L_x$ ,

Rudenberg deduziu que a densidade superficial de corrente ( $J$ ) é dependente da tensão ( $V$ ) e da resistividade ( $\rho$ ) do solo. Assim, aplicando a lei de Ampère da magnetização à parte sombreada do anel circular, onde  $s$  representa a superfície sombreada e  $\mu_0$  representa a permeabilidade magnética do meio, com valor  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$  em unidades do SI, tem-se

$$\oint \vec{B} ds = \mu_0 i \quad (01)$$

Denotando por  $J$  a densidade de corrente,  $\vec{B}$  a densidade do campo magnético,  $p$  a distância do centro do condutor e  $i$  a corrente elétrica, pode-se escrever

$$2\pi(p + dp)(\vec{B} + d\vec{B}) - 2\pi \cdot p \cdot \vec{B} = 4\pi \cdot J \cdot \pi \cdot p \cdot dp \quad (02)$$

o que resulta na equação diferencial

$$\frac{1}{p} \frac{\partial}{\partial p} pB = 2\pi J \quad (03)$$

Paralelamente, aplicando a lei da indução de Faraday para a força eletromotriz induzida pelo campo elétrico para uma estreita faixa de comprimento  $L_x$  no solo

$$\oint V ds = \frac{d\phi}{dt} \quad (04)$$

$$L_x(V + dV) - L_x V = L_x dp \frac{d\vec{B}}{dt} \quad (05)$$

à qual se pode relacionar com (03) na forma

$$\frac{\partial V}{\partial p} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (06)$$

Assim, para todo e qualquer ponto do solo, considerando a resistividade ( $\rho$ ) constante ao longo do caminho, a lei de Ohm pode ser escrita como

$$V = \rho \cdot J \quad (07)$$

ou

$$J = V/\rho \quad (08)$$

Para correntes alternadas, designando  $f(p)$  como sendo uma função da distância, a densidade de corrente varia senoidalmente no tempo de acordo com a equação:

$$J = K \cdot f(p) \cdot e^{-j\omega t} \quad (09)$$

Onde  $K$  é uma constante determinada pela resistividade do solo

$$K = 2\pi \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (10)$$

$K$  é uma constante dada em  $\text{cm}^{-1}$

$f$  é a frequência da corrente, em Hz

$\rho$  é a resistividade do solo em  $\text{cm}^2/\text{s}$

Assim,  $1/K$  representa a distância, em centímetros que a corrente alcança na distribuição pelo solo. O quadro 2 mostra como se distribui, na terra ( $1/K$ ), a corrente alternada, para diferentes tipos de solo e diferentes frequências.

Quadro 2: Distribuição da corrente alternada no solo

Tipo de solo/frequência	50	60	150	500	5.000	50.000	Hz
Solo úmido: $\rho = 10^{13} \text{ cm}^2/\text{s}$	710	650	410	224	71	2,24	m
Solo seco: $\rho = 10^{14} \text{ cm}^2/\text{s}$	2.240	2.055	1.300	710	224	71	m
Solo rochoso: $\rho = 10^{15} \text{ cm}^2/\text{s}$	7.100	6.500	4.100	2.240	710	224	m

Fonte: Adaptado de Transient Performance of Electric Power Systems (Rudenberg, 1950)

Para Rudenberg, a densidade ( $J$ ) de corrente no solo, para qualquer distância ao centro do condutor, é dada por

$$J = \sqrt{j} \frac{K}{\pi h} \frac{H_0(\sqrt{j}Kp)}{H_1(\sqrt{j}Kh)} I e^{-j\omega t} \quad (11)$$

Onde

$p$  é a distância do centro do condutor

$H_0$  é a função de Bessel de ordem zero

$H_1$  é a função de primeira ordem

Na equação (11),  $H_1$  é um valor constante que depende da distância  $h$  da superfície do condutor.  $H_0$  assume valores que diminuem à medida que se aumenta a distância ao centro do condutor (função de Bessel) e, dessa forma, a densidade de corrente diminui em mesmo grau.

Isso torna possível entender o fato de que a corrente de linha  $I$  não se espalha significativamente em largura e em profundidade, mas mantém-se próximas às linhas de alimentação. Além disso, observando que os argumentos crescentes de  $H_0$  e  $H_1$  não varia apenas em magnitude, mas também em fase, as correntes alternadas sob a terra não apresentam um ângulo de fase constante em relação à corrente  $I$  que percorre o condutor aéreo, pois este ângulo varia de lugar para lugar.

Para todas as frequências de transmissão de energia podem ser feitas aproximações para as funções de Bessel. Limitando a altura de um cabo de transmissão a  $h = 20 \text{ m}$ , e uma frequência a 5 kHz, a equação (11) pode ser reduzida a

$$J = -\frac{k^2}{2} H_0(\sqrt{j}Kp) \cdot I e^{-j\omega t} \quad (12)$$

Diretamente abaixo do condutor aéreo, para uma profundidade igual a  $h$ , a densidade de corrente no solo é máxima. Para a maioria dos tipos de solo, (solo úmido), por exemplo, o quadro 2, dá para a frequência de 60 Hz, o valor de  $1/K$  igual a 650 m e, para uma linha de altura  $h = 10 \text{ m}$ ,  $kh = 0,0153$ . Para esse valor,  $H_0 = 2,70$  (Rudenberg, 1950) e, considerando para esse exemplo, o valor de  $\frac{2}{K^2} = 1 \text{ km}^2$ , a amplitude da densidade de corrente elétrica é

$$J_{60} \cong -2,70 \cdot I \text{ ampères/km}^2 \quad (13)$$

Isso quer dizer que para cada ampère circulando no condutor, o solo logo abaixo da linha carrega uma densidade de corrente de  $2,70 \text{ A/km}^2$ . Para distâncias maiores, se pode perceber, pela equação (12) que a corrente diminui rapidamente, ou seja, se  $\frac{1}{K} = 650 \text{ m}$  e  $Kp \cong 3$ , tem-se

$$K \cdot p \cong 3 \quad (14)$$

$$p \cong 3 \times 650$$

$$p \cong 1.950 \text{ m}$$

Assim, considerando que a corrente pode fluir, até 3 vezes a distância do quadro 2, até se dissipar. Por conseguinte, as correntes se espalham com a rede de transmissão tão longe quanto alguns quilômetros.

Fazendo uma aproximação assintótica<sup>1</sup> para a função  $H_0$ , com pequenos argumentos até  $Kp = 0,5$ , para o caso de cálculos numéricos, tem-se

$$H_0(\sqrt{j}Kp) = \frac{1}{2} - j \frac{2}{\pi} \ln \left( \frac{2}{\gamma Kp} \right) \quad (15)$$

Onde

$$\gamma = 1,7811 \quad (16)$$

É a constante de Euler. O valor da equação (15) aumenta logaritmicamente com um valor menor de  $p$ , e assim, o valor do segundo termo é preponderante. Dessa forma,  $H_0$  é essencialmente imaginário e a corrente elétrica sob a linha atrasa quase  $90^\circ$  em relação à corrente no condutor aéreo. Usando grandes valores de argumento,  $Kp = 1$ , a aproximação para a equação (15) fica

$$H_0(\sqrt{j}Kp) = \sqrt{\frac{2}{\pi Kp}} e^{-\frac{Kp}{\sqrt{2}}} \cdot e^{j \left( \frac{Kp}{\sqrt{2}} - \frac{3\pi}{8} \right)} \quad (17)$$

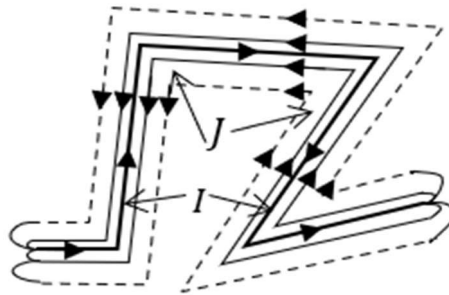
<sup>1</sup> Em matemática, uma expansão assintótica de uma dada função  $f$  na vizinhança de um ponto é uma soma finita de funções de referência que fornece uma boa aproximação do comportamento da função  $f$  na vizinhança considerada. A questão de convergência não importa, ao contrário do que acontece no estudo das séries de potências.



A partir de (17), percebe-se que  $H_0$  decresce mais que exponencialmente e o ângulo de fase rotaciona uniformemente com um valor crescente de  $p$ .

A “ligação” magnética entre a corrente elétrica do condutor aéreo e a corrente no solo, faz com que esta última mantenha e não se desvie do percurso do primeiro. Ou seja, se a linha aérea de distribuição não for retilínea, a corrente sob o solo não “escolhe” o caminho mais curto, como se poderia esperar, pois elas são atraídas em direção à linha e não podem margear distância maior que a permitida pela equação (14). A Figura 5 representa o caminho da corrente, no solo, ao longo da linha aérea.

Figura 5: Representação das linhas de corrente elétrica no solo



Fonte: Adaptado de Transient Performance of Electric power Systems (Rudenberg, 1950)

A importância dessa observação deve ser considerada para redes de alta ramificação, pois já que estão conectadas à terra, principalmente para correntes de retorno, indicam que as mesmas não se espalham transversalmente pelo território, difundindo-se por grandes distâncias no solo, mas seguem sempre o caminho da linha de transmissão, com todos seus possíveis desvios.

### 2.3 A IMPEDÂNCIA DO SOLO

A alta resistividade do solo, apesar da pequena densidade de corrente, acaba por levar a tensão a um valor bastante significativo. A equação (7) fornece a voltagem por unidade de comprimento e, para se obter o valor da mesma ao longo do caminho, devemos considerar o comprimento total  $L_x$  da linha.

$$V = \rho \cdot J \cdot L_x \quad (18)$$

Substituindo a densidade de corrente pela equação (12), e  $K^2$  pela equação (10), obtém-se

$$V = -L_x \omega I \times \pi H_0 (\sqrt{jK\rho}) e^{-j\omega t} \quad (19)$$

o que faz com que a resistividade ( $\rho$ ) seja cancelada. Considerando a região logo abaixo do condutor para  $p = h$  e para valores de  $K\rho \leq 0,5$ , a equação (15) pode ser usada, resultando na amplitude da tensão alternada na superfície da terra.

$$V = -L_x \omega I \left[ \frac{\pi}{2} - j2 \ln \left( \frac{2}{\gamma K h} \right) \right] \quad (20)$$

$$V = Z \cdot I \quad (21)$$

A equação (20) representa a queda de tensão na corrente de retorno ( $I$ ) pelo solo em um comprimento  $L_x$ . Por analogia, comparando as equações (20) e (21), pode ser deduzida a expressão para um circuito contendo uma resistência  $R$  e uma autoindutância  $L$ , isto é:

$$R = L_x \cdot \omega \cdot \frac{\pi}{2} = \pi^2 \cdot f \cdot L_x \quad (22)$$

Que multiplicado pelo fator  $10^{-4}$ , tem-se o valor em  $\Omega$ .

A equação (22) indica que a resistência para a corrente alternada se espalhar pelo solo não depende de um valor fixo, mas de um valor dependente da distância  $L_x$  que deve percorrer. Além disso, é proporcional à frequência e independe da resistividade do solo. Esse comportamento se deve ao fato de que o estreito feixe de corrente sob o solo se contrai com o aumento da frequência e com a menor resistividade.

A autoindutância, de (20), fica:

$$L = L_x 2 \ln \left( \frac{2}{\gamma K h} \right) = 2 L_x \ln \left( \frac{0,178}{h} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \quad (23)$$

Como as grandezas estão, inicialmente em centímetros, multiplicando (23) pelo fator  $10^{-9}$ , tem-se o valor final em miliHenry por quilômetro (mH/km).

A equação (23) mostra que a autoindutância diminui lentamente com o aumento da frequência, devido à contração das correntes.

Portanto, a impedância  $Z$  de terra pode ser escrita como

$$Z = (R - j\omega L) \cdot I \quad (24)$$

Destaque-se que as equações para o cálculo de  $R$  e  $L$  apresentadas, são válidas para frequências de até 5 kHz, devido às aproximações idealizadas.

Foi demonstrado que, a resistência de solo depende unicamente da frequência da corrente alternada circulante. Assim, a partir da equação 22, para uma frequência de 60 Hz, tem-se para a resistência  $R_G$  do solo:

$$\begin{aligned} R_G &= \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} \\ R_G &= \pi^2 \cdot 60 \cdot 10^{-4} \\ R_G &= 0,0592176 \Omega/km \end{aligned} \quad (25)$$

Assim, o valor encontrado em (25), se torna padrão para correntes alternadas a 60 Hz (KERSTING, 2002 p.85).

A indutância (L), por sua vez, precisa ser calculada com base no tipo de solo e na altura (**h**) da linha aérea em relação ao solo. Para solo seco (*dry soil*) com  $\rho = 10^{14} \text{ cm}^2/\text{s}$ , comprimento da linha  $L_x = 1 \text{ km}$ ,  $h = 10 \text{ m}$  e  $f = 60 \text{ Hz}$ , obtém-se:

$$L = 2L_x \ln \left( \frac{0,178}{h} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \right) \cdot 10^{-9}$$

$$L = 2 \cdot 10^5 \ln \left( \frac{0,178}{10^3} \sqrt{\frac{10^{14}}{60}} \right) \cdot 10^{-9}$$

$$L = 1,0874 \cdot 10^{-3} \text{ H/km}$$

Como a reatância indutiva  $X_L$  é dada por

$$X_L = 2\pi fL$$

podemos escrever:

$$X_L = 2\pi \cdot 60 \cdot 1,08 \cdot 10^{-3}$$

$$X_L = 0,4099549$$

$$X_L \cong 0,41 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (26)$$

Portanto, para solo seco em 60 Hz, a impedância (**Z**) característica pode ser escrita como:

$$Z = (0,0592 - j0,41) \text{ } \Omega/\text{km} \quad (27)$$

Destaque para o valor da resistência do solo, onde  $0,0592 \text{ } \Omega/\text{km} = 0,09530 \text{ } \Omega/\text{milha}$ , citado por Kersting (2002).

## 2.4 CONDUTOR EQUIVALENTE AO SOLO

Dado que o solo se comporta como um bom condutor de eletricidade, e que a corrente elétrica não se espalha e permanece próxima à linha de alimentação (RUDENBERG, 1950), facilmente se pode calcular a equivalência do mesmo a um condutor, de cobre ou de alumínio. Basta conhecer a resistência de solo e a resistividade do cobre. A resistência do solo, depende unicamente da frequência da corrente alternada que, para **60 Hz** foi calculada em **0,0592  $\Omega/\text{km}$** . Assim, conhecidas as resistividades ( $\rho$ ) do cobre e do alumínio, a 20 °C, tem-se:

$$R_G = \frac{\rho \cdot L}{A} \quad (28)$$

Onde

$R_G$  representa a resistência do solo

$L$  representa o comprimento do condutor

$\rho$  representa a resistividade do condutor

$A$  representa a área da seção reta do condutor

O Quadro 3 mostra os valores da resistência do solo, calculadas pela equação 25, para diferentes frequências. Mostra também a equivalência do diâmetro para condutores de cobre e de alumínio, que representam o solo na capacidade de condução de corrente.

Quadro 3: Resistência do solo e dimensões de condutor equivalente

Frequência	50	60	500	5000	Hz
Resistência	0,0493	0,0592	0,4934	4,9348	$\Omega/\text{km}$
Cobre	348	290	34	3,4	$\text{mm}^2$
Alumínio	567	473	57	5,7	$\text{mm}^2$

Fonte: Adaptado de Transient Performance of Electric Power Systems (Rudenberg, 1950)

Embora os valores apresentados no quadro 3, para a seção dos condutores, não correspondam a medidas comerciais, pode-se ter uma ideia aproximada da correspondência equivalente, demonstrando a capacidade que o solo tem de transmitir centenas de ampères.

### 3 SISTEMAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL

Ao longo da história, a eletrificação rural no Brasil sempre enfrentou barreiras e dificuldades em seu desenvolvimento. A eletrificação rural iniciou-se nos primeiros anos do século XX, a partir da produção cafeeira, em São Paulo, através da Sociedade Anônima Central Elétrica Rio Claro, que era responsável pela eletrificação de grandes propriedades.

Importante meio de desenvolvimento humano, econômico, e social, a eletricidade no meio rural contribui de maneira fundamental para a qualidade de vida da população. Apesar de sempre encontrar dificuldades, o desenvolvimento elétrico na área rural foi superando os desafios com o fundamental apoio de programas governamentais, que contribuíram de maneira crescente com o desenvolvimento neste meio, desde a década de 1970, segundo o IBGE. Estima-se que os estudos e pesquisas de sistemas simplificados para fins de eletrificação rural no Brasil, tenha iniciado em meados dos anos 70, na Escola Técnica Federal de Pelotas no estado do Rio Grande do Sul (SILVA, 2015). Nessa oportunidade os estudos indicavam que um sistema de retorno por terra, por exemplo, poderia custar 3,6 vezes menos que o sistema trifásico convencional.

De acordo com estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o censo demográfico de 2010 mostrou que a eletricidade está praticamente universalizada no país, pois está presente na vida de 96,7 % dos quase 191 milhões de habitantes que compunham a população brasileira. De acordo com *Eletrificação Rural no Brasil: Uma visão Histórica* (2016), percebe-se uma grande transformação, ao olhar-se em retrospectiva, para o quadro de eletrificação brasileira, a partir da década de 1960, quando apenas um terço dos domicílios do país tinham eletricidade. A cobertura de eletricidade era extremamente precária até mesmo na zona urbana, e apenas 8 % dos domicílios rurais contavam com energia elétrica, incluindo os autoprodutores.

