

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

Paulo Roberto de Oliveira Borges

**REPOTENCIALIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS
MONOFÁSICOS POR MEIO DE DOIS CABOS AÉREOS E O SOLO
COMO A TERCEIRA FASE**

Santa Maria, RS
2017

Paulo Roberto de Oliveira Borges

**REPOTENCIALIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS
MONOFÁSICOS POR MEIO DE DOIS CABOS AÉREOS E O SOLO COMO A
TERCEIRA FASE**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.
Coorientador: José Ezequiel Ramos, Dr. Eng.

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Borges, Paulo Roberto de Oliveira
Repotencialização de sistemas de distribuição rurais monofásicos por meio de dois cabos aéreos e o solo como a terceira fase / Paulo Roberto de Oliveira Borges.- 2017.

161 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior
Coorientador: José Ezequiel Ramos
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2017

1. Eletrificação Rural 2. Transmissão de Energia Elétrica 3. Sistemas Monofásicos 4. Sistema Trifásico a Dois Fios 5. MRT I. Cardoso Junior, Ghendy II. Ramos, José Ezequiel III. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Paulo Roberto de Oliveira Borges. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: paulomscborges@gmail.com

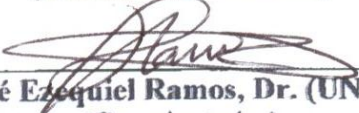
Paulo Roberto de Oliveira Borges

**REPOTENCIALIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS
MONOFÁSICOS POR MEIO DE DOIS CABOS AÉREOS
E O SOLO COMO A TERCEIRA FASE**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 24 de fevereiro de 2017:

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



José Ezequiel Ramos, Dr. (UNIR)
(Co-orientador)



Arnaldo Gakiya Kanashiro, Dr. (USP)



Carlos E. de Moraes Pereira, Dr. (USP)

Adriano Peres de Moraes, PhD (UFSM)

Aécio de Lima Oliveira, Dr. (UFSM)

• Santa Maria, RS
2017

AGRADECIMENTOS

Pela realização deste trabalho quero, em primeiro lugar, agradecer ao Senhor Nosso Deus, na pessoa de Jesus Cristo, sem o qual a minha vida não teria o significado que tem hoje.

Em segundo lugar a mulher que amo, minha esposa, Noria, companheira tenaz, ajudadora, amiga, compreensiva, quando, nos momentos mais difíceis, ela teve a palavra de vai em frente. Aos meus filhos Diogo e Caio, sempre incentivadores e orgulhosos de minhas conquistas. Aos meus pais “*in memoria*” Odilon e Raimunda, que não mediram sacrifícios em prol de minha educação.

Agradeço também:

– À CAPES, pela oportunidade que nos ofertou, sem a qual seria muito difícil a realização desse curso;

– À minha netinha, Maria Bela, que me proporcionou um novo brilho em meu olhar;

– Às minhas noras Ananda e Carol, pela suas alegrias e compartilhamentos;

– Aos meus orientadores Ghendy e Ezequiel, pelo denodo, amizade, companheirismo e ensinamentos ministrados;

– Aos professores membros da banca examinadora: Adriano, Aécio, Arnaldo, Carlos Eduardo, Diego, pela disponibilidade em participar;

– Ao amigo Lucas Centenaro, sempre solícito e disposto a ajudar;

– Ao meu amigo Valdemir Pires da Eletrobrás Rondônia, sempre pronto a contribuir;

– Aos colegas do Departamento de Ciência da Computação (UNIR), pelo apreendimento na ajuda constante durante a realização deste trabalho;

– Aos professores e servidores do PPGE, que, apesar do pouco tempo de convívio, aprendi muito com suas dedicações;

– Aos alunos do curso de engenharia da UNIR, em particular: Rain, Marcus Vinícius, Rodrigo, Raul pelos incançáveis dias de campo no sol de Rondônia;

– Aos irmãos da Igreja Metodista de Santa Maria e de Porto Velho, por suas orações e conforto no momento oportuno;

– Aos meus irmãos Edvaldo, Valter, Vanda, Nilza, pela amizade;

– Aos meus sobrinhos, primos, cunhados, pelo apoio e palavras de incentivos;

– À Prof. Janete, revisora dos textos, pela prontidão, responsabilidade e conhecimento;

- A todos aqueles que de uma forma ou de outra me ajudaram a chegar até aqui.

Se, pois, o Filho vos libertar, verdadeiramente sereis livres.

(Jesus Cristo, Jo 8:36)

Devemos tentar compreender o início do universo com base na ciência. Talvez seja uma tarefa além da nossa capacidade, mas devemos ao menos fazer a tentativa.

(Stephen Hawking)

RESUMO

REPOTENCIALIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS MONOFÁSICOS POR MEIO DE DOIS CABOS AÉREOS E O SOLO COMO A TERCEIRA FASE

AUTOR: Paulo Roberto de Oliveira Borges

ORIENTADOR: Ghendy Cardoso Junior

CO-ORIENTADOR: José Ezequiel Ramos

No Brasil e em vários países do mundo, os projetos de eletrificação rural foram desenvolvidos utilizando o sistema monofásico. Em razão do tipo de cargas dos consumidores rurais e sua localização dispersa. Com o crescimento do agronegócio como atividade que tem contribuído fortemente para o PIB nacional, os produtores rurais têm cobrado das autoridades responsáveis, pela política energética, um posicionamento diante da demanda reprimida por potência trifásica no campo. O seguimento denominado agronegócio familiar, contribui hoje com 80% do alimento colocado na mesa do brasileiro. Outras atividades em vários seguimentos têm em suas atividades dependência direta ou indireta dos produtos produzidos no campo, como a indústria, comércio, serviços e transporte. O setor de exportação em especial, as commodities agrícolas, tem no agronegócio seu principal agente gerador de riquezas para o país. Para que o setor do agronegócio e os pequenos produtores rurais, que fazem parte da cadeia da produção possam continuar crescendo, é necessário disponibilizar potência elétrica trifásica de qualidade, confiável e de custos módicos. Já é sabido, que eletrificar a área rural com sistema trifásico convencional, é economicamente inviável. O presente trabalho visa colaborar com a inserção do sistema trifásico no campo. Para tal, é sugerida uma nova concepção, que repotencializa os sistemas monofásicos existentes por meio de uma pequena adaptação. Transformando em um sistema bifásico ou trifásico, o sistema proposto utiliza o solo como uma das fases. Análise teórica do sistema de distribuição foi modelada e simulada no software ATPDraw. Foi desenvolvido um protótipo trifásico em baixa tensão, com o propósito de verificar em campo o funcionamento da técnica proposta nesta tese. A proposta é promissora e representa um investimento muito atrativo para as concessionárias e uma resposta rápida ao produtor do agronegócio.

Palavras-chave: Eletrificação Rural. Transmissão de Energia Elétrica. Sistemas Monofásicos. Sistema Trifásico a Dois Fios. MRT.

ABSTRACT

REPOWERING OF SINGLE-PHASE RURAL DISTRIBUTION SYSTEMS USING TWO OVERHEAD WIRES AND THE GROUND AS THE THIRD PHASE

AUTHOR: PAULO ROBERTO DE OLIVEIRA BORGES
ADVISOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR
CO-ADVISOR: JOSÉ EZEQUIEL RAMOS

In Brazil and in several countries of the world, rural electrification projects were developed using the single-phase system. Due to the type of loads of rural consumers and their dispersed location. With the growth of agribusiness as an activity that has contributed strongly to the national PIB, rural producers have been charging the authorities responsible for energy policy a positioning in the face of the demand for three-phase power in the countryside. The sector known as family agribusiness, now makes up 80% of food placed on the Brazilian table. Other activities in various sectors have, in their activities direct or indirect dependence on the products produced in the field, such as industry, commerce, services and transportation. The export sector, in particular, agricultural commodities has, in agribusiness its main agent that generates wealth for the country. In order for the agribusiness sector and small farmers, who are part of the chain of production can continue to grow, it is necessary to provide a quality, reliable three-phase electrical power system at an affordable cost. It is already known that electrifying the rural area with a conventional three-phase system is economically unfeasible. This study aims to collaborate with the insertion of the three-phase system in the field. To do this, a new design is suggested, by using the existing single-phase systems by means of a small adaptation. Transforming into a two-phase or three-phase system, the proposed system uses the earth as one of the phases. Theoretical analysis of the distribution system was modeled and simulated in ATPDraw software. A three-phase prototype low voltage, in order to verify in the field the operation of the proposed technique in this thesis was developed. The proposal is promising and represents a very attractive investment for the concessionaires, and a quick response to the agribusiness producer.

Keywords: Rural electrification. Transmission of electricity. Single-phase systems. Three-phase two-wire system. SWER.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figuras 3.1 –	Sistema bifásico ou monofásico fase-fase – tronco trifásico a três fios.....	44
Figuras 3.2 –	Rede bifásica horizontal para distribuição rural Eletrobras Rondônia.....	44
Figuras 3.3 –	Aparência de um sistema fase neutro.....	45
Figuras 3.4 –	Posto de transformação – linha de distribuição rural de 13,8KV	46
Figuras 3.5 –	Distribuição rural em 34,5 KV	48
Figuras 3.6 –	Transformador isolador utilizado em uma rede MRT.....	49
Figuras 3.7 –	Sistema MRT na Versão Neutro Parcial	50
Figuras 3.8 –	Linha rural Eletrobrás Rondônia sistema trifásico.....	52
Figuras 3.9 –	Linha rural Eletrobrás Rondônia sistema trifásico Rural passando para bifásico alimentando MRT.....	53
Figuras 3.10 –	Linha rural Eletrobrás Rondônia prosseguimento do circuito agora somente monofásico.....	53
Figuras 3.11 –	Adaptação das estruturas de sustentação do condutor neutro original do ramal monofásico existente.....	57
Figuras 3.12 –	Polaridade aditiva.....	57
Figuras 3.13 –	Diagrama fasorial ilustrativo das tensões resultantes nas fases A e B do novo ramal bifásico	58
Figuras 3.14 –	Diagrama do sistema proposto para atendimento a cargas trifásicas rurais.....	58
Figuras 3.15 –	Desenho esquemático da estrutura	59
Figura 3.16 –	Subestação supridora do PRE, em Samuel	61
Figura 3.17 –	Subestação distribuidora do PRE, em Itapuã do Oeste.....	61
Figuras 4.1 –	Vista superior do transformador isolador destaque para fase no secundário aterrada.....	65
Figuras 4.2 –	Posto transformador com alimentação por uma das fases aéreas reaproveitando o condutor monofásico do MRT, e a terceira fase é alimentada pelo solo.....	66
Figuras 4.3 –	Instalação de posto transformador trifásico com alimentação por duas fases aéreas, e a terceira sendo o próprio solo	67
Figuras 4.4 –	Circuito simplificado do sistema proposto.....	72
Figuras 4.5 –	Circuito trifásico equivalente para o sistema proposto com as impedâncias dos cabos aéreos e a terra como condutor.....	72
Figuras 4.6 –	Circuito do sistema proposto quando excitado em modo comum	75

Figuras 4.7 –	Circuito do sistema proposto quando excitado em modo diferencial.....	76
Figuras 4.8 –	Circuito trifásico equivalente do sistema proposto com as impedâncias de linha e de terra.....	76
Figuras 4.9 –	Circuito trifásico equivalente do sistema proposto com as impedâncias de linha, terra, e a de compensação	78
Figuras 4.10 –	Condutores e suas imagens.....	79
Figuras 4.11 –	Circuito equivalente formado pelos condutores aéreos e o solo.....	82
Figuras 4.12(a) –	Vista de frente do poste que suporta ambos os cabos aéreos do sistema de distribuição não convencional	83
Figuras 4.12(b) –	Mostra os condutores aéreos e a distâncias para suas imagens	83
Figuras 5.1 –	Diagrama trifásico do protótipo.....	91
Figuras 5.2 –	Representação simplificada do circuito a ser utilizado nas simulações computacionais do protótipo	95
Figuras 5.3 –	Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador Isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 179,02 V, fase B = 179,44 V, fase C= 179,69V. Tensão eficaz fase A = 126,59V, fase B = 126,88V, fase C = 127,0 V.....	95
Figuras 5.4 –	Tensão de linha instantânea no lado do primário transformador Isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 311,09 V, fase B = 311,16 V, fase C= 311,25 V. Tensão eficaz linha A = 219,97V, fase B =220,02V, fase C = 220,09 V FD% =0,031%	96
Figuras 5.5 –	Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador Isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 275,67 V, fase B = 276,01 V, fase C= 403,86V. Tensão eficaz fase A = 194,92V, fase B = 195,17V, fase C =285,57 V ...	97
Figuras 5.6 –	Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador Isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,42 V, fase B = 519,56 V, fase C= 519,57V. Tensão eficaz linha A = 379,30V, fase B =367,38V, fase C = 367,39 V FD% = 2,15%	97
Figuras 5.7 –	Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador Isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 275,66 V, fase B = 276,01 V, fase C= 403,86V. Tensão eficaz fase A = 194,92V, fase B = 195,16V, fase C =285,57 V ...	98
Figuras 5.8 –	Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,42 V, fase B = 527,75 V, fase C=527,96V. Tensão eficaz linha A = 379,31V, fase B =373,18V, fase C =373,32V FD% = 1,079%	98

- Figuras 5.9 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = 0,382A, B = 0,381A e C= 0,368A. Corrente eficaz linha A = 0,27A, B =0,27A e C = 0,26 A 99
- Figuras 5.10 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,384A, B = 0,383A e C= 0,376A. Corrente eficaz linha A = 0,27A, B =0,27A e C = 0,27 A 99
- Figuras 5.11 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 172,73 V, fase B = 179,54 V, fase C=173,19V. Tensão eficaz fase A = 122,14V, fase B =126,95V, fase C =122,46 V... 100
- Figuras 5.12 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 307,43 V, fase B = 307,42 V, fase C= 296,56 V. Tensão eficaz linha A = 217,39V, fase B =217,38 V, fase C =209,70 V FD%=2,37 % 100
- Figuras 5.13 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 175,63 V, fase B = 179,54 V, fase C=176,02V. Tensão eficaz fase A = 124,19V, fase B =126,95V, fase C =124,46 V... 101
- Figuras 5.14 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 309,04 V, fase B = 309,04 V, fase C= 303,03 V. Tensão eficaz linha A = 218,52V, fase B =218,52V, fase C =214,27V FD% = 1,30 % 101
- Figuras 5.15 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,645A, B = 0,665 A e C= 0,644 A. corrente eficaz linha A = 0,46A, B = 0,47A e C = 0,46 A..... 102
- Figuras 5.16– Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,655A, B = 0,665A e C= 0,655A. Corrente eficaz linha A = 0,46A, B = 0,47A e C = 0,46 A..... 102
- Figuras 5.17 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =1,1607A, B =1,1849A e C= 1,104A. Corrente eficaz linha A = 0,826A, B = 0,838A e C = 0,78 A..... 103
- Figuras 5.18 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor(TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =1,1785A, B =1,1849 A e C= 1,1407 A. corrente eficaz linha A = 0,833A, B = 0,838A e C = 0,807 A..... 103

- Figuras 5.19 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor(TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,206A, B =0,2084A e C= 0,206A. Corrente eficaz linha A = 0,146A, B = 0,147A e C = 0,146 A 104
- Figuras 5.20 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,2065A, B =0,2088A e C= 0,2079A. Corrente eficaz linha A = 0,1460 A, B = 0,1476A e C=0,1470 A 104
- Figuras 5.21 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 53.67W, fase B =53,68W, fase C=64,80W 105
- Figuras 5.22 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 53,852W, fase B =53,866 W, fase C= 68,039 W 105
- Figuras 5.23 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 56,021, fase B =60,135W, fase C= 55,816W.... 106
- Figuras 5.24 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 57,677, fase B =59,975 W , fase C= 57,681W.. 106
- Figuras 5.25 – Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 178,96 V, fase B = 179,46 V, fase C= 179,60V. Tensão eficaz fase A = 126,54V, fase B = 127 V, fase C = 127 V..... 107
- Figuras 5.26 – Tensão de linha instantânea no lado do primário transformador isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul);Tensão de pico de linha A=311,12 V, fase B = 311,10 V, fase C= 311,09 V. Tensão eficaz linha A = 220 V, fase B =220 V, fase C = 220 V FD% =0,0% 108
- Figuras 5.27 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 283,67 V, fase B = 285,01 V, fase C= 365,14V. Tensão eficaz fase A = 200,58V, fase B = 201,53V, fase C =258,19 V. 108
- Figuras 5.28 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,11 V, fase B = 532,78 V, fase C= 530,38V. Tensão eficaz linha A = 379,08V, fase B =376,73V, fase C =375,0V FD% = 0,63%. 109
- Figuras 5.29 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de Pico de fase A = 176,52 V, fase B = 179,24 V, fase C=177,95V. Tensão eficaz fase A = 124,82V, fase B =126,74V, fase C =125,83 V.... 109

Figuras 5.30 –	Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 308,49 V, fase B = 310,63 V, fase C= 306,21 V. Tensão eficaz linha A = 218,14V, fase B =219,65 V, fase C =216,52V FD% = 0,82 %.....	110
Figuras 5.31 –	Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor(TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,65767A, B =1,1845A e C= 0,20588A. Corrente eficaz linha A = 0,465A, B = 0,838A e C =0,146 A.....	110
Figuras 5.32 –	Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 73,067W, fase B =29,946W, fase C= 44,572 W.....	111
Figuras 5.33 –	Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 58,197W fase B =70,612 W , fase C= 18,2W...	111
Figuras 5.34 –	Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,42 V, fase B = 527,75 V, fase C= 527,96 V. Tensão eficaz linha A = 379,31V, fase B =373,30V, fase C =373,30VFD% =1,079 %.....	113
Figuras 5.35 –	Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 309,04 V, fase B = 309,04 V, fase C= 303,03 V. Tensão eficaz linha A = 218,52V, fase B =218,52V, fase C =214,47VFD% = 1,30%.....	113
Figuras 5.36 –	Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,655A, B = 0,665A e C= 0,655A. Corrente eficaz linha A = 0,46A, B = 0,47A e C = 0,46 A.....	114
Figuras 5.37 –	Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 59,671W, fase B =59,681W , fase C= 56,378 W.....	114
Figuras 5.38 –	Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 57,665 fase B =59,971 W , fase C= 57,671W ...	115
Figuras 5.39 –	Transformador isolador trifásico 220/380 D/Y – 1 kVA	116
Figuras 5.40 –	Saída do circuito do tranformador isolador, malha do (TI), fases aéreas A e B e a terceira fase C conectada ao solo. Ao fundo malha de aterramento do (TC).....	117

Figuras 5.41 –	Chegada do circuito para alimentar a carga trifásica, fase A, B e C de onde é drenada a corrente para alimentar a fase C do primário do transformador do consumidor (TC) ligado em delta. Ao fundo malha de aterramento do (TI).....	117
Figuras 5.42 –	Transformador do consumidor trifásico 380/220/127V D/Y – 1kVA.Chegada do circuito trifásico alimentando o primário e saída do secundário alimentando as cargas.....	118
Figuras 5.43 –	Bancada onde foram realizados os testes com diversas cargas	118
Figuras 5.44 –	Esquema elétrico utilizado para suprir de energia elétrica as diversas cargas testadas experimentalmente.....	119
Figuras 5.45 –	Tensão de linha no lado primário do transformador isolador experimental, fase A (azul), fase B(vermelha), fase C (verde).	120
Figuras 5.46 –	Tensão de linha no lado secundário do transformador isolador experimental, fase A (azul), fase B (vermelha), fase C (verde).	120
Figuras 5.47 –	Tensão de fase no lado secundário do transformador do Consumidor experimental, fase A (azul), fase B(vermelha), fase C (verde).	121
Figuras 5.48 –	Tensão de linha no lado secundário do transformador do consumidor experimental, fase AB (azul), fase BC (vermelha), fase CA (verde).	121
Figuras 5.49 –	Transformador do consumidor alimentando o motor trifásico com cargas experimentais.....	122
Figuras 5.50 –	Formas de onda no lado secundário do transformador do consumidor considerando como carga um motor trifásico a 10% de plena carga	122
Figuras 5.51 –	Formas de onda no lado secundário do transformador do consumidor considerando como carga um motor trifásico a 80% de plena carga	123
Figuras 5.52 –	Representação simplificada do circuito a ser utilizado nas simulações computacionais	123
Figuras 5.53 –	Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 11,267 kV, fase B = 11,265 kV, fase C= 11,259 kV. Tensão eficaz fase A = 7,9669 kV, fase B = 7,9666kV, fase C = 7.9613 kV	127
Figuras 5.54 –	Tensão de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 19,513kV, fase BC = 19,503 kV, fase CA= 19,506 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,7977 kV, linha BC =13798 kV, linha CA = 13,794kV	127
Figuras 5.55 –	Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul);Tensão de pico de fase A = 9,7537 kV, fase B = 9,7558 kV, fase C= 16,854 kV Tensão eficaz fase A = 6,8969 kV, fase B = 6,8984kV, fase C = 11,9218 kV	128

- Figuras 5.56 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 19,514 kV, BC = 19,495 kV, CA= 19,488 kV Tensão eficaz de linha AB = 13,798 kV, BC =13,785 kV, CA = 13,780kV.FD% = 0,080 % 129
- Figuras 5.57 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformado do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 178,76V, fase B = 178,83V, fase C= 178,72V. Tensão eficaz fase A = 126,40V, fase B = 126,45V, fase C = 126,37V.. 129
- Figuras 5.58 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformado do consumidor, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 309,81V, BC = 309,74V, CA= 309,55V.Tensão eficaz de linha AB =219,07 V, BC =219,02 V, CA = 218,88V FD% = 0,050 % . 130
- Figuras 5.59 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Corrente de pico linha A =0,52A, B = 0,52A e C= 0,52 A. Corrente eficaz linha A = 0,37A, B = 0,37A e C = 0,37A 130
- Figuras 5.60 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); corrente de pico de linha A =32,59A, B = 32,61A e C= 32,58A. Corrente eficaz de linha A = 23,0A, B = 23,1 A e C = 23,0A 131
- Figuras 5.61 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 1,708kW, fase B =2,487kW , fase C= 4,176k W 132
- Figuras 5.62 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 2,80kW, fase B =2,80kW , fase C= 2,80kW..... 132
- Figuras 5.63 – Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 11,267kV, fase B = 11,265 kV, fase C= 11,259 kV. Tensão eficaz fase A = 7,9669 kV, fase B = 7,9666kV, fase C = 7.9613 kV..... 133
- Figuras 5.64 – Tensão de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC(verde) e CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 19,514kV, BC = 19,511 kV e CA= 19,500 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,798 kV, BC =13,796 kV e CA = 13,789kV FD% = 0,039% 134
- Figuras 5.65 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 9,7537 kV, fase B = 9,7558 kV, fase C= 16,854 kV.Tensão eficaz fase A = 6,8969 kV, fase B = 6,8984kV, fase C = 11,9218 kV 134

- Figuras 5.66 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC (verde), e CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 19,514kV, BC = 19,511 kV e CA= 19,500 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,798 kV, BC =13,796 kV e CA = 13,789kV FD% = 0,039% 135
- Figuras 5.67 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 177,92V, fase B = 176,64V, fase C= 178,54V. Tensão eficaz fase A = 125,80V, fase B = 124,90V, fase C = 126,24V. 136
- Figuras 5.68 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 305,78V, BC =307,93V e CA= 309,68V. Tensão eficaz de linha AB =216,22V, BC =217,74V e CA = 218,98V FD% = 0,73% 136
- Figuras 5.69 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador Isolador (TI), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); corrente de pico de linha A =1,8366A, B = 0,8404 A e C= 1,3277A. Corrente eficaz de linha A =1,2987A, fase B = 0,594 A e fase C = 0,9388 A..... 137
- Figuras 5.70 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); corrente de pico de linha A =116,01A, B = 85,35A e C= 50,37A. Corrente eficaz de linha A =82,03A, B = 60,35A e C = 35,62^a 137
- Figuras 5.71 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 5,149kW, fase B =3,989kW , fase C= 11,015kW 138
- Figuras 5.72 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 10,321kW, fase B =5,215kW , fase C= 4,471kW 138
- Figuras 5.73 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 2,714 kW, fase B =2,769kW , fase C= 2,888kW 139
- Figuras 5.74 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 2,80kW, fase B =2,80kW , fase C= 2,80kW 140
- Figuras 6.1 – Sistema de distribuição (protótipo) com dois condutores aéreos e o solo, modelado no ATP para análise de perturbações na rede. 144
- Figuras 6.2 – Tensão de fase instantânea no lado do primário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul) 145

Figuras 6.3 –	Tensões de linha verificadas no primário do transformador isolador em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul)	145
Figuras 6.4 –	Tensões de linha verificadas no secundário do transformador isolador em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul)	146
Figuras 6.5 –	Tensões de fase verificadas no secundário do transformador consumidor em condições de perturbação. Tensões de fase, A (vermelha), B (verde), C (azul).....	147
Figuras 6.6 –	Tensões de linha verificadas no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul)	147
Figuras 6.7 –	Sistema de distribuição trifásico não convencional simulado no ATP em condições de perturbação ocasionada por um curto circuito entre as fases aéreas A e B	148
Figuras 6.8 –	Tensões de linha verificadas no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador, AB (azul), BC (vermelha), CA (verde)	149
Figuras 6.9 –	Tensões de linha verificadas no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador, AB (azul), BC (vermelha), CA (verde)	149
Figuras 6.10–	Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (azul), BC (vermelha), CA (verde).....	150
Figuras 6.11(A) –	Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (azul), BC (vermelha), CA (verde) sequência ABC. Medições em laboratório	151
Figuras 6.11(B) (C) –	Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (vermelha), BC (verde), CA (azul).....	151
Figuras 6.12(A) –	Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (verde), BC (vermelha), CA (azul) sequência ABC. Medições em laboratório	153
Figuras 6.13(A) (B)–	Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (vermelha), BC (verde), CA (azul).....	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Sistemas MRT implantados pelas empresas distribuidoras de Energia Elétrica (CEPEL).....	55
Tabela 4.1 – Mostra de forma particularizada a resistividade de diferentes tipos de solos. ..	69
Tabela 4.2 – Variação da resistividade em função da umidade	69
Tabela 4.3 – Parâmetros do circuito.....	84
Tabela 5.1 – Componentes do sistema simulado no ATP.....	90
Tabela 5.2 – Tensões e correntes no secundário do transformador do consumidor, experimentais.....	92
Tabela 5.3 – Identifica os componentes da figura 5.52.....	124
Tabela 5.4 – Identifica os parâmetros da figura 5.52	125
Tabela 6.1 – Definições de limites de tensão em regime permanente, inferior a 1 kV.....	143
Tabela 6.2 – Limites para redes 220/127 V	143

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT NBR	Associação Brasileira de Normas Técnica
AT/BT	Alta tensão/Baixa tensão
ATPDraw	Alternative Transiens Program
AWG	American Wire Gauge
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BT	Baixa tensão
CAA	Condutor de alumínio com alma de aço
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CAZ	Condutor de aço zincado
CEB	Companhia Energética de Brasília
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco
CEMAR	Companhia Energética do Maranhão
CEMAT	Centrais Elétricas Matogrossenses
CEPEL	Centro de Pesquisa de Energia Elétrica
CERON	Centrais Elétricas de Rondônia
CESP	Companhia Energética de São Paulo
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
COELBA	Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia
COPEL	Companhia Paranaense de Energia S.A.
COSERN	Companhia Energética do Rio Grande do Sul
d%	desequilíbrio das cargas
ER	Eletrificação Rural
ERA	Administração de Eletrificação Rural
ESCELSA	Espírito Santo Centrais Elétricas S.A
EUA	Estados Unidos da América
f	Frequência
FAO	Food and Agriculture of the United Nations
FD%	Fator de desenvolvimento
flicker	Variação luminosa (cintilação)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
IEA	Internacional Energy Agency
IEEE	Institute of Eletrical and Electronics Engineers
LIGHT	Light S.A.
LpT	Programa Luz para Todos
MRN	Sistema monofásico com retorno por cabo metálico
MRT	Sistema Monofásico com Retorno por Terra
NZIECP 41:1993	New Zealand Eletrical Code of Practice 41:1993
P&D	Pesquisa e desenvolvimento
PIB	Produto Interno Bruto
PRE	Para Raio Energizado
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
SWER	Single Wire Earth Return
TC	Transformador do consumidor
TI	Transformador isolador
TVA	Tennesse Vallery Authority
Ue	Potencial do eletrodo em relação ao terra remoto
UNIR	Universidade Federal de Rondônia
VTCD	Variações de tensão de curta duração
WEO	World Energy Outlook
$\Delta\theta$	Variação de temperatura
λ	Condutividade térmica do solo
ρ	Resistividade do solo
ε	Permissividade média
ε_0	Permissividade no ar livre
ε_r	Permissividade média relativa
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	29
1.2	INTRODUÇÃO.....	29
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	32
1.4	MOTIVAÇÃO.....	33
1.5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
1.6	CONTRIBUIÇÃO DA TESE.....	35
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	36
2	ENERGIA ELÉTRICA NA ZONA RURAL	37
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	37
2.2	ELETRIFICAÇÕES RURAIS NO MUNDO.....	38
2.3	ELETRIFICAÇÕES RURAIS NO BRASIL	39
2.4	O ACESSO DO AGRICULTOR RURAL A TECNOLOGIA E EQUIPAMENTOS TRIFÁSICOS	40
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
3	TÉCNICAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL	43
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	43
3.2	SISTEMAS UTILIZADOS NA ELETRIFICAÇÃO RURAL	43
3.2.1	O Sistema Fase/Fase	43
3.2.2	Sistema monofásico convencional – MRN	45
3.3	SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO POR TERRA (MRT)	46
3.3.1	Sistemas MRT no Brasil	47
3.3.2	Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento	49
3.3.3	Sistema MRT na Versão Neutro Parcial	50
3.3.4	Tipos de Condutores Utilizados no Sistema MRT	51
3.3.5	Regulação de Tensão no MRT	51
3.3.6	Aterramento o desafio do sistema MRT	54
3.3.7	Atendimento à Área Rural por meio Sistema Trifásico Convencional	54
3.3.8	Outras Propostas Tecnológicas para Atendimento a Cargas Trifásicas Rurais	55
3.3.8.1	<i>Sistema Conversor Monotrifásico</i>	55
3.3.8.2	<i>Sistemas de distribuição a dois condutores</i>	56
3.3.8.3	<i>Sistema Tecnologia PRE Instalado em Rondônia</i>	60
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
4	PROPOSTAS DA TESE	63
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	63
4.2	TECNOLOGIA DO SISTEMA TRIFÁSICO A DOIS FIOS TENDO O SOLO COMO A TERCEIRA FASE	63
4.2.1	Transformador isolador	64
4.2.2	Repotencialização do circuito monofásico existente	65
4.2.3	Suprimento de Potência Trifásica	66
4.2.4	Sistema de aterramento	67
4.3	MODELANDO O SISTEMA PROPOSTO	71
4.3.1	Balanceamento Longitudinal	78
4.3.2	Dimensionamento da Capacitância do Sistema Proposto	78
4.3.3	Dimensionamento da capacitância a ser adicionada	81

4.3.3.1	<i>Balaceamento transversal</i>	82
4.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO PARA SUPRIR AS CARGAS TRIFÁSICAS RURAIS.....	83
4.4.1	Parâmetros dos Circuitos e Dados dos Condutores	83
4.4.2	Calculando as impedâncias séries	84
4.4.3	Cálculo da capacitância shunt	85
4.4.4	Comparativos entre sistema proposto e o sistema trifásico de para raios energizados (PRE)	86
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
5	RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÕES	89
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	89
5.2	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO PARA SUPRIR CARGAS TRIFÁSICAS RURAIS.....	89
5.2.1	Desequilíbrio de tensão em sistema elétrico trifásico	93
5.2.2	Método que quantifica o desequilíbrio de tensão	93
5.3	AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROTÓTIPO.....	94
5.3.1	Circuito desequilibrado com cargas equilibradas	94
5.3.2	Simulação do sistema com circuito desequilibrado e carga desequilibrada	107
5.3.3	Circuito equilibrado com cargas equilibradas	112
5.4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	115
5.4.1	Resultado dos testes em laboratório	119
5.5	SISTEMA PROPOSTO PARA A MÉDIA TENSÃO (KV).....	123
5.5.1	Avaliação do sistema proposto trifásico 13,8 kV por meio de simulações computacionais	125
5.5.2	Simulação do sistema 13,8 kV com carga equilibrada	126
5.5.3	Simulação do sistema 13,8 kV com carga desequilibrada	133
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	140
6	COMPORTAMENTOS DO SISTEMA PROPOSTO DIANTE DE PERTURBAÇÕES	141
6.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	141
6.1.1	O comportamento do sistema proposto em condições de perturbações	141
6.1.2	Simulação das perturbações no sistema provocada por curto circuito	144
6.1.2.1	<i>Resultados das perturbações no sistema provocados por curto circuito</i>	145
6.1.2.2	<i>Resultados das perturbações no sistema provocados pela abertura monofásica sem curto-circuito.</i>	150
6.1.2.3	<i>Resultados das perturbações no sistema provocados pela abertura bifásica sem curto-circuito.</i>	152
6.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	154
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	155
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	156
7.2	PUBLICAÇÕES.....	156
	REFERÊNCIAS	157
	ANEXO A – DIAGONALIZAÇÃO DE UMA MATRIZ	161

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo é feita uma abordagem da eletrificação rural como um importante fator indutor do desenvolvimento humano, econômico e social, nas áreas rurais, introduzindo o problema a ser abordado. Também são ressaltadas as contribuições do trabalho, objetivos, motivação, além de uma breve revisão sobre o estado-da-arte no assunto, mostrando a evolução das técnicas utilizadas na eletrificação rural.