Mesmo que os serviços de distribuição de eletricidade tenham crescido continuamente nas décadas seguintes, com o desenvolvimento econômico do país, o déficit de fornecimento de eletricidade nas áreas rurais continuava grande. Nos anos de 1990 apenas 49 % dos domicílios rurais continham eletricidade. Contudo, a situação para a população rural, no que concerne à eletricidade, veio a melhorar somente em 2002, com a consagração do direito gratuito e irrestrito de acesso à eletricidade, garantido pela legislação. Em 2003, o Programa Luz Para Todos, do governo federal brasileiro, por meio do decreto 4.873 de 11 de novembro, passou a implementar a universalização ao acesso à energia elétrica, para todas as famílias residentes no meio rural, e que ainda não tinham disponíveis esse serviço público.

Nos itens seguintes faz-se uma breve descrição dos formatos de distribuição de eletricidade no meio rural.

### 3.1 MONOFÁSICO COM RETORNO PELO NEUTRO

O sistema monofásico com retorno pelo neutro (MRN), é utilizado desde o ano de 1935 pelos Estados Unidos (EUA), e no Brasil é um sistema bastante usual para transmissão de eletricidade no meio rural, principalmente quando as distâncias não são muito extensas, ou quando as condições topográficas apresentam muitos empecilhos para instalação de um sistema MRT. O sistema consiste na instalação de dois condutores aéreos, sendo um deles o condutor fase e o outro o condutor neutro para efetuar o retorno da corrente. Se comparado ao sistema bifásico, por exemplo, esse sistema pode apresentar uma redução de custos de 20 % aproximadamente (ELETROBRAS, RER-05). Algumas vantagens do sistema são:

- Eliminação de cruzetas e ferragens associadas;
- Eliminação de isoladores de alta tensão;
- Simplificação da construção
- Utilização de estações transformadoras mais simples e mais baratas, pois os transformadores têm somente uma bucha de alta tensão e exigindo um único para-raios e uma chave monofásica;
- Possibilidade de utilização do neutro comum, tanto para alta como para baixa tensão.

No Brasil, o sistema é adotado por algumas concessionárias de energia elétrica, tais como a ESCELSA, CEB, CFLCL, CEMIG, CELPE, COELBA, entre outras.

### 3.2 MONOFÁSICO COM RETORNO POR TERRA

O sistema monofilar com retorno por terra (MRT), visa atender necessidades de fornecimento de energia elétrica a baixo custo, com a finalidade de atender a população rural de baixa renda visando melhora na sua qualidade de vida. O sistema consiste em um único condutor aéreo, denominado fase, que alimenta um ou mais transformadores de distribuição em tensão primária, com retorno da corrente elétrica pelo solo. O emprego do sistema MRT deve ser feito com um prévio estudo da área, onde será implantado, observando as características de cargas a serem atendidas, a resistividade do solo na região, e também seu posicionamento em relação aos alimentadores existentes (ENERSUL, 2001).

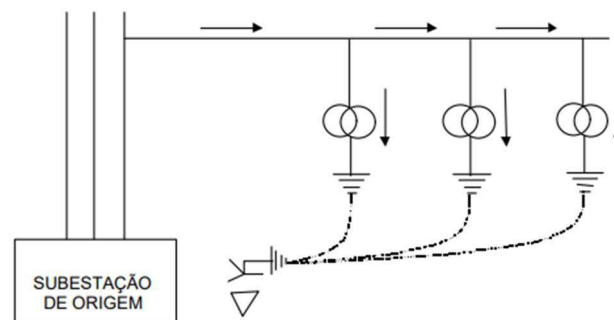
O sistema apresenta várias vantagens, dentre as quais:

- Redução de custos de capital, de manutenção e de operação;
- Construção simplificada com redução de material e de mão de obra;
- Menor probabilidade de interrupções, quando comparada a outros sistemas;

No Brasil, o desenvolvimento de experiências com o MRT, tem se desenvolvido a partir de três versões de instalação, de acordo com a natureza do sistema elétrico existente, e com as características do solo de cada região.

- O sistema sem transformador isolador, constitui-se de um único condutor metálico ligado diretamente a uma das fases da linha trifásica, sendo o retorno da corrente elétrica feito pelo solo. A figura 6 ilustra essa situação.

Figura 6: MRT sem transformador isolador

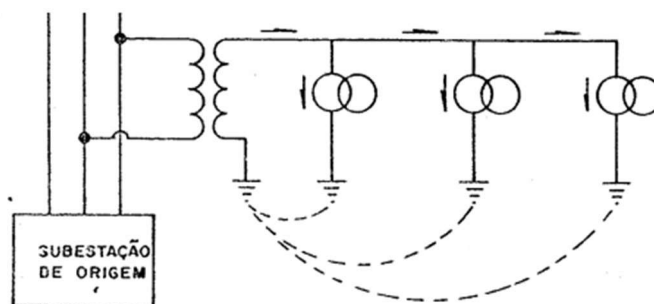


Fonte: CEPEL-RER-05

Esse sistema é comprovadamente a versão mais prática e econômica de MRT (CEPEL, RER-05), e deve ser originado em alimentadores cuja saída da subestação de origem, é em estrela aterrada.

- O sistema com transformador isolador, consiste de um único condutor metálico ligado ao transformador de isolador, sendo o solo o caminho de retorno da corrente. A diferença para o sistema anterior, é que havendo um transformador isolador, este tem seu enrolamento primário conectado a duas fases do sistema trifásico, e o secundário conectado ao condutor metálico da linha MRT e à terra. A figura 7 ilustra esse esquema de conexão.

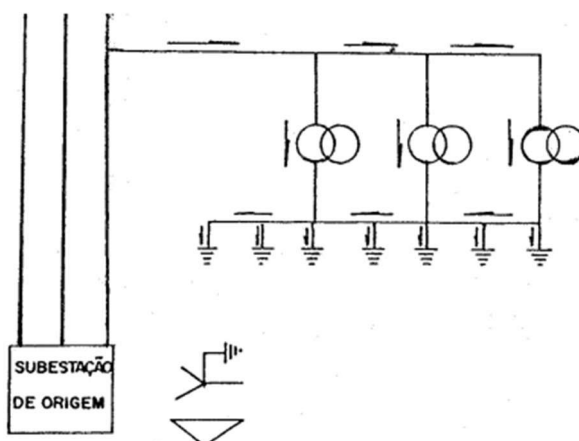
Figura 7: MRT com transformador isolador



Fonte: CEPEL-RER-05

O sistema com neutro parcial consiste em um esquema de ligação dito multiaterrado, pois, a partir de um condutor adicional, são interligados todos os aterramentos dos transformadores que constituem o ramal MRT, mas esse condutor adicional não está conectado à subestação de origem. A figura 8 mostra o esquema desse tipo de ligação.

Figura 8: MRT com neutro parcial



Fonte: CEPEL-RER-05

Este sistema tem sido empregado em regiões na qual a resistividade do solo se apresenta muito alta, assim a interligação dos aterramentos visa formar uma malha de aterramento, com a finalidade de diminuir a resistência equivalente em cada ponto.

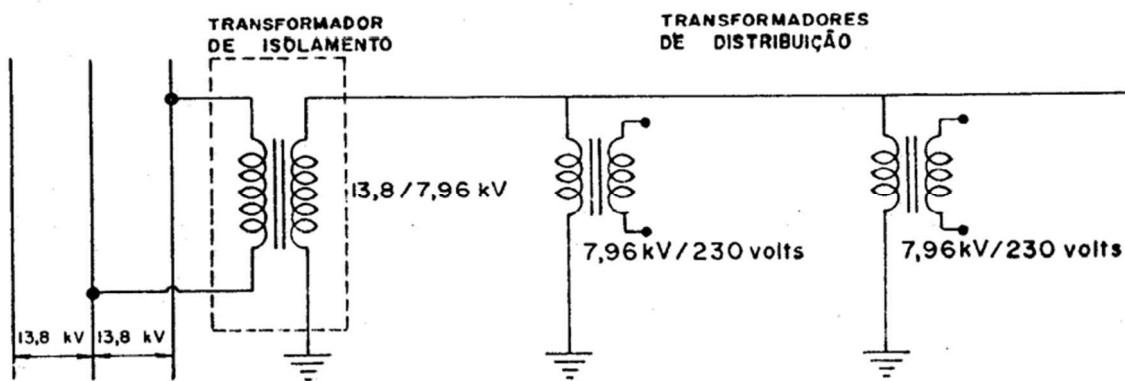
Em análise feita pela Companhia de Eletricidade de Pernambuco (CELPE), verifica-se que os sistemas MRT são muito mais econômicos em relação aos sistemas trifásicos e bifásicos para regiões onde não há a necessidade destes. O custo do sistema MRT convencional gira em torno de 50% do sistema trifásico convencional, e o multiaterrado em torno de 60%. Onde há



necessidade do sistema bifásico, por não comportar um MRT, esse custo vai a 80% do trifásico convencional (CELPE\_RER-05).

As experiências de implantação desse sistema, que desde a década de 1980 passou a ser difundido no Brasil, com a criação de um grupo de trabalho pela ELETROBRAS, demonstram que o sistema transmite bastante segurança aos usuários, pois não têm sido relatados problemas técnicos, ou acidentes com pessoas e animais, desde sua implantação. Comumente, as tensões de distribuição do MRT, no Brasil têm sido de  $13,8/\sqrt{3}$  kV,  $23/\sqrt{3}$  kV e  $34,5/\sqrt{3}$  kV entre fase e terra, que resultam efetivamente em uma tensão de 7,96 kV, 13,27 kV e 19,91 kV, respectivamente, no primário dos transformadores, e no secundário, 127 V ou 230 V, que é a tensão utilizada para o consumidor final. A figura 9 ilustra uma dessas situações para um sistema com uso de transformador isolador.

Figura 9: MRT com transformador de isolamento



Fonte: CEPPEL-RER-05

### 3.3 PARARAIOS ENERGIZADO

O sistema de transmissão de energia denominado PRE, ou para-raios energizado, foi concebido inicialmente como uma solução de baixo custo para levar eletricidade para atender pequenas cargas consumidoras, principalmente nas proximidades de redes de transmissão de energia com alta ou extra alta tensão. A primeira experiência de implantação do PRE no mundo foi em 1985, em Gana, na África. No Brasil, a primeira linha de distribuição nesse modelo foi experimentada no estado de Rondônia, implantada em 1995 (ROSE, 1997).

O precursor do sistema foi Francisco Iliceto, da universidade de Roma, que juntamente com outros autores, descreveu o funcionamento do PRE em seu artigo *New Concepts on MV Distribution From Insulated Shield Wires Of HV Lines*. Na oportunidade, em 1989, o artigo

descreve a experiência da utilização do PRE em Gana, na África, com o objetivo de abastecer comunidades formadas ao longo de uma linha de alta tensão (HV). Nesta experiência, os cabos para-raios foram energizados em média tensão (MV), de 10 a 34,5 kV, Iliceto et al (1989). Os resultados apresentados foram obtidos a partir da operação do sistema proposto ao longo de 33 meses, abastecendo cargas monofásicas e trifásicas a partir de uma linha de 161 kV.

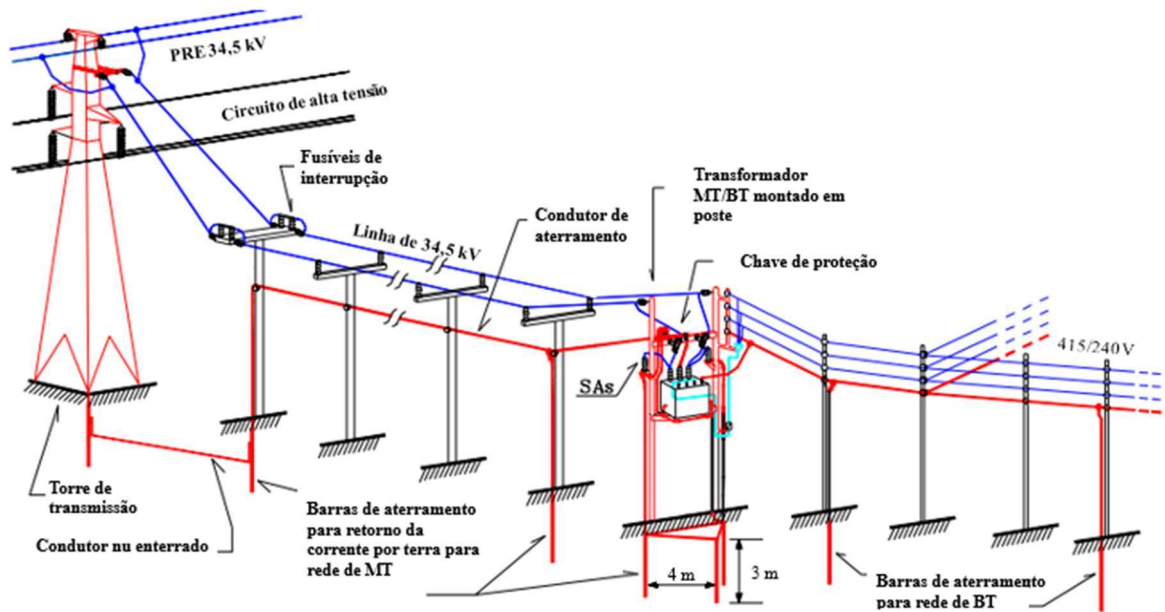
A proposta consiste no isolamento dos cabos para-raios, dispostos sobre as linhas de alta tensão, pelo uso de isoladores suspensos, e a energização desses cabos em média tensão, sem comprometer a função desses condutores, que é a de proteger a linha de HV, de descargas atmosféricas. O objetivo é atingido isolando estes cabos, da torre, a partir do uso de centelhadores, ajustados de tal forma, que na ocorrência de um surto atmosférico, ocorre um curto-circuito entre as fases tirando o PRE de operação (RAMOS et al, 2010). Com o uso de transformadores abaixadores, a partir de uma das subestações da linha, pode-se abastecer cargas monofásicas, ou mesmo de cargas trifásicas, o que pode ser feito com alguns arranjos mecânicos e, nesse caso, o retorno da corrente se dá pelo solo, como terceira fase.

A utilização do PRE pode ser feita de quatro maneiras distintas, dependendo do número de cabos para-raios sobre a linha de alta tensão, podendo ser constituída de um único cabo, ou de dois cabos. (ROSE,1997):

- Com transmissão monofásica e retorno pela terra, quando houver um cabo para-raios.
- Com transmissão monofásica e retorno metálico quando houver 2 cabos para-raios.
- Com transmissão bifásica e retorno pela terra, o que constitui um sistema de distribuição trifásico.
- Com transmissão bifásica e retorno pela terra, o esquema em “V”, constituindo um sistema trifásico a 4 fios.

Destaca-se que os esquemas que utilizam o retorno pela terra são os mais econômicos, quando aplicados em locais com solo de baixa ou média resistividade (RAMOS, 2010). A figura 10 ilustra o esquema trifásico a 4 fios.

Figura 10: Distribuição por PRE de MV para LV a 4 fios



Fonte: Adaptado de Iliceto et al, 2005

Ramos et al, em seu artigo intitulado "Desempenho Técnico e Operacional da Tecnologia Para-raios Energizado (PRE) no estado de Rondônia", mostra, o desempenho positivo, técnico e operacional, da linha PRE, implantada no Brasil pela Eletronorte e a atual Eletrobras. Ou seja, de acordo com a demanda e dada a necessidade regional, o sistema pode ser uma boa solução, pois não influencia na linha de HV, à qual tem proximidade, e representa uma economia substancial pelo fato de evitar o acionamento de termelétricas. Além disso, apresenta uma redução de custos de, aproximadamente 10 vezes, em relação à implantação de uma linha de distribuição de MV.

#### 4 DESENVOLVIMENTO DA TÉCNICA PROPOSTA

Embora já existam estudos demonstrativos de outras propostas semelhantes como em (BORGES, 2017), o sistema desenvolvido consiste em uma montagem em pequena escala de um sistema de transmissão trifásico a dois fios, em baixa tensão, utilizando o solo como terceira fase. Apesar de outros estudos teóricos, o trabalho aqui proposto foca na montagem real desse sistema, e com especial atenção ao valor da resistência de aterramento. Pretende-se fazer uma breve análise do comportamento da corrente elétrica pelo solo e verificar os principais fatores que influenciam em sua transmissão em baixa tensão. Inicialmente a transmissão pelo solo se dará por uma distância aproximada de 50 metros, devido às limitações de espaço do local da montagem. A montagem foi feita em local urbano, mas em área arborizada de mata nativa preservada, junto ao prédio do Departamento de Ciências Exatas e Engenharias (DCEEng) da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), localizada no município de Ijuí-RS. Para efetuar as medições de tensão e corrente, mostradas nos capítulos seguintes, foi utilizado o analisador de energia DRANETZ, de propriedade do Departamento de Engenharia da UNIJUI. Os condutores utilizados foram cabos de cobre de 2,5 mm<sup>2</sup>, que de acordo com o fabricante, possui resistência de 0,00887 Ω/m e reatância indutiva de 0,00015 Ω/m. A figura 11 mostra a montagem, usando cabos de cobre de 2,5 mm<sup>2</sup>, tanto nas 2 fases aéreas, quanto na fase aterrada, até o bastão de aterramento.