1.2 INTRODUÇÃO

A qualidade de vida e melhores perspectivas de trabalho têm levado a uma grande migração da população rural para os centros urbanos nas últimas décadas. A preocupação de fornecer grandes blocos de energia à indústria e aos centros urbanos excluiu o pequeno consumidor rural Cruz et al. (2004).

O World Energy (WEO), principal publicação anual da Agência Internacional da Energia (IEA), estima que cerca de 1,3 bilhões de pessoas, ou 18% da população mundial, não tinham acesso à eletricidade em 2011.

Buscando corrigir o que foi constatado pelo Ministério de Minas e Energia por meio do Censo 2000 do IBGE:

A existência de um contingente de 2 milhões de famílias no setor rural brasileiro sem energia elétrica. O Censo revelou que essas famílias estavam localizadas em áreas de reduzido Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), abaixo da linha da pobreza. Cerca de 90% dos entrevistados pelo IBGE possuíam renda familiar inferior a três salários mínimos. “Hoje, a energia elétrica está presente em 3 milhões 95 mil 724 lares brasileiros transformando a vida de 15 milhões de pessoas que moravam no escuro”, declarou Aurélio Pavão de Farias, Diretor Nacional do Programa.

O Programa Luz Para Todos respondeu à necessidade básica de energia elétrica numa grande parcela da população rural. O programa aponta a inserção de equipamentos eletroeletrônicos que vieram melhorar em muito as condições de vida das áreas rurais. O Ministério de Minas e Energia (2013) reforça que 3 milhões de famílias foram beneficiadas com a chegada da energia elétrica em suas casas. Sendo inegável o avanço sócio econômico obtido com esta etapa, a ponto de se tornar um exemplo a ser copiado por outros países em desenvolvimento. No entanto, o crescimento da produtividade agropecuária mais efetiva passa

pela melhoria dos sistemas elétricos, hoje oferecidos nas aéreas rurais. A maioria do fornecimento de energia é feito por meio de ligações monofásicas, sendo estes geradores de diversos obstáculos para os produtores agropecuários de pequeno e médio portes.

Os principais equipamentos que são capazes de gerar força eletromecânica para a produção no campo são em sua grande maioria motores monofásicos ou adaptação para conversores trifásicos. Os motores trifásicos convencionais têm um menor custo e melhor rendimento e já está consagrado na indústria e comércio.

A qualidade de energia oferecida traz um transtorno a mais; não basta só ter energia elétrica, é necessário que esta tenha continuidade, estabilidade, confiabilidade e tensões de alimentação adequadas. As cargas rurais têm sua tipicidade estabelecida em (FANDI, 2013):

- longa distância entre o consumidor e o centro de suprimento;
- poucos consumidores por quilometro de rede de energia elétrica, ou seja, baixa densidade de consumidores;
- baixa carga instalada;
- baixo consumo de energia elétrica ativa mensal;
- pequenas demandas máximas simultâneas.

As características apresentadas corroboram para as dificuldades enfrentadas por estes consumidores, que distam dos centros de reclamações das concessionárias, onde dependendo do local, passam horas ou até mesmo dias para serem atendidos e sanados os defeitos da rede de distribuição elétrica. Em muitos casos estes defeitos refletem diretamente no aparecimento de outros nos equipamentos elétricos, em especial queima de motores monofásicos, levando o agricultor rural a ser penalizado várias vezes, como:

- aumento dos custos de manutenção;
- perda de tempo no deslocamento ao posto mais próximo para comunicar a falta de energia;
- perda de alguns produtos perecíveis, como o leite e seus derivados;
- dentre outros.

Como nas áreas urbanas, as rurais, hoje em dia, têm as mesmas dependências de produção apoiada em energia elétrica. As seguintes aplicações clássicas para uso com fins produtivos em áreas rurais:

Força Motriz:

- acionamento de máquinas agrícolas;
- beneficiamento e classificação de cereais;
- preparo de alimentos para bovino cultura, suíno cultura, avicultura;
- automação da distribuição dos alimentos;
- bombeamento de água para limpeza e consumo;
- bombeamento de água para irrigação;
- bombeamento de água para tanques de piscicultura;
- ventilação de galpões;
- ordenha mecanizada.

Processos de moagem:

- extração de óleos vegetais;
- transporte de grãos;
- seleção de grãos.

Fonte de Calor:

- aquecedores de galpões;
- aquecimento de água nos tanques de piscicultura;
- em chocadeiras.

Resfriamento:

- processo de pasteurização de leite;
- tanques de resfriamento de leite para armazenagem até a coleta pelo caminhão-tanque;
- armazenamento de derivados do leite, produzidos nas próprias fazendas, como queijos, requeijão e manteiga;
- armazenamento de certos tipos de vinhos em vinícolas;
- conservação local de vacinas para os animais da fazenda;

- conservação de vacinas para humanos, nos postos de saúde em zonas rurais;
- refrigeração de alimentos perecíveis nas residências, vendas e centros comunitários.

Iluminação:

- residências;
- setores produtivos;
- galpões para aves;
- centros comunitários;
- escolas rurais.

O consumidor rural clássico, que demandava uma potência elétrica voltada para alimentar alguns “pontos de luz”, como uma bomba d’água, um motor elétrico de baixa potência para cortar alimento para os animais, hoje dispõe de equipamentos com microprocessador, máquina de lavar, geladeiras e outros, conforme visto acima.

O insumo de energia elétrica não supriu ainda a necessidade em termos de qualidade, eficiência e confiabilidade para o produtor rural que hoje demanda as mesmas condições de suprimento oferecida aos centros urbanos Silva et al. (2002).

Portanto, a eletrificação rural é um importante fator indutor do desenvolvimento humano, econômico e social, com impactos que ultrapassam as fronteiras das comunidades rurais. Além dos benefícios evidentes para a população rural com possibilidade de maior nível de conforto, satisfação, acesso aos meios de comunicação e informação, mecanização e consequente melhoria da produtividade agrícola, este setor impulsiona a cadeia produtiva industrial.

A pesquisa aponta para uma solução inédita, onde se utiliza o sistema MRT já instalado com a implantação de mais um cabo tendo o solo como terceira fase. Repotencializando os sistemas rurais monofásicos para um sistema trifásico.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo para avaliação da proposta do atendimento trifásico foi verificar a viabilidade prática de se transmitir energia elétrica utilizando o solo como um dos condutores.

Como objetivo específico este trabalho visa a:

- levantar informações sobre os diversos sistemas de eletrificação rural, monofásicos e trifásicos, visando indicar a melhor solução técnica para o suprimento de energia elétrica para os consumidores rurais;
- melhorar a qualidade, eficiência e portabilidade da energia elétrica no setor rural, sem maiores impactos ambientais, em particular na região amazônica;
- eliminar as faltas monofásicas de alta impedância, uma vez que nesses sistemas a menor corrente de curto-circuito é a bifásica (as chances de a proteção enxergar este defeito são maiores);
- isolar os sistemas rurais dos sistemas urbanos através do transformador isolador, estabelecendo qualidade de energia para o campo e maior confiabilidade nas áreas urbanas;
- formular um modelo matemático para o sistema trifásico a dois fios tendo o solo como a terceira fase;
- desenvolver por meio de simulações, com o auxílio do software ATP (Alternative Transients Program), um modelo do sistema trifásico a dois fios tendo o solo como a terceira fase;
- Experimentos realizados em um protótipo em escala reduzida de modo possibilitar a análise do comportamento do sistema.

1.4 MOTIVAÇÃO

A expansão de redes tradicionais de eletrificação na área rural é um grande desafio, pois a sua configuração foi gerida principalmente para atendimento de cargas concentradas.

A eletrificação rural tem suas características próprias, como já fora descrito anteriormente. Diante disso, pesquisas vêm sendo feita na intenção de responder à premência que se estabelece na eletrificação rural, com custos viáveis de instalação de redes de distribuição trifásicas.

1.5 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A transmissão de energia elétrica ou sinais para comunicação utilizando o solo como meio natural para condução, teve como precursor (TESLA, 1905). Que por meio de sua patente 787412, datada de 18 de abril de 1905, descreve: “A Arte de Transmitir energia elétrica através do meio natural”. A eletrificação rural dado as suas característica foi uma das beneficiárias direta desse tipo de pesquisa.

Nos Estados Unidos foi proposto um sistema fase/neutro. É um sistema monofásico a dois fios derivados de uma fase e o neutro do sistema trifásico a quatro fios de média tensão, o neutro é aterrado de forma permanente (GARWOOD, 1950).

Os primeiros trabalhos sobre sistema de distribuição monofásica com retorno por terra (MRT) foi realizado por (MANDENO, 1947), na Nova Zelândia. Durante um tempo deteve a patente do MRT, na Austrália e Nova Zelândia. Quando da publicação de seu primeiro artigo em 1947 tornou-se referência mundial na tecnologia MRT.

Vários pesquisadores têm se debruçado na busca da melhora dessa tecnologia, que tanto contribui para a qualidade de vida do homem do campo em todo mundo. Há uma expectativa de aumento de potência elétrica fornecida no campo, assim como, o reconhecimento da inviabilidade econômica utilizando os sistemas trifásicos convencionais.

A primeira alternativa disponível para a conversão de um sistema monofásico para um sistema trifásico, no lado da carga, foi baseada em elementos passivos, como capacitores e reatores com conversores e autotransformadores (MAGGS, 1946), para suprir cargas trifásicas. A maioria destes conversores permanece equilibrada apenas para uma carga especificada. Em (DEWAN, 1981) é apresentado um novo conversor estático monofásico trifásico usando dois reatores fixos, um capacitor fixo e quatro tiristores.

A eletrônica de potência desenvolveu vários sistemas de conversão monofásicos para trifásicos Hisano et al. (1966). Novas concepções de conversores para uso em cargas trifásicas foram desenvolvidas para diminuir a distorção harmônica e reduzir as perdas no conversor Cipriano et al. (2012).

Estes recursos, pode, dependendo do contexto, ser uma solução para questões locais; embora não aumente a capacidade do sistema de transmissão, e pode impactar a instalação de grandes cargas. Além disto, o uso em massa desses elementos degrada a qualidade de energia, devido à presença dos harmônicos.

A Tecnologia cabo para raios isolado e energizado (PRE) foi desenvolvida pelo Professor Francisco Iliceto da Universidade de Roma. Baseada na isolação e energização dos cabos para raios de uma linha de transmissão em corrente alternada, por meio da qual é feita o transporte de energia elétrica em Média Tensão, utilizando ou não o solo como caminho para retorno de correntes. “O artigo, Rural electrification inn Developing Countries With the Shield Wire Scheme Applications in Laos” Gatta et al. (2004), descreve a implantação da tecnologia PRE em operação no Laos desde 2002. Fornecendo eletricidade para mais de 100 aldeias, para algumas cidades pequenas e uma capital de uma província. A experiência do PRE no Brasil tem como localização a cidade de Itapuã do Oeste, que esta 100 km de Porto

Velho, Capital de Rondônia, que operou no período compreendido de 1997 a 2015. Na cidade de Jaru o PRE operou nos períodos de 1996 a 14/11/2000 (PIANTINI et al., 2009).

Em (FANDI, 2013) é proposto um sistema trifásico com dois fios para áreas rurais. Essa técnica trabalha bem, sem desbalanço com impedância de aterramento igual a 0Ω , e a capacidade de transmissão esta limitada a duas vezes ao sistema monofásico.

A proposta desta tese tem como desafio atender as regiões rurais, por meio de uma tecnologia confiável e economicamente viável. Buscando com isto, responder a crescente demanda com serviços de qualidade nas regiões rurais.

1.6 CONTRIBUIÇÃO DA TESE

Estabelecer um novo modelo para a distribuição da energia elétrica, que consiste na utilização de dois condutores aéreos, e o solo como alimentador, para formar um sistema trifásico a três condutores, restrito a equipamentos, e acessórios normalmente disponíveis no mercado.

Um transformador trifásico convencional será utilizado como transformador isolador mantendo suas características técnicas. E os outros materiais empregados como: postes, cabos, chaves, disjuntores, normalmente utilizados pelas concessionárias, sem impactar os seus almoxarifados, com produtos específicos. Pelo lado dos consumidores, os equipamentos: eletroeletrônicos, máquinas e motores com potências e tensões padronizadas, normalmente fornecidas pelo mercado.

Então é apresentada aqui uma nova concepção para o sistema de distribuição de energia elétrica a dois condutores capaz de responder 100% das cargas trifásicas, bifásicas e monofásicas rurais, simultaneamente.

Inspirado na tecnologia Para-Raios Energizado (PRE), no esquema trifásico, experiência única que funcionou no Brasil no período de 1997 a 2015, na cidade de Itapuã do Oeste e na cidade de Jaru de 1996 a 2000 no Estado de Rondônia (RAMOS, 2010), resultante de um convênio entre a ELETRONORTE e a CERON (atual Eletrobrás Distribuição Rondônia). Constitui-se num esquema trifásico, em que duas fases são suportadas pelos cabos para-raios e o retorno de corrente pelo solo, utilizando um sistema de Transmissão de Alta ou Extra Tensão.

Um projeto não convencional trifásico tem que trazer em sua contribuição: baixo custo, robustez, portabilidade, confiabilidade, manutenção simplificada. Em razão das

condições adversas estabelecidas pelas áreas rurais, com grandes extensões de redes rurais monofásicas.

Há uma ênfase na melhoria da energia elétrica e eficiência operacional para todo o sistema de distribuição. Isto é especialmente desafiador na área rural com longos circuitos radiais principalmente com distribuição monofásica (SAINT, 2007).

O método proposto apresenta as vantagens econômicas quando comparados com os sistemas trifásicos convencionais. Em relação às outras tecnologias que utilizam conversores eletrônicos ou **eletromagnéticos**, apresenta eficiência e qualidade para atender o consumidor rural, garantindo o aumento de potência energética para responder ao crescimento da produção e riquezas no campo.

1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em sete capítulos, incluindo a introdução ficando assim distribuído:

No Capítulo 2, foi feita uma abordagem histórica da eletrificação rural no Brasil e no mundo.

No Capítulo 3, são apresentadas várias técnicas utilizadas para eletrificação rural. Foi analisada as técnicas de distribuição rural existente e faz uma proposta inovadora, o sistema trifásico a dois fios que utiliza o solo como terceira fase.

No Capítulo 4, aborda a proposta da tese.

No Capítulo 5, são apresentadas as discussões dos resultados obtidos por meio das simulações computacionais.

No Capítulo 6, são apresentadas as discussões dos resultados experimentais.

Para finalizar, no Capítulo 7, as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros da tese são apresentadas.

2 ENERGIA ELÉTRICA NA ZONA RURAL

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Apesar de a energia elétrica ser um insumo de relevância para o aumento da produtividade agrícola, o produtor rural em vários países do mundo, inclusive no Brasil, durante décadas ficou alijado do sistema de eletrificação. Isso porque, tratando-se de uma tecnologia que exigia investimentos, não era atrativa por parte das concessionárias, devido às características de carga dos consumidores rurais e suas condições de renda, as quais se apresentam em áreas geograficamente dispersas e com baixo nível de cargas, não garantindo o retorno do investimento.

Experiências realizadas em países como: a China, Bangladesh, Tailândia onde a presença governamental foi de fundamental importância, ao tratar a eletrificação rural não somente como um negócio, mas como investimento social, por meio de programas de eletrificação, estes países tiveram êxito, permitindo que a eletrificação rural chegasse para grande parte de suas populações (BARNES, 2005).

No Brasil algumas iniciativas de governos estaduais e federal como o projeto “Luz da Terra” do Governo de São Paulo e o projeto “Luz do Campo” do governo federal respectivamente não lograram êxitos. A Lei nº 10.438/2002 e a Resolução Aneel nº 223/2003 estabeleceram as bases para universalização do acesso à energia. O Governo Brasileiro criou por meio do Decreto nº4. 873, de 11 de novembro de 2003, que instituiu o Programa Luz para Todos (LpT), que permitiu em sua primeira etapa, 10 milhões de brasileiros que viviam durante décadas na escuridão vissem a luz. O programa foi estendido atendendo a 15 milhões de consumidores rurais. A eletrificação rural no Brasil e em vários países do mundo, tanto os desenvolvidos como os subdesenvolvidos, construíram suas redes elétricas rurais no sistema monofásico (CEPEL, 2002).

O crescimento do agronegócio como atividade que contribui fortemente para o PIB promete mudar a configuração da eletrificação rural para o futuro. Que tem em suas atividades vários setores da economia que dependem de sua produção como: a indústria, comércio, serviços e transporte etc. O agronegócio tem demonstrado forte crescimento na produção e geração de riqueza, principalmente por meio da exportação de diversos produtos agrícolas para diversos países do mundo. Para ser competitivo e produtivo tem que ter acesso às novas tecnologias que demandam alto grau de mecanização e automação. Para isso precisa de potência elétrica de qualidade e confiável, uma vez que os sistemas monofásicos não são capazes de prover.

A sociedade organizada já começa a cobrar uma solução mais efetiva para resolver a questão de eficiência e qualidade de energia na área rural. Que passa pelo aumento de potência elétrica através de circuitos trifásicos. Para que isto possa ocorrer dentro de condições econômicas e financeiras compatíveis com o investimento, é necessário acesso a novas tecnologias que poderão esta a disposição dos gestores, para que estes possam optar por aquela com melhor viabilidade técnica e econômica.

2.2 ELETRIFICAÇÕES RURAIS NO MUNDO

A eletrificação rural é um grande desafio para diversos países. Alguns programas de eletrificação têm sido bem sucedidos, entre eles pode-se citar (BARNES, 2005):

- O programa de eletrificação rural na Tailândia que começou em 1972, quando o país tinha um baixo nível de desenvolvimento. Os moradores que viviam fora da Área Metropolitana de Bangkok, apenas 10% tinham acesso à energia elétrica. Trinta anos depois, entretanto, mais de 99% das Vilas tem serviço de eletricidade.
- Bangladesh, em 1976 enfrentou o desafio de criar uma política nacional e programas de eletrificação, em meio a uma infraestrutura subdesenvolvida, com um rápido crescimento populacional, e ainda enfrentando desastres naturais. Poucos teriam previstos que em 25 anos, este país pobre do Sul da Ásia teria sucesso em prover eletricidade para mais de 50% do total de sua população, incluindo 28% das residências rurais. Segundo Waddle (2005a), Bangladesh esta entre os países mais pobres no mundo, mesmo assim, da um exemplo de que um programa de eletrificação pode ser feito com sucesso mesmo em situações econômicas tão adversas.
- A China é o país continental com a maior população mundial. Forneceu eletricidade para um pouco mais de um bilhão de Chineses começou há cinquenta anos. Durante este período o programa mudou significativamente de seu modesto início para hoje.
- A maioria das aldeias rurais na China tem acesso à eletricidade. Esta conquista foi realizada com uma combinação de incentivos para o envolvimento local através de um processo evolutivo do apoio nacional. Conforme Waddle (2005b), embora se possa ficar impressionado com as realizações das empresas locais de eletricidade na China rural, o papel das agências de apoio local e agências administrativas estaduais não devem ser subestimados. O Estado entrou fundamentalmente como prestador de assistência e apoio para o processo global de Eletrificação Rural, com uma grande dose de criação de incentivos locais para o fornecimento de serviços de eletricidade.

- O mundo há muito tempo tem visto os Estados Unidos como um país desenvolvido, mas a sua situação de 65 ou há 70 anos não era tão monolítica. Em meados da década de 1930, a área rural dos Estados Unidos ficava muito atrás dos seus centros metropolitanos em desenvolvimento. Agricultura sofria de uma depressão em longo prazo. Eletrificação rural para as famílias era apenas 10%, em comparação com quase 85% dos domicílios urbanos. Nestes e outros aspectos, a desigualdade do desenvolvimento dos EUA no início do século 20 assemelha-se de muitos dos países em desenvolvimento de hoje. Poderíamos esperar, portanto, a experiência dos EUA de Eletrificação Rural (ER) que contenha algumas lições para os programas de ER de hoje.
- As empresas de energia em larga escala dominam o mercado dos EUA e desenvolvem atividades no exterior e têm feito isso por gerações. Portanto, pode ser surpreendente para alguns reconhecer que grandes empresas de serviços corporativos não levam eletrificação rural (ER) nos Estados Unidos. Em vez disso, ER cresceu de cooperativas sem fins lucrativos executados localmente aconselhados e financiados por um órgão federal, a Administração de Eletrificação Rural (AER).
- Outra agência federal, a Tennessee Valley Authority (TVA), construiu hidrelétrica e projetos para controle de inundações no Centro-Oeste e Sul. Forneceu energia de baixo custo para mais de um quarto das primeiras cooperativas (BROWN, 1980). Com a ajuda federal, as cooperativas elétricas rurais cresceram dentro dos primeiros 20 anos de fundação do programa dos EUA ER para servir mais de 4 milhões de pessoas mais pobres e mais dispersos do país (WOLMAN, 2005).

2.3 ELETRIFICAÇÕES RURAIS NO BRASIL

Em 1995, o Estado de São Paulo por meio de uma proposta do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), criou um programa de eletrificação rural com o objetivo de atender à população mais pobre, o programa de eletrificação rural “Luz da Terra”. A configuração do programa mostrou-se inadequada devido à participação de 95% por parte do agricultor e 5% por parte da concessionária. Outro projeto com o modelo parecido foi criado, pelo Governo Federal denominado “Luz no Campo” de caráter nacional, que também malogrou.

A Lei nº 10.438/2002 e a Resolução Aneel nº 223/2003 estabeleceram as bases para universalização do acesso à energia com cronograma e critérios de atendimento que não atenderiam a urgência da população rural carente, excluída deste serviço. O governo federal criou o Programa Luz para Todos (LpT), por meio do Decreto nº 4.873/2000, estabelecendo recursos setoriais para seu financiamento, o governo utilizou como parâmetro o Censo Demográfico do IBGE, de 2000, em que apontava para um contingente de dez milhões de

peças sem energia elétrica. Este programa diferia na sua composição efetivamente dos outros programas supracitados, trazendo no seu bojo o reconhecimento de décadas de abandono de uma política de eletrificação rural, em que penalizou uma imensa quantidade de brasileiros que teve roubada a sua cidadania. A meta inicial estabelecida pelo governo de atender a dois milhões de residências foi alcançada em 2010, segundo o Ministério de Minas e Energia. O LpT por meio do Decreto nº 6.442/2008 foi prorrogado. “Hoje, a energia elétrica está presente em 3 milhões 95 mil 724 lares brasileiros transformando a vida de 15 milhões de pessoas que moravam no escuro”, declarou Aurélio Pavão de Farias, Diretor Nacional do Programa. Porém ainda não se consolidou a questão primeira que é 100% de todos os domicílios brasileiros terem energia elétrica. Esta política de eletrificação rural necessita ser ampliada, além de não contemplar a todos, a qualidade de energia oferecida necessita de investimento para assegurar qualidade e eficiência, para o produtor rural. O aumento da produtividade passa inquestionavelmente por uma energia que garanta continuidade da produção. Em termos técnicos é fundamental que o agricultor familiar que tem menor renda, tenha acesso a ligações trifásicas, pois se trata de um sistema com mais recursos técnicos quando comparado com os sistemas monofásicos. Proposta de Projeto de Lei (PL-3777/2012) aponta a necessidade de o produtor agropecuário ser beneficiado por programas de universalização em áreas rurais, e poder optar pela conexão trifásica à rede elétrica de distribuição.

Outra questão relevante que passa tecnicamente pelo programa LpT, é que este foi montado em cima de um sistema de distribuição urbano, que já dava mostra de operação no limite, em vários lugares. O sistema de distribuição carece de maiores investimentos para evitar no futuro um colapso, que poderá comprometer não só a área rural, mais também a urbana.

2.4 O ACESSO DO AGRICULTOR RURAL A TECNOLOGIA E EQUIPAMENTOS TRIFÁSICOS

No Brasil como em outras partes do mundo, os suprimentos de energia elétrica nas áreas rurais são predominantemente monofásicos.

Porém, deve-se levar em consideração as mudanças que estão ocorrendo no campo com a chegada da energia. O agricultor rural, em especial o produtor familiar quer ter acesso a qualidade de energia para melhorar a sua produção. Hoje o grande clamor está que as ligações monofásicas, trazem diversos obstáculos para o crescimento. Os equipamentos elétricos,

principalmente os motores monofásicos são mais caros que os trifásicos, exigem investimentos iniciais mais elevados por parte do consumidor rural. Como é de conhecimento os motores monofásicos tem rendimento inferior. Isto aumenta o custo de produção do agricultor, trazendo em consequência a redução da competitividade das pequenas propriedades. Por outro lado, a participação crescente do agronegócio de forma expressiva no PIB, denota o crescimento da riqueza no campo. As exigências deste consumidor tende a aumentar, cobrando uma energia que responda as suas necessidades não só básicas, mas também para o entretenimento. Pois este consumidor com a melhora de sua renda, passou a ter acesso a produtos com tecnologias com microprocessador, como: Computadores, máquinas de lavar, geladeiras, ar condicionado, micro ondas que demandam qualidade de energia e eficiência, pois estes equipamentos são susceptíveis ao fornecimento de energia de má qualidade diminuindo seu tempo de vida útil. Hoje o consumidor rural anseia pela mesma qualidade de vida do consumidor urbano, onde esse tem a sua disposição as redes trifásicas de energia elétrica com as condições adequadas para evolução de suas cargas, seja ela, para a produção ou uso doméstico. O agronegócio aponta para uma nova fase da eletrificação rural, a sociedade como um todo terá de buscar soluções adequadas. Investindo neste segmento de mercado que já tem dado resposta para sua participação expressiva na produção de alimentos, segurança alimentar e na geração de riqueza para o País. Para exemplificar a urgência de medidas objetivas, uma audiência pública realizada na Assembleia Legislativa do Rio Grande do Sul no dia 16 de julho de 2015, o seminário “Energia – A Qualidade que o Brasil Precisa” demonstrou claramente, as dificuldades dos produtores rurais do Estado do Rio Grande do Sul em relação à qualidade da energia elétrica fornecida para sua produção. Na ocasião foi apresentada uma proposta para “reconstrução das redes atuais já ultrapassadas e construção de novas redes monofásicas, bifásicas e trifásicas para atender às comunidades do interior”. Calcula-se um investimento inicial no valor de R\$ 400 milhões de reais. Com a participação do governo federal 50%, distribuidoras 30%, produtores 15%, e o Estado 5%.

E o futuro conta com a produção brasileira de alimento, a população mundial atingiu 7 bilhões de habitantes, as projeções da FAO¹ sinalizam para 2025 uma população de 7,851 bilhões, com (58%) 4,579 bilhões vivendo nas cidades e 3,272 bilhões (42%) nos campos. A previsão para 2050 é que este número alcance 9 bilhões. O grande desafio para agricultura mundial é produzir alimentos, fibras e energia suficientes para atender a demanda crescente. O Brasil pode e deve contribuir, pois desempenha papel de destaque, pois ainda

¹ Food and Agriculture of the United Nations.

tem uma grande quantidade de terras agriculturáveis em estoque. O agronegócio tem conquistado novos mercados em diferentes partes do mundo.

Para alcançar um nível de excelência o Brasil terá de investir na eletrificação rural trifásica. Buscando soluções tecnológicas e novos modelos para fazerem frente a este desafio. Estas novas tecnologias terão que apresentar custos adequados de implantação, respondendo a modicidade tarifária, para que o agricultor familiar e o patronal possam ter no insumo eletricidade, custos razoáveis para aumento de sua produtividade e maior competitividade de seus produtos no mercado. A agricultura moderna demanda alta capacidade de produção de maquinários agrícola, colheitadeiras e tratores e baixo custo de produção. No Capítulo 3 serão detalhadas as tecnologias atualmente utilizadas e as novas que estão sendo propostas para Eletrificação Rural.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo fez uma abordagem histórica da Eletrificação Rural no Brasil e no Mundo. Enfatizou os programas de governos nacional e internacional que foram criados para resolver o problema da eletrificação rural mostrando seus êxitos e fracassos. Como o foco principal do capítulo é a Eletrificação Rural Trifásica, uma breve discussão sobre os sistemas monofásicos foi realizada, destacando a sua limitação técnica para o setor agrícola que tem a necessidade premente de crescimento de sua produtividade. Por fim, apresenta-se o argumento mais factível que o Brasil terá que investir na eletrificação rural trifásica, buscando novas tecnologias e modelos capazes de serem eficazes e terem custos módicos.

3 TÉCNICAS DE ELETRIFICAÇÃO RURAL

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A evolução dos sistemas elétricos para eletrificação rural deu-se em função das características de cargas e a dispersão da população no meio rural. Isso passa por um repensar sobre o suprimento de energia elétrica a esse novo tipo de consumidor. O modelo da eletrificação urbana não se encaixava dentro do perfil necessário à área rural, já que ela, prima pela concentração das cargas com uma demanda alta, possibilita o uso das técnicas já conhecidas, como eletrificação trifásica e monofásica convencional nos centros urbanos, com retorno econômico garantido para os investidores.

Como o sistema de eletrificação rural não tem o apelo econômico ao seu favor, os recursos são de natureza pública e tem de ser empregados de maneira criteriosa. Os países desenvolvidos como Nova Zelândia, Austrália, Estados Unidos e Rússia, entre outros, desenvolveram técnicas que tinham custos de implantação, operação e manutenção mais próxima da realidade do consumidor rural, a experiência da eletrificação rural brasileira teve como inspiração a dos países citados.

3.2 SISTEMAS UTILIZADOS NA ELETRIFICAÇÃO RURAL

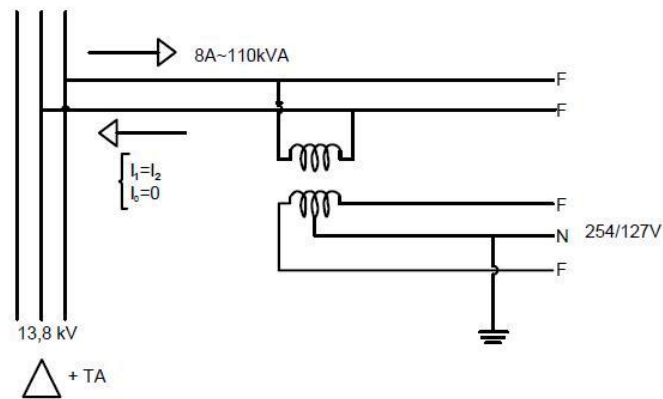
Os sistemas em uso são:

- o sistema fase/fase;
- o sistema fase/neutro;
- o sistema monofilar com retorno por terra-MRT (CEPEL, 2002).

3.2.1 O Sistema Fase/Fase

A França utilizou uma das primeiras técnicas de eletrificação rural, chamada de sistema fase-fase. O circuito era trifásico a duas fases, sem a utilização do condutor neutro para atendimento monofásico. Idênticos a estruturas trifásicas, porém sem o condutor central. Sendo uma opção para regiões onde o tronco de distribuição trifásico de energia elétrica da concessionária é constituído por três condutores fases. Deriva um ramal bifásico que irá alimentar um sistema bifásico ou monofásico fase-fase Figura 3.1. No Brasil, algumas concessionárias, tais como COPEL, CEEE, CEMAT, COSERN, COELBA, CELPE, etc. usam-no (CEPEL, 2002).

Figura 3.1 – Sistema bifásico ou monofásico fase-fase – tronco trifásico a três fios



Fonte: CEPEL (2002).

Existem dois tipos de sistemas bifásicos: o horizontal e o vertical, os bifásicos verticais utilizam postes similares ao sistema monofásico fase-neutro.

O sistema horizontal, exemplificado pela figura 3.2, leva na sua configuração uma possibilidade de crescimento rápido de carga, para uma determinada região, onde só será necessária a instalação de um terceiro condutor com todas as suas estruturas de instalação para transformá-lo num sistema trifásico.

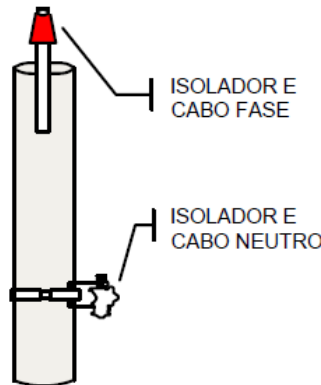
Figura 3.2 – Rede bifásica horizontal para distribuição rural



Fonte: Rede de distribuição Eletrobrás-RO (2014).

3.2.2 Sistema monofásico convencional – MRN

Figura 3.3 – Aparência de um sistema fase neutro



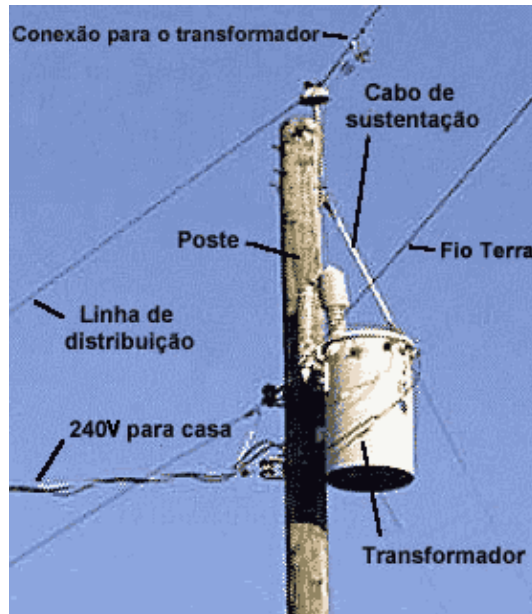
Fonte: Adaptado da CEPEL (2002).

Desde 1935, os Estados Unidos utilizam este tipo de sistema, conforme mostra a figura 3.3. Este é monofásico com retorno pelo neutro, interligado ao potencial do solo por meio de aterramentos ao longo da rede. A derivação monofásica (fase/ neutro) sai do circuito trifásico a quatro fios, com neutro multiaterrados. E em alguns casos o neutro não sai da fonte terá que vir do ponto de origem da alimentação até o destino. Pode também utilizar um transformador de aterramento sendo um transformador bifásico ligado a duas fases de um sistema trifásico, derivando a tensão fase/neutro. As principais vantagens são:

- eliminação das cruzetas e ferragens associadas;
- eliminação de um isolador de alta tensão por poste (em relação ao sistema fase/fase);
- simplificação da construção, permitindo maior rapidez e menores custos;
- utilização de estações transformadoras mais simples e baratas, pois os transformadores têm somente uma bucha de alta tensão, exigindo um único para-raio e uma única chave monofásica;
- possibilidade de usar o neutro comum na alta e na baixa tensão.

Em média alcançam uma redução de custo de aproximadamente 20%, em relação aos sistemas fase/fase (CEPEL, 2002). No Brasil algumas concessionárias também utilizam esse sistema, como a CEB, CELPE, CELPA, COELBA, ESCELSA, entre outras. A figura 3.4 ilustra este tipo de instalação.

Figura 3.4 – Posto de transformação - linha de distribuição rural de 13,8KV-



Fonte: publicações ELETRONORTE (2004).

3.3 SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO POR TERRA (MRT)

O Sistema MRT inicialmente foi instalado na Nova Zelândia por Mandeno em 1930 e ainda é usado nas áreas rurais da Austrália, África do Sul e parte do sudoeste da Ásia.

O MRT na Nova Zelândia não logrou êxito devido a algumas razões que incluía:

- casas com maior padrão de exigência em relação à diversidade máxima de demandas;
- limitações da máxima corrente de terra para 8 amperes pelo NZECP 41:1993 (New Zealand Electric, 1993);
- melhor acesso de energia elétrica em áreas rurais;
- alta densidade de cargas que significa que os sistemas bifásicos ou trifásicos são mais convenientes para distribuição de energia elétrica;
- expectativa de suprimento de alta qualidade;
- demanda de suprimento trifásico para motores de grande porte;
- declínio no interesse em usar a tecnologia.

Porém a tecnologia é ainda valorizada para atender a algumas áreas remotas do país, particularmente onde melhorias técnicas podem ser aplicadas para estender a vida útil do

sistema instalado, postergando a mudança onerosa da substituição por um sistema bifásico ou trifásico convencional (HOLLAND, 2004).

A Austrália, em 1950, adotou o MRT dando um maior desenvolvimento à tecnologia e expandindo a eletrificação rural em seu vasto território e com vazio populacional. Antes a tecnologia utilizada era o sistema fase/fase. Mas, devido ao custo crescente para atingir as populações mais dispersas em áreas cada vez mais remotas optou-se pelo MRT. O MRT australiano está passando por uma nova etapa com investimento na melhora do desempenho da tensão ao longo das linhas em função do crescimento das cargas. No interior da Austrália a sua utilização é intensa, com alguns circuitos chegando a 300 km, de forma ramificada, em comprimento. O desenvolvimento tecnológico do MRT tem melhorado significativamente e é bem adequado para conectar com as redes de distribuição modernas, para atender consumidores com cargas baixas em áreas remotas (HOLLAND, 2004).

- Regulação de tensão – Um dos problemas que é inerente ao MRT é a regulação precária devido ao efeito de acoplamento que ocorre em linhas de comprimentos longos com injeção de capacitivo na rede, efeito Ferranti. O problema tem se intensificado com o aumento das cargas. Em vários sistemas empregam-se reatores shunt fixos, porém a regulação para carga leve e pesada não é garantida. Algumas inovações surgiram, como os reguladores de tensão inteligentes, onde o controle da tensão é feito por meio eletrônico.

Com a melhora financeira do setor rural nos países desenvolvidos uma demanda por energia de melhor qualidade, passou a ser exigida pela população rural. Como visto a melhor opção ainda para as características de atendimento da área rural é o MRT. Com isto, recursos tecnológicos são implementados na perspectiva de manter o MRT funcional durante mais alguns anos, adiando investimentos maiores e imediatos, viabilizando futura mudança para sistema elétrico de distribuição bifásica ou trifásica convencional.

3.3.1 Sistemas MRT no Brasil

O MRT evoluiu no Brasil a partir de conhecimento adquiridos juntos a outros países que já tinham experiência, em especial a Austrália. O sistema MRT que foi desenvolvido na Nova Zelândia, mas a Austrália investiu nesta tecnologia e passou com isso a ser uma referência para os outros países, tendo a seu favor o diferencial de baixo custo com um sistema que atende cargas esparsas em grandes áreas geográficas.

Do tronco trifásico de distribuição deriva um condutor que irá alimentar a fase do primário do transformador monofásico, o retorno de corrente para subestação é realizado

através do solo. A subestação da origem a um circuito trifásico, que tem o secundário do transformador em estrela aterrado, para fechar o circuito com a corrente de retorno do MRT.

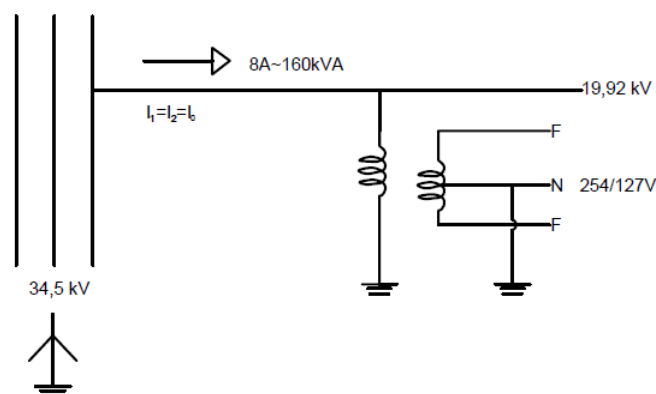
Dado as características das cargas rurais não é muito fácil manter as fases que alimentam os diversos circuitos MRT's balanceadas. Verifica-se, portanto, que o aterramento, bem como as características ambientais relacionadas à formação geológica do solo, sua compactação, seu teor de umidade e a quantidade de sais nele dissolvidos são fatores fundamentais na garantia da utilização eficiente e segura do sistema MRT (SOUZA, 2013).

Os valores típicos de tensão das linhas MRT são $13,8/\sqrt{3}$ kV, $23/\sqrt{3}$ kV e $34,5/\sqrt{3}$ kV, determinando, respectivamente, 7,967 kV, 13,279 kV ou 19,919 kV como tensões sobre os enrolamentos primários dos transformadores de distribuição rurais, ligados entre a fase e a terra.

No lado BT, são estas as tensões padronizadas para rede de distribuição monofásica, que apresentam sempre duas possibilidades de tensões, em relação ao enrolamento secundário: 254/127 V, 440/220 V, 230/115 V, 220/110 V e 240/120 V. Definida pela norma ABNT NBR 5440:2011 intitulada “Transformadores para redes aéreas de distribuição”.

A figura 3.5 apresenta-se como uma simplificação do monofásico multiaterrado convencional com eliminação do condutor neutro e, conseqüentemente, dos aterramentos ao longo da linha, comprovadamente a versão mais prática e econômica do MRT, sendo, portanto, a mais recomendada (CEPEL, 2002).

Figura 3.5 – Sistema Monofilar

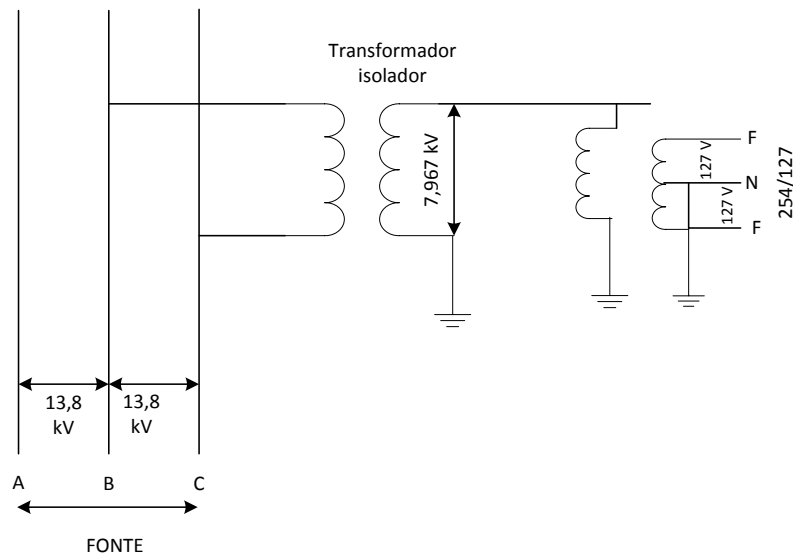


Fonte: COPEL Distribuição rural em 34,5 KV (2002).

3.3.2 Sistema Monofilar com Transformador de Isolamento

O sistema com transformador de isolamento é largamente utilizado em países como Austrália e Nova Zelândia. O sistema tem como característica um transformador isolador. Tendo enrolamento primário conectado entre duas fases, um dos terminais do enrolamento secundário é aterrado, cuja função é promover confinamento da corrente de retorno. A outra fase do secundário vai até ao transformador do consumidor onde liga no primário, e a corrente retorna por meio do aterramento no transformador do consumidor, fechando o circuito. A figura 3.6 mostra um transformador isolador instalado.

Figura 3.6 – Transformador isolador utilizado em uma rede MRT



Fonte: Próprio autor.

Enumeram-se algumas vantagens do emprego desta tecnologia:

- elevar a tensão para permitir o atendimento a uma área mais ampla em condições econômicas;
- limitar a zona de circulação das correntes de retorno pela terra, evitando interferências em linhas de telecomunicações fora do percurso do ramal;
- limitar as correntes de curto-circuito nas linhas MRT (CEPEL, 2002).

Atualmente, com a evolução das tecnologias para redes elétricas como um todo, o sistema MRT nestes países experimenta melhoras para atender com qualidade e confiabilidade às redes de eletrificação rural.

No Brasil, alguns problemas com o MRT na sua concepção técnica, após sua implantação, geraram por parte de algumas concessionárias resistências para sua expansão no meio rural. A falta de estudo mais aprofundado sobre o uso do transformador isolador trouxe uma interpretação equivocada, que esse representava somente mais um custo.

Outras desvantagens consideradas são:

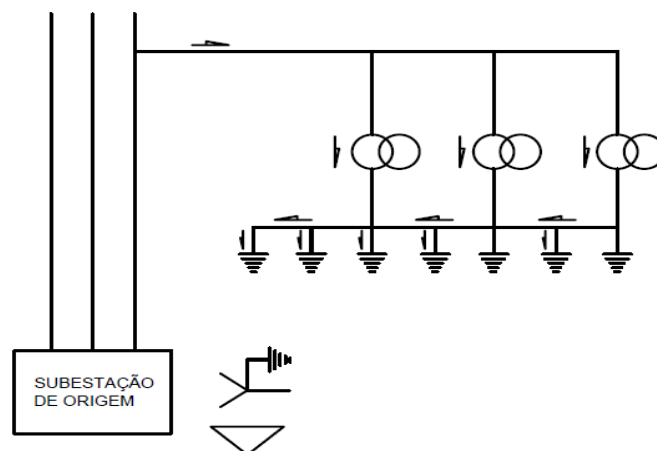
- a potência nominal do transformador de isolamento limita o suprimento de energia;
- necessidade de se reforçar o aterramento do transformador de isolamento, pois na sua falta cessa o fornecimento de energia para todo o ramal.

O transformador isolador no MRT isolado pode ser empregado no MRT convencional ou MRN. A corrente de retorno é feita pela terra, no entanto ela chega até o aterramento do secundário do transformador isolador sem retornar a subestação do tronco trifásico que alimenta o primário, isso é uma função importante no confinamento da corrente de carga em uma determinada área.

3.3.3 Sistema MRT na Versão Neutro Parcial

Este sistema tem como característica sua utilização em regiões em que o MRT convencional, não consegue responder devido à alta resistividade do solo como mostra a figura 3.7.

Figura 3.7 – Sistema MRT na Versão Neutro Parcial



Devido à dificuldade de encontrar valores adequados para aterramentos em solo com alto nível de resistividade, esse sistema responde com um fio neutro conectando os vários aterramentos, buscando com isso adequá-los ao valor necessário para o bom desempenho.

Ao contrário das redes usuais de distribuição, onde o condutor neutro é aterrado em intervalos regulares, geralmente de 300 m, no caso de redes de distribuição multiterradas, devem ser instaladas hastes de aterramento em todos os pontos nos quais estão instalados equipamentos como transformadores de potência e para-raios, nos pontos de entrega de energia ao consumidor e nos pontos de transição da rede primária para suas derivações.

3.3.4 Tipos de Condutores Utilizados no Sistema MRT

O padrão de condutores elétricos utilizados na eletrificação rural são os de alumínio com alma de aço, denominados CAA no Brasil. Esse tipo de condutor substitui o de cobre, de maior custo, que também, por ser mais pesado exige uma estrutura de suporte mais cara.

Os condutores de aço zincado, e o condutor de aço aluminizado (não convencionais) apresentam boa resposta técnica, reduzindo os custos, de instalação e de manutenção das linhas rurais. Dada a sua capacidade de tração, tais condutores permitem o uso de uma estrutura mais leve com menor número de postes por Km de linha. Apesar de terem uma baixa capacidade de corrente, muito inferior aos condutores convencionais, são usados para atender à baixa densidade de cargas. Em determinadas condições geográficas são utilizados para vão de até 300 metros em terrenos planos; em caso de terrenos montanhosos, podem chegar até 1200 metros. Utilizando o condutor de aço zincado CAZ 3,09mm, por exemplo, poderá alcançar uma economia no custo de implantação de 48,4% em relação a um sistema construído com condutor CAA – 4 AWG.

A aplicação do condutor de aço zincado CAZ 3,09mm é restrita a algumas situações de projetos. Isso, pois apresentam reduzida capacidade de condução de corrente, implicando em maiores perdas elétricas e queda de tensão por quilometro de rede comparado ao condutor CAA 21,15 mm (SILVA, 2006).

3.3.5 Regulação de Tensão no MRT

A regulação de um sistema MRT é de baixa qualidade. Porém, o desempenho do sistema elétrico depende dela. Os problemas mais comuns nas áreas rurais esta relacionado com a qualidade de energia elétrica.

As características de alimentação feitas para os circuitos rurais, geralmente consideram um circuito trifásico que sai de uma subestação urbana e segue por quilômetros num sistema radial até determinado centro de carga. Devido à corrente de carga ser predominantemente indutiva, uma sequência de reguladores de tensão ou bancos de capacitores estáticos ou sistemas mais modernos com controle eletrônico são instalados ao longo da rede no sentido de regular a tensão.

As figuras 3.8, 3.9 e 3.10 mostram as sequências de alimentação em uma linha rural no Estado de Rondônia da concessionária Eletrobrás Rondônia (CERON). Do alimentador tronco trifásico derivam-se circuitos monofásicos. Ao longo do alimentador tronco, à medida que as cargas instaladas demandam menor potência, o circuito trifásico é substituído por um circuito bifásico. Como no final da linha há uma baixa demanda de cargas instaladas, o alimentador tronco transforma-se em um sistema monofásico.

Figura 3.8 – Linha Rural Eletrobrás Rondônia sistema trifásico



Fonte: Rede de distribuição Eletrobrás-RO (2015).

Figura 3.9 – Prosseguimento da Linha Rural Eletrobrás Rondônia utilizando das fases



Fonte: Rede de distribuição Eletrobrás-RO (2015).

Figura 3.10 – Prosseguimento da Linha rural Eletrobrás Rondônia utilizando uma fase



Fonte: Rede de distribuição Eletrobrás-RO (2015).

Com o objetivo de reduzir custo na aplicação do MRT, a solução para se obter boa regulação de tensão no circuito é limitar a corrente máxima a 8A, da derivação MRT ou limitar o comprimento máximo do ramal MRT ou ainda limitar a potência a ser fornecida à carga (SILVA, 2006).

3.3.6 Aterramento o desafio do sistema MRT

No Brasil, algumas concessionárias após terem o sistema MRT instalado, reviram seus projetos e acabaram por utilizar um cabo de neutro como condutor, no lugar do retorno por terra (sistema fase/neutro).

A viabilidade de um sistema MRT passa principalmente por um sistema de aterramento que responda às características de circulação da corrente. A segurança para as pessoas e os animais que ali circulam, estão intrinsicamente ligados com o cálculo da resistência de aterramento e aos potenciais na superfície do solo.

O sistema MRT tem como característica a corrente de retorno pela terra. Logo, esse convive com desafios constantes, já que a passagem de corrente pelo solo constitui um elemento de risco para vidas humanas e animais. Com isto o projeto de um sistema de aterramento precisa ser muito bem dimensionado afastando qualquer possibilidade de acidente. Geralmente, as tensões de passo, toque, toque máxima (tensão de *Mesh*) e transferida determinam o nível de segurança do aterramento (RAGGI, 2009).

Um projeto cuidadoso deve resultar em uma baixa resistência de terra e reduz os gradientes de tensão para valores seguros. As ligações a terra devem ser estáveis e de resistências adequadas, pois as redes monofilares têm seu desempenho, tanto sob aspecto de confiabilidade como segurança, estritamente vinculado as condições dos seus aterramentos (BERTOLLO, 2008).

3.3.7 Atendimento à Área Rural por meio Sistema Trifásico Convencional

O produtor rural do agronegócio familiar ou patronal demanda aumento de sua produção. Para isso requer energia elétrica de qualidade e confiável. O atendimento às cargas elétricas rurais é realizado para a quase totalidade, por meio de redes de distribuição monofásicas, sendo que não correspondem às expectativas esperadas.

A demanda crescente por cargas motrizes de maior potência, que responde por boa parte da produção do campo, exige a utilização de redes de distribuição trifásica em média tensão, para substituir as redes monofásicas.

Porém, o custo associado a construção de uma rede trifásica convencional irá onerar o agricultor rural familiar, independentemente de se tratar de um novo ramal ou de adaptação de ramal existente. Isto, pois em geral, ele se encontra a alguns quilômetros dos troncos das redes trifásicas, e dependendo da distância, o projeto poderá vir a ser inviabilizado.

O Brasil contava em março de 1986 com 40.912 km de linhas de distribuição rural operando no sistema MRT, implantadas através de empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica, atendendo a 124.328 consumidores. Sendo que desse total, 13.211 km com 51.417 consumidores são na versão neutro parcial e 59 km com 108 consumidores são ramais partindo de transformadores de isolamento (Tabela 3.1) (CEPEL, 2002).

Tabela 3.1– Sistemas MRT implantados pelas empresas distribuidoras de Energia Elétrica

Empresa	Estado	Região	Início das Experiências	Sistema MRT Implantado					
				MRT Monofilar		MRT – Monofilar com trafo Isolador		MRT Neutro Parcial	
				Cons. ligado	Km de linha	Cons. ligado	Km de linha	Cons. ligado	Km de linha
CEMAR	MA	NORDESTE	1979	1.800	2.000	–	–	–	–
CELPE	PE	NORDESTE	1980	2.000	370	–	–	1.100	500
COBER	BA	NORDESTE	1980	4.201	258	–	–	19	27
LIGHT	RJ	SUDESTE	1982	–	–	108	59	298	134
CESP	SP	SUDESTE	1981	52	73	–	–	–	–
COPEL	PR	SUL	1967	53.000	20.000	–	–	–	–
CELESC	SC	SUL	1974	3.000	1.500	–	–	50.000	12.500
CEEE	RS	SUL	1980	8.750	3.500	–	–	–	–
TOTAL				72.803	27.701	108	59	51.417	13.211

Fonte: CEPEL (2002).

3.3.8 Outras Propostas Tecnológicas para Atendimento a Cargas Trifásicas Rurais

3.3.8.1 Sistema Conversor Monotrifásico

Conforme (FANDI, 2013), algumas soluções foram desenvolvidas por meio de projetos de conversores monotrifásicos, ou seja: conversores rotativos monotrifásicos, constituídos de máquinas rotativas;

- conversores estáticos monotrifásicos, empregando elementos reativos (indutores e capacitores) convenientemente associados;
- conversores eletrônicos monotrifásicos, utilizando componentes eletrônicos para a composição de unidades de retificação e inversão.

Os conversores rotativos são os mais comuns em termo de utilização, dada a sua simplicidade de instalação, não necessitando de cálculo elaborado para a seu dimensionamento. A máquina rotativa que irá girar a vazio terá que ter a mesma capacidade de potência das cargas trifásicas que serão conectadas a ela. Porém não possuem controle de corrente de partida, não garantido tensões trifásicas reguladas nos terminais do motor. Tem um custo agregado de manutenção por força de suas partes móveis.

Entre essas tecnologias, o conversor estático, é o mais limitado em razão de sua especificidade de dimensionamento. Os valores calculados dos elementos passivos indutâncias e capacitâncias são cuidadosamente dimensionados para carga específica.

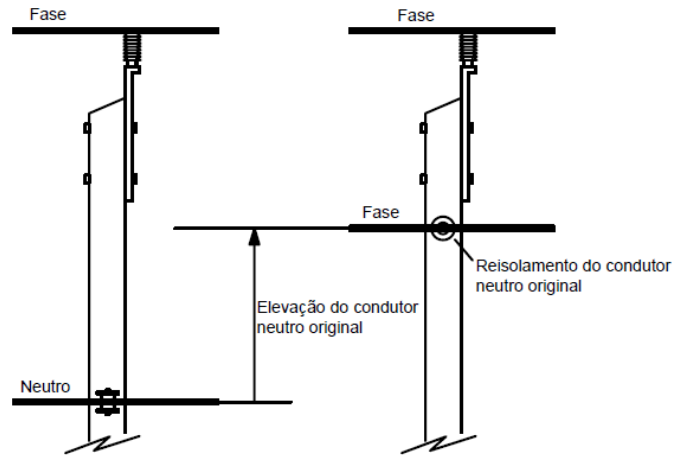
3.3.8.2 Sistemas de distribuição a dois condutores

Esta proposta trata de um sistema conversor bifásico para trifásico, com o intuito de atender a cargas rurais trifásicas a partir de ramais aéreos de distribuição a dois condutores. Tendo seu maior apelo, o baixo custo de implantação, já que utiliza a rede instalada MRT ou MRN existentes. Em relação à reutilização do MRT com retorno por terra terá que ser instalado outro condutor da fonte até o ponto de entrega ao consumidor rural. Caso seja um sistema fase/fase ou fase/neutro serão necessárias as adaptações feitas num circuito monofásico, porém sem a necessidade de utilização de um outro condutor, pois o sistema tem como característica somente dois fios no primário para obter uma tensão trifásica no secundário. No caso de uma nova instalação toda a estrutura de um circuito deverá ser implantada.

Trata-se de uma técnica de arranjos eletromagnéticos específicos que utiliza os equipamentos normalmente usados pelas concessionárias sem maiores impactos de tecnologia especializada. Usa um transformador monofásico com relação de 1:1 que tem por finalidade criar uma defasagem de 60° entre as duas fases do primário.

O sistema trifásico a dois condutores baseia-se na disponibilidade de dois condutores energizados cujas tensões de fase apresentem mesmo módulo, porém defasadas de 60° uma da outra (FANDI, 2013). Como a proposta tem sua aplicação mais direta em um circuito existente, disponibilizando dois condutores energizados no primário, no caso de um sistema fase/neutro, basta conectar o neutro numa das fases do circuito trifásico tronco e derivar até ao consumidor. A figura 3.11 ilustra a adaptação da estrutura existente que utiliza o neutro como retorno no MRT.

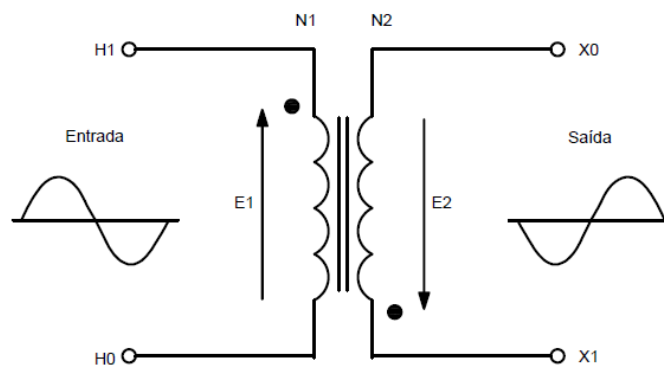
Figura 3.11 – Adaptação das estruturas de sustentação do condutor neutro original do ramal monofásico existente



Fonte: Adaptado de Fandi Juliane (2012).

O projeto faz uso de um transformador monofásico com relação 1:1, com polaridade aditiva, em uma das duas fases do primário. Possibilitando a defasagem de 180° , conforme mostra a figura 3.12.

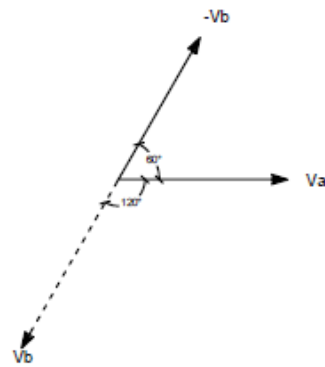
Figura 3.12 – Polaridade aditiva



Fonte: Adaptado de Fandi Juliane (2012).

O diagrama fasorial apresentado na figura 3.13 mostra que ao se definir a fase A, como referência, e tendo um transformador monofásico na fase B, com polaridade aditiva alcança-se a defasagem esperada de 60° entre elas.

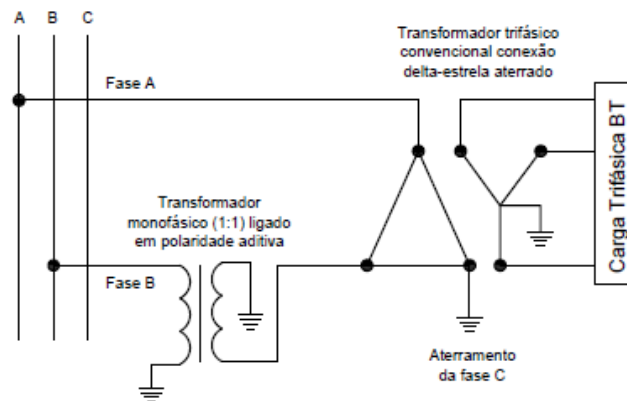
Figura 3.13 – Diagrama fasorial ilustrativo das tensões resultantes nas fases A e B do novo ramal bifásico



Fonte: Adaptado de Fandi Juliane (2012).

O diagrama elétrico dessa técnica é mostrado na figura 3.14

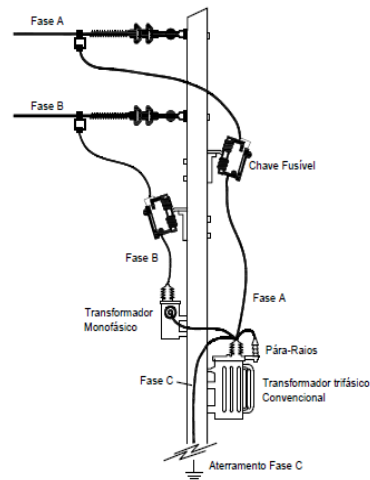
Figura 3.14 – Diagrama do sistema proposto para atendimento a cargas trifásicas rurais



Fonte: Adaptado de Fandi Juliane (2012).

A figura 3.15 apresenta o desenho esquemático da estrutura que faz interface com a carga trifásica.

Figura 3.15 – Desenho esquemático da estrutura



Fonte: Adaptado de Fandi Juliane (2012).

Observa-se que um transformador monofásico 1:1 ligado em polaridade aditiva é colocado na fase B, depois da chave de proteção monofásica e daí a fase é conectada na bucha do transformador. A fase A passa pela chave monofásica de proteção indo diretamente na segunda bucha. Por outro lado, a fase C não está presente, esta é aterrada na configuração delta/estrela de um transformador convencional do lado do primário no ponto de entrega do consumidor rural.

Nessa configuração, a potência a ser oferecida a carga fica limitada à potência do transformador monofásico que defasa uma das fases do primário em 180°. Segundo (FANDI, 2013), é que a efetividade do novo sistema de distribuição foi comprovada por meio de simulações computacionais, onde se analisou o desempenho do sistema em condições de regime permanente e de perturbações relacionadas à qualidade da onda da tensão. O autor concluiu que o sistema apresenta desempenho compatível com as redes de distribuição convencionais.

Enfim, em se tratando de uma proposta ainda não incorporada a uma instalação real, ficam faltando algumas respostas, a questionamento, tais como:

- a) Como se comportará o sistema quando a fase a ser aterrada estiver num terreno cuja resistividade seja alta ou sofra sazonalidade?
- b) A partir da derivação, qual a distância segura para atendimento de um consumidor rural que se localiza a alguns quilômetros?

- c) Quanto à tensão de passo e toque, as medições a serem realizadas estarão dentro dos valores simulados e considerados seguros?
- d) Os custos apresentados no projeto simulado confirma-se-á, numa instalação real?
- e) O transformador monofásico utilizado para criar a defasagem entre as duas fases aéreas não será um grande impeditivo para o sistema de potência trifásico, que necessite de uma potência maior do que as simuladas?
- f) A demanda reprimida de potência trifásica para o aumento de produção do agronegócio terá a sua expectativa confirmada?
- g) Em caso de defeito ou queima do transformador defasador o sistema não fica vulnerável em relação ao suprimento da carga?
- h) Na prática, o sistema responderá às grandes cargas trifásicas ou responderá somente às pequenas cargas isoladas como característica atual das áreas rurais?