Figura 11: Duas fases aéreas e uma aterrada

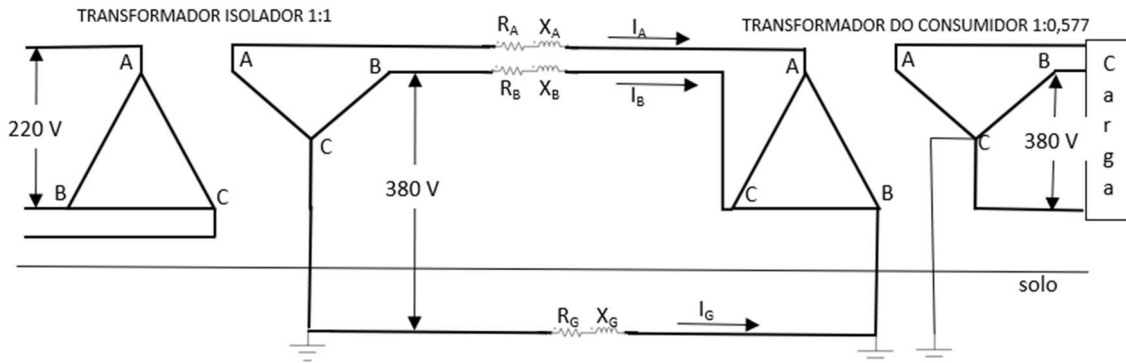


Fonte: autor

#### 4.1 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DO SISTEMA

Pretende-se demonstrar a real possibilidade de transmissão de eletricidade pelo solo, com o uso de um transformador isolador de relação 1:1, do lado da fonte. A figura 12 ilustra o esquema utilizado.

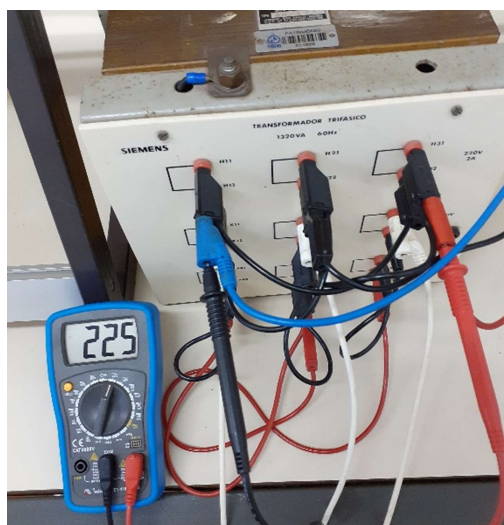
Figura 12: Relação de transformação usando tensão de linha



Fonte: autor

No primário é conectada uma tensão trifásica 220 V em delta e seu secundário está em estrela, cuja tensão de saída obedece a relação de transformação  $\Delta/Y$ . Pelo lado do consumidor, onde se pretende conectar as cargas, é usado um transformador abaixador, com a mesma configuração de conexão  $\Delta/Y$ , porém com relação de transformação  $1: 1/\sqrt{3}$ .

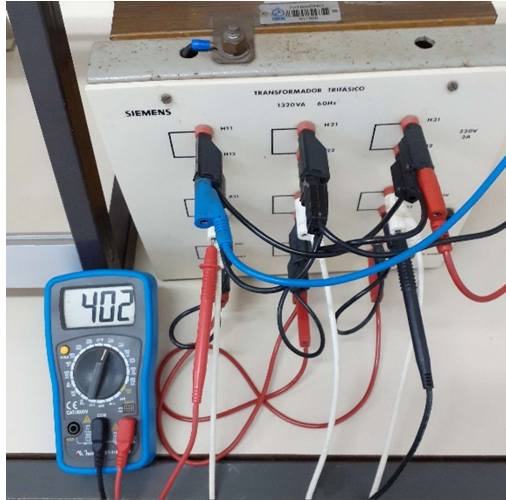
Figura 13: Tensão de linha na entrada no transformador isolador



Fonte: autor

Assim, no transformador isolador, tem-se no primário  $V_{AB} = V_{AC} = V_{BC} = 220 \text{ V}$ , e no secundário  $V_{AB} = V_{AC} = V_{BC} = 380 \text{ V}$ . A figura 13 ilustra a tensão no primário e a figura 14 ilustra a tensão no secundário.

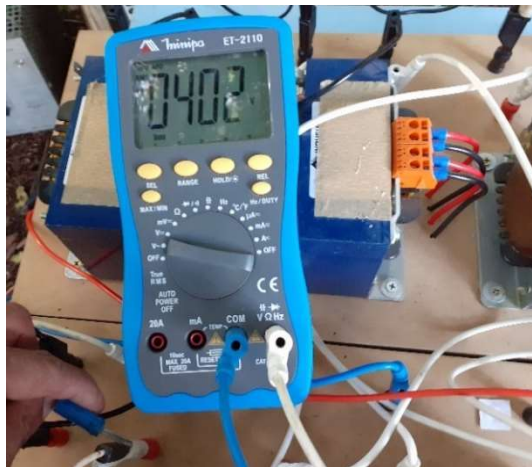
Figura 14: Tensão de linha no secundário do transformador isolador



Fonte: autor

Observa-se que a tensão no secundário, com o transformador a vazio, surge um pouco acima do valor esperado pela relação de transformação, devido à necessidade de compensação pelas perdas por histerese, e principalmente pelas perdas no cobre, de acordo com Oliveira, José Carlos et al., (1984 p.19).

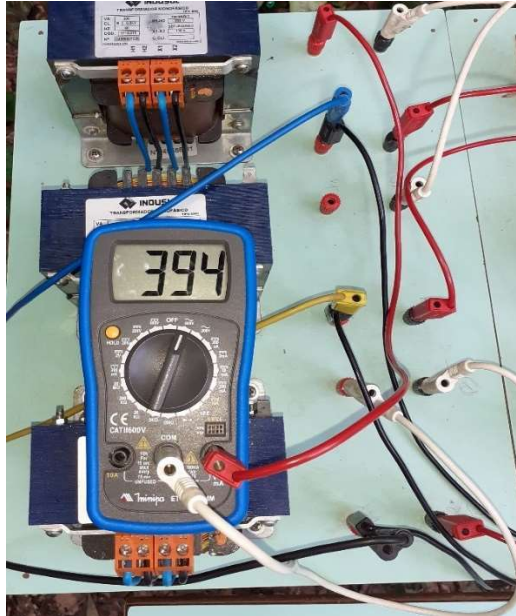
Figura 15: Tensão de linha no primário do transformador do consumidor



Fonte: autor

Pelo lado do consumidor, tem-se o mesmo esquema de ligação  $\Delta/Y$ , porém com redução de tensão pelo fator  $\sqrt{3}$ , assim, no primário  $V_{AB} = V_{AC} = V_{BC} = 380 \text{ V}$  e no secundário  $V_{AB} = V_{AC} = V_{BC} = 380 \text{ V}$ . A figura 15 ilustra as tensões medidas no primário, e a figura 16 ilustra as tensões no secundário.

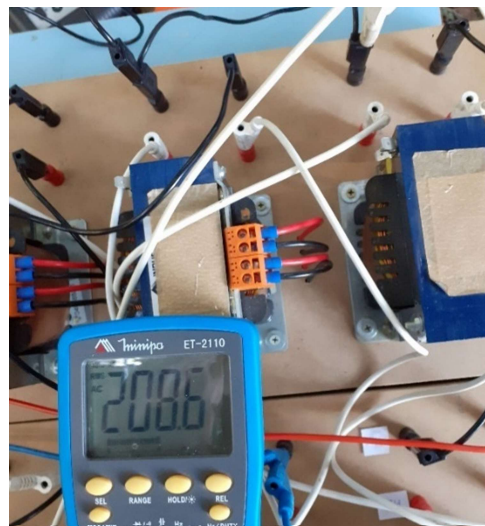
Figura 16: Tensão de linha no secundário do transformador do consumidor



Fonte: autor

Para as tensões usuais, tem-se as tensões de fase, ou seja,  $V_{AN} = V_{BN} = V_{CN} = 220 \text{ V}$ . A figura 17 ilustra essa medida na saída do transformador pelo lado do consumidor.

Figura 17: Tensão de fase do lado do consumidor



Fonte: autor

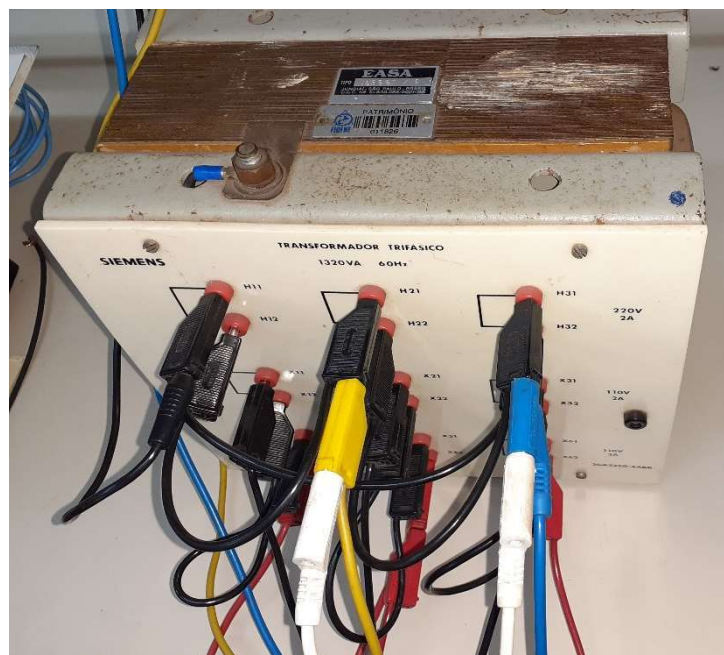
## 4.2 OS TRANSFORMADORES PROPOSTOS AO SISTEMA

Para a transformação da tensão trifásica optou-se por usar 2 grupos de 3 transformadores monofásicos de 1 kVA cada, e com a mesma configuração de construção, ou seja, construídos com a mesma relação de transformação, a vazio. No entanto, devido a algumas facilidades para a montagem no local onde foi realizada a atividade, optou-se por usar, pelo lado da fonte, um transformador trifásico pertencente ao laboratório da UNIJUI, que atenderia perfeitamente as necessidades do projeto.

O funcionamento dos transformadores, em paralelo, é perfeito quando a potência se divide espontaneamente e igualmente entre eles (MARTIGNONI, 1991). Essa condição é essencialmente encontrada, quando a vazio, os bornes secundários não acusam nenhuma troca de corrente elétrica.

As figuras 18 e 19 mostram o grupo de transformadores utilizados na montagem do sistema, para o lado da fonte e do consumidor, respectivamente.

Figura 18: Transformador trifásico conectado em  $\Delta/Y$ , pelo lado do distribuidor



Fone: autor

As relações de transformação das tensões propostas ao sistema são importantes em vários aspectos, ou seja, os transformadores propostos à montagem devem:

- Fornecer a demanda necessária à necessidade da proposta.
- Ser conectados de forma que atenda as especificidades do projeto.



Figura 19: Grupo de transformadores monofásicos, pelo lado do consumidor



Fonte: autor

Para isso, a proposta da configuração delta/estrela se traduz na melhor configuração, ou seja, o sistema  $\Delta/Y$  é escolhido para transmissões em alta tensão porque fornece uma tensão secundária de linha maior que a tensão nominal do transformador secundário.

O quadro 4 fornece as especificações relativas à resistência ( $R$ ) e à indutância ( $L$ ) dos enrolamentos, do transformador isolador. O enrolamento H representa o primário e o enrolamento X representa o secundário do transformador.

Quadro 4: Resistências e indutâncias do transformador isolador, por fase

		TR 1	TR 2	TR 3
H	R ( $\Omega$ )	1,3	1,2	1,3
	L (mH)	430	550	388
X	R ( $\Omega$ )	1,5	1,5	1,5
	L (mH)	227	339	243

Fonte: Autor

O quadro 5 mostra as especificações relativas à resistência (R) e à indutância (L) dos enrolamentos, do transformador pelo lado do consumidor. O enrolamento H representa o primário e o enrolamento X representa o secundário do transformador.

Quadro 5: Resistências e indutâncias do transformador do consumidor, por fase

		TR 3	TR 4	TR 5
H	R ( $\Omega$ )	4,5	4,0	3,7
	L (mH)	687	677	646
X	R ( $\Omega$ )	3,6	4,0	3,6
	L (mH)	648	658	648

Fonte: Autor

### 4.3 O ATERRAMENTO DO SISTEMA

Embora as condições ideais de aterramento estejam descritas no capítulo 3, optou-se aqui, principalmente por falta de experiência neste tipo de montagem, em iniciar-se o aterramento de maneira simples, ou seja, como se fosse utilizar o próprio aterramento de uma instalação consumidora residencial. Os aterramentos das instalações residenciais normalmente obedecem aos Regulamentos das Instalações Consumidoras (RIC), da concessionária local, além de atender a norma brasileira ABNT NBR 5410. O RIC/BT da CEEE, por exemplo, datado de março de 2017, prevê o uso de eletrodo de aterramento de 2000 mm ou de 2400 mm, e que em qualquer época do ano, a resistência de aterramento não deve ultrapassar 25  $\Omega$ . Esse valor de resistência de aterramento foi utilizado como balizador da montagem, ou seja, o aterramento foi parametrizado de acordo com as normas definidas pela ABNT NBR 5410.

Dessa forma, optou-se por utilizar eletrodos de aterramento convencional de 2,4 m (2400 mm) conforme previsto na NBR 5410, e sem fazer medições prévias, do lado do consumidor, inicialmente, utilizou-se um eletrodo de 1200 mm. Para todas as situações propostas foram medidas as resistências de aterramento de acordo com a norma NBR 15749, com o uso de um terrômetro analógico conforme descrito no item 4.5.

### 4.4 O DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

A análise da qualidade da energia elétrica passa, necessariamente, pelo fator de desequilíbrio da tensão fornecida pelo distribuidor. O desequilíbrio da tensão, dado em

percentual, é conceituado pelo desequilíbrio da tensão de fase, entre fases, ou pelo desequilíbrio angular entre as mesmas. Em uma situação ideal, as tensões de fase têm todas 1 p.u., em módulo, e ângulos de  $0^\circ$ ,  $-120^\circ$  e  $120^\circ$ , respectivamente às fases A, B e C. Muitas podem ser as causas e as origens desse desequilíbrio, porém, a mais comum é a má distribuição das cargas, entre trifásicas e monofásicas para cada fase do sistema, ou seja, a má distribuição das cargas na instalação consumidora influencia diretamente no desequilíbrio. No caso de um sistema monofásico ou trifásico, o sistema será dito equilibrado quando as correntes que nele circulam são cuidadosamente distribuídas nas fases, de forma que, no caso trifásico, a corrente no ponto comum é igual a zero.

Várias são as maneiras e formas de cálculo para se obter o percentual de desequilíbrio de tensão trifásica, normatizadas por organismos internacionais. Neste trabalho foi adotado, o método utilizado pelo ONS/PRODIST usa a expressão conhecida como CIGRÉ-C04 que é definida por:

$$VUF = \sqrt{\frac{1-\sqrt{3-6\beta}}{1+\sqrt{3-6\beta}}} \times 100 \quad (29)$$

Onde

$$\beta = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (30)$$

Calculado, pelo método CIGRÉ apresentado pelas equações 29 e 30, o valor percentual de desequilíbrio não pode ser maior que 2 % (ONS/ANEEL) como limite global. Para o caso em estudo, optou-se por conectar somente cargas trifásicas equilibradas, e em seguida, a partir dos valores de tensão lidos, calcular o desequilíbrio de tensão para cada caso. Dessa forma fica evidente que o desequilíbrio não é causado pelo desequilíbrio das cargas, mas sim pelo desequilíbrio de tensão, resultante da alta resistência de aterramento para a fase aterrada. Esse desequilíbrio pode ser observado nos casos relatados no item 4.5, e são apresentados no apêndice E.

#### 4.5 DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA EXPERIMENTAL EM BT

Para observar o comportamento do sistema sob o ponto de vista do aterramento e da capacidade de condução de corrente pelo solo, foram conectadas diferentes tipos de cargas, resistiva e indutiva, pelo lado do consumidor. Para todos os casos, foram utilizados os mesmos tipos de carga, tanto resistiva, quanto indutiva. O quadro 6 mostra as configurações destas cargas.