Apesar de o sistema não ter sido testado de maneira prática e real, em que surgem diversas variáveis que não têm o controle estabelecido em um protótipo de laboratório, é submetida a toda a condição extrema do meio ambiente, o que demonstra teoricamente viabilidade técnica e econômica.

3.3.8.3 Sistema Tecnologia PRE Instalado em Rondônia

Conforme (RAMOS, 2010), a Tecnologia PRE, cabo para-raios isolado e energizado, foi desenvolvida pelo Professor Francisco Ilíceto da Universidade de Roma. Ela é baseada na isolação e energização dos cabos para-raios de uma linha de transmissão em corrente alternada (LTCA), por meio da qual é feita o transporte de energia elétrica em Média Tensão, utilizando ou não o solo como caminho para as correntes de retorno.

Quatro técnicas são propostas, porém dar-se-á ênfase ao esquema trifásico, em que duas fases são suportadas pelos cabos para-raios e a terceira fase é o solo, devido a similaridade com o sistema proposto.

A segunda experiência de implantação da tecnologia PRE foi no Estado de Rondônia. O projeto desenvolvido para atendimento a seis localidades próximas a LT 230 kV entre a Usina Hidrelétrica de Samuel (UHE Samuel) e a Subestação de Ji-Paraná. Efetivamente duas localidades foram contempladas Jaru, que esteve em operação no período de 30/12/1995 a 14/11/2000 e Itapuã do Oeste, de 22/09/1997 a 28/02/2016.

A figura 3.16 mostra a foto ilustrando o pátio da subestação supridora (UHE Samuel).

Figura 3.16 – Subestação supridora do PRE, em Samuel



Fonte: Adaptado de Ramos (2010).

A figura 3.17 mostra a foto ilustrando o pátio da subestação distribuidora do PRE, em Itapuã do Oeste.

Figura 3.17 – Subestação distribuidora do PRE, em Itapuã do Oeste



Fonte: Adaptado de Ramos (2010).

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou, sob o ponto de vista das pesquisas e análises levantadas bibliograficamente no Brasil e no mundo, informações de diversos tipos de técnicas utilizadas para eletrificação rural, passando pelos sistemas monofásicos MRT mais tradicionais até as novas tecnologias que propõem mudanças e melhoras radicais em nível de suprimento de energia na aérea rural.

Quanto ao sistema de distribuição a dois condutores, ainda está no campo da proposta de laboratório, faltando a sua aplicação prática.

4 PROPOSTAS DA TESE

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O capítulo antecedente fez uma revisão das técnicas de eletrificação rural. Passando pelo sistema mais utilizado no mundo que são os monofásicos com retorno por terra MRT, até as mais ambiciosas tecnologias que propõem mudanças dos mais diversos matizes.

Neste capítulo é apresentada a técnica de transmissão trifásica a dois fios aéreos com a terceira fase sendo o próprio solo.

4.2 TECNOLOGIA DO SISTEMA TRIFÁSICO A DOIS FIOS TENDO O SOLO COMO A TERCEIRA FASE

O sistema proposto pesquisa a viabilidade de adaptar a tecnologia Para Raio Energizado (PRE) numa nova proposta de distribuição de energia elétrica para atendimento de cargas trifásicas rurais. Apesar da similitude, o sistema proposto tem características específicas a serem observadas como:

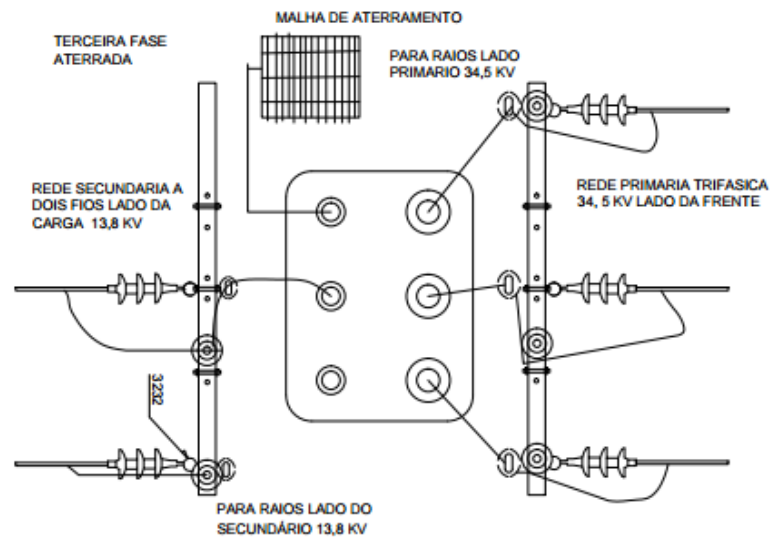
- a) Um transformador de isolamento, interposto entre o circuito da fonte de alimentação e a linha não convencional que é energizada no primário por tensão trifásica simétrica, sendo uma das fases do transformador no secundário direcionada para conexão solidamente aterrada.
- b) Deve o transformador isolador atender 24 horas por dia.
- c) Pode suprir 100% de carga trifásica, por meio de transformadores de média tensão AT/BT convencional, com enrolamento primário em delta e secundário em estrela aterrado.
- d) Os transformadores monofásicos ou trifásicos, com um terminal primário conectado ao solo podem ser instalados ao longo da linha, observando que os transformadores monofásicos terão de ter duas buchas de alta tensão, de acordo com a classe de tensão que está sendo utilizada, pois nesse caso, trata-se de um sistema bifásico, devido o solo ser uma das fases.
- e) No atendimento as cargas monofásicas, os respectivos transformadores devem ser distribuídos entre as fases de maneira a obter o melhor balanceamento.
- f) A carga localizada fora do eixo do tronco de alimentação poderá ser suprida por meio de derivações, no esquema bifásico, com um condutor levando energia e a outra fase seguindo pelo solo, ou com dois condutores aéreos para alimentação se a carga for trifásica.

- g) Devido à circulação permanente de corrente no solo, o aterramento deve garantir tensões de toque e de passo seguras para seres humanos e animais, não aquecimento do solo, bem como as possibilidades de interferências com linhas telefônicas.
- h) Os motores trifásicos de indução de maior potência podem ser alimentados, sem restrições, atendendo a apelo do agricultor rural.

4.2.1 Transformador isolador

Inicialmente a instalação deste transformador tem como função isolar o sistema de alimentação trifásico da fonte alimentadora, do circuito trifásico que alimentará a área rural. Confinando a corrente de alimentação do circuito, permitindo um melhor controle quanto à tensão de passo e de toque, pois o aterramento tanto do transformador isolador quanto do aterramento do consumidor precisam ser monitorados de tempo em tempo. Além de ter toda corrente retornando para o aterramento do transformador isolador, não sobrecarregando o aterramento da subestação alimentadora do circuito. As condições de alimentação deste transformador devem seguir as tensões normalmente padronizadas pelas concessionárias para área rural e que atende ao sistema de média tensão trifásico convencional, por exemplo: 13,8 kV/34,5 kV, 34,5 kV/13,8 kV entre outros. No caso da tensão do primário ser de 13,8 kV/13,8 kV pode utilizar-se um transformador isolador trifásico de média tensão de 1:1. Por não ser um equipamento de linha de produção seu custo torna-se um pouco mais elevado, mas não de forma preponderante, a fim de desestimular a implantação do projeto. O transformador é alimentado no primário de acordo com sua classe de tensão, conforme estipulado pelo projeto, do secundário saem três fases duas aéreas e a terceira é conectada diretamente no solo, conforme mostra a figura 4.1.

Figura 4.1 – Vista Superior do transformador isolador destaque para fase no Secundário aterrada

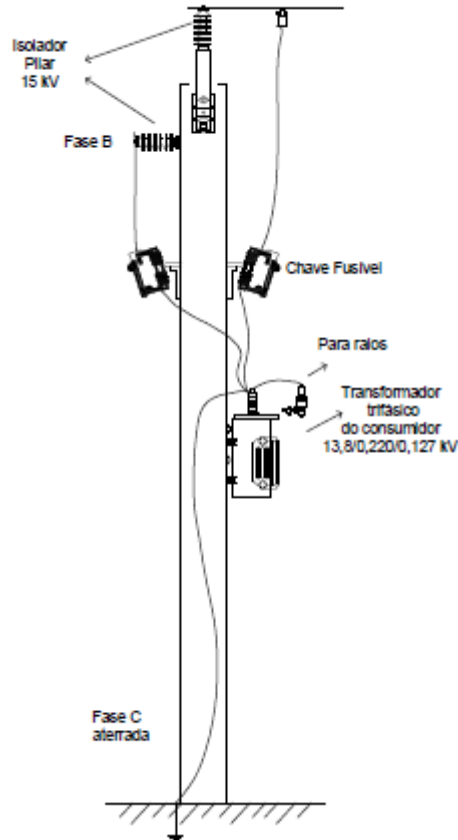


Fonte: Adaptado “Transformador da rede distribuição” CERON (2013).

4.2.2 Repotencialização do circuito monofásico existente

Este trabalho considera a reutilização dos circuitos Monofásicos com Retorno pela Terra (MRT) ou com Retorno por Cabo Metálico (MRN). O ramal monofásico de média tensão que atende ao consumidor é adaptado para uma configuração trifásica, substituindo o transformador monofásico do consumidor por um trifásico. Um cabo alimentador pode ser reaproveitado do antigo sistema monofásico MRT, e a alimentação da segunda fase é feita por meio de um novo condutor. A terceira fase é conectada diretamente ao solo, conforme mostrado na Fig 4.2. Observa-se que as condições descritas permitem o reaproveitamento de todos os condutores existentes no ramal monofásico. Deste modo, propõe-se aumentar a potência elétrica na área rural usando as faixas de servidão já existentes. Para as concessionárias, esta configuração pode ser tornar atrativa, uma vez que há um grande aproveitamento dos investimentos realizados nas redes pré-existentes.

Figura 4.2 – Posto transformador com alimentação por uma das fases aéreas reaproveitando o condutor monofásico do MRT e a terceira fase é alimentada pelo solo

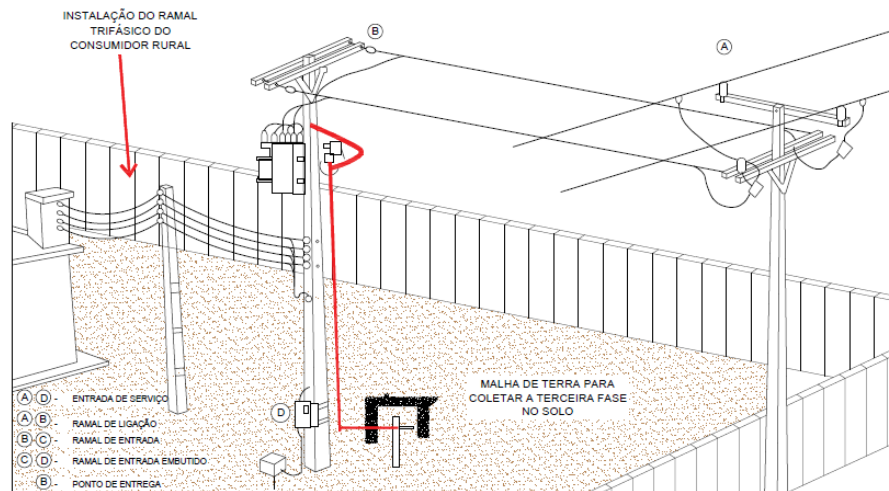


Fonte: Adaptado Celpa (2009).

4.2.3 Suprimento de Potência Trifásica

O transformador trifásico que atenderá o consumidor será convencional delta/ estrela aterrado. Sendo que uma das fases do primário deverá ser aterrada, pois esta receberá pelo solo uma das três fases que alimentará o transformador, sendo as outras duas aéreas. A figura 4.3 mostra uma instalação.

Figura 4.3 – Instalação de posto transformador trifásico com alimentação por duas fases aéreas, e a terceira sendo o próprio solo



Fonte: Adaptado “Transformador da rede distribuição - Eletrobras RO” (2013).

O fato de se utilizar o solo como uma das fases introduz uma questão particular a essa tecnologia voltada para obter um sistema trifásico equilibrado, pois o solo possui uma resistência muito menor do que a dos cabos condutores usualmente utilizados nas redes de distribuição (HAYFORD, 1989).

4.2.4 Sistema de aterramento

A experiência obtida de forma particular no Estado de Rondônia com a implementação do sistema PRE, em relação ao aterramento, permite comparar com o sistema proposto. Considerando as devidas proporções entre as tecnologias, ambos utilizam o solo como uma das fases, cuja interação com o sistema é estabelecida através de uma malha de terra independente da fonte, em que é injetada a corrente de carga, e outra malha de terra independente na casa do consumidor ou na comunidade (depende do projeto), em que é colhida a corrente de carga. A grande diferença do comportamento do sistema de aterramento convencional para o proposto está em suas aplicações, já que o convencional tem a função de dissipar as correntes dos fenômenos naturais, como descargas atmosféricas e outros distúrbios, que possam por em risco as vidas de pessoas e animais, para o solo, porém num curto intervalo de tempo. Enquanto que o aterramento do sistema proposto é parte ativa impondo a necessidade de metodologia e recursos de projetos.

O sistema de aterramento: “É o conjunto de condutores, cabos, hastes e conectores interligados, circundados por um elemento que dissipa para terra as correntes que sejam

impostas a este”, Kindermann e Campagnolo (1991) recomendam que no mínimo as seguintes etapas devam ser consideradas:

- Definir o local de aterramento;
- Providenciar várias medições no local;
- Fazer a estratificação do solo nas suas respectivas camadas;
- Definir tipo de sistema de aterramento desejado;
- Calcular a resistividade aparente do solo para o respectivo sistema de aterramento;
- “Dimensionar o sistema de aterramento levando em conta a sensibilidade dos relés e os limites de segurança pessoal, visando evitar a ocorrência de fibrilação ventricular do coração”.

Um sistema de aterramento deve atender às seguintes finalidades básicas:

- Proporcionar uma baixa resistência de aterramento;
- Manter os valores de tensão dentro dos níveis de segurança pessoal;
- Proporcionar um caminho de escoamento para terra da eletricidade estática gerada por equipamentos ou induzida;
- Permitir o rápido escoamento para a terra das descargas atmosféricas ou sobre tensões advindas de manobras de equipamentos;
- Possibilitar aos equipamentos de proteção isolar rapidamente as faltas à terra;
- Diminuir valores de tensão fase-terra do sistema, fixando a tensão de isolamento a valores determinados;
- Atender aos requisitos de baixa resistência, alta capacidade de condução de corrente e proporcionar segurança pessoal.

A resistividade do solo se caracteriza-se como um dos principais dados para o aterramento. Sendo definida como a resistência específica à passagem de corrente elétrica, oferecida por uma substância ou meio, sua unidade de medida, (Ωxm). O valor da resistividade em Ωxm é numericamente igual à resistência de um cubo de 1 metro de aresta. O solo é um elemento heterogêneo, variando o seu valor circunstancialmente, conforme o material que é composto, a profundidade de suas camadas, umidade, e idade de formação geológica.

Conforme a tabela 4.1 a presença da umidade no solo altera significativamente o valor da resistividade. A presença da água torna o valor da resistividade dependente da resistividade

da água, que por sua vez sofre influência direta dos sais dissolvidos nela. Os sais dissolvidos formam as condições adequadas para que as correntes iônicas fluam. A tabela 4.2 mostra a variação da resistividade do mesmo solo, com a variação do índice da umidade.

Tabela 4.1 – mostra de forma particularizada a resistividade de diferentes tipos de solos.

Tipo de solo	Resistividade (Ωxm)
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1500 a 5000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1300
Areia seca	3000 a 8000
Calcário compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000

Fonte: Kindermann e Campagnol (1991).

Tabela 4.2 – Variação da resistividade em função da umidade

Índice de umidade (% por peso)	Resistividade (Ωxm) Solo arenoso
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Kindermann e Campagnol (1991).

Como o solo sob a superfície da terra não é homogêneo a distribuição da corrente torna-se difícil, quando não impossível. Segundo (Rudenberg, 1950) a resistividade depende do tipo de solo e, varia com a distância e com a profundidade.

O fato de se utilizar o solo como uma das fases provoca circulação de corrente, do ponto de injeção até o de coleta. Cuidados especiais devem ser tomados quanto ao aquecimento do solo, tensões de toque e passo, bem como interferências com linhas telefônicas. É necessário garantir o não ressecamento do solo perto dos eletrodos de aterramento. Por recomendação de Iliceto et al. (1989) deve-se utilizar a equação de Ollendorff, que é a seguinte:

$$U_e = \sqrt{2 \cdot \Delta\theta \cdot \rho \cdot \lambda} \quad (4.1)$$

Em que:

U_e = potencial do eletrodo em relação ao terra remoto (V);

$\Delta\theta$ = elevação da temperatura do eletrodo e do solo ao redor em relação à temperatura ambiente (°C);

ρ = resistividade do solo (ohm.m)

λ = condutividade Térmica do solo (W/m°C)

A equação (4.1) é aplicável a eletrodos de qualquer formato em solos uniformes, ou seja, solo com resistividade e condutividade térmica constante. Para dada corrente nominal considerada em projeto, o cálculo do valor máximo da resistência de terra do sistema de aterramento, a partir do qual ocorrer o fenômeno de ressecamento, é determinado pela equação:

$$R_{max} = \frac{U_{e_{max}}}{I_n} \quad (4.2)$$

Onde:

R_{max} = Valor máximo da resistência de terra

$U_{e_{max}}$ = máxima elevação do potencial do sistema de aterramento, dado em volts, a partir do qual são criadas as condições para ocorrência de ressecamento do solo;

I_n = corrente nominal da carga, dada em amperes, que circula pelo sistema de aterramento.

Considerando a grande importância do aterramento na funcionalidade da proposta o projeto das malhas de terra, considera dois aspectos básicos (RAMOS, 2010):

- a norma do Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE-80, revisão - 1981, esta norma fora atualizada para IEEE-80, revisão 2000;
- limite térmico do solo.

A resistência do condutor representado pelo solo é muito menor que a resistência de qualquer cabo condutor usualmente utilizado em linhas de Média Tensão-MT. Segundo (RAMOS, 2010), considerando a frequência de 60 Hz, a resistência do caminho de retorno pelo solo a ser percorrida pela corrente possui aproximadamente 0,06 ohm/Km, o que equivale a um cabo com 480 mm^2 de seção (RUDENBERG, 1950).

4.3 MODELANDO O SISTEMA PROPOSTO

O desenvolvimento analítico vem fundamentar, a proposta para o atendimento do consumidor rural utilizando o solo, como uma das fases, afim de, fornecer energia elétrica por meio de um circuito trifásico, em que as outras duas fases são aéreas.

A matriz de impedância série que representa a modelagem do sistema proposto é:

$$[\bar{Z}] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{ii} & \bar{Z}_{ji} \\ \bar{Z}_{ji} & \bar{Z}_{jj} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A equação (4.3) é a matriz simétrica 2x2 em que os elementos \bar{Z}_{ii} e \bar{Z}_{jj} são as impedâncias próprias equivalentes e \bar{Z}_{ji} é a impedância mútua equivalente, que representa as fases aéreas. Tais impedâncias já incluem a correção de Carson devido ao efeito do solo (Carson, 1926).

A figura (4.4), note que é um circuito bifásico com seus retornos por terra, em que $\dot{I}_g = -(\dot{I}_i + \dot{I}_j)$. Como as impedâncias próprias equivalentes \bar{Z}_{ii} são iguais \bar{Z}_{jj} e chamando-as de \bar{Z}_P e a impedância equivalente \bar{Z}_{ji} de \bar{Z}_M pode-se escrever:

$$\Delta \dot{V}_i = \bar{Z}_P \dot{I}_i + \bar{Z}_M \dot{I}_j + 0 \quad (4.4)$$

$$\Delta \dot{V}_j = \bar{Z}_M \dot{I}_i + \bar{Z}_P \dot{I}_j + 0 \quad (4.5)$$

$$\Delta \dot{V}_g = 0 + 0 + \bar{Z}_E \dot{I}_g \quad (4.6)$$

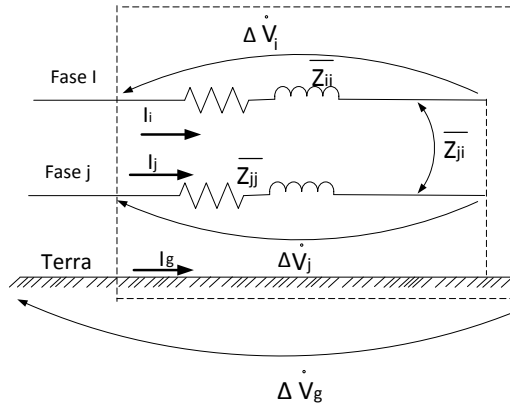
Em que:

\bar{Z}_E = impedância de compensação.

$\dot{I}_g = -(\dot{I}_i + \dot{I}_j)$ corrente de retorno pela terra.

Observando a parte tracejada da figura (4.4) representada pelas equações (4.4) e (4.5) mostra o acoplamento entre as fases. Este modelo precisa ser desacoplado a fim de obter outro sistema em que uma das fases não afeta a outra.

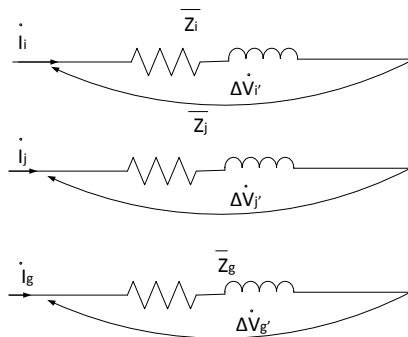
Figura 4.4 – Circuito simplificado do sistema proposto



Fonte: Adaptado de Rose (1997).

Para isso é necessário transformar o circuito bifásico em um circuito trifásico isolado, em que a terceira fase é o retorno por terra (GATTA, 2005), $\dot{I}_g + \dot{I}_i + \dot{I}_j = 0$ de acordo com a figura (4.5) o modelo está desacoplado.

Figura 4.5 – Circuito trifásico equivalente para o sistema proposto com as impedâncias dos cabos aéreos e a terra como condutor



Fonte: Adaptado de Rose (1997).

Diagonalizando a matriz de impedância equação (4.7) que relaciona tensões e correntes:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_i \\ \Delta \dot{V}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_P & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Encontrando-se os autovalores da matriz (4.7) obtêm-se os autovetores correspondentes. Com estes fica definida a matriz de transformação, relacionam-se as variáveis do sistema acoplado para o desacoplado e vice-versa.

Os autovalores da matriz de impedância (\bar{k}) são aqueles para os quais a equação é verdadeira:

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_P & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \bar{k} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

São obtidos com o determinante:

$$\det \begin{bmatrix} \bar{Z}_P - \bar{k} & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P - \bar{k} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.9)$$

Em que:

$$\bar{k}_1 = \bar{Z}_P + \bar{Z}_M \quad (4.10)$$

$$\bar{k}_2 = \bar{Z}_P - \bar{Z}_M \quad (4.11)$$

Substituindo os valores de (\bar{k}) na equação (4.8) tem-se:

\bar{k}_1 :

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_P & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \bar{Z}_P + \bar{Z}_M \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_P \bar{x} + \bar{Z}_M \bar{y} &= (\bar{Z}_P + \bar{Z}_M) \cdot \bar{x} \\ \bar{x} = \bar{y} \text{ ou se } \bar{x} = 1, \bar{y} &= 1 \end{aligned}$$

$$\text{Autovetor de } \bar{k}_1 = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

\bar{k}_2 :

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_P & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} = \bar{Z}_P - \bar{Z}_M \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \bar{Z}_P \bar{x} + \bar{Z}_M \bar{y} &= (\bar{Z}_P - \bar{Z}_M) \cdot \bar{x} \\ \bar{y} = -\bar{x} \text{ ou se } \bar{x} = 1, \bar{y} &= -1 \end{aligned}$$

$$\text{Autovetor de } \bar{k}_2 = \begin{bmatrix} \bar{x}_2 \\ \bar{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

A associação dos autovetores com os autovalores formam a matriz de transformação $[\bar{T}]$ que irá diagonalizar a matriz de impedância $[\bar{Z}]$ que é formada pelos autovetores associados aos autovalores de $[\bar{Z}]$, sendo:

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \bar{T}^{-1} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_i \\ \Delta \dot{V}_j \end{bmatrix} = [\bar{T}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_C \\ \Delta \dot{V}_D \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} = [\bar{T}] \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_C \\ \dot{I}_D \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Como,

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_i \\ \Delta \dot{V}_j \end{bmatrix} = [\bar{Z}] \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} \quad \text{então:} \quad (4.18)$$

$$[\bar{T}] \cdot \begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_C \\ \Delta \dot{V}_D \end{bmatrix} = [\bar{Z}] \cdot [\bar{T}] \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_C \\ \dot{I}_D \end{bmatrix} \quad \text{em que:} \quad (4.19)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_C \\ \Delta \dot{V}_D \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \cdot [\bar{Z}] \cdot [\bar{T}] \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_C \\ \dot{I}_D \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Esta expressão pode ser resolvida sabendo-se que:

$$\begin{bmatrix} \bar{Z}_P & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{k}_1 & 0 \\ 0 & \bar{k}_2 \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad (4.21)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{Z}_P & \bar{Z}_M \\ \bar{Z}_M & \bar{Z}_P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_1 & \bar{x}_2 \\ \bar{y}_1 & \bar{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{k}_1 & 0 \\ 0 & \bar{k}_2 \end{bmatrix} \quad \text{então:} \quad (4.22)$$

$$\bar{T}^{-1} \cdot [\bar{Z}] \cdot [\bar{T}] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_P + \bar{Z}_M & 0 \\ 0 & \bar{Z}_P - \bar{Z}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_C & 0 \\ 0 & \bar{Z}_D \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Substituindo a equação (4.23) na (4.20) vem:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_C \\ \Delta \dot{V}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_C & 0 \\ 0 & \bar{Z}_D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_C \\ \dot{I}_D \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Os índices C e D representam os modos comum e diferencial, respectivamente. Se o circuito de fase for excitado por uma entrada igual a um dos modos, ele se comportará segundo este modo, ou seja, as tensões e correntes de fase obedecerão à relação daquele modo (ROSE, 1997).

a) Modo comum:

$$\text{Excitando em modo comum: } \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{I} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

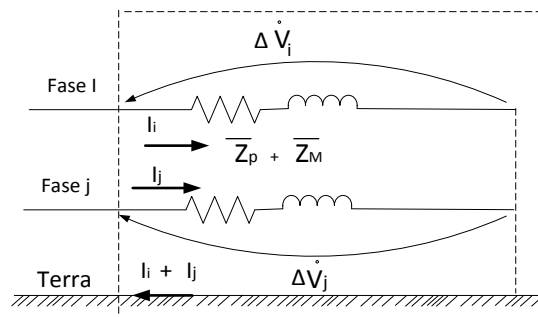
A equação (4.25) envolve o condutor de retorno, pois $\dot{I}_i = \dot{I}_j$, ou seja, $\dot{I}_i + \dot{I}_j \neq 0$. A corrente que passa pelo condutor de retorno é $2 \dot{I}$.

$$\Delta \dot{V}_i = \bar{Z}_P \dot{I}_i + \bar{Z}_M \dot{I}_j = (\bar{Z}_P + \bar{Z}_M) \cdot \dot{I} = \bar{Z}_C \times \dot{I} \quad (4.26)$$

$$\Delta \dot{V}_j = \bar{Z}_M \dot{I}_i + \bar{Z}_P \dot{I}_j = (\bar{Z}_P + \bar{Z}_M) \cdot \dot{I} = \bar{Z}_C \times \dot{I} \quad (4.27)$$

O circuito equivalente será:

Figura 4.6 – Circuito do sistema proposto quando excitado em modo comum



Fonte: Adaptado de Rose (1997).

b) Modo diferencial

$$\text{Excitando em modo diferencial: } \begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \dot{I}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ -\dot{I} \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

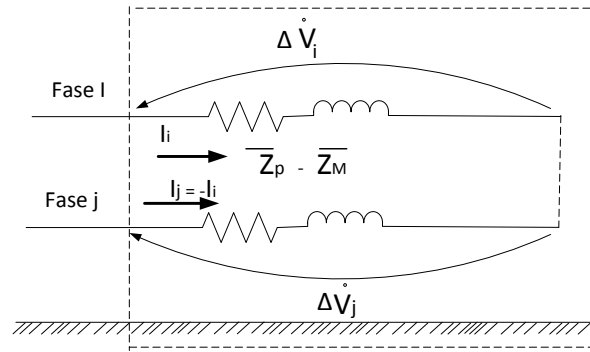
A equação (4.28) não envolve o condutor de retorno que é igual a $\dot{I}_i + \dot{I}_j = 0$.

$$\Delta \dot{V}_i = \bar{Z}_P \dot{I}_i + \bar{Z}_M \dot{I}_j = (\bar{Z}_P - \bar{Z}_M) \cdot \dot{I} = \bar{Z}_D \times \dot{I} \quad (4.29)$$

$$\Delta \dot{V}_j = \bar{Z}_M \dot{I}_i + \bar{Z}_P \dot{I}_j = -(\bar{Z}_P - \bar{Z}_M) \cdot \dot{I} = -\bar{Z}_D \times \dot{I} \quad (4.30)$$

A parte aérea do circuito equivalente pode ser modelada como dois ramos desacoplados, conforme figura (4.7).

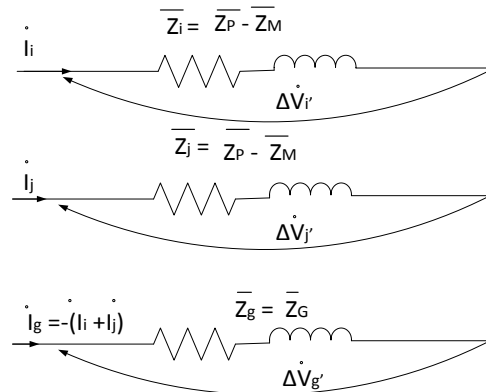
Figura 4.7 – Circuito do sistema proposto quando excitado em modo diferencial



Fonte: Adaptado de Rose (1997).

A figura (4.8) mostra o comportamento do circuito equivalente que leva em conta, a sobreposição, do modo equivalente comum e o modo diferencial e a impedância \bar{Z}_G que influencia somente o modo comum. Com isto, tem-se a representação do circuito equivalente do sistema proposto.

Figura 4.8 – Circuito trifásico equivalente do sistema proposto com as impedância de linha e de terra



Fonte: Adaptado de Rose (1997).

A queda de tensão é representada por \bar{Z}_G devido à excitação do modo comum. Então $\dot{I}_i = \dot{I}_j = \dot{I}$ (modo comum) como é mostrado abaixo:

$$\Delta \dot{V}_i = \Delta \dot{V}_i' - \Delta \dot{V}_g' \tag{4.31}$$

$$(\bar{Z}_P + \bar{Z}_M) \dot{I} = (\bar{Z}_P - \bar{Z}_M) \dot{I} + 2\bar{Z}_G \dot{I} \tag{4.32}$$

Resolvendo a equação (4.32) a impedância de terra será igual à mútua;

$$\bar{Z}_G = \bar{Z}_M \quad (4.33)$$

A impedância de linha será de acordo com a figura 4.8;

$$\bar{Z}_L = \bar{Z}_P - \bar{Z}_M \quad (4.34)$$

O sistema esta desequilibrado. Para torná-lo equilibrado é preciso que a terceira fase seja acrescida de uma impedância \bar{Z}_E em que:

$$\bar{Z}_E + \bar{Z}_G = \bar{Z}_L \quad (4.35)$$

$$\bar{Z}_E = \bar{Z}_L - \bar{Z}_M = \bar{Z}_P - 2\bar{Z}_M \quad (4.36)$$

As impedâncias \bar{Z}_P (própria) e \bar{Z}_M (mútua) podem ser calculadas pela equação modificada de Carson (Kersting, 2002) onde:

f = Frequência 60 Hertz

ρ = 100Ω/m

r_i = Resistências dos condutores (0,4406 Ω/milha ou 0,0006214 Ω/m)

$r_d = \pi^2 \times f \times 10^{-4} = 0,09530 \text{ Ω/milha ou } 0,059219 \text{ Ω/km}$ – Resistência de terra (RUDENBERG, 1950).