Quadro 6: Cargas aplicadas ao sistema

CARGA	CARACTERÍSTICA	CONEXÃO
MOTOR TRIFÁSICO	½ cv - 1,1 A - 1700 rpm	Y/380 V
RESISTIVO 1	0,71 kΩ	Y/380 V
RESISTIVO 2	0,17 kΩ	Δ/380 V

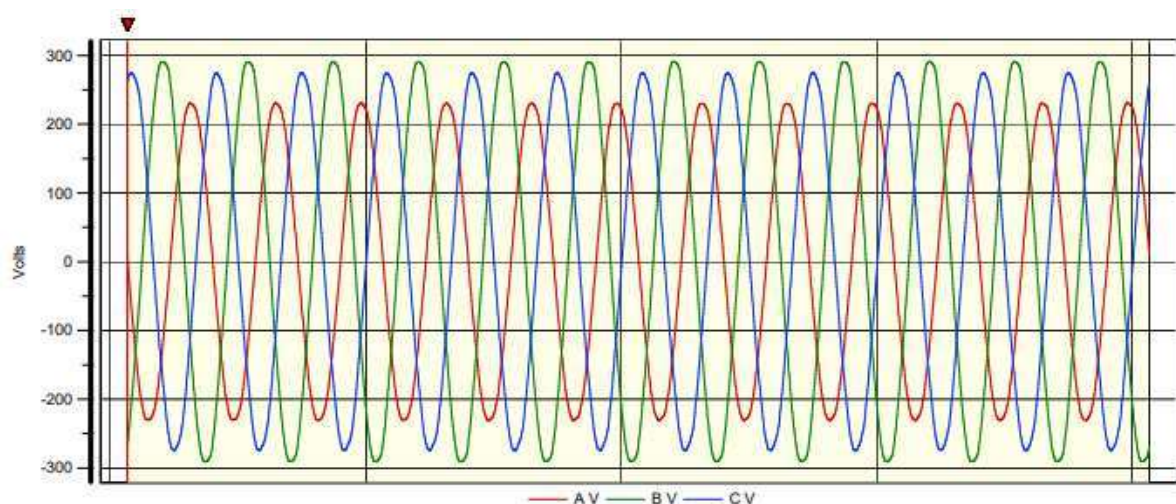
Fonte: autor

#### 4.5.1 O 1º caso

Na primeira tentativa de se conduzir eletricidade pelo solo, de forma a alimentar as cargas do quadro 6, o aterramento da 3ª fase foi construído com uma haste cobreada de 2,4 m, e o aterramento para “coletar” a 3ª fase do lado consumidor, foi feito com uma haste de 1,2 m. Os resultados de tensão e corrente estão representados nas figuras 20 e 21.

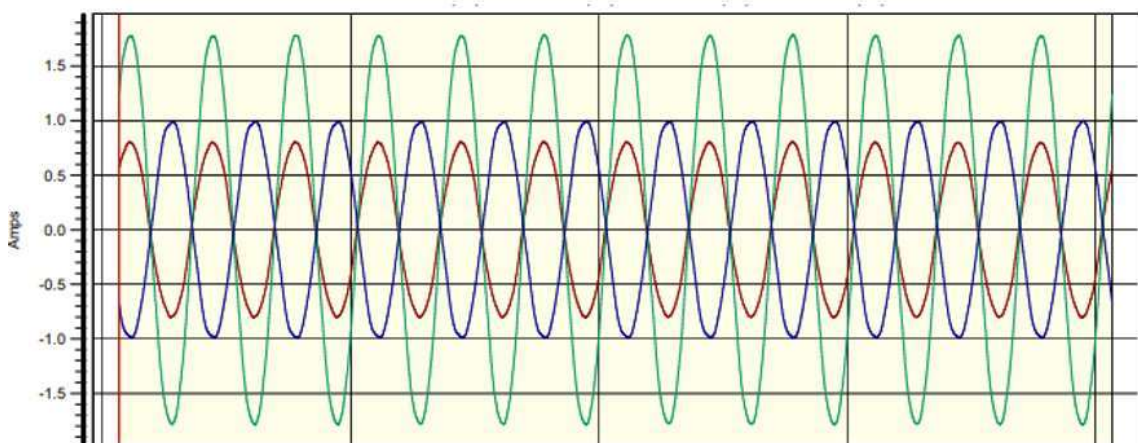
Para a carga indutiva, o comportamento da tensão está representado na figura 20, e da corrente em cada fase está representado na figura 21. Na figura 20, percebe-se que a fase aterrada (fase A) tem a maior queda de tensão, provocando um alto percentual de desequilíbrio. Ao se analisar a figura 21, o desequilíbrio fica mais evidente, pois percebe-se que a fase aterrada não atende a potência requerida pela carga.

Figura 20: Gráfico das tensões pelo lado do consumidor



Fonte: autor

Figura 21: Gráfico das correntes pelo lado do consumidor  $I_a=1,0$  A;  $I_b=1,7$  A;  $I_c=0,7$  A



Fonte: autor

Assim, torna-se necessário medir o valor das resistências de aterramento, pois as mesmas devem estar acima do desejado. Ou seja, se a resistência de aterramento for muito alta, há uma queda de tensão acentuada, o que acaba por provocar o desequilíbrio percentual entre as fases.

O procedimento inicial para medição da resistência de aterramento foi feito pelo método de queda de potencial, de acordo com a ABNT NBR 15749:2009, com o uso do terrômetro ICCEL TR-4120 analógico, mostrado na figura 22. Os resultados obtidos estão representados nas figuras 23 e 24.

Figura 22: Terrômetro



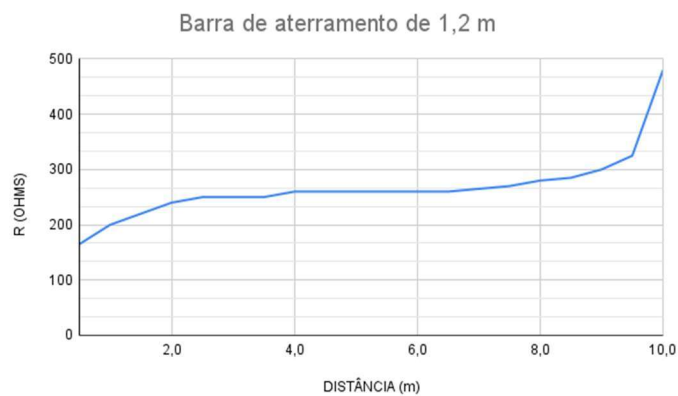
Fonte: autor

Figura 23: Resistência de aterramento do transformador isolador



Fonte: autor

Figura 24: Resistência de aterramento do transformador consumidor



Fonte: autor

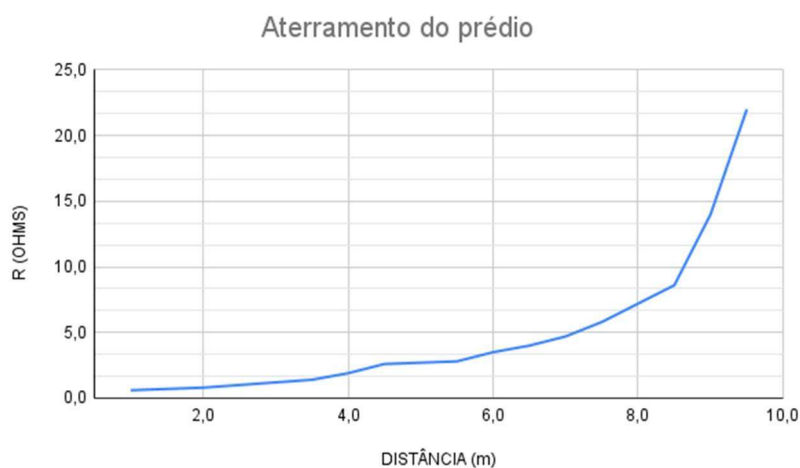
Para esse 1º caso ficou evidente que o sistema proposto não foi satisfatório, principalmente na fase aterrada, pela alta resistência de aterramento. Desprezando-se a resistência do solo, que conforme descrito no capítulo 3, pode ser desprezada, para essas condições, devido ao seu baixo valor, percebe-se que a resistência de aterramento, considerando-se os dois eletrodos, facilmente supera os 300  $\Omega$ . Assim, optou-se por reduzir a resistência de aterramento do transformador isolador e consumidor.

#### 4.5.2 O 2º caso

Na segunda montagem proposta, a fase aterrada foi conectada a um aterramento 2,7  $\Omega$ , usando o aterramento do prédio local. A resistência foi novamente medida de acordo com a ABNT NBR 15749:2009, com o uso do terrômetro ICEL TR-4120 analógico. O resultado obtido está representado na figura 25. Do lado do consumidor, utilizou-se um eletrodo de

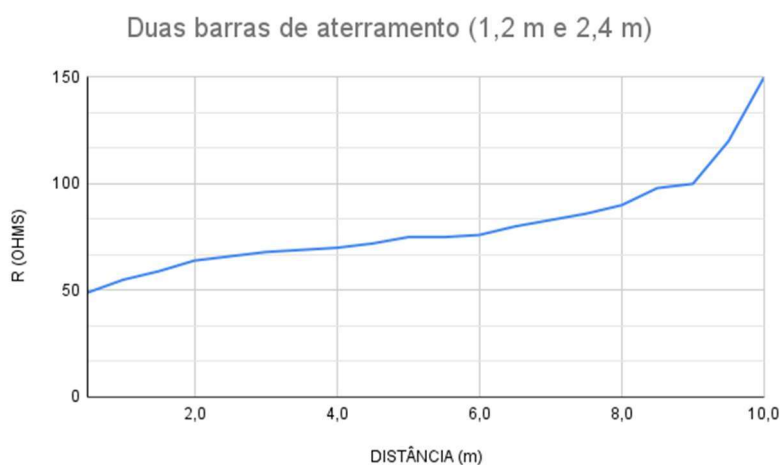
aterramento de 2,4 m, mais um eletrodo de 1,2 m de profundidade, com afastamento de 2 metros entre si, o que resultou em uma resistência de aterramento de  $75 \Omega$ , medida pela mesma metodologia anterior, para “coletar” a mesma fase. O resultado está representado na figura 26.

Figura 25: Aterramento do prédio



Fonte: Autor

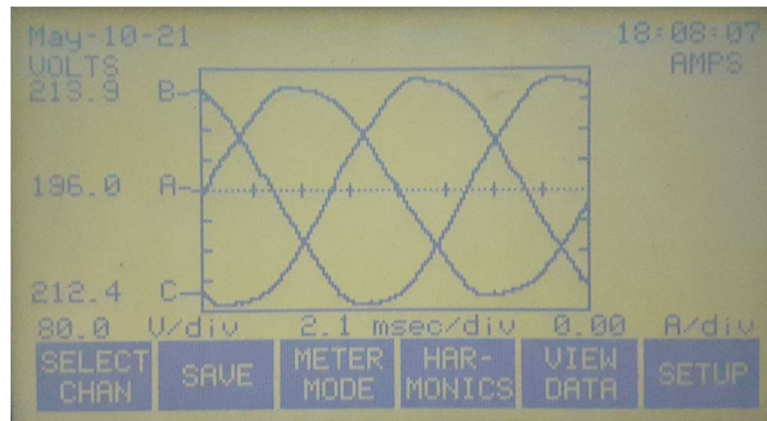
Figura 26: Aterramento com 2 barras



Fonte: autor

Com a melhoria dos sistemas de aterramento, percebe-se uma sensível melhora nos níveis de tensão. A figura 27 ilustra o comportamento das tensões quando conectado o motor trifásico do quadro 6. Com a conexão da carga indutiva, o desequilíbrio de tensão permaneceu em 5,46 %, como ilustrado no quadro 7.

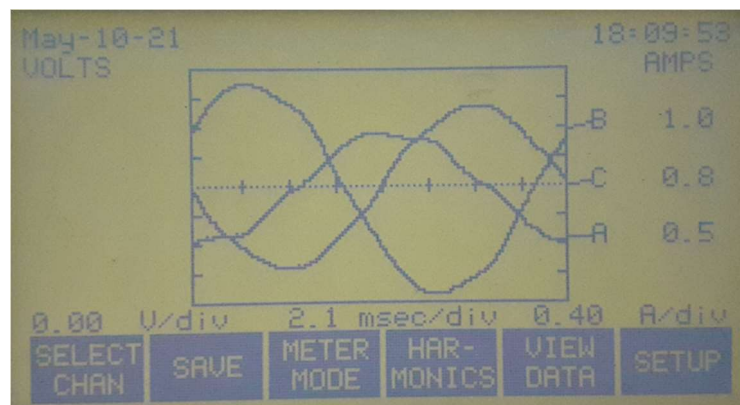
Figura 27: Tensões para o motor trifásico do quadro 6



Fonte: autor

Com a melhora dos níveis de tensão, o equilíbrio das correntes, por fase também melhorou. Observa-se que a fase aterrada ainda permanece com um nível de corrente elétrica menor que as fases aéreas, resultando em um desequilíbrio entre as fases. A figura 28 ilustra essa condição. Embora haja um claro desequilíbrio nos níveis de tensão e de corrente, optou-se por conectar algumas cargas resistivas, de diferentes valores para observar o comportamento do sistema.

Figura 28: Correntes para o motor trifásico do quadro 6

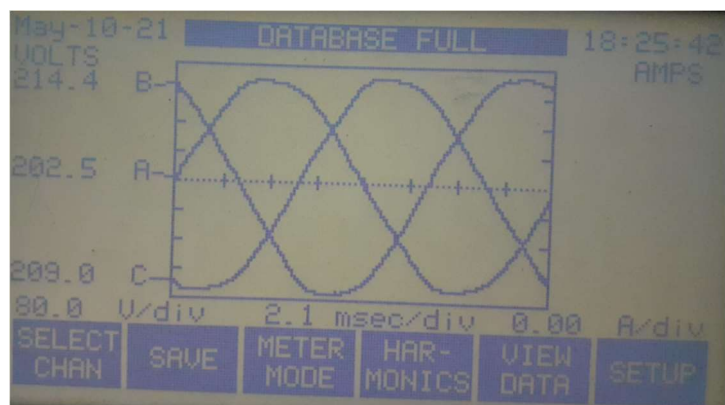


Fonte: autor

Assim, foram conectadas duas cargas resistivas trifásicas, como mostrado no quadro 6. As figuras 29, 30, 31 e 32 ilustram as tensões e as correntes para as cargas de 0,71 k $\Omega$  e de 0,17 k $\Omega$ , respectivamente.

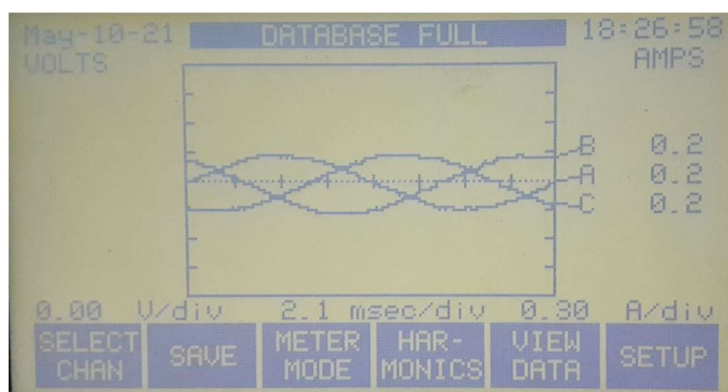


Figura 29: Tensões para carga resistiva 1



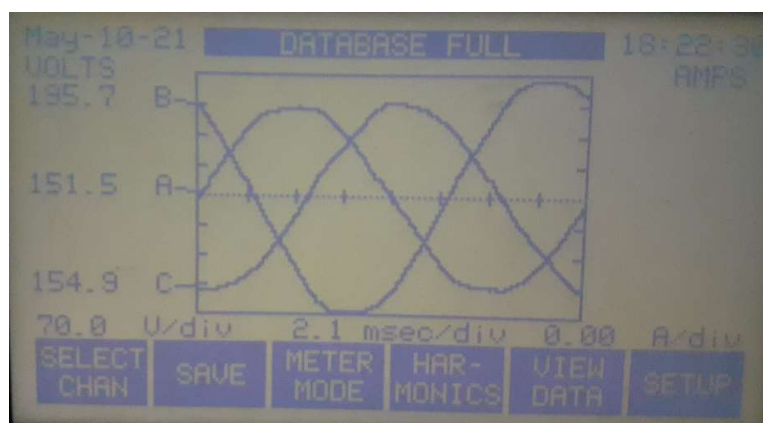
Fonte: autor

Figura 30: Correntes para carga resistiva 1



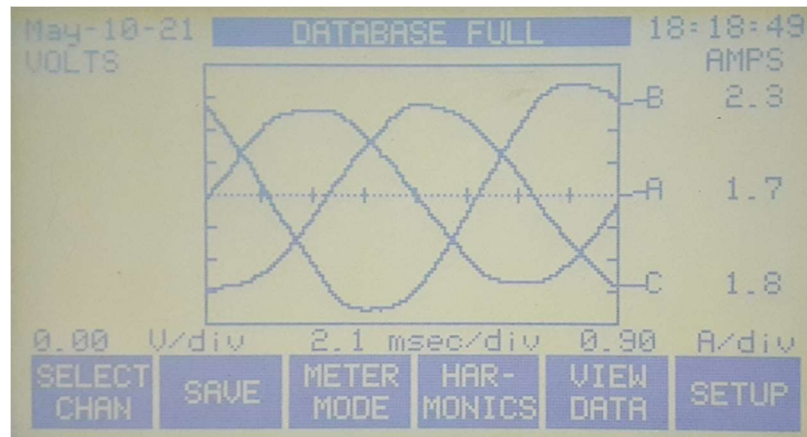
Fonte: autor

Figura 31: Tensões para carga resistiva 2



Fonte: autor

Figura 32: Correntes para carga resistiva 2



Fonte: autor

Ainda que evidentes os desequilíbrios de tensão, optou-se em verificar o quão próximo do percentual permitido pelo ONS/PRODIST o mesmo se verifica. O quadro 7 ilustra esse desequilíbrio para cada tipo de carga.