GMR_i = Raio médio geométrico do condutor i em (pés)

D_{ij} = Distância entre os condutores i e j (pés).

$$\bar{Z}_P = r_i + r_d + j0,12134 \left[\ln \left(\frac{1}{GMR_i} \right) + 7,93402 \right] \text{ Ω/milha} \quad (4.37)$$

$$\bar{Z}_M = r_d + j0,12134 \left[\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} \right) + 7,93402 \right] \text{ Ω/milha} \quad (4.38)$$

A equação (4.33) representa a impedância da terceira fase que tem o solo como condutor. A impedância de linha do sistema proposto é representada pela equação (4.34), como as impedâncias são diferentes conclui-se que o circuito é naturalmente desequilibrado.

Segundo Iliceto et al. (1989), a introdução de elementos de compensação adaptados para cancelar ou reduzir as assimetrias inerentes na estrutura desses sistemas poderá limitar a componente de sequência negativa de tensão geralmente em 1% (em nenhum caso exceder a 2%). Isso é possível por meio do uso de um resistor-reator em série com a fase que utiliza o solo.

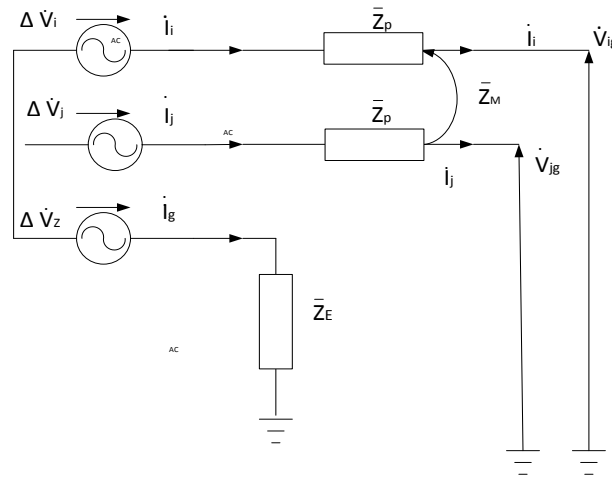
4.3.1 Balanceamento Longitudinal

A fim de extinguir a componente de sequência negativa da tensão, a impedância de compensação \bar{Z}_E poderá ser calculada por (CINIEMI, 1999) e adicionada a \bar{Z}_G .

$$\bar{Z}_E = r_i - \pi^2 x f \times 10^{-4} + j 0.12134 \ln \left(\frac{D_{ij}^2}{\text{GMRI}} \right) - 0.962713 \Omega/\text{milha} \quad (4.39)$$

A figura 4.9 é o diagrama do sistema proposto com a impedância de compensação.

Figura 4.9 – Circuito trifásico equivalente do sistema proposto com as impedância de linha, terra, e a de compensação



Fonte: Adaptado de E. Cinieri (1999).

4.3.2 Dimensionamento da Capacitância do Sistema Proposto

A capacitância da linha é o resultado da diferença de potencial entre os condutores (KERSTING, 2002). Quando dois potenciais diferentes entre dois pontos são conhecidos então as capacitâncias entre os dois pontos podem ser calculadas.

Métodos das imagens de Carson são empregados para calcular as capacitâncias shunt das linhas aéreas.

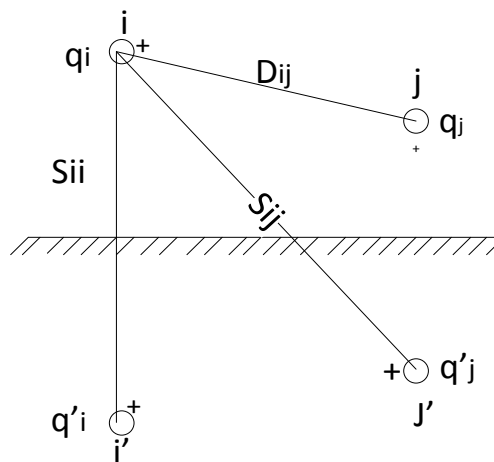
A Fig.4.10 ilustra os condutores com suas imagens.

Considerando que:

$$q'_i = -q_i \text{ e } q'_j = -q_j \quad (4.40)$$

$$q_1 + q_2 + \dots + q_N = 0 \quad (4.41)$$

Figura 4.10 – Condutores e suas imagens



Fonte: Adaptado do livro “Distribution System Modeling and Analysis” William H. Kersting (2002).

A equação geral pode ser escrita na forma:

$$V_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{n=1}^N q_n \ln \frac{D_{nj}}{D_{ni}} \quad (4.42)$$

Em que:

$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r =$ permissividade média

$\epsilon_0 =$ permissividade no ar livre = $8,85 \times 10^{-12} F/m$

$\epsilon_r =$ permissividade média relativa

$q_n =$ densidade de carga no condutor n

$D_{ni} =$ distância entre condutor n e o condutor i (pés)

$D_{nj} =$ distância entre condutor n e o condutor j (pés)

$R_{Dn} =$ raio do condutor n

n = i então $D_{ni} = R_{Di}$

n = j então $D_{nj} = R_{Dj}$

Aplicando a equação 4.42 na Fig.4.10 tem-se:

$$V_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_i \ln \frac{S_{ii}}{R_{Di}} + q'_i \ln \frac{R_{Di}}{S_{ii}} + q_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + q'_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} q'_j \ln \frac{D_{ij}}{S_{ij}} \right) \quad (4.43)$$

Equação simplificada

$$V_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(2 \cdot q_i \ln \frac{S_{ii}}{R_{Di}} + 2 \cdot q_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (4.44)$$

A equação 4.44 calcula a queda de tensão total entre o condutor i e suas imagens (CARSON, 1926). A queda de tensão entre o condutor i e o terra será a metade.

$$V_{ig} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_i \ln \frac{S_{ii}}{R_{Di}} + q_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (4.45)$$

A equação 4.45 pode ser escrita na forma:

$$V_{ig} = \hat{P}_{ii} \cdot q_i + \hat{P}_{ij} \cdot q_j \quad (4.46)$$

Em que \hat{P}_{ii} e \hat{P}_{ij} são coeficientes do potencial próprio e mútuo respectivamente. Para linhas aéreas a permissividade do ar assume 1,0 de modo que:

$$\epsilon_{ar} = 1,0 \times 8,85 \times 10^{-12} F/metro \quad (4.47)$$

$$\epsilon_{ar} = 1,4240 \times 10^{-2} \mu F/milha$$

Usando os valores da permissividade em $\mu F/milha$, os coeficientes de potencial próprios e mútuos são definidos como:

$$\hat{P}_{ii} = 11,17689 \ln \frac{S_{ii}}{R_{Di}} \text{ milha} / \mu F \quad (4.48)$$

$$\hat{P}_{ij} = 11,17689 \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \text{ milha} / \mu F \quad (4.49)$$

Para uma linha aérea de n condutores, a matriz de coeficientes de potencial primitiva $[\hat{P}_{primitiva}]$ pode ser construída. A matriz de coeficientes de potencial primitiva será uma matriz $n \times n$. Para uma linha em estrela aterrada será da forma:

$$\hat{P}_{primitiva} = \begin{pmatrix} \hat{P}_{aa} & \hat{P}_{ab} & \hat{P}_{ac} & \hat{P}_{an} \\ \hat{P}_{ba} & \hat{P}_{bb} & \hat{P}_{bc} & \hat{P}_{bn} \\ \hat{P}_{ca} & \hat{P}_{cb} & \hat{P}_{cc} & \hat{P}_{cn} \\ \hat{P}_{na} & \hat{P}_{nb} & \hat{P}_{nc} & \hat{P}_{nn} \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

A equação 4.50 é particionada entre as terceira e quarta linhas e colunas. Na forma particionada, torna-se:

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{pmatrix} \hat{P}_{ij} & \hat{P}_{in} \\ \hat{P}_{nj} & \hat{P}_{nn} \end{pmatrix} \quad (4.51)$$

Aplicando a redução de Kron, tem-se:

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] \cdot [\hat{P}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{P}_{nj}] \quad (4.52)$$

A inversa da matriz de coeficientes potenciais primitivos será dada por:

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} \quad (4.53)$$

Em que $[C_{abc}]$ é a capacitância

4.3.3 Dimensionamento da capacitância a ser adicionada

Considerando que os condutores se encontram em paralelos em relação ao solo, o cálculo da capacitância a ser adicionada entre as fases i e j , fica simples. A equação 4.54 mostra a matriz de capacitância shunt.

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

4.3.3.1 Balanceamento transversal

Em (GATTA, 2005) pode-se perceber que as capacitâncias entre os condutores aéreos são muito menores do que as capacitâncias entre cada condutor aéreo e a terra. Assim, as impedâncias de equilíbrio devem ser adicionadas ao sistema de distribuição não convencional.

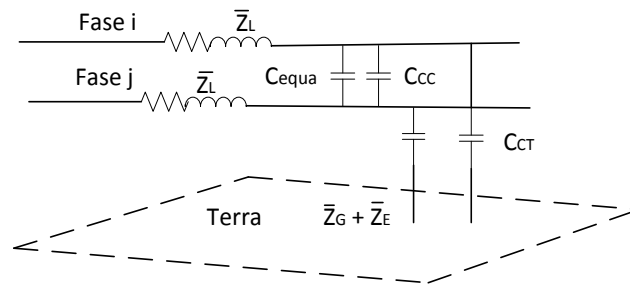
A figura 4.11 mostra as capacitâncias do sistema proposto que são calculado de acordo com a equação (4.55) a (4.57) (ROSE, 1997).

$$C_{CT} = \sum_{j=1}^2 C_{ij} \quad \text{nF/km, em que } i = 1 \text{ ou } 2, \quad (4.55)$$

$$\text{Ou } C_{CT} = C_{11} + C_{21} \quad (\text{capacitância entre condutor e terra}) \quad (4.56)$$

$$C_{CC} = -C_{21} \quad \text{nF/km (capacitância entre condutores)} \quad (4.57)$$

Figura 4.11 – Circuito equivalente formado pelos condutores aéreo e o solo



Fonte: Próprio autor.

Como mostra à figura 4.11 as capacitâncias entre as fases aéreas são menores do que entre as fases aéreas e a terra, então é necessário adicionar uma capacitância entre as fases com o seguinte valor:

$$C_{equa} = C_{CT} - C_{CC} \quad (4.58)$$

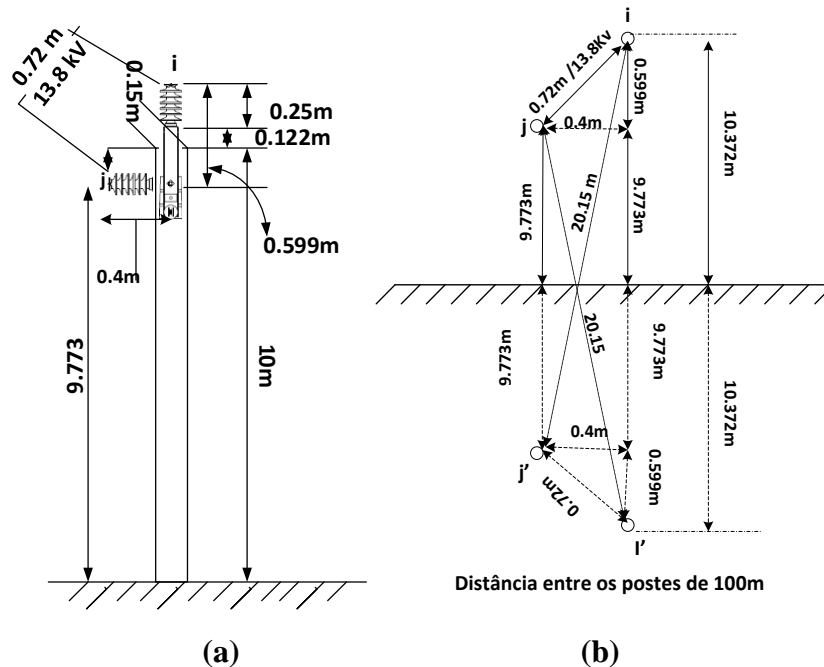
Onde:

C_{equa} = Capacitância de equalização.

4.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO PARA SUPRIR AS CARGAS TRIFÁSICAS RURAIS

Como já explanado neste trabalho e considerando as características das estruturas usadas no sistema MTR de acordo com a Fig. 4.12 (a), o isolador no topo do poste poderá ser reutilizado. Um segundo isolador será instalado na parte lateral, resultando em um circuito trifásico com a terra como a terceira fase. A Fig 4.12(b) mostra as distâncias entre os postes e os cabos aéreos para a terra, e suas imagens.

Figura 4.12 (a) – Vista de frente do poste que suporta ambos cabos aéreos do sistema



Fonte: Adaptado Celpa (2009).

4.4.1 Parâmetros dos Circuitos e Dados dos Condutores

As impedâncias \bar{Z}_P (próprias) e \bar{Z}_M (mútuas) são calculadas usando as equações modificadas de Carson (Kersting, 2002).

A tabela 4.3 apresenta os parâmetros e as impedâncias calculadas usando as equações 4.32 e 4.33.

Tabela 4.3 – Parâmetros do circuito

Parâmetros do circuito	Valor
Frequência (f)	60Hz
Resistividade (ρ)	100 Ω /m
Resistência de terra (r_d) $r_d = \pi^2 \times f \times 10^{-4}$ (Rundenerg,1950)	0,059219 Ω /km ou $59,21710^{-6}$ Ω /m
Dados dos condutores	Valor
Dois condutores i e j , Fig. 4.11(a) e (b).	1/0 AWG
Resistência (r_i)	0,7090 Ω /km ou 1,1410 Ω /milha;
GMR $_i$	0,00388m ou 0,01273 pés
Distância entre os condutores aéreos i e j D_{ij}	0,72m ou 2,3622 pés

Calculando as impedâncias próprias e mútuas utilizando as equações 4.59 e 4.60.

$$\bar{Z}_P = 1,2363 + j1,4922 \Omega/\text{mile or } 0,768 + j0,9272 \Omega/\text{km.} \quad (4.59)$$

$$\bar{Z}_M = 0,09530 + j0,8584 \Omega/\text{mile or } 0,05922 + j0,53334 \Omega/\text{km} \quad (4.60)$$

4.4.2 Calculando as impedâncias séries

Por meio das equações 4.61 e 4.62 calculam-se as impedâncias séries;

$$\bar{Z}_L = \bar{Z}_P - \bar{Z}_M = \bar{Z}_{ii} - \bar{Z}_{ji} = 0,7088 + j0, 3939 \Omega/\text{km} \quad (4.61)$$

$$\bar{Z}_G = \bar{Z}_M = \bar{Z}_{ji} = 0,05922 + j0, 5333 \Omega/\text{km} \quad (4.62)$$

O cálculo da impedância de compensação é feito utilizando a equação 4.63;

$$\bar{Z}_E = r_i - \pi^2 \cdot f \cdot 10^{-4} + j0, 12134 \left[\ln \left(\frac{D_{ij}^2}{\text{GMR}_i} \right) - 0,962713 \right] \Omega/\text{milha} \quad (4.63)$$

$$\bar{Z}_E = 1,08178 + j0, 6213 \Omega/\text{milhas or } 0,672 + j0, 3861 \Omega/\text{km.}$$

4.4.3 Cálculo da capacitância shunt

Dados dos condutores aéreos:

Raios dos condutores R_i e $R_j=5,055\text{mm}$ ou $0,016585$ pés;

Distância entre os condutores i e j (D_{ij}) = $0,72\text{m}$ ou $2,3622$ pés.

Cálculo das distâncias entre os condutores aéreos e suas imagens por meio da Fig.4.11b;

As distâncias entre os condutores e suas imagens são:

$$S_{ii'}=20,744\text{m}; S_{jj'}=19,55\text{m}; S_{ij'}=20,15\text{m}; S_{ji'}= 20,15\text{m}.$$

Para entrar com os valores das distâncias entre os condutores e suas imagens, nas respectivas equações dos cálculos dos coeficientes de potencial próprio e mútuo, os valores das distâncias são transformados para pés, então:

$$S_{ii'}=68,0577 \text{ pés}; S_{jj'}=64,1404 \text{ pés}; S_{ij'}=66,1089 \text{ pés}; S_{ji'}= 66,1089 \text{ pés}.$$

Então por meio das equações 4.43 e 4.44 respectivamente calculo-se os coeficientes de potencial próprios e mútuos, em que:

$$\hat{P}_{ii'}= 11,17689 \ln \frac{S_{ii'}}{R_{Di}} \text{ milha}/ \mu F = 11,17689 \ln \frac{68,058}{0,016585} = 92,99 \text{ milha}/ \mu F \quad (4.64)$$

$$\hat{P}_{jj'}=11,17689 \ln \frac{S_{jj'}}{R_{Dj}} \text{ milha}/ \mu F = 11,17689 \ln \frac{64,1404}{0,016585} = 92,32 \text{ milha}/ \mu F \quad (4.65)$$

$$\hat{P}_{ij'}=11,17689 \ln \frac{S_{ij'}}{D_{ij}} \text{ milha}/ \mu F = 11,17689 \ln \frac{66,109}{2,3622} = 37,24 \text{ milha}/ \mu F \quad (4.66)$$

$$\hat{P}_{ji'}=11,17689 \ln \frac{S_{ji'}}{D_{ij}} \text{ milha}/ \mu F = 11,17689 \ln \frac{66,109}{2,3622} = 37,24 \text{ milha}/ \mu F \quad (4.67)$$

Com os valores dos coeficientes de potenciais das equações (4.64) a (4.67) tem-se a matriz primitiva.

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{pmatrix} 92,99 & 37,24 \\ 37,24 & 92,32 \end{pmatrix} \text{ milha}/\mu F$$

Conforme a equação 4.48, $[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1}$ tem-se:

$$[C_{abc}] = \begin{pmatrix} 0,01285 & -5,199 \times 10^{-3} \\ -5,199 \times 10^{-3} & 0,012936 \end{pmatrix} \mu F/\text{milha}$$

$$\text{Ou} \begin{pmatrix} 0,007980 & -0,323 \times 10^{-3} \\ -0,323 \times 10^{-3} & 0,008163 \end{pmatrix} \mu F/\text{km}$$

As capacitâncias de balanceamento transversal são dadas pelas equações 4.68 a 4.70, respectivamente:

$$C_{CT} = C_{11} + C_{21} = 4.75 \text{ nF/km} \quad (4.68)$$

$$C_{CC} = -C_{21} = 3.23 \text{ nF/km} \quad (4.69)$$

$$C_{\text{equa}} = C_{CT} - C_{CC} = 1.52 \text{ nF/km} \quad (4.70)$$

A figura 4.11 mostra que os condutores não estão paralelos. No entanto, a capacitância definida é simplificada, devido à baixa influência entre as disposições geométrica dos condutores.

4.4.4 Comparativos entre sistema proposto e o sistema trifásico de para raios energizados (PRE)

Faz-se necessário para melhor compreensão das tecnologias, uma abordagem referente aos pontos complementares e de diferenciação. O solo compõe a terceira fase e sua resistência é muito menor que as dos condutores metálicos, com isso, os sistemas são circuitos desbalanceados, e a reatância do solo é levemente menor do que a dos cabos aéreos (ILICETO et al., 2004).

É necessário aprofundar as pesquisas quanto ao comportamento do sistema proposto em relação à assimetria entre as fases. Dentre diversas questões a serem respondida, uma é de grande importância: Devido à classe de tensão na rede de distribuição haverá necessidade de compensação com o uso de um resistor-reator na fase que utiliza o solo, para que haja simetria?

Apesar da semelhança entre o sistema proposto e o sistema para raio energizado (PRE), há diferenças marcantes em relação a:

- estrutura que suporta o circuito PRE, utiliza os cabos para raios de proteção das linhas de transmissão de alta extra tensão instalados na torre mais o solo, para suprir em média tensão o primário do transformador que irá alimentar em baixa tensão consumidores que se localizam ao longo dos circuitos que transportam grandes blocos de energia para centros urbanos;
- a linha de transmissão tem classe de tensão acima de 100 kV, os circuitos aéreos do PRE trifásico com duas fases estão sobre ela e sofrem acoplamento eletromagnético e eletroestático;
- a corrente capacitiva no PRE, entre os dois cabos energizados e o solo que é a terceira fase são desbalanceadas devido as capacitâncias parciais (capacitância entre os cabos, cujo valor é aproximadamente metade da capacitância entre cada cabo e o solo) e a corrente capacitiva induzida pelos condutores de alta tensão, segundo Iliceto et al. (1989), a estrutura do sistema proposto consiste em um transformador isolador que é alimentado pela rede de média tensão no primário. No secundário saem dois condutores aéreos e a terceira fase é o próprio solo. A distribuição dos circuitos elétricos é feita utilizando postes convencionais onde os dois condutores aéreos são instalados, e irão suprir o transformador que atenderá ao consumidor rural;
- sistema proposto poderá sofrer influência de acoplamentos eletromagnéticos e eletroestático externo, não com a mesma intensidade do PRE;
- o sistema proposto em circuito longo pode conforme o carregamento sofrer sobre tensão no final da linha, por causa do efeito Ferranti;
- a prevenção quanto a ferroressonância no PRE é realizada por capacitores instalados entre os condutores aéreos e condutores aéreos e o solo , segundo Iliceto et al. (1989);
- a ferroressonância no sistema proposto é ponto de estudo e investigação;

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta protagoniza uma quebra de paradigma na distribuição de sistema de energia elétrica ao utilizar o solo como uma das fases para atendimento às cargas rurais. Visa, sobretudo à adaptação dos sistemas MRT's ou fase-neutro existentes, com o maior reaproveitamento de investimentos realizados. No caso de uma nova construção, um projeto que usa menos material que o sistema trifásico convencional.

5 RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

As simulações computacionais foram realizadas no ATP Draw (Alternative Transient Program) que é um software dedicado aos estudos de transitórios eletromagnéticos. Por meio dele é possível, a partir de um modelo adequado, reproduzir o comportamento da rede elétrica. Ele possui recursos para modelar tanto os sistemas de transmissão quanto os de distribuição em uma mesma plataforma, permitindo as análises de transitórios eletromagnéticos para diferentes configurações operacionais. O que veio contribuir na sedimentação dos estudos realizados neste capítulo. Pode-se avaliar o comportamento do sistema proposto, tanto para as simulações do protótipo quanto para simulação do sistema 13,8 kV. Esclarecendo pontos importantes na avaliação do sistema ATPDraw, o que proporcionou as condições necessárias para a modelagem dos principais componentes e formas de ondas permitindo a extração de dados que corroboram com a compreensão da aplicação da proposta.

5.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO SISTEMA PROPOSTO PARA SUPRIR CARGAS TRIFÁSICAS RURAIS

Objetivando aproximar-se de uma situação real foi desenvolvido um protótipo em baixa tensão, em um laboratório a céu aberto, na Universidade Federal de Rondônia.

No protótipo apresentado na figura 5.1, foi construída uma malha composta por 6 hastes, formando um retângulo com dimensões 4,8 m por 9,6 m. Nessa malha foi conectada a terceira fase do secundário do transformador isolador, sendo denominada de malha de terra do TI. No primário do transformador do consumidor foram realizados um total de 94 testes, considerando valores de resistência de terra variando de 634 Ω (aterramento composto de uma única haste em solo seco) a 47 Ω , resultante de um sistema de aterramento composto por 10 hastes alinhadas. Como esperado, estes testes permitiram concluir que os valores de tensão na carga localizada no lado de baixa tensão do transformador do consumidor, permanecem dentro do limite de desequilíbrio de 2% para valores de R_{at} menor ou igual ao valor citado, mantendo-se na malha de terra TI um valor de $R_{at} = 12 \Omega$. Esse experimento também teve por objetivo buscar comprovar a viabilidade da alternativa proposta em relação a um sistema de

aterramento simples. Como visto, esse objetivo foi alcançado no âmbito da pesquisa feita no protótipo.

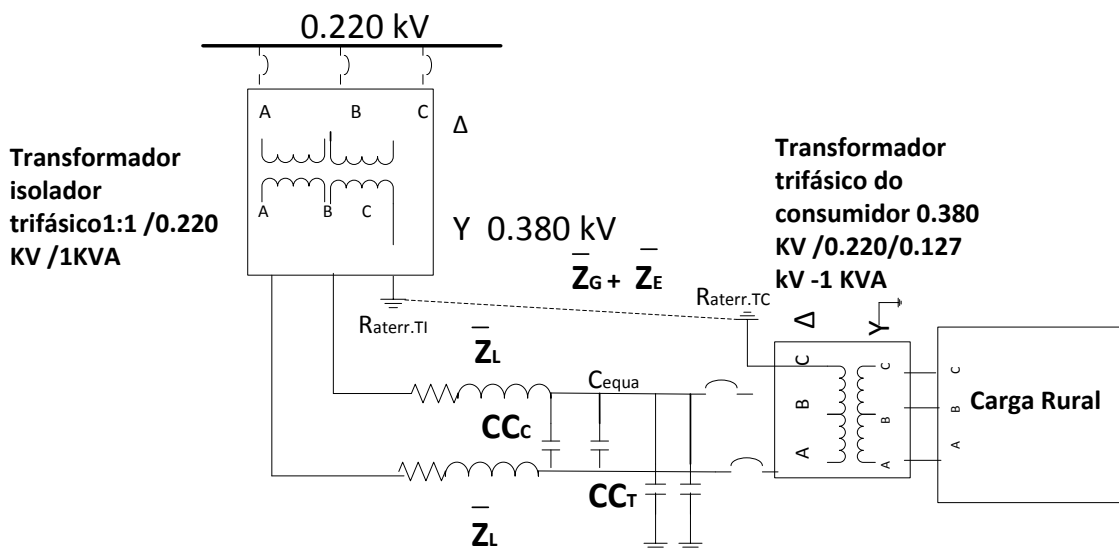
Os parâmetros usados para modelar o sistema proposto são mostrados na Tabela 5.1. Os dados calculados seguiram as equações desenvolvidas no capítulo anterior. A ideia fundamental é comprovar, por meio de um sistema em baixa potência, os fenômenos estudados a partir das simulações executadas no programa ATPDraw.

Tabela 5.1 – Componente do sistema simulado no ATP

Transformador trifásico isolador (TI) (dados do fabricante)	
Potência Nominal	1 kVA
Tensão	0,220/0,380 kV
Z%	4%
Relação de espiras	1:1
Transformador trifásico do consumidor (TC) (dados do fabricante)	
Potência Nominal	1 kVA
Tensão	0,380/0,220 kV
Z%	4%
Relação de espiras	1:0, 294.
Dados dos condutores aéreos e do condutor retorno de terra	
6 AWG	
$r_d = 0,00005921$ (Ω/m)	– Resistência de terra
$r_i = 0,002644$ (Ω/m)	– Resistência do condutor
$GMR_i = 0,00169$ m	– Raio médio geométrico do condutor
$R_i = R_j = 0,00233$ m	– Raio dos condutores
$D_{ij} = 0,3$ m	– Distâncias entre condutores aéreos
Impedância série do retorno de terra	
$\bar{Z}_G = (0,00005922 + j0,0005997)$ (Ω/m)	
Impedância série de linha	
$\bar{Z}_L = (0,002644 + j0,0003906)$ (Ω/m)	
Impedância série de compensação	
$\bar{Z}_E = (0,0025847 + j0,000316)$ (Ω/m)	
Capacitância entre os condutores aéreos	
$C_{CC} = 0,3862$ nF/m	
Capacitância entre os condutores aéreos e o solo	
$C_{CT} = 0,5959$ nF/m	
Capacitância de equalização	
$C_{equal} = 0,2097$ nF/m	
Distância do circuito	
39 m	

A Figura 5.1 mostra o diagrama trifásico do sistema proposto. As medições foram realizadas entre os meses de abril a setembro de 2016 na malha de aterramento do transformador do consumidor (TC), conforme mostra a Tabela 5.2. A malha de terra do transformador isolador (TI) teve resistência média de 12Ω . Considerou-se este período do ano que teve as condições climáticas mais severas, pois a Região Noroeste da Amazônia apresentou baixo índice pluviométrico, altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar.

Figura 5.1 – Diagrama trifásico do protótipo



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 5.2 apresenta os níveis de tensões e correntes em relação aos valores das malhas de terra. À medida que o valor da resistência de aterramento do transformador do consumidor diminuiu, as tensões tenderam a ficar mais equilibradas. Dadas as circunstâncias no campo, o valor médio alcançado foi o de 20Ω para a malha de resistência do (TC) e 12Ω para do (TI). As cargas utilizadas foram resistivas (C), resistiva e indutiva (D), fortemente resistiva e indutiva (E).

Os níveis de tensão e de corrente aproximam-se em muito a um sistema de distribuição de energia elétrica convencional.

OBS: É importante ressaltar que a concessionária de energia do Pará (Celpa), considera para o MRT a resistência de 20Ω , no consumidor.

Tabela 5.2 – Tensões e correntes no secundário do transformador do consumidor

TENSÃO EFICAZ (V)			CORRENTE EFICAZ (A)			RES.TERRA (Ω)	CARGA (Ω)
219	220	217	0,47	0,47	0,47	47,0	268,9+ j0 (C)
220	220	217	0,47	0,47	0,47	45,4	268,9+ j0 (C)
220	220	217	0,47	0,47	0,47	36,5	268,9+ j0 (C)
220	220	218	0,47	0,47	0,47	27,6	268,9+ j0 (C)
220	220	218	0,47	0,47	0,47	20,0	268,9+ j0 (C)
222	210	206	0,82	0,84	0,78	47,0	100+ j113 (D)
222	210	206	0,82	0,84	0,79	45,4	100+ j113 (D)
222	210	206	0,82	0,84	0,79	36,5	100+ j113 (D)
221	214	211	0,83	0,84	0,79	27,6	100+ j113 (D)
221	215	213	0,82	0,84	0,81	20,0	100+ j113 (D)
221	215	214	0,83	0,84	0,81	15,0	100+ j113 (D)
220	220	219	0,15	0,15	0,15	20,0	856+ j113 (E)
220	220	219	0,15	0,15	0,15	15,0	856+ j113 (E)

Como os circuitos que atendem aos consumidores rurais ou urbanos possuem distâncias quilométricas, os valores dos parâmetros dos condutores e as correspondentes perdas e quedas de tensões dependem dessa extensão. Os dois condutores aéreos têm impedâncias iguais, mas o solo tem impedância diferente. As simulações iniciais são realizadas sem levar em consideração a impedância de compensação (Z_E). Isto provoca desequilíbrio de tensão entre as duas fases aéreas e o solo. Mas as tensões de linha no secundário do transformador isolador apresentaram amplitudes muito aproximadas. A tensão de linha alimentou o primário em delta do transformador trifásico (TC) que supre a carga no consumidor.

Os padrões trifásicos sofrem alterações quando ocorrem perdas e quedas de tensões. O desequilíbrio de tensão pode então ser quantificado, associando as magnitudes das tensões trifásicas de linhas: V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} .

5.2.1 Desequilíbrio de tensão em sistema elétrico trifásico

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente.

A má distribuição de cargas provoca desequilíbrio entre as fases devido à presença de cargas trifásicas desequilibradas ou derivações intermediárias de cargas monofásicas ou ainda pela variação nos ciclos de demanda de cada fase. Os problemas de desequilíbrios são agravados por consumidores alimentados de forma trifásica, em que as cargas em seus circuitos internos têm distribuição inadequada, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária.

Alguns exemplos de causas de desequilíbrio de tensão:

Sistemas monofásicos:

- suprimentos de tração em áreas remota;
- anomalias no sistema, tais como: abertura de um condutor, curto-circuito, falha na isolação de equipamentos;
- linhas aéreas assimétricas e sem transposição;
- correntes de magnetização de transformadores trifásicos, devido às diferenças magnéticas oriundas da sua própria construção.

5.2.2 Método que quantifica o desequilíbrio de tensão

O método CIGRÉ (REZENDE, 2016) fornece o mesmo resultado do método das componentes simétricas, mas se utiliza de uma série de manipulações algébricas para expressar o desequilíbrio a partir dos módulos das tensões de linha:

Em que V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} são os módulos das tensões de linha.

$$K\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (5.1)$$

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2} \quad (5.2)$$

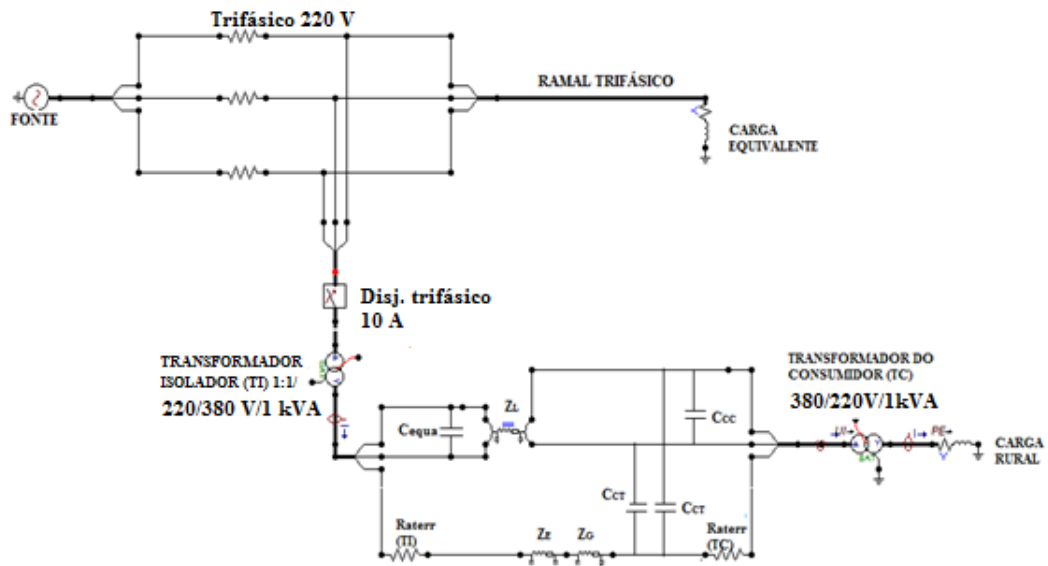
Entre os diversos métodos para a quantificação do desequilíbrio de tensão neste trabalho foi usado o método CIGRÉ, conforme equação 5.1 e 5.2. O documento (ANEEL, 2012) Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8, ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica faz referência a este método utilizando para determinar o fator de desequilíbrio (FD%). Segundo este documento o valor de desequilíbrio nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2%.

5.3 AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROTÓTIPO

5.3.1 Circuito desequilibrado com cargas equilibradas

O Circuito da Figura 5.2 foi utilizado para realização das simulações computacionais para o protótipo. O circuito foi considerado desequilibrado, sem a impedância de compensação (\bar{Z}_E). As resistências da malha de aterramento no transformador isolador ($R_{aterr(TI)}$), em que é injetada a corrente no solo, permaneceu constante para todas as medições, em torno de 12Ω . Enquanto que na resistência da malha do consumidor ($R_{aterr(TC)}$) foram consideradas a mais crítica de 47Ω e a mais adequada de 20Ω , conforme Tabela 5.2

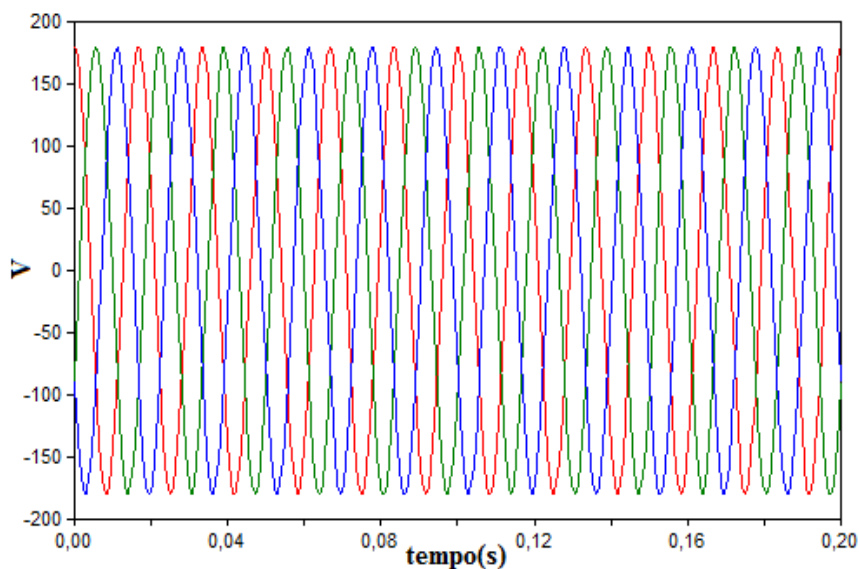
Figura 5.2 – Representação simplificada do circuito a ser utilizado nas simulações computacionais do protótipo



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

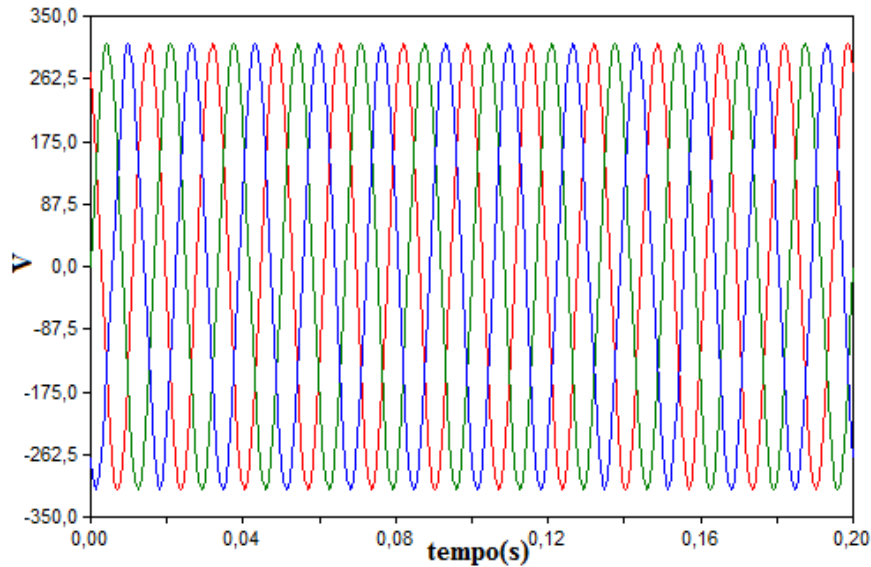
As figuras 5.3 e 5.4 mostram as tensões instantâneas de fase e de linha respectivamente do ramal trifásico que alimenta o transformador isolador. Essa tensão veio do circuito trifásico interno do laboratório.

Figura 5.3 – Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 179,02 V, fase B = 179,44 V, fase C= 179,69V.Tensão eficaz fase A = 126,59V, fase B = 126,88V, fase C = 127,0 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.4 – Tensão de linha instantânea no lado do primário transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 311,09 V, fase B = 311,16 V, fase C= 311,25 V. Tensão eficaz linha A = 219,97V, fase B=220,02V, fase C = 220,09 V **FD% =0,031%**

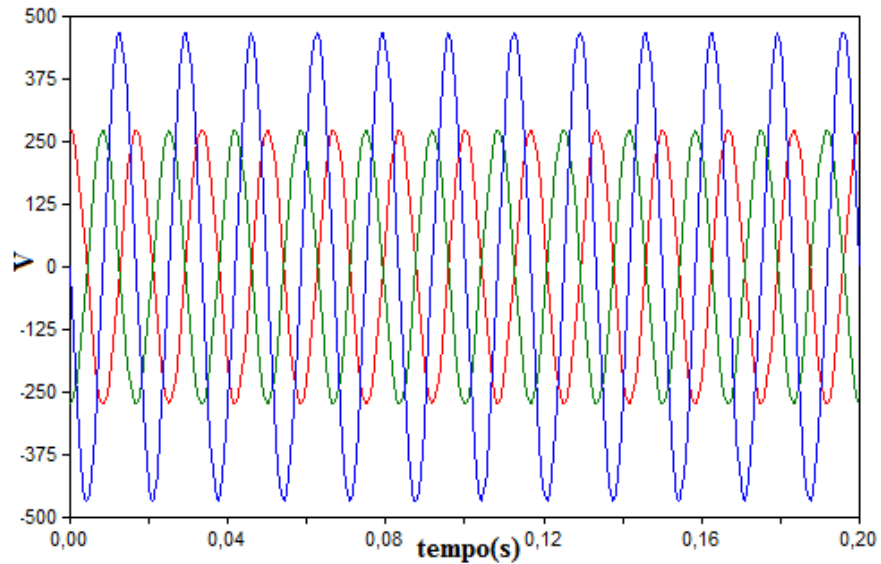


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As figuras 5.5 e 5.6 mostram as tensões instantâneas de fase e de linha respectivamente no secundário do (TI), com a resistência da malha de 12Ω . Para o (TC) a resistência da malha crítica é de 47Ω . As figuras 5.7 e 5.8 mostram as mesmas condições das figuras 5.5 e 5.6, porém com resistência da malha do (TC) de 20Ω . Sendo utilizada uma carga trifásica equilibrada conectada em estrela de $68,92+j0\ \Omega/\text{fase}$, nas duas situações. As figuras 5.5 e 5.7 que representam as tensões de fase, só foram possíveis serem verificadas devido aos recursos computacionais do ATP. Na prática, o sistema caracteriza-se por tensões de linha, já que o solo se apresenta como um condutor, não sendo uma simples referência como ocorre num sistema de distribuição convencional. No secundário do transformador isolador, conforme figuras 5.8, verifica-se que o método proposto está dentro da eficácia da norma, estando as amplitudes das tensões de linha muito próximas, e defasadas de 120° , na sequência ABC. Já a figura 5.6 demonstra que a resistência da malha do (TC), influencia diretamente no desequilíbrio da tensão no secundário do transformador. O fator de desequilíbrio neste caso está acima do pretendido pela norma.

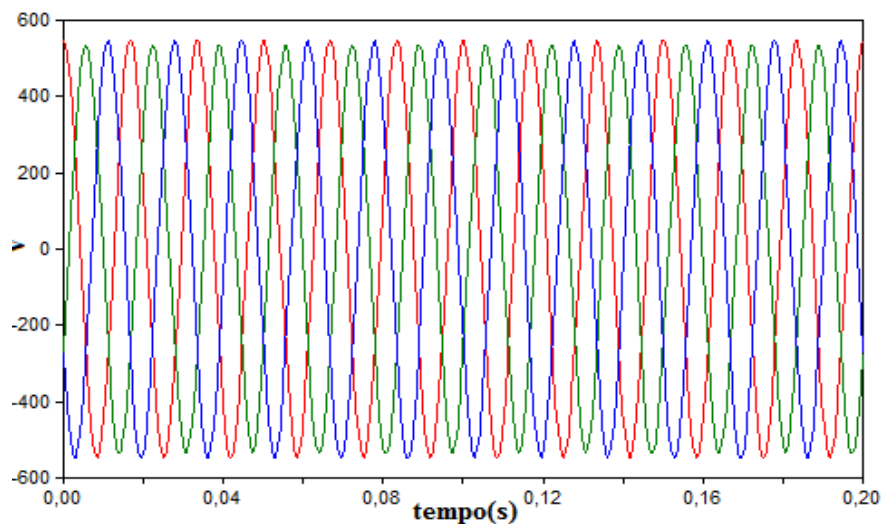
Considerando a configuração mais adequada, em que a resistência da malha do (TC) é de 20Ω . O sistema proposto demonstrar que o método se consubstancia como principal requisito para atendimento às cargas trifásicas rurais.

Figura 5.5 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 275,67 V, fase B = 276,01 V, fase C = 403,86V. Tensão eficaz fase A = 194,92V, fase B=195,17V, fase C =285,57 V



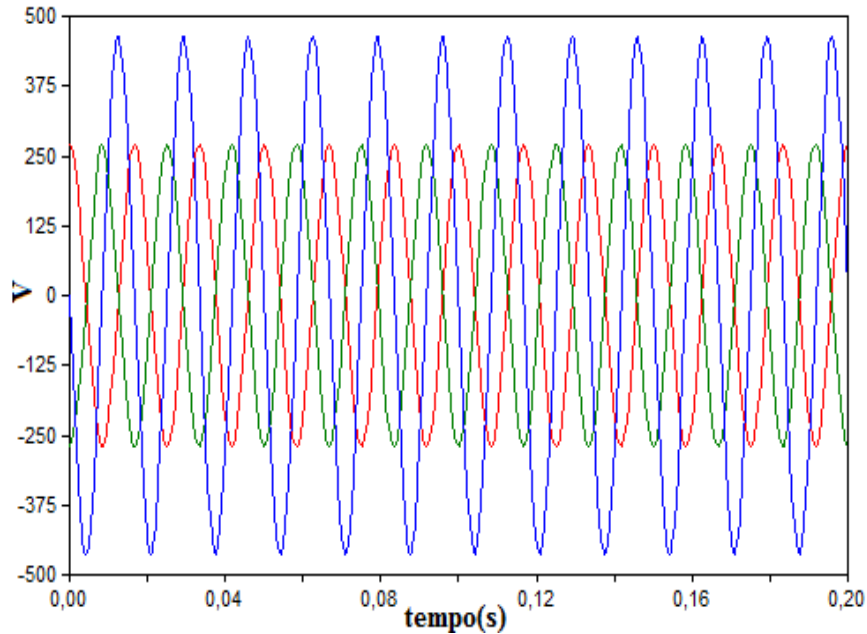
Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.6 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,42 V, fase B = 519,56 V, fase C = 519,57V. Tensão eficaz linha A = 379,30V, fase B =367,38V, fase C = 367,39 V **FD% = 2,15%**



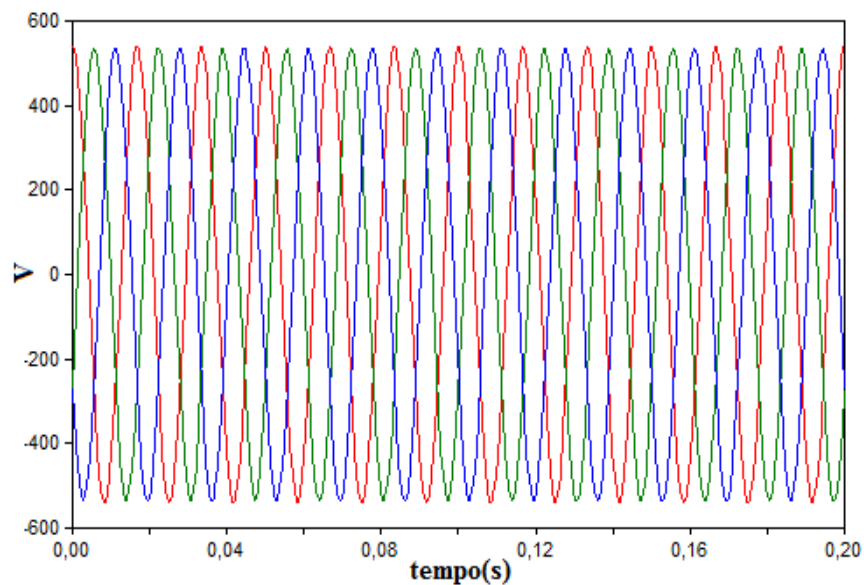
Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.7 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 275,66 V, fase B = 276,01 V, fase C = 403,86V. Tensão eficaz fase A = 194,92V, fase B = 195,16V, fase C = 285,57 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.8 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,42 V, fase B = 527,75 V, fase C = 527,96V. Tensão eficaz linha A = 379,31V, fase B = 373,18V, fase C = 373,32V **FD% = 1,079%**

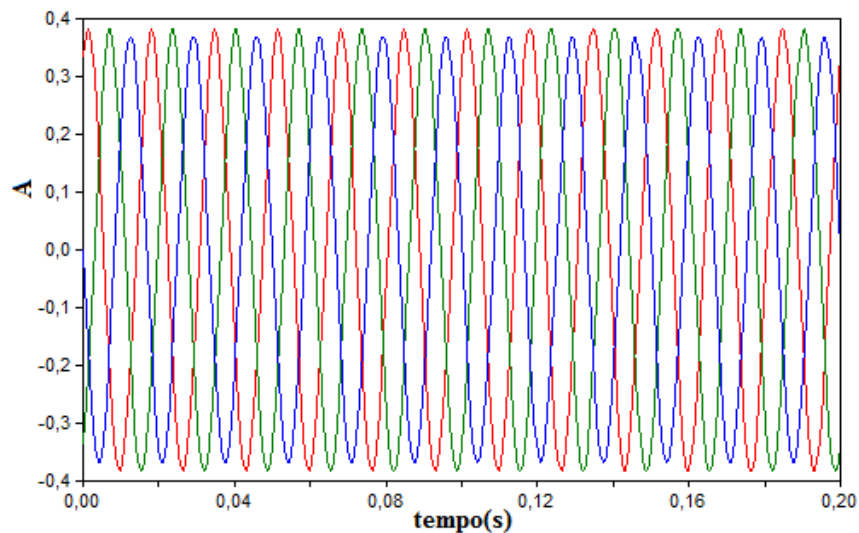


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As figuras 5.9 e 5.10 representam as correntes de linha no secundário do transformador isolador, para a resistência da malha do consumidor de 47Ω e 20Ω

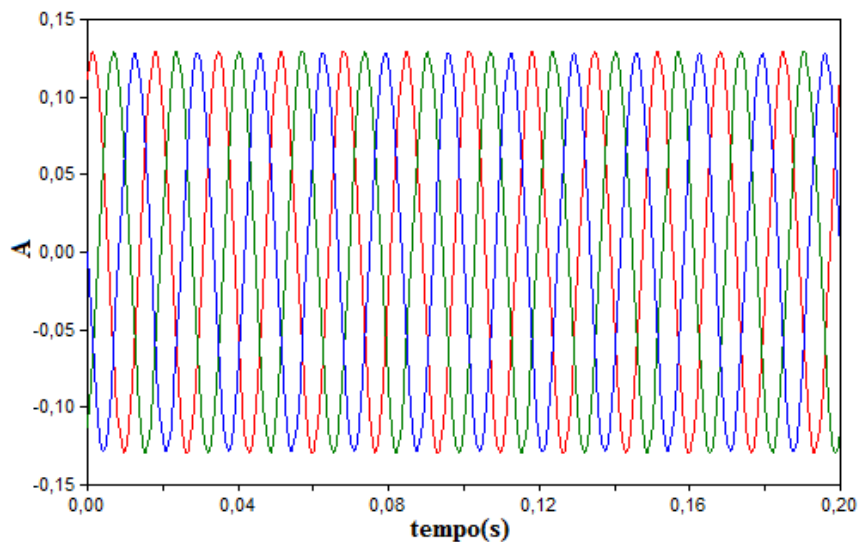
respectivamente. Os valores diferenciados das malhas, quase não interfere no valor da corrente do secundário do transformador isolador.

Figura 5.9 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = 0,382 A, B = 0,381A e C= 0,368A. Corrente eficaz linha A = 0,27A, B =0,27A e C = 0,26 A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.10 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Corrente de pico linha A =0,384A, B = 0,383A e C= 0,376A. Corrente eficaz linha A = 0,27A, B =0,27A e C = 0,27A

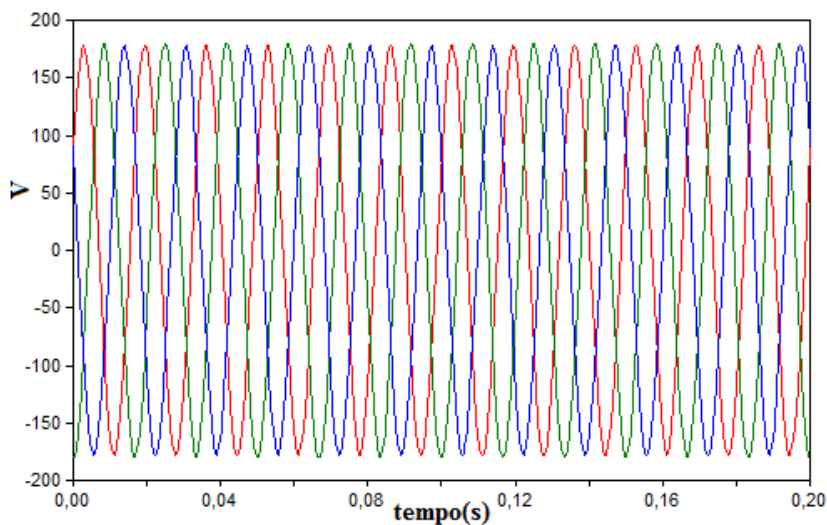


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As tensões de fase e de linha no secundário do transformador do consumidor, com valor de resistência da malha de 47Ω , são mostradas nas figuras 5.11 e 5.12. No entanto, o valor da resistência compromete o fator de desequilíbrio, pois esse é maior que 2%. Numa

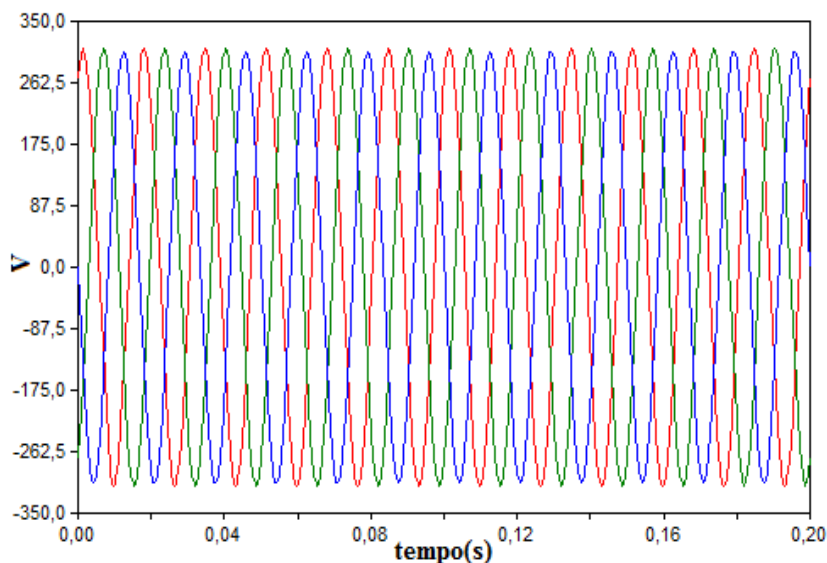
situação como essa alguma atitude deve ser tomada como: investir mais na malha do (TI), buscando baixar a sua resistência, ou na malha do (TC) ou em ambas. Procurar nas vizinhanças um melhor lugar para confecção de uma nova malha. Essa última solução necessita ser avaliada adequadamente, pois onera o custo de implantação.

Figura 5.11 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 172,73 V, fase B = 179,54 V, fase C=173,19V. Tensão eficaz fase A = 122,14V, fase B =126,95V, fase C =122,46 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

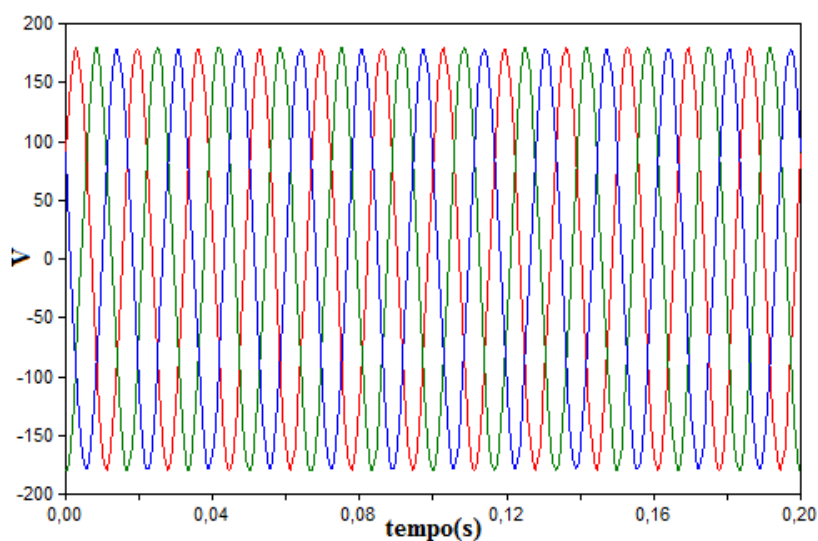
Figura 5.12 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 307,43 V, fase B = 307,42 V, fase C= 296,56 V. Tensão eficaz linha A = 217,39V, fase B =217,38 V, fase C =209,70 V **FD%=2,37 %**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

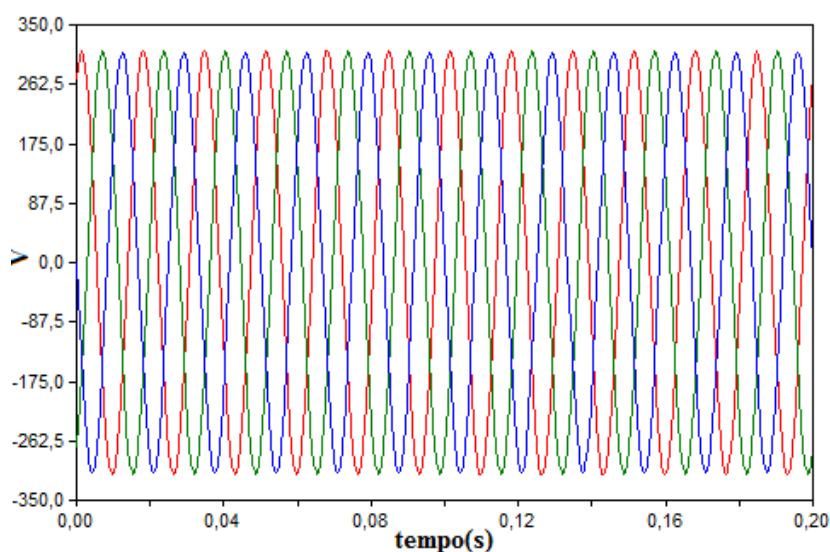
As figuras 5.13 e 5.14 mostram as tensões de fase e de linha no secundário do transformador do consumidor com amplitudes muito próximas e defasagem de 120° elétricos entre si, mantendo a sequência de fases ABC. As tensões de linha estão dentro do desequilíbrio estabelecido por norma. O valor de resistência da malha do consumidor é de 20Ω .

Figura 5.13 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 175,63 V, fase B = 179,54 V, fase C=176,02V. Tensão eficaz fase A = 124,19V, fase B =126,95V, fase C =124,46 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

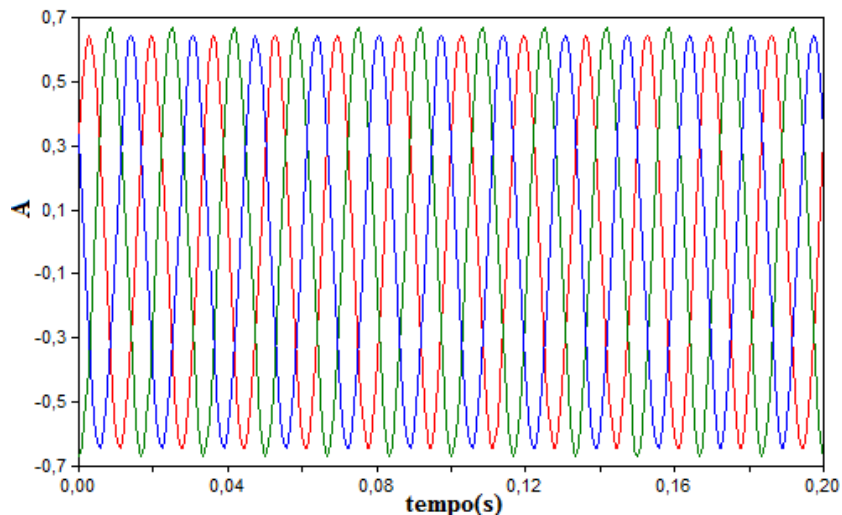
Figura 5.14 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 309,04 V, fase B = 309,04 V, fase C= 303,03 V. Tensão eficaz linha A = 218,52V, fase B =218,52V, fase C =214,27V **FD% = 1,30 %**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

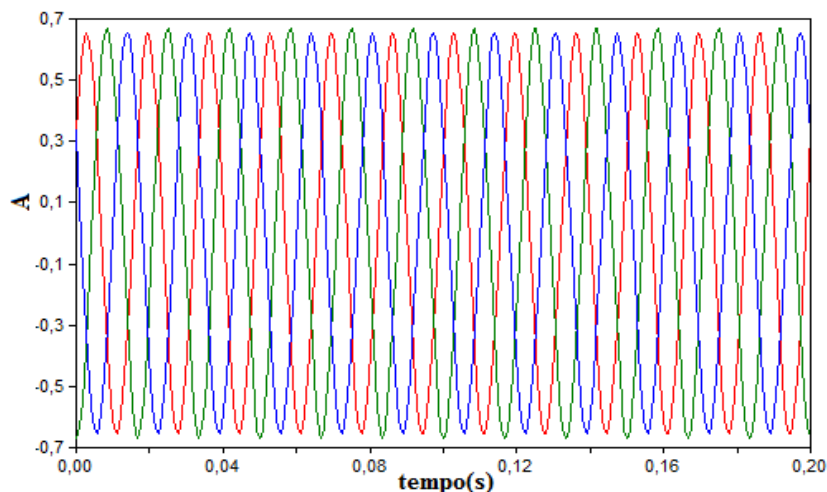
As figuras 5.15 e 5.16 são as correntes na carga para as resistências da malha do consumidor 47Ω e 20Ω , respectivamente. Observa-se que os valores eficazes das correntes estão muito próximos dos valores medidos na Tabela 5.2, com a carga $268,9+j0\Omega$ /fase trifásica balanceada. Essas correntes estão circulando nos enrolamentos do secundário do transformador do (TC) e pela carga trifásica conectada em estrela, tendo os módulos muita semelhança e defasagem angular de 120° .

Figura 5.15 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = $0,645\text{A}$, B = $0,665\text{A}$ e C = $0,644\text{A}$. Corrente eficaz linha A = $0,46\text{A}$, B = $0,47\text{A}$ e C = $0,46\text{A}$



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

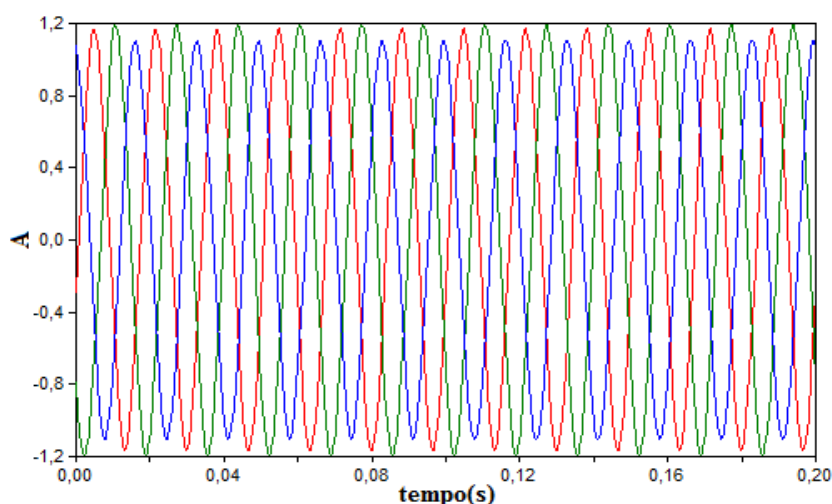
Figura 5.16 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = $0,655\text{A}$, B = $0,665\text{A}$ e C = $0,655\text{A}$. Corrente eficaz linha A = $0,46\text{A}$, B = $0,47\text{A}$ e C = $0,46\text{A}$



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

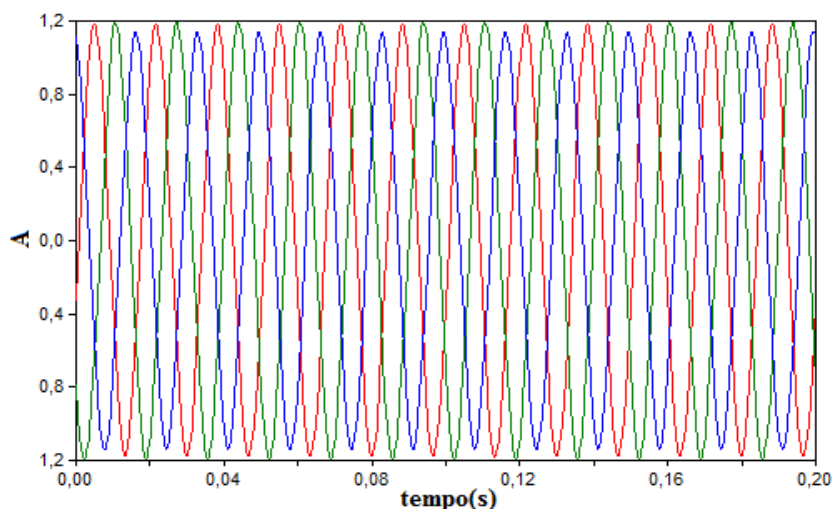
Considerando as semelhanças dos circuitos e levando em conta a manipulação das cargas utilizadas, optou-se em relatar e mostrar somente as formas de ondas das correntes e potências envolvidas nas próximas simulações. Isso dadas as suas importâncias para o resultado do protótipo. Com uma carga $100 + j113$ (D) trifásica equilibrada ligada em estrela. As figuras 5.17 e 5.18 mostram as correntes na carga para as resistências da malha do consumidor 47Ω e 20Ω , respectivamente.