Quadro 7: Desequilíbrio de tensão para as cargas do quadro 6

	Vab	Vbc	Vac	Van	Vbn	Vcn	Ia	Ib	Ic	% V
Vazio	360,9	365,4	374,2	210,7	217,4	217,9	-	-	-	2,13
Indutivo	339,0	370,0	367,4	196,0	213,9	212,4	0,532	1,03	0,781	5,46
Resistivo 1	350,0	370,9	361,6	202,5	214,4	209,0	0,2	0,2	0,2	3,29
Resistivo 2	262,0	338,5	268	151,5	195,7	154,9	1,7	2,3	1,8	17,99

Fonte: autor

Analisando o quadro 7, percebe-se que o desequilíbrio de tensão fica próximo dos valores permitidos (2%) somente quando não tiver cargas, ficando muito acima do aceitável quando conectadas as cargas. Assim, resta melhorar o nível de aterramento.

#### 4.5.3 O 3º caso

Na realização da terceira montagem, a fase aterrada foi novamente conectada ao um aterramento  $2,7 \Omega$ , usando o aterramento do prédio local. Pelo lado do consumidor, a resistência foi novamente medida de acordo com a ABNT NBR 15749:2009, com o uso do terrômetro ICEL TR-4120 analógico. Dessa vez foram usadas duas barras de 2,4 m, uma barra de 1,2 m e

mais duas barras de 0,6 m. As barras de 2,4 m e de 1,2 m ficaram distanciadas de 3,0 m entre si, enquanto as duas barras de 0,6 m ficaram distanciadas de 1 m das primeiras. O aterramento, ficou reduzido a 38  $\Omega$ , como ilustrado no gráfico da figura 33.

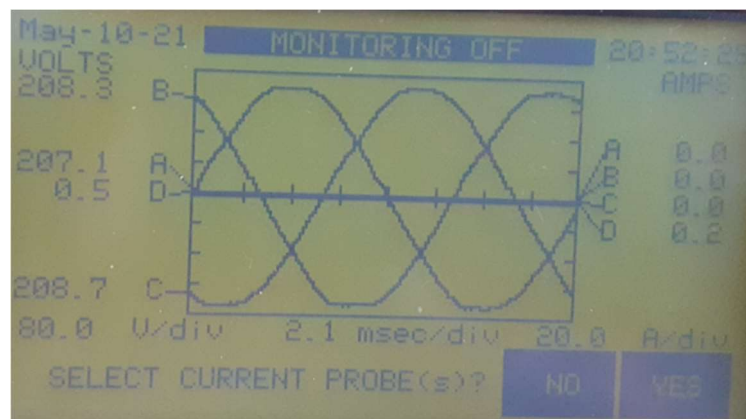
Figura 33: Aterramento com 5 barras distintas no lado do consumidor



Fonte: Autor

Com o nível de aterramento melhorado, novamente foram conectadas as cargas do quadro 6, e o comportamento das tensões e das correntes estão demonstrados nas figuras obtidas com o analisador de energia DRANETZ. A figura 34 mostra as tensões de fase na saída do transformador do consumidor. Percebe-se que para esse caso, o desequilíbrio de tensão permanece em 0,67 % (apêndice E), dentro dos parâmetros aceitáveis pela norma do PRODIST/ONS.

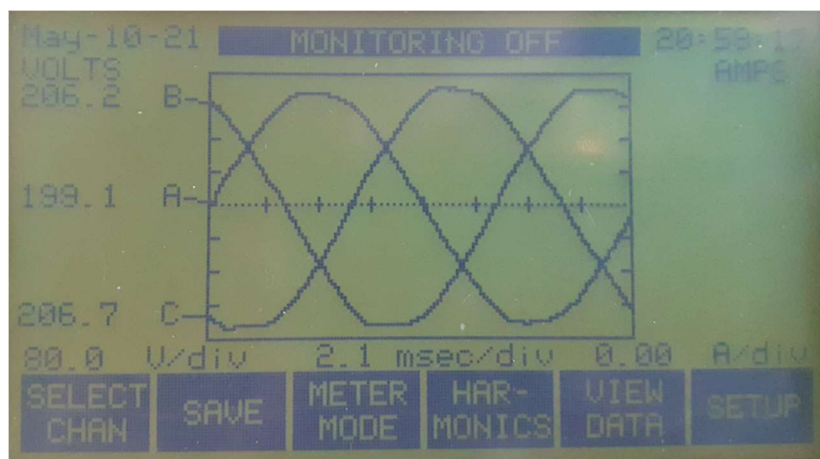
Figura 34: Tensões de fase a vazio



Fonte: autor

Ao conectar-se a carga indutiva, com o aumento de corrente, e a significativa queda de tensão da fase A (fase aterrada), o desequilíbrio volta a aumentar, chegando a 2,29 % (apêndice E), o que novamente extrapola o valor permitido. A figura 35 mostra as tensões de fase para esse caso.

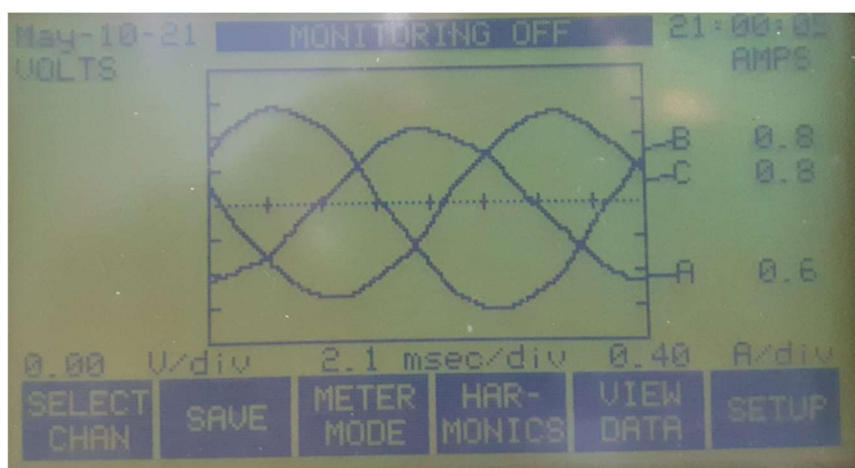
Figura 35: Tensões para carga indutiva



Fonte: autor

Comparativamente, aos casos anteriores, percebe-se que os valores da corrente elétrica já permanecem bem mais próximos entre si, melhorando o equilíbrio do circuito. O que demonstra que com a melhora constante do aterramento, pode-se chegar aos valores que estejam dentro dos limites aceitáveis de desequilíbrio de tensão, para a transmissão da eletricidade pelo solo. A figura 36 ilustra os valores da corrente para este caso.

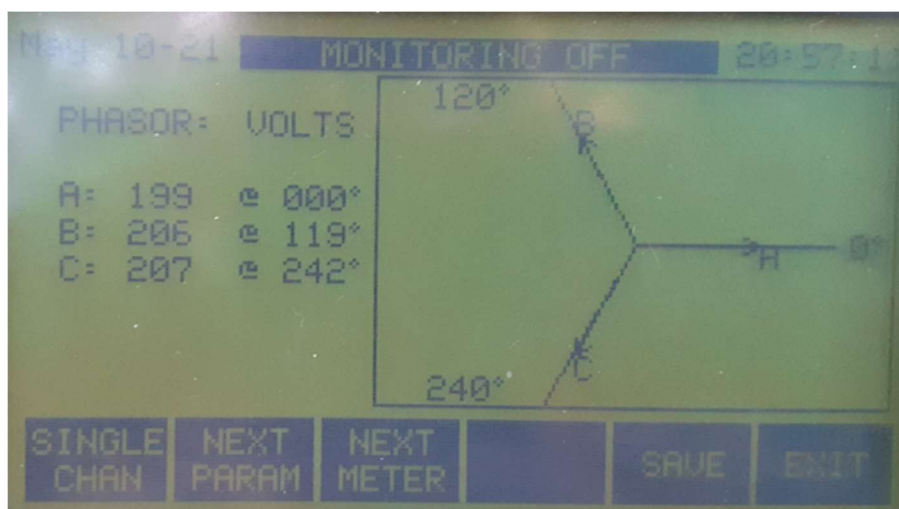
Figura 36: Correntes para carga indutiva



Fonte: autor

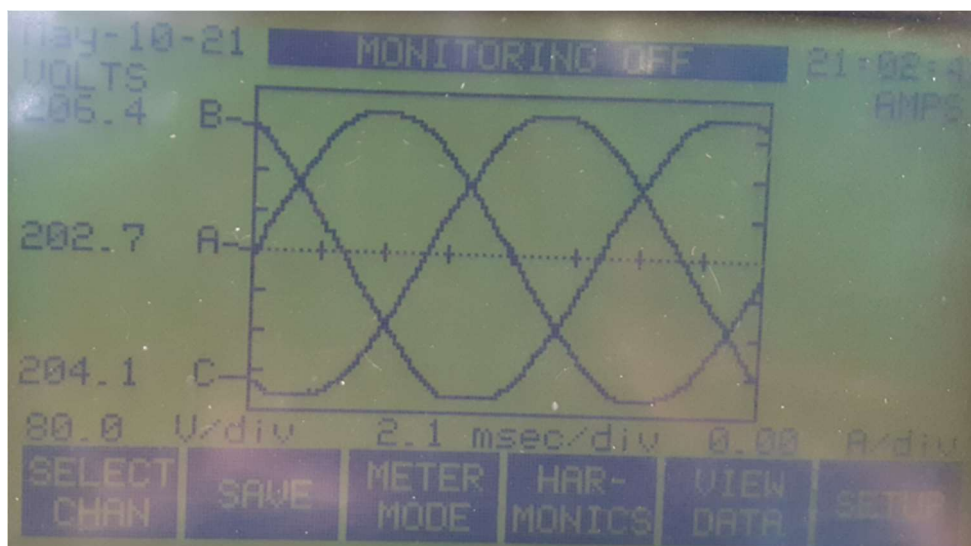
A figura 37 mostra os fasores da tensão para a carga indutiva, demonstrando que há um deslocamento bem pequeno das tensões, em relação ao ideal. A figura 38 ilustra o comportamento das tensões para a carga resistiva 1, sendo que para esta situação, o desequilíbrio das tensões permaneceu em 1,02 % (apêndice E), e a figura 39 ilustra os fasores das tensões para essa carga.

Figura 37: Fasor da tensão para carga indutiva



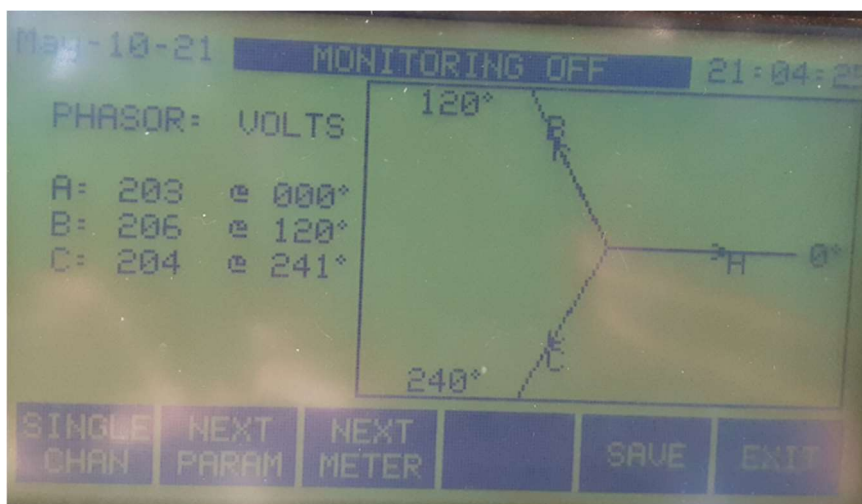
Fonte: autor

Figura 38: Tensões para carga resistiva 1



Fonte: autor

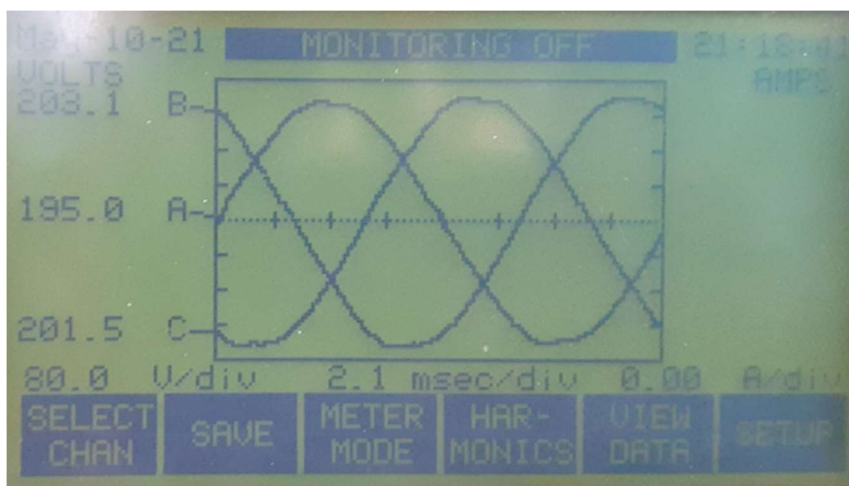
Figura 39: Fasores da tensão para carga resistiva 1



Fonte: autor

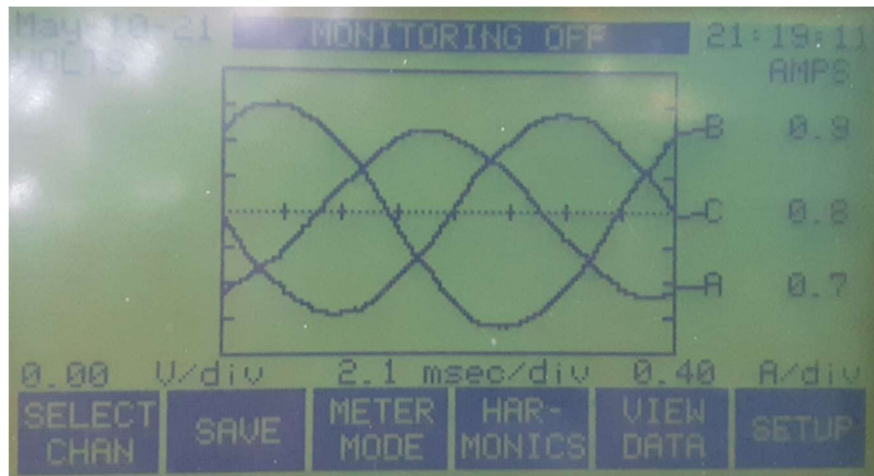
Ainda para verificar o comportamento de 2 tipos de cargas conectadas ao sistema neste último valor de aterramento, foram conectadas simultaneamente a carga indutiva e a carga resistiva 1. Os níveis de tensão, os valores das correntes e os fasores das tensões para esta situação estão mostrados nas figuras 40, 41 e 42.

Figura 40: Tensões para carga resistiva 1 e carga indutiva



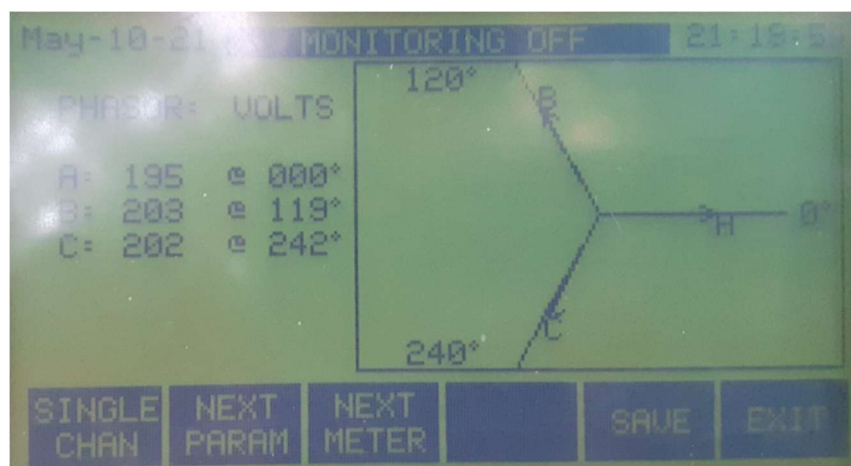
Fonte: autor

Figura 41: Correntes para a carga resistiva 1 e carga indutiva



Fonte: autor

Figura 42: Fasor das tensões para as cargas resistiva 1 e carga indutiva



Fonte: autor

Para este último caso, com dois tipos diferentes de cargas, o desequilíbrio de tensão permanece em 2,5 % (apêndice E), o que demonstra que se está bastante perto da situação estabelecida pelo PRODIST, que é de 2%. Destaque-se que a falta de capacidade de condução de corrente pela fase A, deve-se totalmente ao alto valor da resistência de aterramento pelo lado do consumidor.

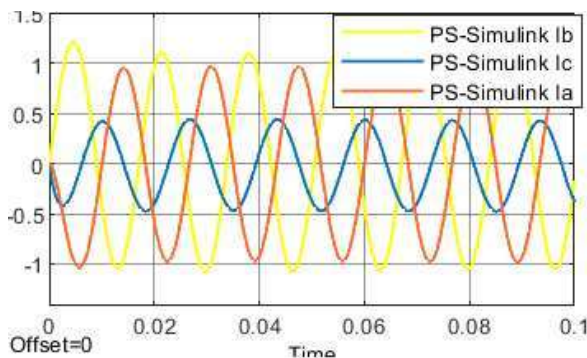
As simulações computacionais mostradas a seguir são capazes de demonstrar o valor mínimo para que se consiga chegar ao valor de aterramento considerado satisfatório. Ou seja, aquele valor que mantém o desequilíbrio de tensão dentro dos valores aceitáveis pelas normas.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Além da proposta experimental em BT desenvolvida, todos os casos apresentados foram simulados para as diversas situações de aterramento relatadas, com o intuito de se fazer um comparativo da situação real com aquela na qual o nível de resistência de aterramento tem valor bastante baixo. O *software* escolhido e utilizado foi o Matlab, com o uso do Simulink. Os esquemas das simulações para as diferentes cargas constam nos apêndices de A a D e mostram as conexões utilizadas para os 6 transformadores monofásicos. As resistências dos enrolamentos de cada transformador e suas indutâncias medidas, encontram-se nos quadros 4 e 5. Os resultados simulados e os resultados medidos para os diferentes casos de resistência de aterramento estão demonstrados a seguir. Percebe-se que em algumas situações há uma pequena diferença entre os dados simulados e os dados medidos, o que de fato pode ter ocorrido pela oscilação da tensão da rede de energia local, pois muitas das medições foram efetuadas em dias e horários diferentes.

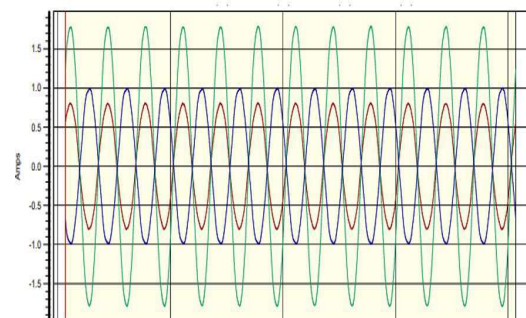
A figura 43 mostra os resultados simulados (a) e os resultados medidos (b) para o motor trifásico descrito no quadro 6 para o 1º caso, ou seja, com resistência total de aterramento equivalente a  $360 \Omega$ .

Figura 43: Correntes elétricas simuladas e medidas para 1º caso, carga indutiva



(a)  $I_a=0,98 \text{ A}$ ;  $I_b=1,19 \text{ A}$ ;  $I_c=0,48 \text{ A}$

Fonte: Autor

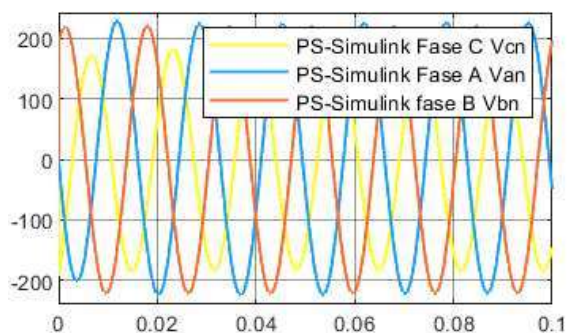


(b)  $I_a=1,0 \text{ A}$ ;  $I_b=1,75 \text{ A}$ ;  $I_c=0,70 \text{ A}$

Para o 2º caso, ou seja, para resistência total de aterramento de  $77,7 \Omega$ , a figura 44 (a) e (b) mostram as tensões de fase para o motor trifásico do quadro 6. A figura 45 (a) e (b) mostram as correntes para a mesma situação.

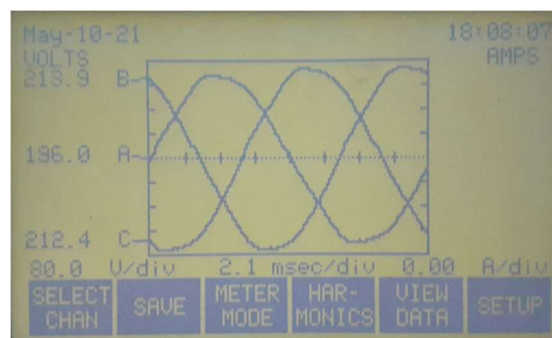


Figura 44: Tensões de fase simuladas e medidas para 2º caso, carga indutiva



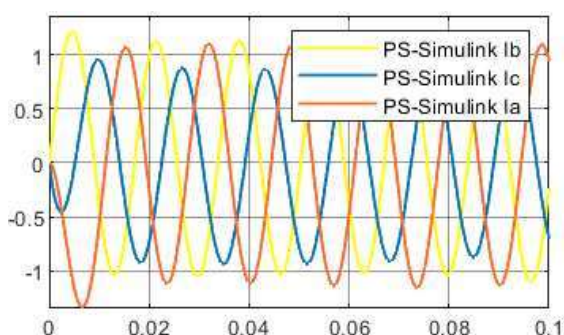
(a)  $V_{an}=182,3$  V;  $V_{bn}=220,8$  V;  $V_{cn}=220,6$  V

Fonte: Autor



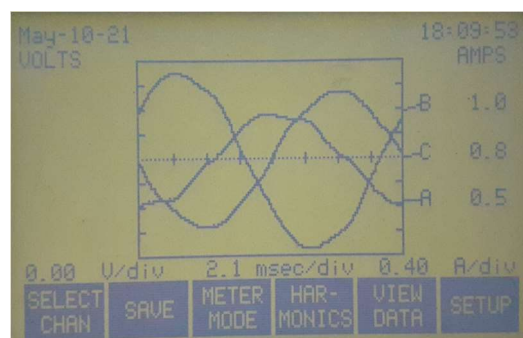
(b)  $V_{an}=196,0$  V;  $V_{bn}=213,9$  V;  $V_{cn}=212,4$  V

Figura 45: Correntes elétricas simuladas e medidas para 2º caso, carga indutiva



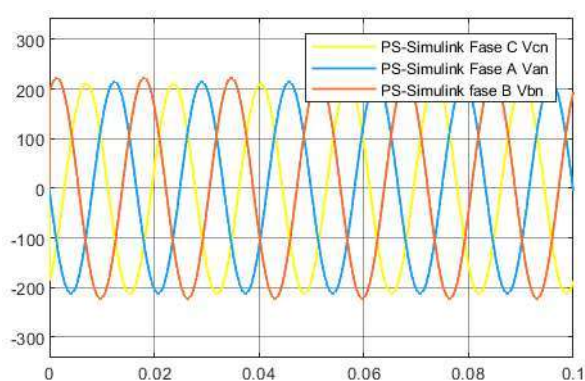
(a)  $I_a=0,84$  A;  $I_b=1,04$  A;  $I_c=1,08$  A

Fonte: autor



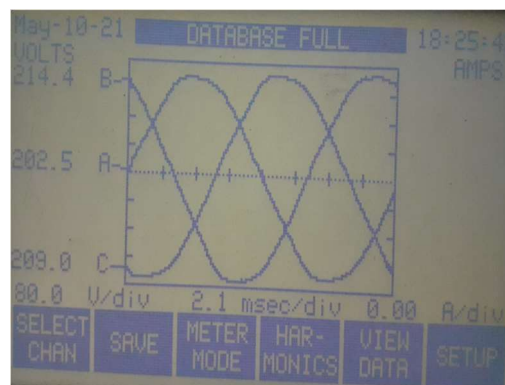
(b)  $I_a=0,5$  A;  $I_b=1,0$  A;  $I_c=0,8$  A

Figura 46: Tensões de fase simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 1



(a)  $V_{an}=212,2$  V;  $V_{bn}=214,3$  V;  $V_{cn}=210,6$  V

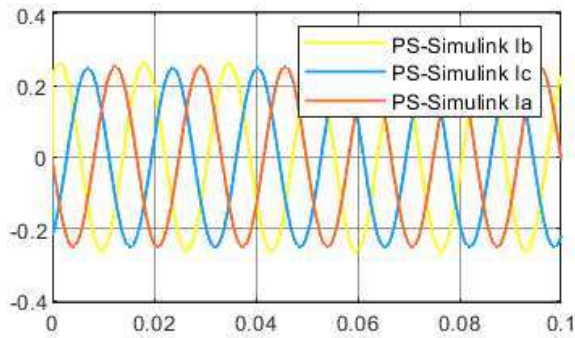
Fonte: Autor



(b)  $V_{an}=202,5$  V;  $V_{bn}=214,4$  V;  $V_{cn}=209,0$  V

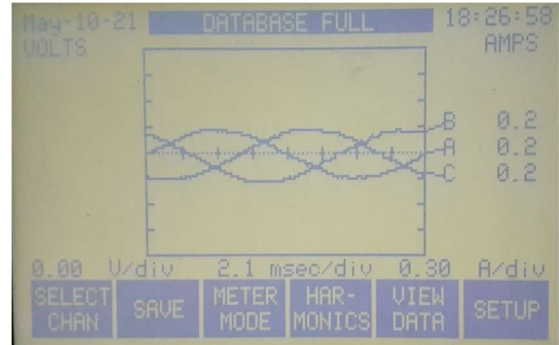
A figura 46 (a) e (b) mostram as tensões de fase simuladas e medidas para a carga resistiva 1, do quadro 6, e a figura 47 (a) e (b) mostram as correntes elétricas para a mesma situação, o 2º caso.

Figura 47: Correntes elétricas simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 1



(a)  $I_a=0,25$  A;  $I_b=0,26$  A;  $I_c=0,22$  A

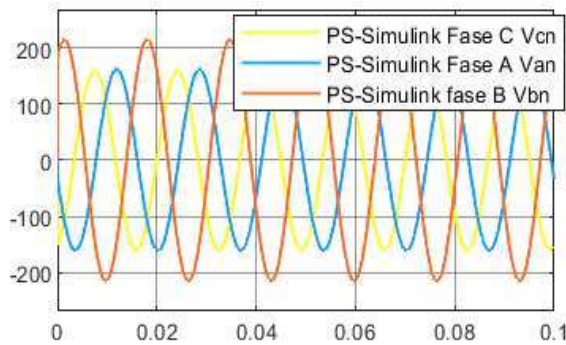
Fonte: Autor



(b)  $I_a=0,2$  A;  $I_b=0,2$  A;  $I_c=0,2$  A

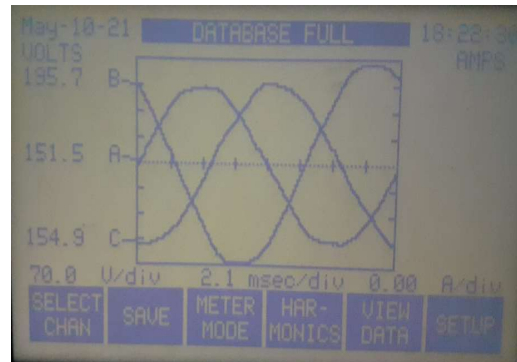
A figura 48 (a) e (b) mostram as tensões de fase simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 2.

Figura 48: Tensões de fase simuladas e medidas para o 2º caso, carga resistiva 2



(a)  $V_{an}=159,8$  V;  $V_{bn}=212,2$  V;  $V_{cn}=158,6$  V

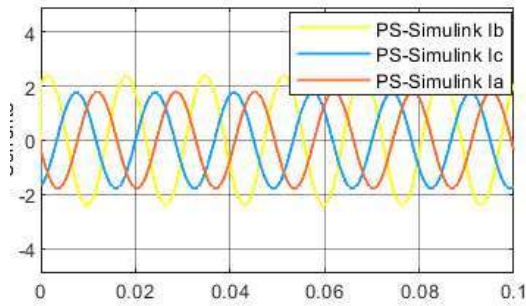
Fonte: Autor



(b)  $V_{an}=151,5$  V;  $V_{bn}=195,7$  V;  $V_{cn}=154,9$  V

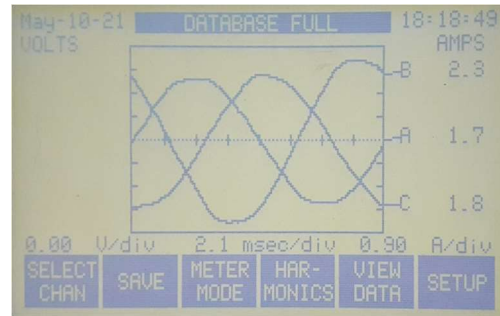
A figura 49 (a) e (b) mostram as correntes elétricas simuladas e medidas para a carga resistiva 2 e resistência de aterramento de  $75 \Omega$ .

Figura 49: Correntes elétricas simuladas e medidas para 2º caso, carga resistiva 2



(a)  $I_a=1,82$  A;  $I_b=2,38$  A;  $I_c=1,82$  A

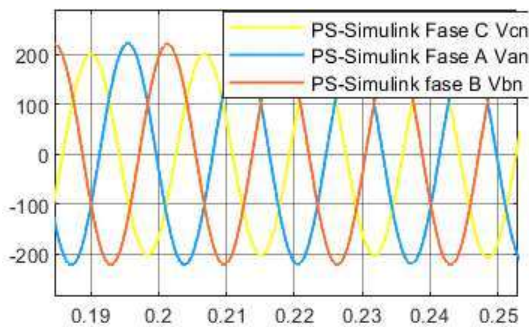
Fonte: Autor



(b)  $I_a=1,7$  A;  $I_b=2,3$  A;  $I_c=1,8$  A

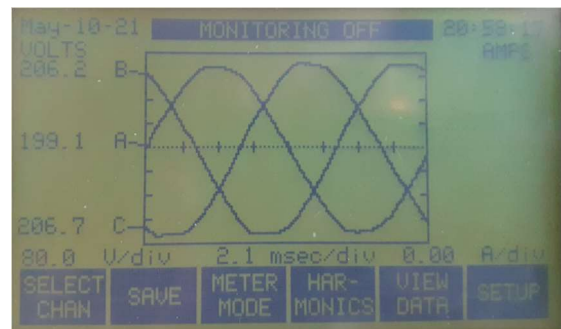
Para o 3º caso, além do comparativo simulado e medido, para a carga indutiva e resistiva do quadro 6, é mostrado também o resultado quando ambas as cargas são conectadas simultaneamente à montagem. A figura 50 (a) e (b) mostra as tensões de fase para a carga indutiva e a figura 51 (a) e (b) mostra as correntes para o mesmo caso.

Figura 50: Tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, carga indutiva



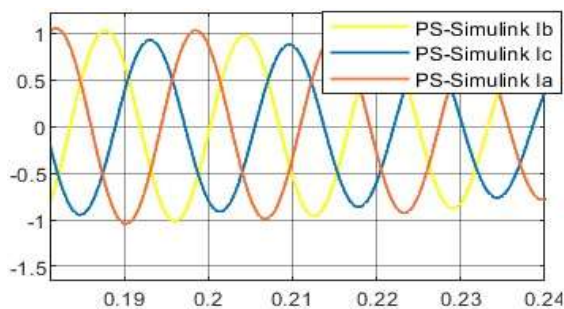
(a)  $V_{an}=214,2$  V;  $V_{bn}=215,4$  V;  $V_{cn}=200,5$  V

Fonte: Autor



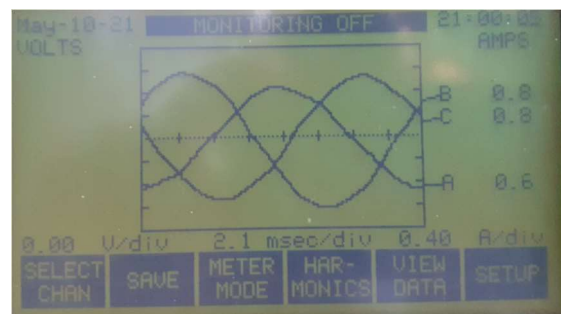
(b)  $V_{an}=199,1$  V;  $V_{bn}=206,2$  V;  $V_{cn}=206,7$  V

Figura 51: Correntes elétricas simuladas e medidas para 3º caso, carga indutiva



(a)  $I_a=0,87$  A;  $I_b=0,90$  A;  $I_c=1,06$  A

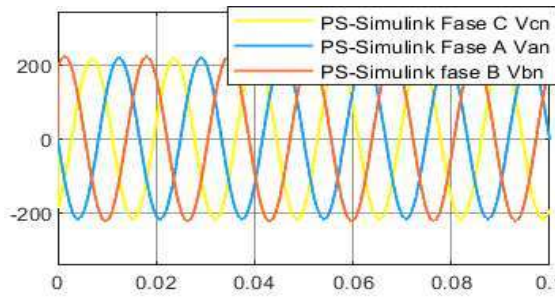
Fonte: Autor



(b)  $I_a=0,6$  A;  $I_b=0,8$  A;  $I_c=0,8$  A

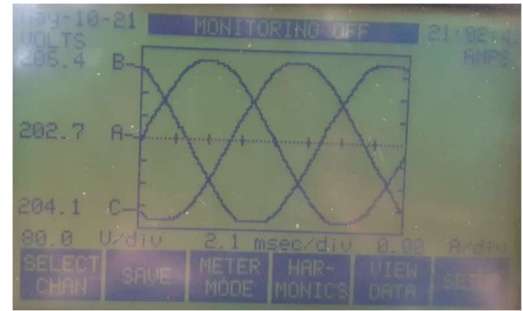
A figura 52 (a) e (b) mostra as tensões de fase para o 3º caso, quando conectada a carga resistiva R1. A figura 53 (a) e (b) mostra as tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, quando conectadas simultaneamente a carga indutiva e a carga resistiva R1. A figura 54 (a) e (b) mostra as correntes elétricas para o mesmo caso.