Figura 5.17 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = 1,1607A, B = 1,1849A e C = 1,104A. Corrente eficaz linha A = 0,826A, B = 0,838A e C = 0,78A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

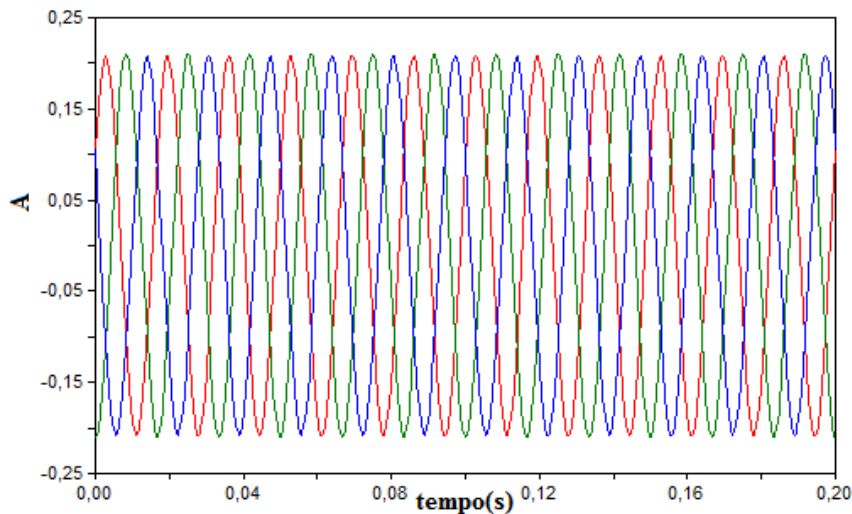
Figura 5.18 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = 1,1785A, B = 1,1849 A e C = 1,1407 A. Corrente eficaz linha A = 0,833A, B = 0,838A e C = 0,807A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

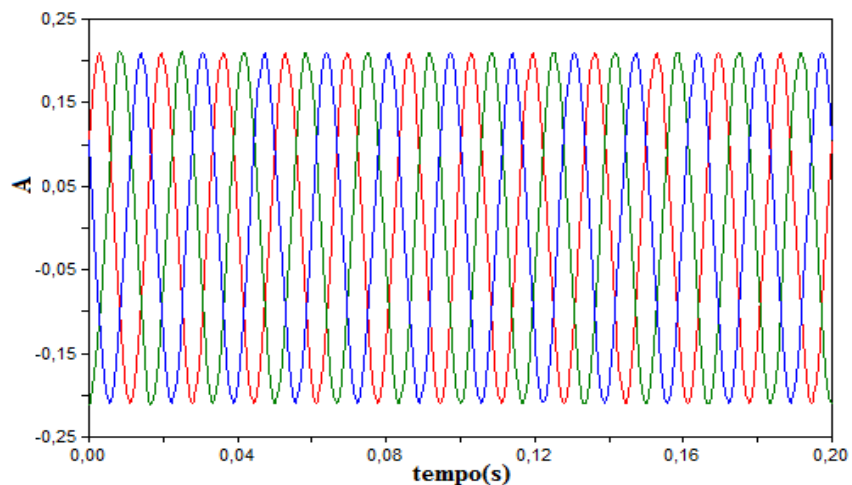
Na intenção de demonstrar as diversas cargas que foram simuladas com os valores da Tabela 5.2, finalmente foi simulada a carga trifásica ligada em estrela $856 + j113(E)$. Os resultados mostrados pelas figuras 5.19 e 5.20 apontam para valores muito semelhantes para as resistências de aterramento da malha do consumidor de 47Ω e 20Ω , respectivamente.

Figura 5.19 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = $0,206A$, B = $0,2084A$ e C = $0,206A$. Corrente eficaz linha A = $0,146A$, B = $0,147A$ e C = $0,146A$.



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.20 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = $0,2065A$, B = $0,2088A$ e C = $0,2079A$. Corrente eficaz linha A = $0,1460A$, B = $0,1476A$ e C = $0,1470A$.

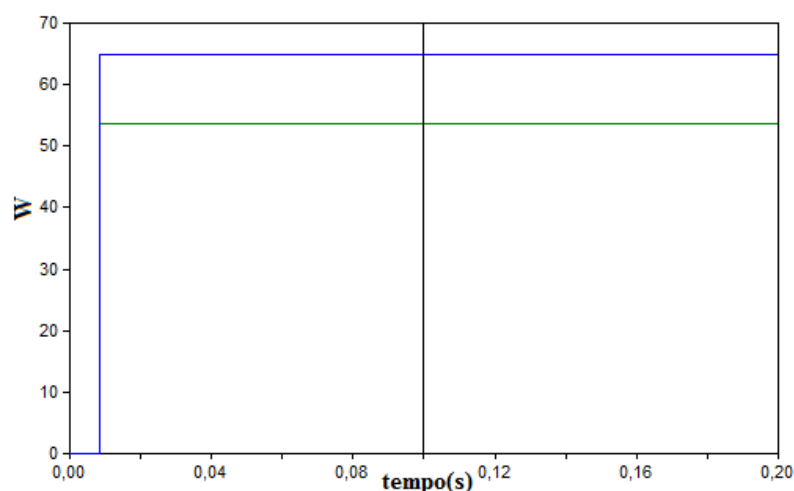


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

O comportamento das correntes analisadas nas figuras 5.16 até 5.20, com as diversas cargas submetidas, confirmaram os valores medidos no campo fornecido pela Tabela 5.2.

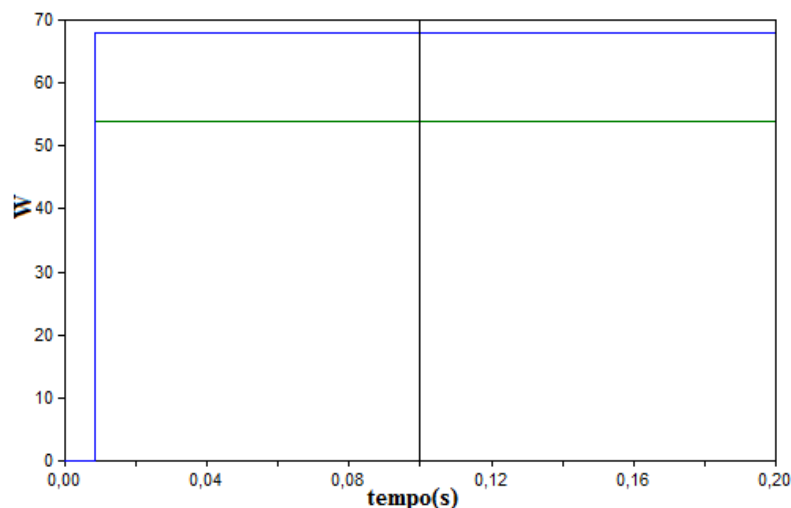
As simulações que se seguem têm o objetivo de verificar as potências ativas na carga trifásica equilibrada ligada em estrela $268,9+j0$ (C). Os registros da potência ativa são mostrados nas figuras 5.21 e 5.22, nas fases do primário do transformador do consumidor, para uma resistência de malha do transformador do consumidor de 47Ω e 20Ω . Devido à peculiaridade do sistema, as potências no primário do transformador do consumidor aparecem com as fases desequilibradas.

Figura 5.21 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 53,67W, fase B =53,68W , fase C=64,80W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

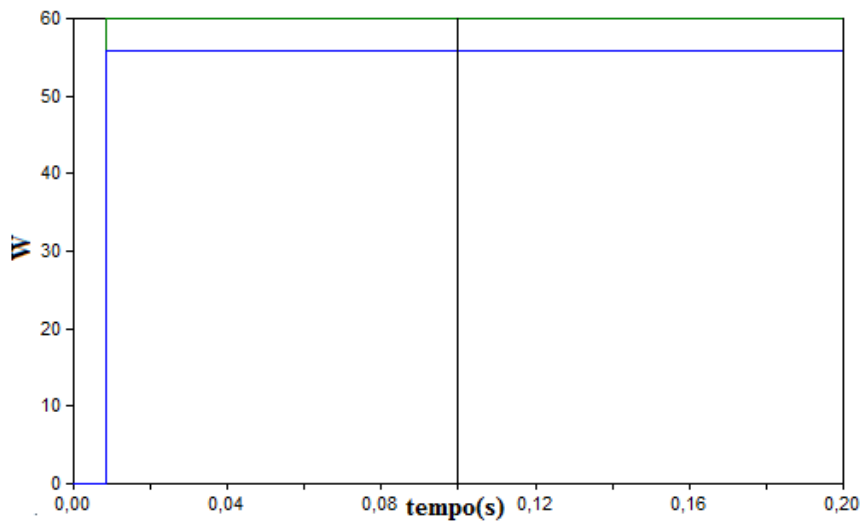
Figura 5.22 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 53,852W, fase B =53,866W , fase C = 68,039 W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

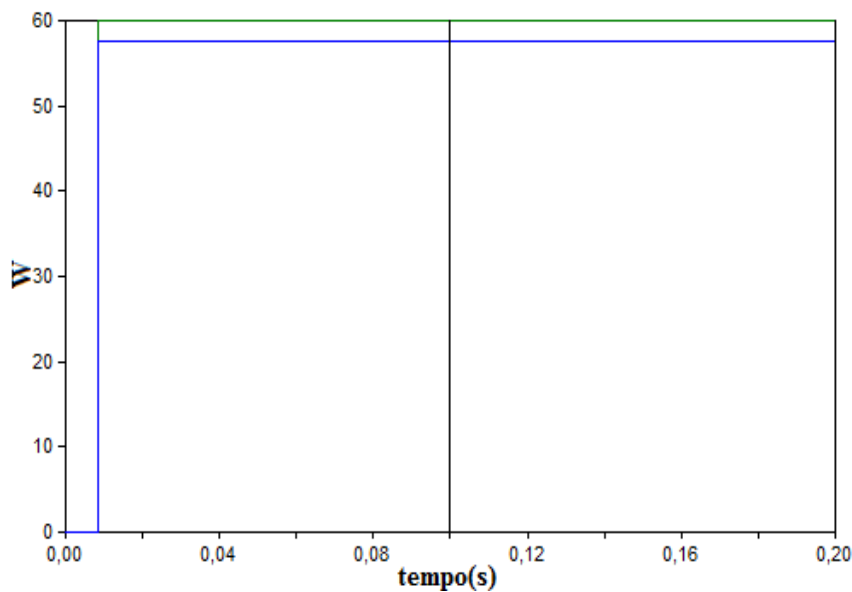
As figuras 5.23 e 5.24 mostram as potências no secundário do transformador do consumidor nas duas condições de resistências da malha de aterramento do transformador do consumidor. O desequilíbrio observado nas fases é amenizado quando a resistência da malha do consumidor tem um valor menor.

Figura 5.23 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 56,021W, fase B =60,135W , fase C= 55,816W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.24 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Potência ativa fase A = 57,677 W, fase B =59,975 W , fase C= 57,681W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

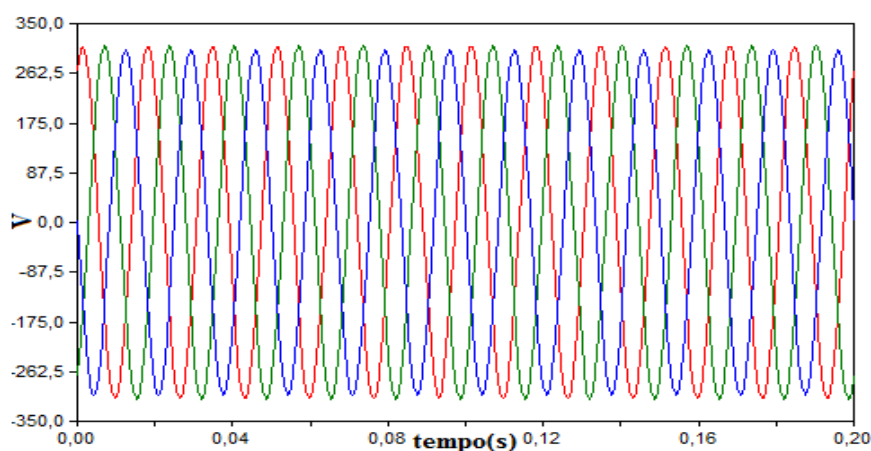
Vários testes foram realizados com outros valores de cargas, e o comportamento do sistema quanto a sua funcionalidade foram mantidos.

5.3.2 Simulação do sistema com circuito desequilibrado e carga desequilibrada

Nestas simulações, a carga rural será substituída por uma carga fortemente desequilibrada, com impedância constante, conexão estrela: $268,92 + j0$; $100 + j113$ e $856 + j113$. A resistência da malha do (TI) continua sendo de 12Ω e a resistência da malha do (TC) será somente a de 20Ω , pois nas simulações anteriores mostrou-se mais adequada para o sistema.

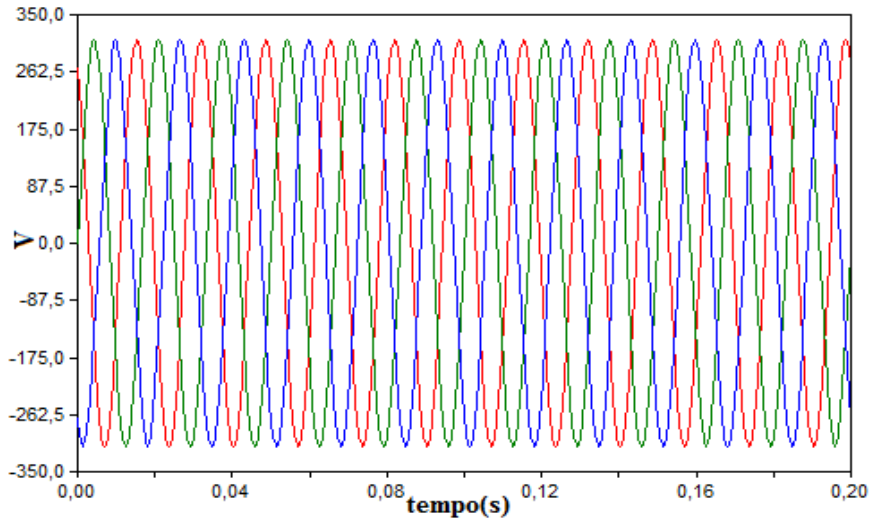
As figuras 5.25 e 5.26 mostram as tensões de fase e de linha respectivamente no primário do (TI).

Figura 5.25 – Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 178,96 V, fase B = 179,46 V, fase C = 179,60 V. Tensão eficaz linha A = 126,54 V, fase B = 127 V, fase C = 127 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

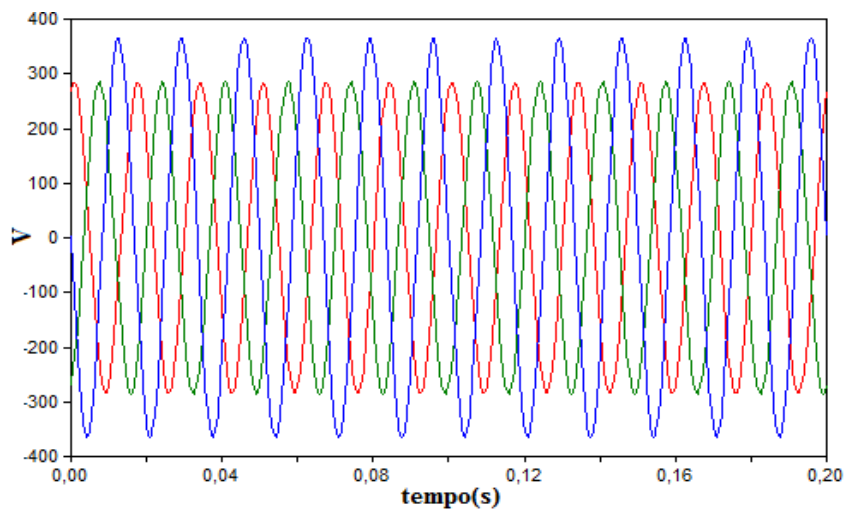
Figura 5.26 – Tensão de linha instantânea no lado do primário transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 311,12 V, fase B = 311,10 V, fase C = 311,09 V. Tensão eficaz linha A = 220 V, fase B = 220 V, fase C = 220 V **FD% = 0,0%**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

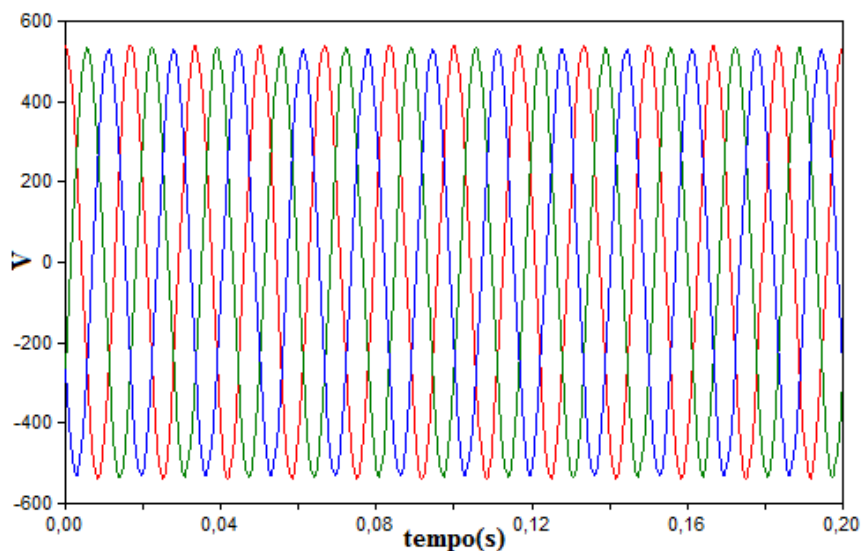
As figuras 5.27 e 5.28 mostram as tensões de fase e de linha respectivamente no secundário do (TI). Como já comentado, a tensão de fase é uma prerrogativa do ATP. Mas a tensão de linha para carga desequilibrada mostrou um melhor comportamento em razão do FD% com um valor de 0,63% bem abaixo do definido em norma.

Figura 5.27 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 283,67 V, fase B = 285,01 V, fase C = 365,14 V. Tensão eficaz fase A = 200,58 V, fase B = 201,53 V, fase C = 258,19 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

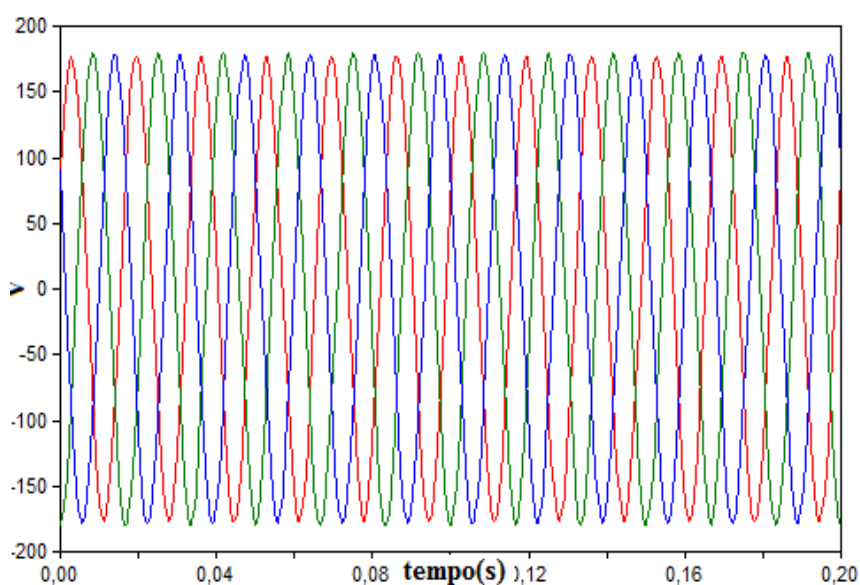
Figura 5.28 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,11 V, fase B = 532,78 V, fase C= 530,38V.Tensão eficaz linha A = 379,08V, fase B =376,73V, fase C =375,0V **FD% = 0,63%**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

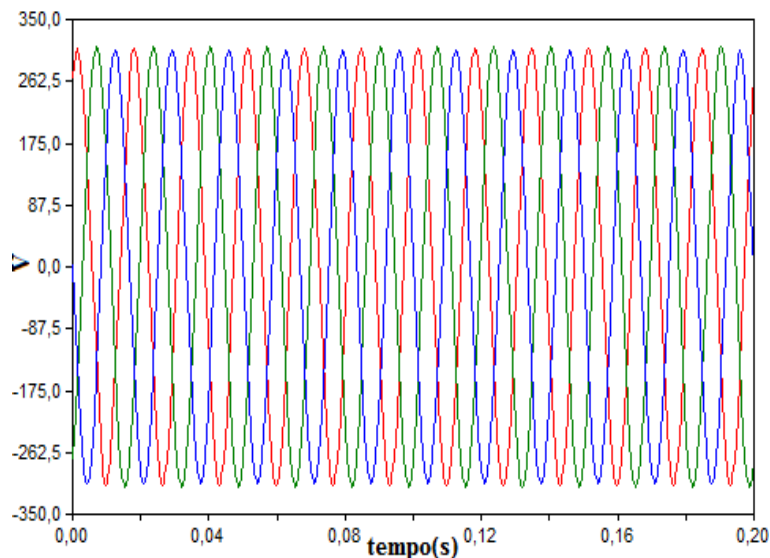
A figura 5.29 e 5.30 mostram as tensões na carga comparativamente com a carga equilibrada, não havendo alterações muito significativas nos resultados.

Figura 5.29 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul).Tensão de pico de fase A = 176,52 V, fase B = 179,24 V, fase C=177,95V.Tensão eficaz fase A = 124,82V, fase B =126,74V, fase C =125,83 V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

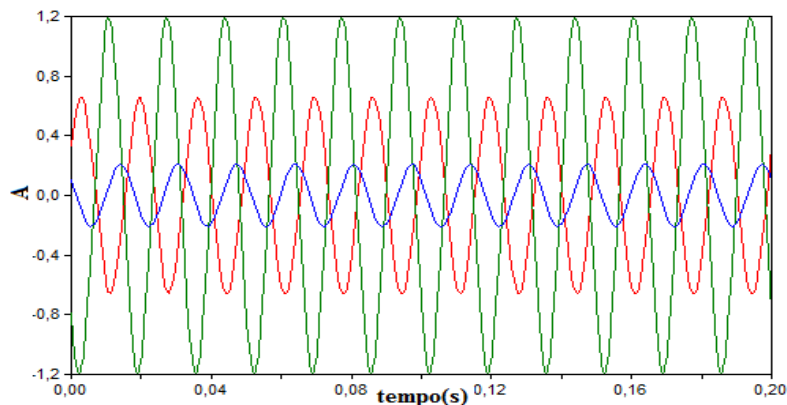
Figura 5.30 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul). Tensão de pico de linha A = 308,49 V, fase B = 310,63 V, fase C = 306,21 V. Tensão eficaz linha A = 218,14V, fase B = 219,65 V, fase C = 216,52V **FD% = 0,82 %**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 5.31 mostra as correntes de linha circulando nos enrolamentos do secundário do transformador do consumidor que alimenta a carga conectada em estrela. O desequilíbrio entre as correntes caracteriza-se pela carga fortemente desequilibrada. Porém essa condição não é tão diferente de um circuito convencional alimentando uma carga urbana ou rural. Como se pode verificar propositalmente, as cargas desequilibradas por fase foram as mesmas quando utilizadas como cargas equilibradas. Observa-se que o comportamento das correntes de linha tem os valores próximos dos medidos em campo.

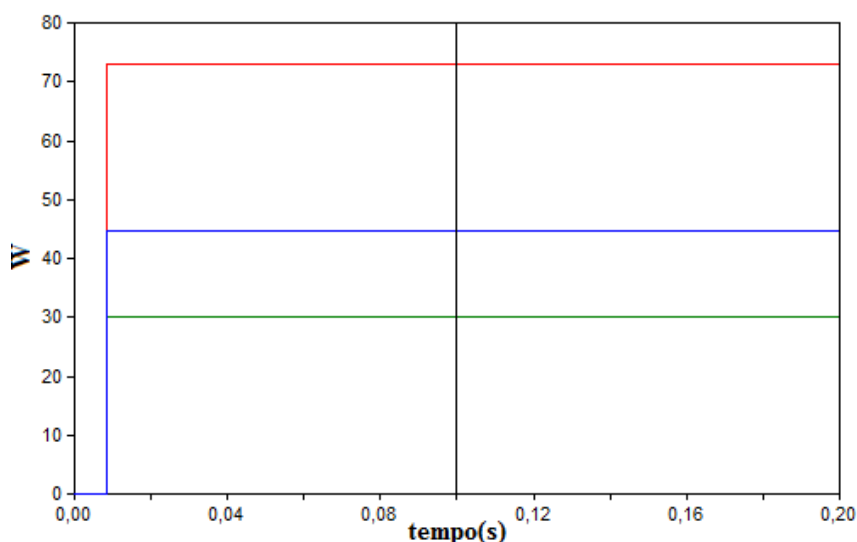
Figura 5.31 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = 0,65767 A, B = 1,1845 A e C = 0,20588 A. Corrente eficaz linha A = 0,465 A, B = 0,838 A e C = 0,146 A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

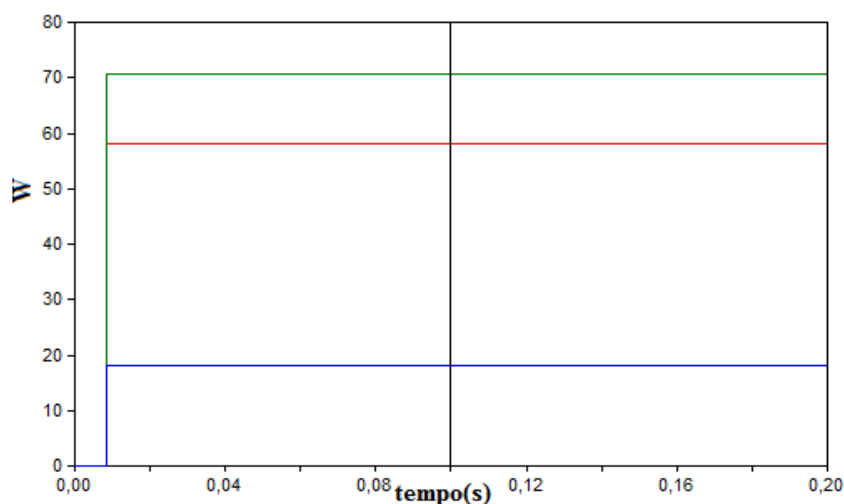
As figuras 5.32 e 5.33 mostram as potências ativa na distribuição das fases no primário e secundário respectivamente do (TC).

Figura 5.32 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 73,067W, fase B =29,946W , fase C= 44,572 W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.33 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 58,197W fase B =70,612 W , fase C= 18,2W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As correntes de linha mostradas na figura 5.31 com as simulações com cargas desequilibradas estão dentro das margens permitidas, conforme Equação 5.3. Essas tensões e correntes suprem o primário do transformador trifásico (TC), que irá alimentar as cargas.

O desequilíbrio das correntes eficazes nas simulações das cargas desequilibradas pode ser calculado conforme equação:

$$d\% = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{(2I_a - I_b - I_c)^2 + 3(I_c - I_b)^2}{I_a + I_b + I_c}} \times 100\% \quad (5.3)$$

Em que: I_a , I_b , I_c – módulos das correntes nos condutores referentes às fases “A”, “B”, “C”, respectivamente.

$d\%$ - desequilíbrio das cargas

Esta forma de cálculo está descrito no documento “Manual de Procedimentos de Redes de Distribuição” da Eletrobrás, aprovado pela Resolução nº 085/2012, de 29 de maio de 2012. O limite recomendado para o desequilíbrio máximo é de 20%, já que pode determinar elevadas quedas de tensão na fase mais carregada, resultando em desequilíbrio de tensão e aumento na corrente no neutro.

O $d\%$ das correntes citada ficou em torno 0,66%, muito abaixo do limite estabelecido por norma.

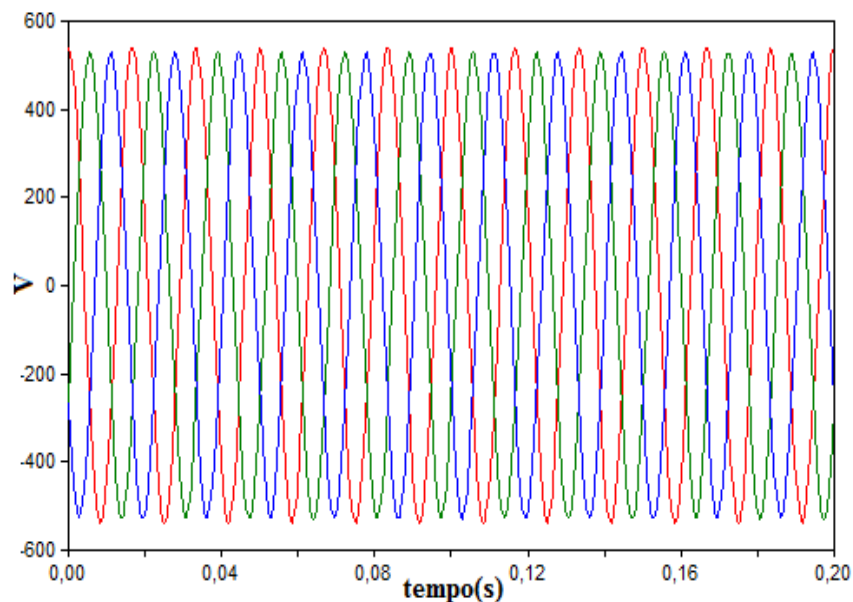
5.3.3 Circuito equilibrado com cargas equilibradas

Para esses testes foi escolhida somente a resistência da malha do (TC) de 20Ω e a malha do (TI) continua sendo 12Ω , para uma carga de $268,9 + j0\Omega$ /fase. Essa escolha deu-se por conta dos testes anteriores que apontaram ser essa a melhor condição. Confirmando as leituras realizadas em campo e mostradas na Tabela 5.2.

Para equilibrar o circuito foi instalado em série com a impedância de retorno de terra (\bar{Z}_G), a impedância de compensação (\bar{Z}_E).