Figura 52: Tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, carga resistiva R1



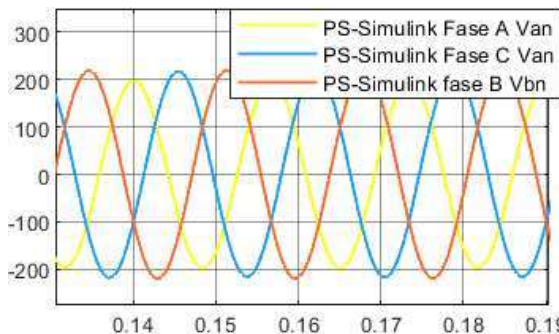
(a)  $V_{an}=213,2$  V;  $V_{bn}=217,4$  V;  $V_{cn}=215,8$  V

Fonte: Autor



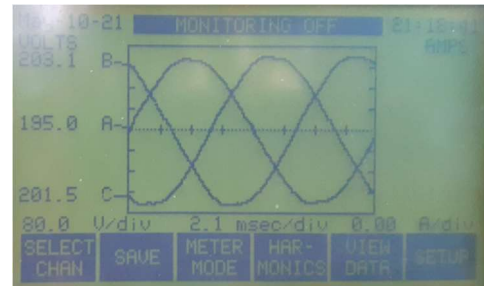
(b)  $V_{an}=202,7$  V;  $V_{bn}=206,4$  V;  $V_{cn}=204,1$  V

Figura 53: Tensões de fase simuladas e medidas para o 3º caso, carga indutiva e resistiva l



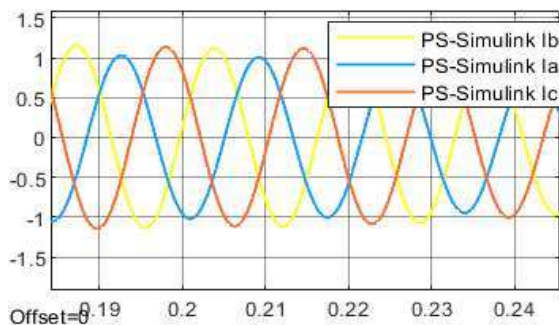
(a)  $V_{an}=197,5$  V;  $V_{bn}=219,0$  V;  $V_{cn}=217,4$  V

Fonte: Autor



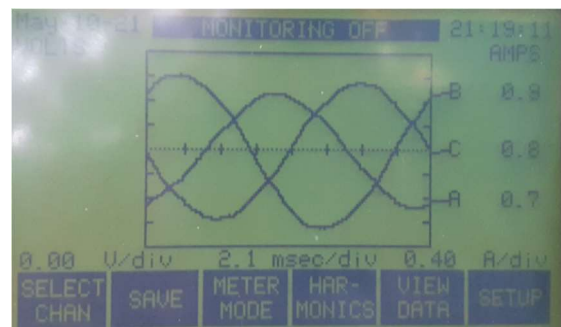
(b)  $V_{an}=195,0$  V;  $V_{bn}=203,1$  V;  $V_{cn}=201,5$  V

Figura 54: Correntes simuladas e medidas para o 3º caso, carga indutiva e resistiva l



(a)  $I_a=0,97$  A;  $I_b=1,09$  A;  $I_c=1,11$  A

Fonte: Autor



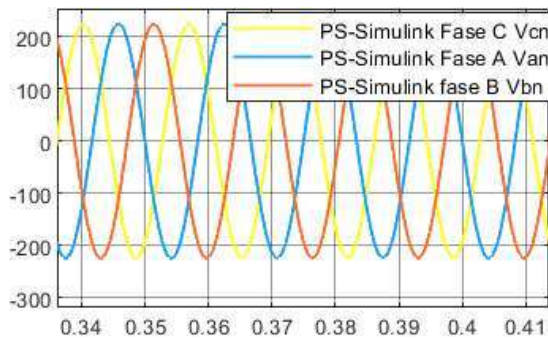
(b)  $I_a=0,7$  A;  $I_b=0,9$  A;  $I_c=0,8$  A

Com o intuito de obedecer aos Regulamentos das Instalações Consumidoras (RIC), bem como a norma brasileira ABNT NBR 5410, o aterramento do sistema deve ficar abaixo dos 25  $\Omega$ . Dessa forma, para observar o comportamento do sistema, foram efetuadas simulações com a resistência de aterramento bastante baixa, ou seja, com valores que tendem a manter o desequilíbrio de tensão abaixo dos 2%.

Embora a referência para a resistência total de aterramento tenha sido os 25  $\Omega$ , definidos pela NBR 5410 para instalações de BT, optou-se por simular um valor de resistência bastante baixo, de forma que aumentasse a eficiência e a confiabilidade da proposta. Neste contexto, os melhores resultados simulados para as cargas referidas no quadro 6, foram obtidos com resistência de aterramento total abaixo dos 10  $\Omega$ .

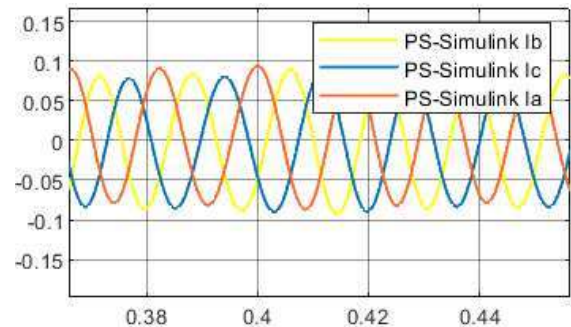
As figuras 55 a 58 mostram os resultados das simulações com resistência de aterramento total de 7,7  $\Omega$ , sendo 2,7  $\Omega$  do aterramento da fase no transformador isolador, e 5  $\Omega$  do aterramento do lado do consumidor.

Figura 55: Tensão e corrente elétrica simuladas para  $R_{\text{aterramento}}=7,7 \Omega$ , carga indutiva



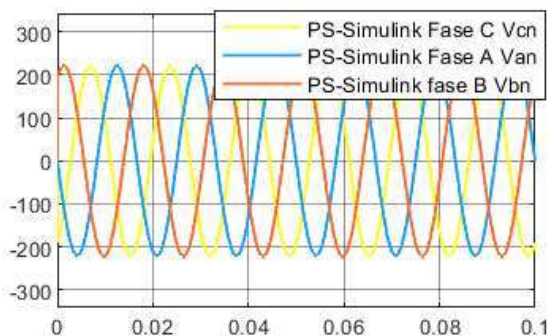
(a)  $V_{an}=223,0 \text{ V}$ ;  $V_{bn}=224,0 \text{ V}$ ;  $V_{cn}=223,8 \text{ V}$

Fonte: Autor



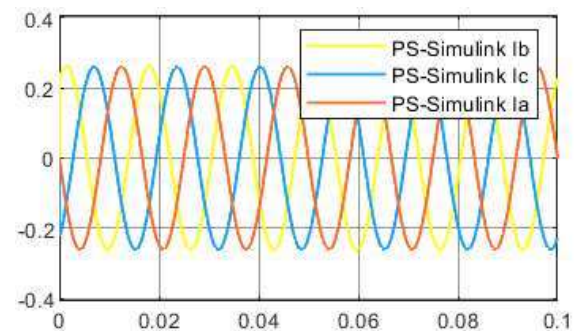
(b)  $I_a=0,094 \text{ A}$ ;  $I_b=0,086 \text{ A}$ ;  $I_c=0,080 \text{ A}$

Figura 56: Tensão e corrente elétrica simuladas para  $R_{\text{aterramento}}=7,7 \Omega$ , resistiva 1



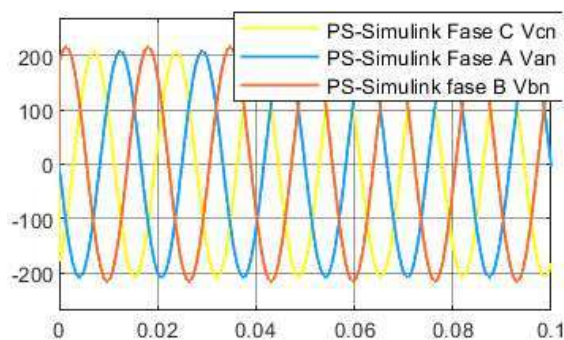
(a)  $V_{an}=220,2 \text{ V}$ ;  $V_{bn}=221,0 \text{ V}$ ;  $V_{cn}=220,9 \text{ V}$

Fonte: Autor



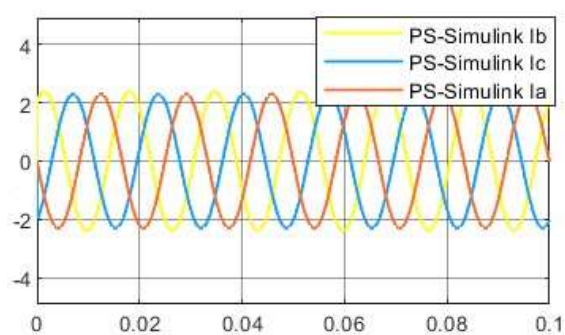
(b)  $I_a=0,26 \text{ A}$ ;  $I_b=0,26 \text{ A}$ ;  $I_c=0,26 \text{ A}$

Figura 57: Tensão e corrente elétrica simuladas para  $R_{\text{aterramento}}=7,7 \Omega$ , carga resistiva 2



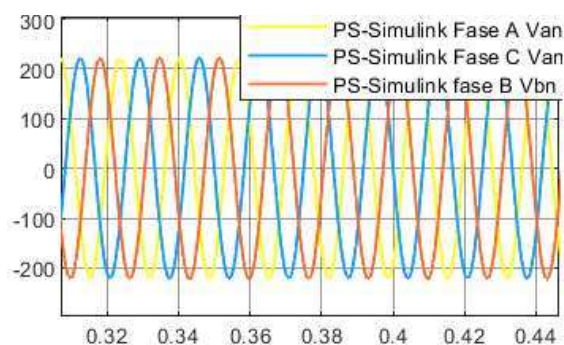
(a)  $V_{an}=212,8 \text{ V}$ ;  $V_{bn}=214,7 \text{ V}$ ;  $V_{cn}=210,5 \text{ V}$

Fonte: Autor



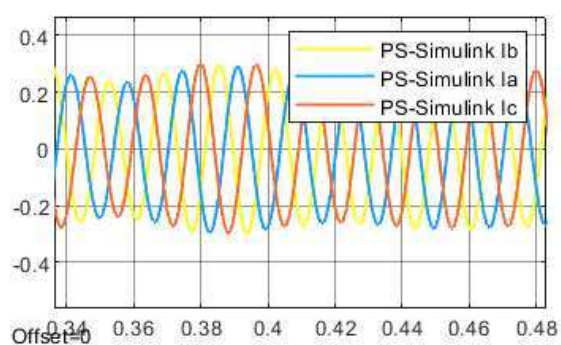
(b)  $I_a=2,35 \text{ A}$ ;  $I_b=2,39 \text{ A}$ ;  $I_c=2,29 \text{ A}$

Figura 58: Tensão e corrente elétrica simuladas para  $R_{\text{aterramento}}=7,7 \Omega$ , carga indutiva e resistiva 1



(a)  $V_{an}=220,5 \text{ V}$ ;  $V_{bn}=222,1 \text{ V}$ ;  $V_{cn}=221,2 \text{ V}$

Fonte: Autor



(b)  $I_a=0,28 \text{ A}$ ;  $I_b=0,27 \text{ A}$ ;  $I_c=0,27 \text{ A}$

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A proposta inicial do trabalho consistia em verificar a real possibilidade de transmissão de eletricidade pelo solo em BT, com capacidade para abastecer algumas cargas trifásicas. Ainda, compondo a proposta inicial, optou-se por fazer um breve estudo dos fatores que têm capacidade de influenciar nessa transmissão, o que pode impactar no desequilíbrio de tensão do sistema. Embora o tipo de solo tenha diferentes composições ao longo da superfície terrestre, o mesmo não se tornou o principal balizador da transmissão referida em BT e a curta distância, pois em testes realizados em outro terreno se obtiveram resultados semelhantes. Baseando-se em todos os casos apresentados e analisados, tornou-se bastante evidente que um dos principais elementos influenciadores na transmissão é o sistema de aterramento. Percebe-se que o aterramento, tanto do lado do fornecimento de energia quanto do lado do consumidor, desempenha um importante papel para o sucesso da proposta.

Partindo-se do caso 1, das situações apresentadas, onde o aterramento em ambos os pontos foi colocado em prática sem preocupar-se com o estudo prévio e simulado, percebeu-se claramente que as cargas não teriam atendidas as demandas de corrente elétrica. Ou seja, embora as cargas fossem equilibradas, evidenciou-se o desequilíbrio percentual considerável na tensão elétrica. A partir disso, coube uma melhora nesses níveis de aterramento, de maneira gradual, para que se observasse caso a caso o comportamento do sistema para esse tipo de transmissão. Como era de se prever, devido aos estudos de sistemas de aterramento empregados em sistemas MRT, a transmissão de eletricidade pelo solo só atinge seu objetivo quando o aterramento está a níveis baixos. Ou seja, à medida que o aterramento foi sendo otimizado, diminuindo sua resistência, melhorou o equilíbrio da corrente elétrica entre as fases.

Antes disso, devido à baixa capacidade de transmissão de corrente, o maior desafio enfrentado é o do desequilíbrio percentual de tensão, cujos cálculos estão apresentados no apêndice E. Além disso, os valores desse desequilíbrio, são dependentes do tipo de carga conectada, se indutiva ou resistiva, e obviamente de suas potências consumidas. Nesse interim, os valores do desequilíbrio de tensão, aceitável em valor máximo de 2 % pelo ONS e ANEEL, passam de um valor equivalente a 17,9 % para a pior situação do caso 1, a 2,5 % para a pior situação do caso 3. Para a melhor situação de aterramento simulada, ou seja, com valores e resistência de aterramento abaixo dos 25  $\Omega$  comumente utilizados em instalações residenciais, os valores permanecem sempre abaixo dos 2 %, passando de 0,27 % a 1,14 % considerando a melhor e a pior situação, respectivamente.

Por fim, se pode concluir que o sistema de transmissão trifásica a dois fios, com uma fase aterrada é totalmente viável, dentro das condições testadas e estabelecidas neste trabalho, podendo substituir com facilidade um sistema convencional.

Como sugestão para trabalhos futuros fica a possibilidade de:

- Estudo da transmissão em BT com cargas distribuídas;
- Estudo da capacidade da corrente elétrica em “contornar” obstáculos, tais como rochas ou rios, em uma área de solo não homogênea;
- Desenvolvimento da proposta experimental em MT.



## 7 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 7117:2012. **Medição de Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo.**

ABNT NBR 15749:2009. **Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento.**

ALUBAR ALTEC, Catálogo Técnico: **Condutores Elétricos de Alumínio.** Disponível em: <https://www.alubar.net.br/index.php/produtos-solucoes/aluminio>. Consulta em 17.09.2019.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica-Procedimentos de Distribuição de Energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**, 2012.

Borges, P.R.O. **Repotencialização De Sistemas De Distribuição Rurais Monofásicos Por Meio De Dois Cabos Aéreos E O Solo Com/o A Terceira Fase.** 2017. TESE (Doutorado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria).

Borges, P.R.O; Ramos, J.E; Pires, V.A; Junior, G.C; Mariotto, L; Morais, A.P. **Repowering Rural Single-Phase Distribution Network: A Non-Conventional Proposal using Two Overhead Wires and the Ground as Third Phase.** Electric Power Systems Research–ELSEVIER, 2017.

Carson, J.R. **Wave Propagation in Overhear Wires with Ground Return,** Bell System Technical Journal, Vol 5, New York, 1926.

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (CEEE). **Estruturas para Redes de Distribuição Aéreas com Condutores Nus.** 2016

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA (CEEE). **Materiais para Redes Aéreas de Distribuição.** 2019.

Centro da Memória da Eletricidade no Brasil - MEMÓRIA DA ELETRICIDADE. **Eletrificação Rural no Brasil, uma Visão Histórica.** Rio de Janeiro: Centro da Memória da Eletricidade no Brasil, 2016.

CEPEL Centro de Pesquisa de Energia Elétrica **Seleção de Sistema –MRT- RER-05,** 2002.

Fandi, J.C.O. **Sistema de Distribuição de Energia Elétrica a Dois Condutores para Atendimento a Cargas Rurais Trifásicas,** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Elétrica Programa de Pós-Graduação.

Fandi, J.C.O; Macedo Jr, J.R; Gondim, I.N; Oliveira, J.C; Guimarães, G.C. **Two-Wire Distribution System for Supplying Three-Phase Rural Loads.** Brazilian Society for Automatics–SBA 2013.

Gatta, F.M; Illiceto F; Lauria, S; Masato, P. **Balancing Methods of the 3-Phase Shield Wire Schemes.** Power Tech, IEEE, Russia, 2005.

Glover, J.D; Sarma, M.S; Overbye,T.J. **Power Systems, Analysis and Design**. Fifth edition. Stamford, EUA, CENGAGE Learning, 2012.

Hayford, L.C; Dokyi, G.O; Cinieri, E; Iliceto, F. **New concepts on MV Distribution From Insulated Shield Wires QF HV Lines Operation Results of an Experimental System and Applications in Ghana**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 4, N° 4, 1989.

Iliceto, F; Gatta F.M; Lauria, S; Debebe, M; Hussen, M; **Rural Electrification in Developing Countries With the Shield Wire Scheme. Applications in Laos**, CIGRÉ Session 2004. Paris.

Iliceto F; Cinieri, E; Dokyi, G.O. **New Concepts on MV Distribution From Insulated Shield Wires Of HV Lines**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 4, n° 4, October 1989.

Iliceto, F; Gatta F.M; Lauria, S; Debebe, M; Hussen, M; **Rural Electrification In Ethiopia With The Shield Wire Scheme**. CIRED, 18th International Conference on Electricity Distribution Turin, 6-9 June 2005.

Kagan, N. et al. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência**. 2 ed. São Paulo: E. Blucher LTDA, 1996.

Kersting, W.H. **Distribution System Modeling and Analysis**, four chapter, pages 77-85 and Chapter five pages 109-115". New York, 2002.

Lima, A.B. **Medição da Impedância e da Resistência de Aterramento Utilizando Ondas Impulsivas e Condutores de Pequeno Comprimento nos Circuitos de Tensão e Corrente**. 2015. TESE (Doutorado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais).

Paulilo, G. **Qualidade de Energia, Desequilíbrio de Tensão**. Cap III. MEGABARRE, BRASIL, [19--].

Ramos, J.E; Piantini, A; Pires, V.A; D'Ajuz, A. **The Brazilian Experience With the Use of the Shield Wire Line Technology (SWL) for Energy Distribution**, IEEE Latin America Transactions, Vol 7, N° 6, December 2009.

Ramos. J.E. **Universalização da Energia Elétrica Através da Tecnologia Cabos Para-Raios Energizados (PRE)**. 2010. TESE (Doutorado Programa de Pós Graduação em Energia – Universidade de São Paulo).

Rosa, F; Mak, S.T. **A Look into Steady State and Transient Performance of Power Lines Integrating Single Wire Earth Return Circuits**. IEEE, 2005.

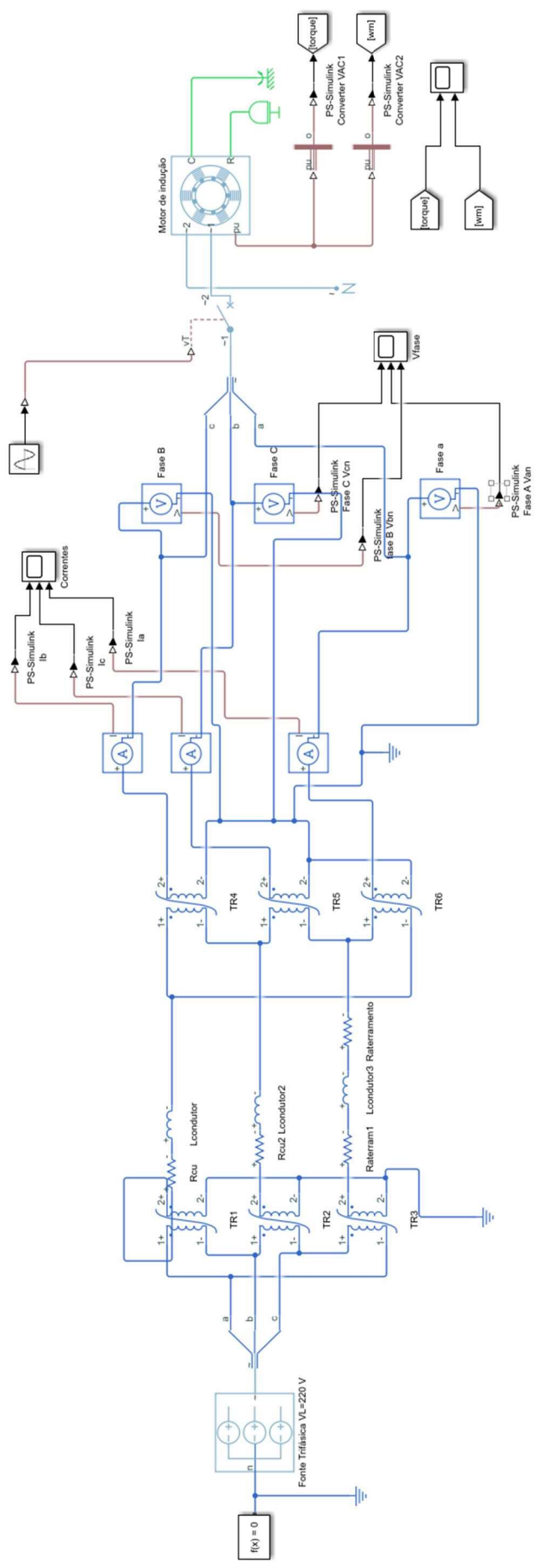
Rose, E.H **Alimentação de pequenas cargas ao longo de linhas de transmissão por meio de para-raios energizados**. 188f, Dissertação mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica. Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI. Itajubá, 1997.

Rudenberg. **Transient Performance of Electric Power Systems Phenomena in Lumped Network**, p.393, first Edition, McGraw-HILL BOOK COMPANY, INC. NEW YORK, 1950.

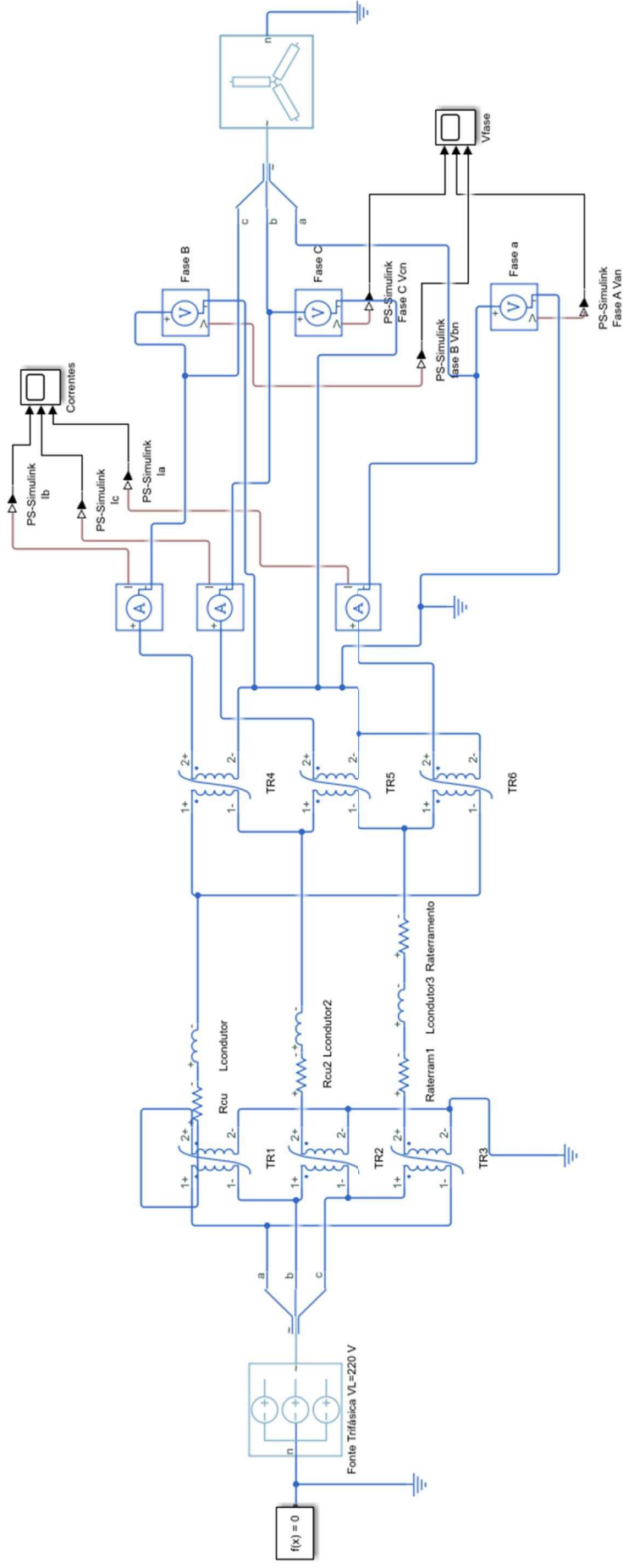
Silva, M.R. **Avaliação de Alternativa para Eletrificação Rural no Contexto dos Programas de Universalização do Atendimento de Energia no Brasil**. 187f, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. 2006.

## 8 APÊNDICES

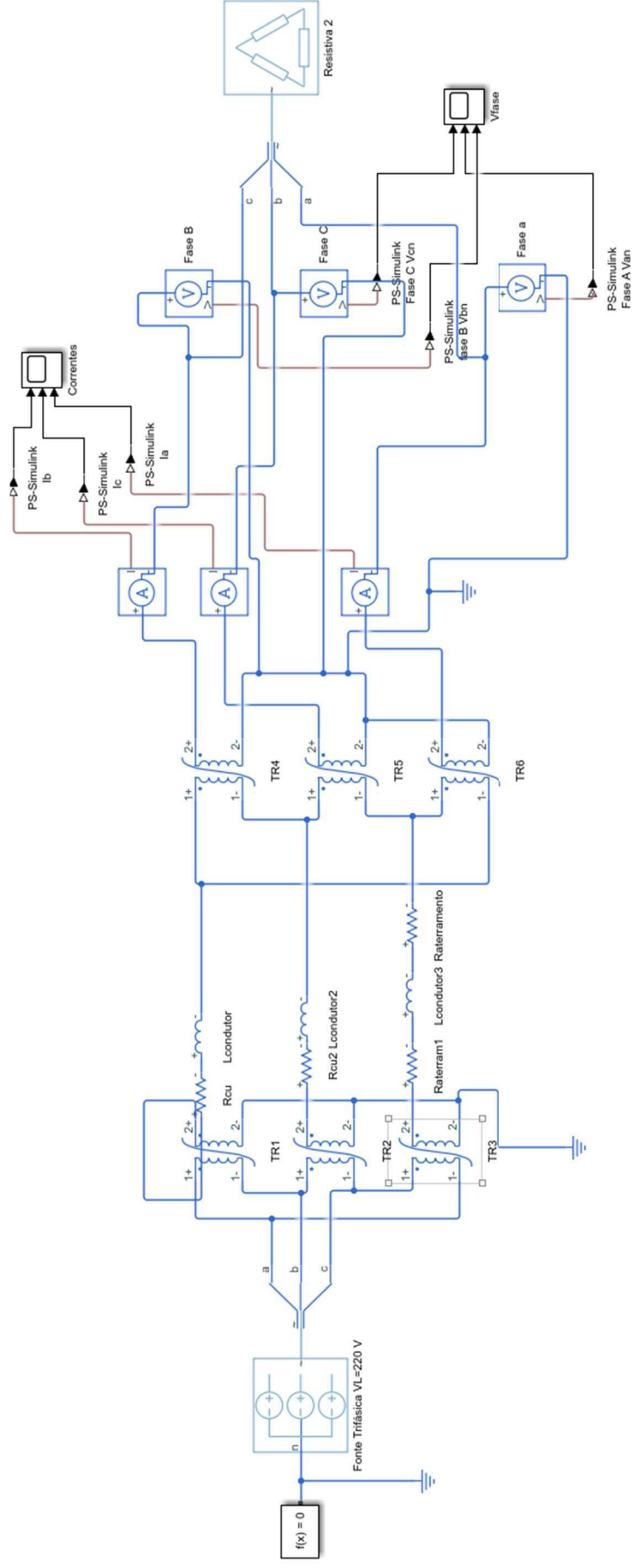
### APÊNDICE A – ESQUEMA DE SIMULAÇÃO PARA MOTOR TRIFÁSICO



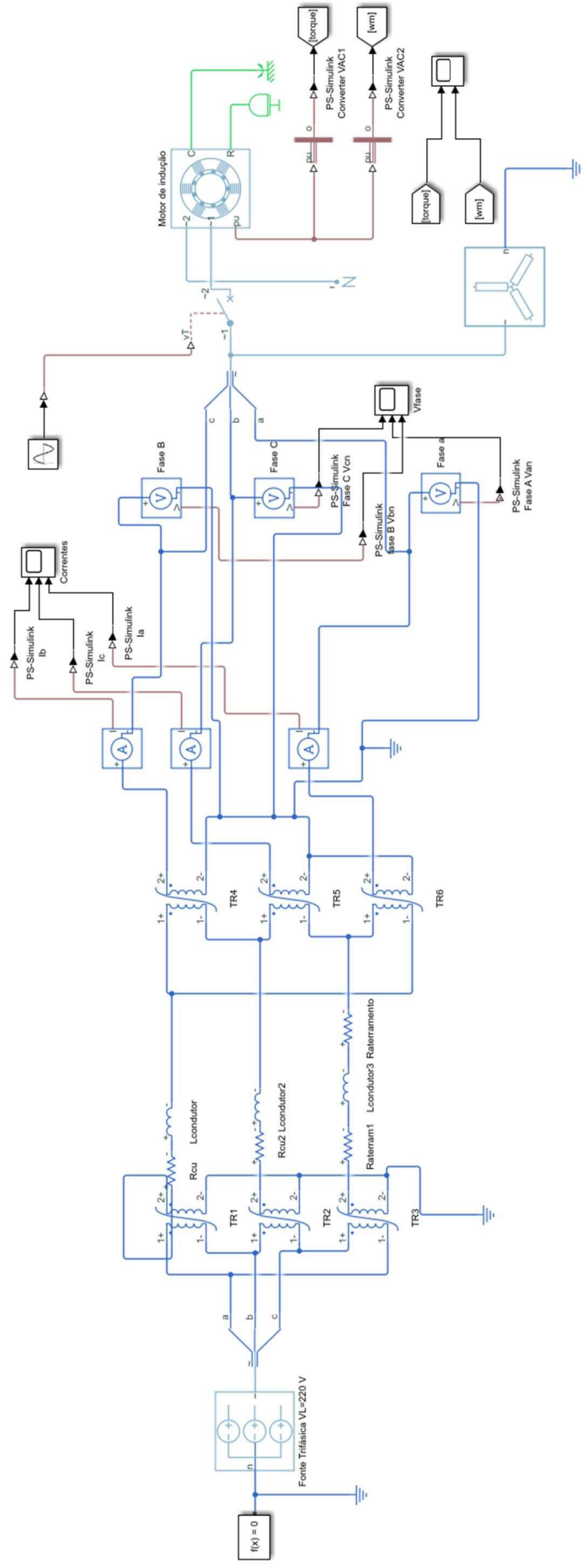
## APÊNDICE B – ESQUEMA DE SIMULAÇÃO PARA CARGA RESISTIVA 1



**APÊNDICE C – ESQUEMA DE SIMULAÇÃO PARA CARGA RESISTIVA 2**



# APÊNDICE D – ESQUEMA DE SIMULAÇÃO PARA MOTOR E CARGA RESISTIVA 1



## APÊNDICE E – QUADRO DE DESEQUILÍBRIO PERCENTUAL DE TENSÃO

	CASO 2	CASO 3	R <sub>SIMULADO</sub>
Rterra (lado_isolador)	2,7 ohms	2,7ohms	2,7 ohms
Rterra (lado_consumidor)	75 ohms	38 ohms	5 ohms
Vab (vazio)	360,9	361	-
Vbc (vazio)	365,4	356,9	-
Vac (vazio)	374,2	358,4	-
Van (vazio)	210,7	206,7	-
Vbn (vazio)	217,4	208,7	-
Vcn (vazio)	217,9	208,2	-
% V (vazio)	2,13	0,67	-
Ia (ind)	0,532	0,616	0,09
Ib (ind)	1,03	0,844	0,086
Ic (ind)	0,781	0,752	0,08
Vab	339,08	344,3	385,7
Vbc	370,04	353,4	387,5
Vac	367,45	358,2	387,1
% V (ind)	5,46	2,29	0,27
Ia (R=0,71 k)	0,2	0,2	0,26
Ib (R=0,71 k)	0,2	0,2	0,26
Ic (R=0,71 k)	0,2	0,2	0,26
Vab	370,9	350,498	380,9
Vbc	350,32	356,726	382,3
Vac	361,5	352,92	382,1
% V (R=0,71 k)	3,29	1,02	0,23
Ia (R=0,17 k)	2,3	2,2	2,35
Ib (R=0,17 k)	1,7	1,9	2,39
Ic (R=0,17 k)	1,8	1,9	2,29
Vab	262,09	289,256	368,1
Vbc	338,56	321,309	371,4
Vac	267,9	292,024	364,1
% V (R=0,17 k)	17,99	6,9	1,14
Ia (Ind+R1)	-	0,9	0,28
Ib (Ind+R1)	-	0,8	0,27
Ic (Ind+R1)	-	0,7	0,27
Vab	-	289,256	381,4
Vbc	-	348,6	384,2
Vac	-	348,6	382,6
% V (Ind+R1)	-	2,5	0,41

Os cálculos foram efetuados com base no método adotado pelo ONS/PRODIST que usa a expressão conhecida como CIGRÉ-C04, mostrada na equação 29.