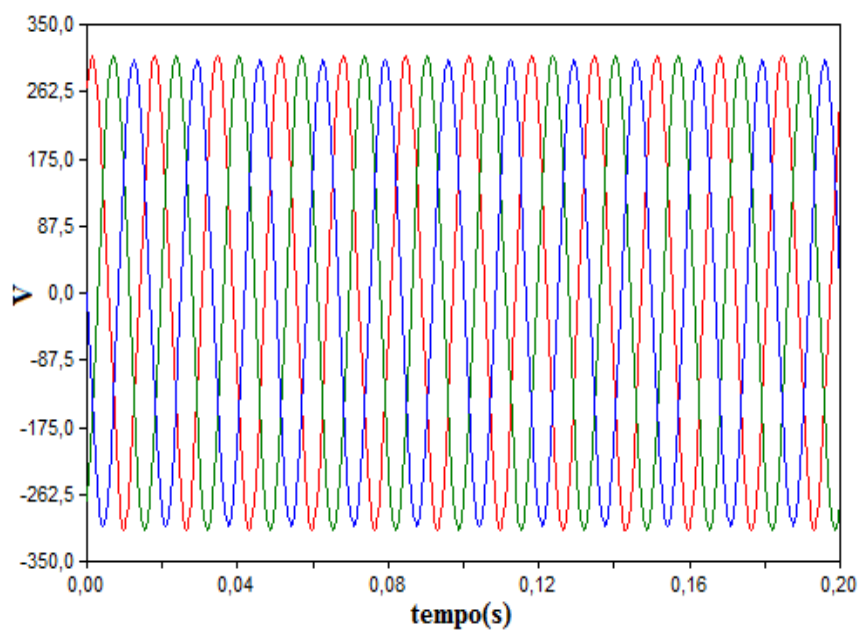
Comparando as tensões de linha do secundário do (TI) figura 5.34, e do secundário do (TC) figura 5.35 respectivamente com as figuras 5.8 e 5.14, circuito desequilibrado, observa-se que não houve alterações nos resultados. O mesmo ocorreu com a figura 5.36 comparado com a figura 5.15, que descreveu as correntes de cargas para um circuito desequilibrado.

Figura 5.34 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de linha A = 536,42 V, fase B = 527,75 V, fase C= 527,96 V. Tensão eficaz linha A = 379,31V, fase B =373,30V, fase C =373,30V **FD% = 1,079 %**



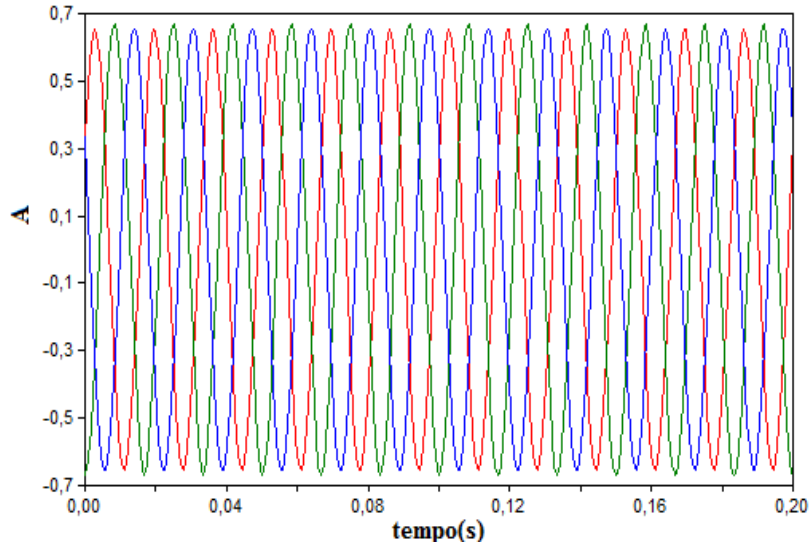
Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.35 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); tensão de pico de linha A = 309,04 V, fase B = 309,04 V, fase C= 303,03 V. Tensão eficaz linha A = 218,52V, fase B =218,52V, fase C =214,47V **FD%=1,30**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

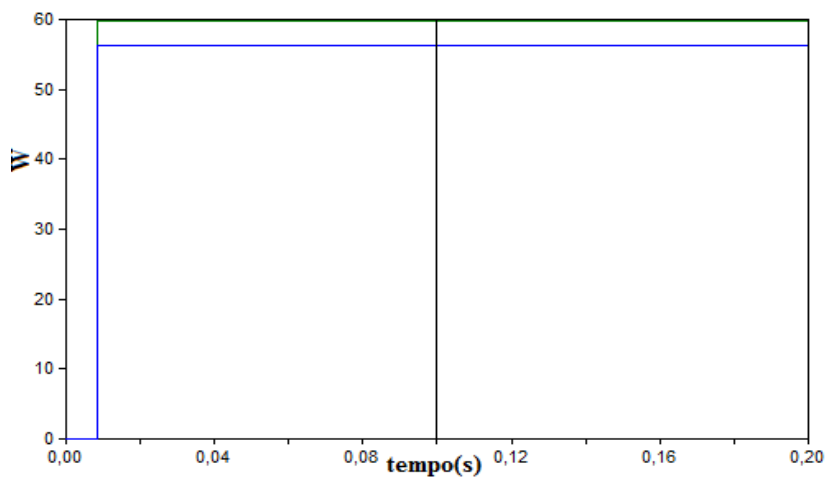
Figura 5.36 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A = 0,655A, B = 0,665A e C = 0,655A. Corrente eficaz linha A = 0,46A, B = 0,47A e C = 0,46 A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

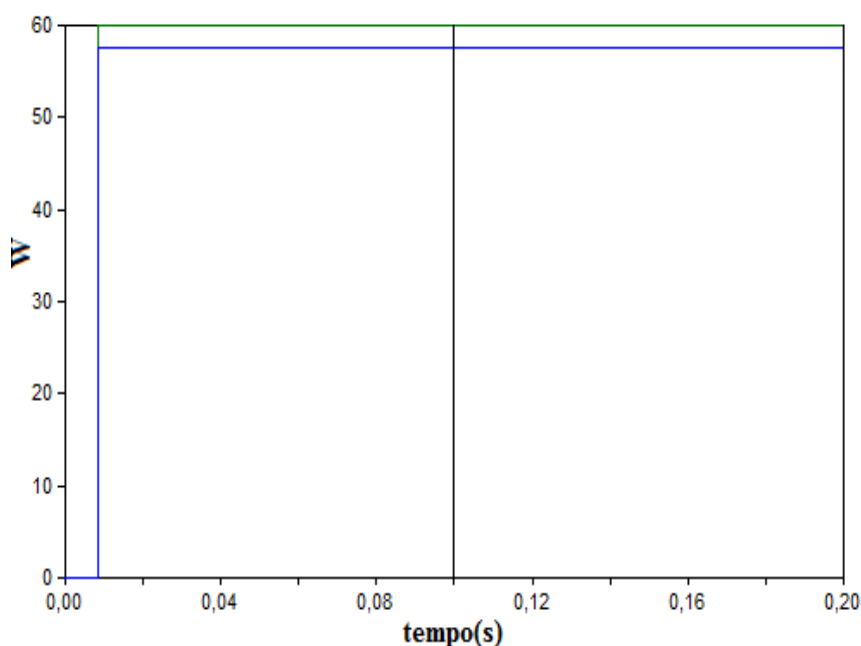
As potências ativas em um circuito equilibrado são mostradas por meio das figuras 5.37 no primário do (TC) e figura 5.38 no secundário do (TC). Comparando para mesmas condições de carregamento, a figura 5.28 apresenta um melhor equilíbrio em relação à figura 5.22 do circuito desequilibrado. O que cria uma melhor distribuição das cargas nas fases do primário do transformador, evitando a sobrecarga, em uma das fases. Quanto à figura 5.29 em comparação com a figura 5.24 do circuito desequilibrado, não houve uma mudança acentuada na distribuição de potência entre as fases.

Figura 5.37 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 59,671W, fase B = 59,681W, fase C = 56,378 W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.38 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B(verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 57,665 W, fase B =59,971 W, fase C= 57,671W



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A importância das simulações realizadas por meio do ATP, tanto para o circuito desequilibrado quanto equilibrado no protótipo foi estabelecer um comparativo no experimento. Em primeiro lugar, sem a presença da impedância de compensação, no segundo instante com a sua aplicação, o circuito então foi analisado em condições de equilíbrio. Conforme Tabela 5.2, utilizaram-se as impedâncias da malha do (TC) a mais crítica e a adequada, e a do (TI) constante. As condições operativas do circuito desequilibrado foram primeiro suprir uma carga trifásica equilibrada e depois uma carga trifásica fortemente desequilibrada. Já o circuito equilibrado supriu uma carga trifásica equilibrada. Em todos os três casos estudados o resultado mostrou-se satisfatório, resultando em desequilíbrios aceitáveis em todos os pontos em que tensões e correntes foram registradas.

As simulações apontaram a grande possibilidade do uso do sistema sem a impedância de compensação, pois a ideia é atender ao consumidor rural com uma tecnologia adequada a custos atrativos para todos os envolvidos.

5.4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo desenvolvido, nas instalações da Universidade Federal de Rondônia UNIR, a céu aberto, é mostrado por meio das figuras 5.39 até 5.43. Por ser um projeto

inovador foi importante dar uma visualização geral. Realizado com a utilização de protótipo em escala reduzida (220/380/220 V), com a intenção de verificar o comportamento, em relação aos valores de tensão do circuito trifásico não convencional, para atender cargas rurais. Observam-se as fases aéreas (A e B), posicionadas a uma altura de aproximadamente 0,80m em relação ao solo. E a distância entre as fases A e B de 0,3m, a fase C é conectada diretamente ao solo, de onde parte o circuito, conforme figura 5.40. Em razão das limitações de espaço, o comprimento do circuito ficou em 39m, porém não dificultou a obtenção dos dados desejados. A chegada do circuito para alimentar a carga se dá pelas duas fases aéreas e o solo como terceira fase, identificados na figura 5.41. Alimentou o primário do transformador do (TC), o qual forneceu energia elétrica por meio do seu secundário às cargas em testes, conforme figura 5.42. Por fim, a bancada do laboratório onde diversos tipos de cargas foram testadas com o objetivo de comprovar o comportamento do sistema. A resistência da malha do (TI) teve o seu valor constante em 12Ω . Em relação à resistência da malha do (TC), o valor foi de 20Ω , na simulação apareceu como o mais adequado.

Figura 5.39 – Transformador isolador trifásico 220/380 D/Y – 1kVA



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.40 – Saída do circuito do transformador isolador, malha do (TI) , fases aéreas A e B e a terceira fase C conectada ao solo. Ao fundo malha de aterramento do (TC)



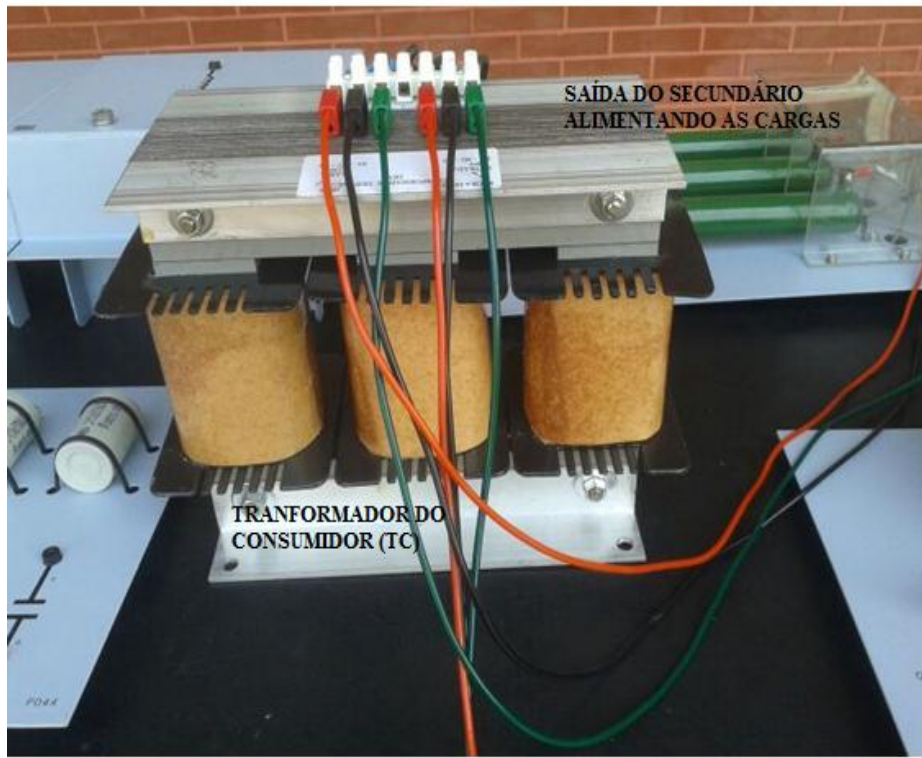
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.41 – Hegada do circuito para alimentar a carga trifásica, fase A, B e C de onde é drenada a corrente para alimentar a fase C do primário do transformador do consumidor (TC) ligado em delta. Ao fundo malha de aterramento do (TI)



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.42 – Transformador do consumidor trifásico 380/220/127V D/Y – 1kVA. Chegada do circuito trifásico alimentando o primário e saída do secundário alimentando as cargas



Fonte: Próprio autor.

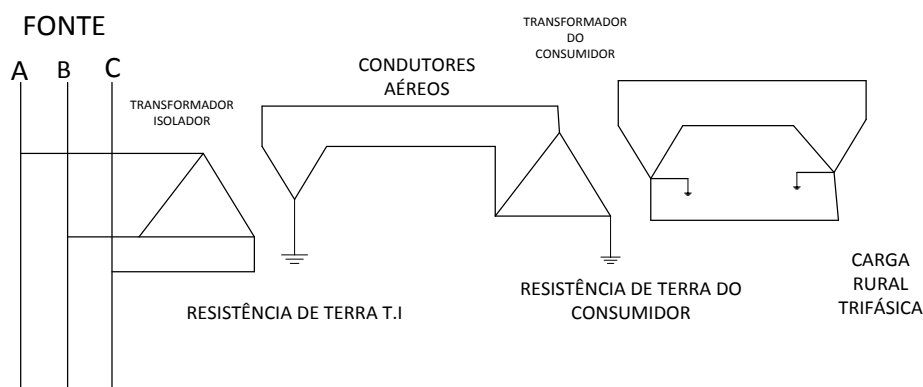
Figura 5.43 – Bancada onde foram realizados os testes com diversas cargas



Fonte: Próprio autor.

A figura 5.44 mostra o circuito composto por um transformador isolador, sistema de transmissão não convencional de 39 m e o transformador do consumidor. Inicialmente, a carga trifásica, para o teste, foi composta por um conjunto de três lâmpadas de 60W /220 V ligadas em estrela, conforme indicado na figura 5.39, alimentação trifásica para o sistema submetido ao ensaio veio do laboratório. No primário do transformador isolador em delta 220 V foram conectadas as três fases na sequência positiva ABC. No secundário em estrela 380 V, conforme mostra a figura 5.40, saem dois condutores aéreos fases A, B e a terceira fase C é ligada diretamente ao solo.

Figura 5.44 – Esquema elétrico utilizado para suprir de energia elétrica as diversas cargas testadas experimentalmente

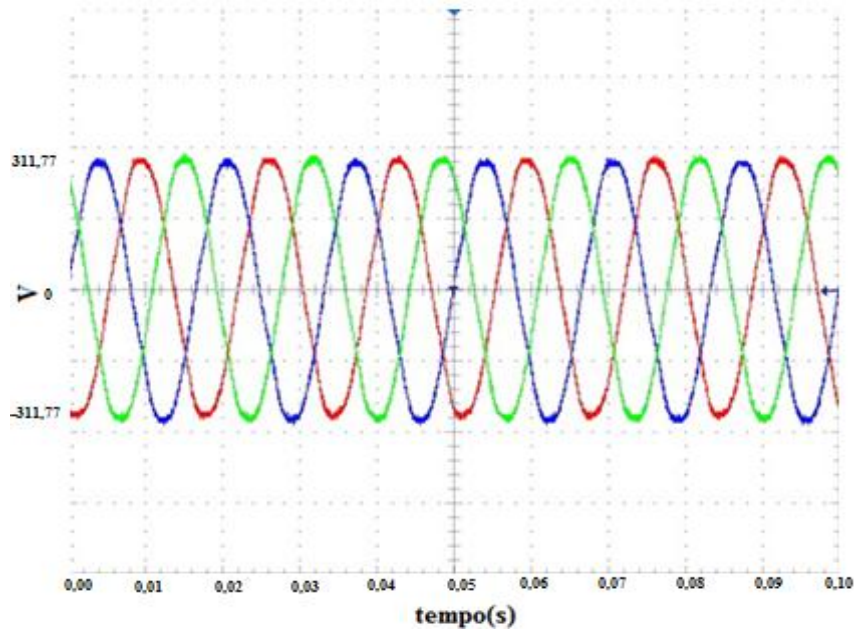


Fonte: Próprio autor.

5.4.1 Resultado dos testes em laboratório

As tensões obtidas no primário do transformador isolador, com conexão delta-estrela com uma fase aterrada, são mostradas na figura 5.45. Observa-se que os resultados, considerando-se a condição de regime permanente da carga resistiva, são compatíveis com os resultados obtidos por meio da simulação computacional figura 5.4. Devido às características das imagens do osciloscópio as cores do faseamento foram mudadas para: a fase A – cor Azul, fase B – cor Vermelha e fase C – cor Verde.

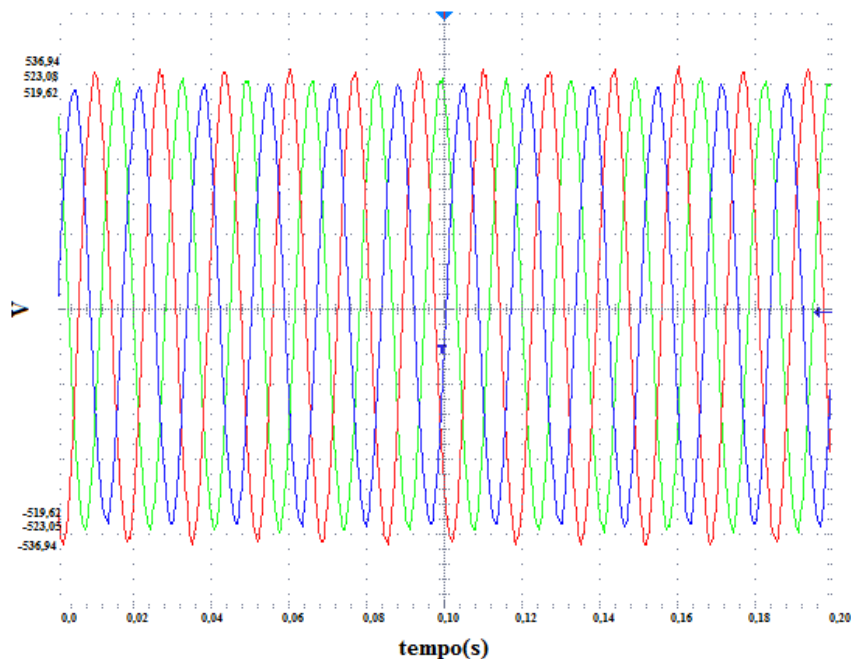
Figura 5.45 – Tensão de linha no lado primário do transformador isolador, fase A (azul), fase B (vermelha), fase C (verde)



Fonte: Próprio autor.

A tensão no secundário do transformador isolador (figura 5.46) apresenta desequilíbrio entre os valores de amplitude. Mas esse comportamento se assimila com o que ocorreu na simulação computacional, figura 5.8, estando dentro do FD% definido por norma.

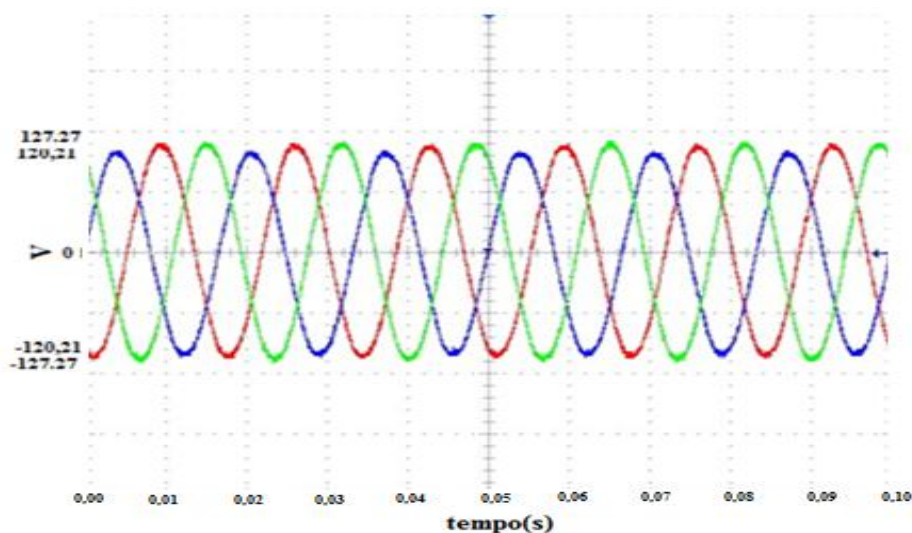
Figura 5.46 – Tensão de linha no lado secundário do transformador isolador, fase A (azul), fase B (vermelha), fase C (verde)



Fonte: Próprio autor.

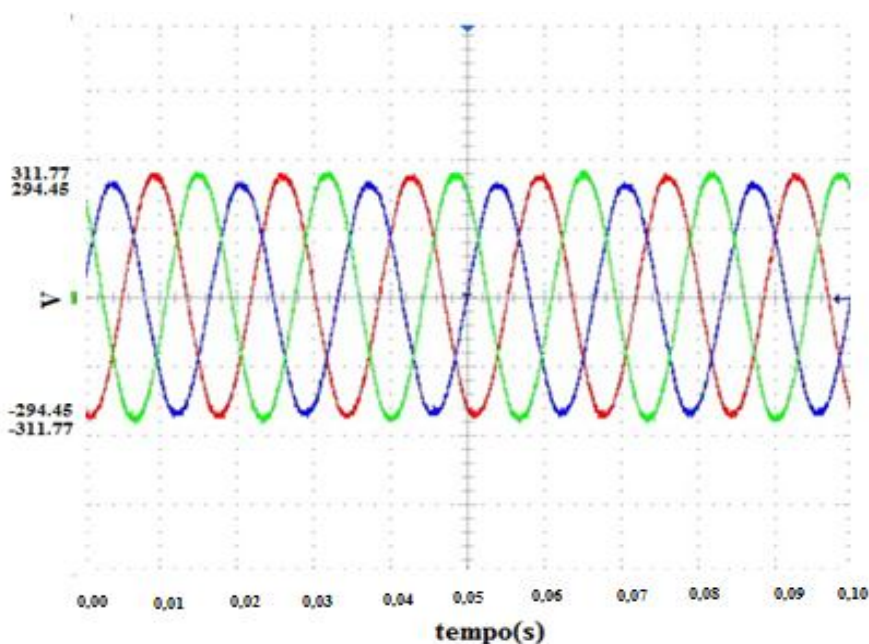
As figuras 5.47 e 5.48 mostram as tensões de fase e de linha no secundário do transformador do consumidor, respectivamente. Os valores experimentais foram melhores do que os valores na simulação computacional conforme figuras 5.13 e 5.14.

Figura 5.47 – Tensão de fase no lado secundário do transformador do consumidor, fase A (azul), fase B (vermelha), fase C (verde)



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.48 – Tensão de linha no lado secundário do transformador do consumidor, fase AB (azul), fase BC (vermelha), fase CA (verde)



Fonte: Próprio autor.

Para finalizar alimentou-se um motor de indução trifásico com potência nominal 1,5 CV, 60hz, 1725 rpm, 220V, corrente nominal 4,2 A, tipo gaiola de esquilo, conforme

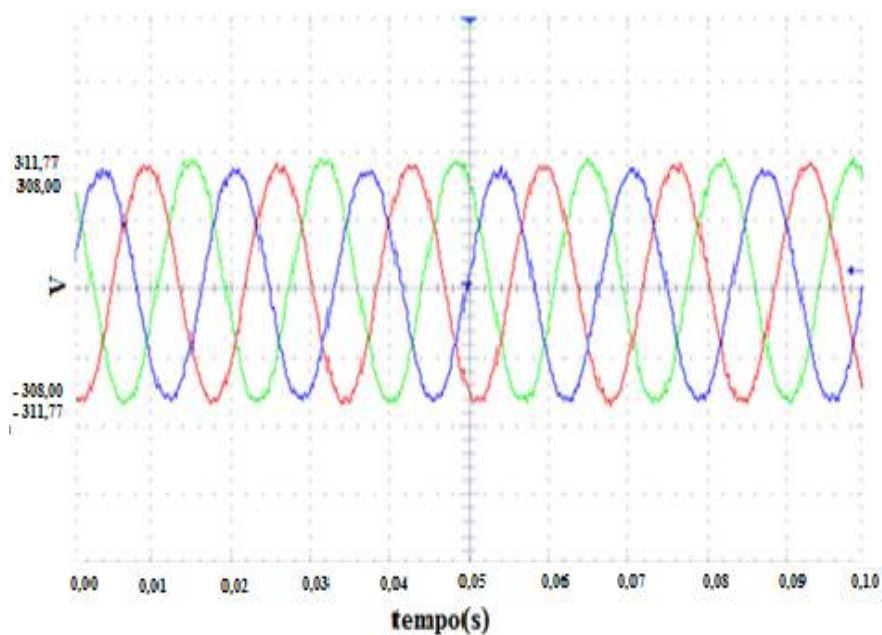
figura 5.49. Durante os testes variou-se o carregamento do motor de 10% até 80% da nominal, em regime permanente. Os resultados são apresentados nas figuras 5.50 e 5.51 são coerentes com os obtidos na simulação. Ou seja, o nível de desequilíbrio está dentro de 2% admitido por norma. Apesar de pequenas distorções na forma de onda, o motor funcionou plenamente sem apresentar nenhum ruído ou aquecimento. As tensões que alimentaram o motor de indução são equivalentes a um sistema trifásico convencional.

Figura 5.49 – Transformador do consumidor alimentando o motor trifásico com cargas experimentais



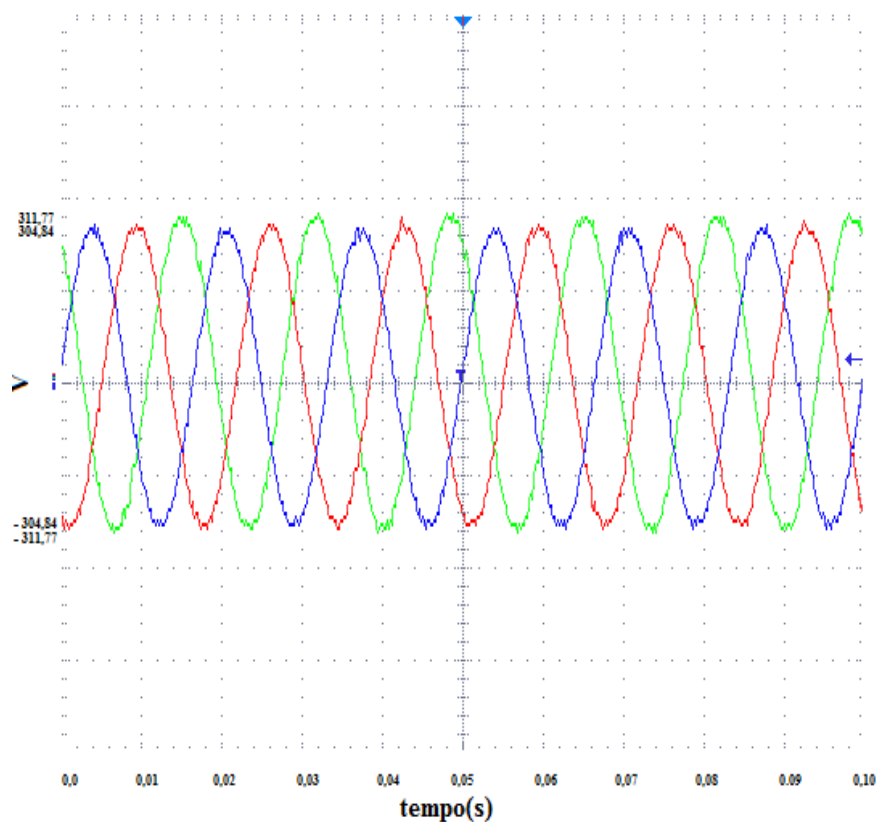
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.50 – Formas de onda no lado secundário do transformador do consumidor



Fonte: Próprio autor.

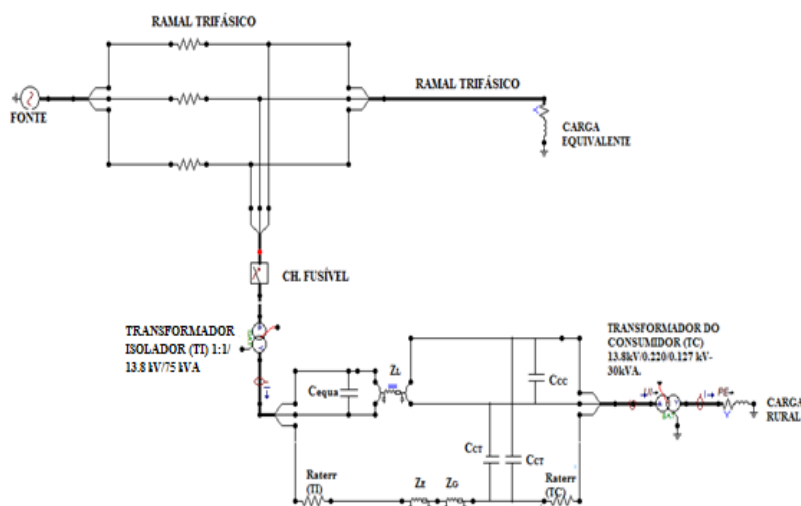
Figura 5.51 – Formas de onda no lado secundário do transformador do consumidor considerando como carga um motor trifásico a 80% de plena carga



Fonte: Próprio autor.

5.5 SISTEMA PROPOSTO PARA A MÉDIA TENSÃO (KV)

A Figura 5.52 – Representação simplificada do circuito a ser utilizado nas simulações. As Tabelas 5.3 e 5.4 representam respectivamente os componentes e os parâmetros de figura 5.52



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Tabela 5.3 – Identifica os componentes da figura 5.52

Componentes	Definição	Características
Carga equivalente	Carga trifásica desequilibrada conectada diretamente ao ramal trifásico	Conexão estrela de impedância constante. Impedância por fase: $Z_{a1} = 400 + j10\Omega$ $Z_{b1} = 500 + j50\Omega$ $Z_{c1} = 100 + j0,001\Omega$
Carga rural	Carga trifásica conectada diretamente no secundário do transformador trifásico.	Esta carga manipulada conforme os diferentes dos.
Transformador Isolador (TI)	Transformador que isola o sistema convencional do sistema proposto.	Configuração delta-estrela, Potência nominal: 75 kVA, Tensões: 13,800 kVA/7,967 kVA Corrente a vazio de 3,1% (137,5mA), Resistência do primário: 34,74m Ω , Indutância do primário: 190,98mH, Resistência do secundário: 3,86 m Ω , Indutância do primário: 2,12mH, Resistência de magnetização 577.012,89 Ω
Resistências ramal trifásico	Consiste nas três resistências indicadas no tronco trifásico.	Todas são iguais a 0,01 Ω , usadas apenas para o do splitter (dispositivo do ATP que permite a um nó trifásico em três nós monofásicos)
Trafoformador trifásico que supri a carga do consumidor	Transformador que integra o sistema para suprir a carga.	Configuração delta-estrela, Potência nominal: 30 kVA, Tensões: 13,800 kV/ 220 V Corrente a vazio de 0,4% (7,1 mA), Resistência do primário: 31,74m Ω , Indutância do primário: 282,39mH, Resistência do secundário: 8,1 m Ω , Indutância do secundário: 0,0718 mH Resistência de magnetização: 2,6449776 M Ω .
Resistências do ramal trifásico	Consiste nas três resistências indicadas no tronco trifásico.	Todas são iguais a 0,01 Ω , usadas apenas para permitir o uso do splitter (dispositivo do ATP que permite a derivação de um nó trifásico em três nós monofásicos)
Impedância de linha	Impedância dos condutores aéreos do secundário do transformador isolador e a impedância da fase que percorrer pelo solo.	Considerou-se a extensão de 250m do circuito trifásico do secundário do transformador isolador, formado por dois cabos de alumínio com alma de aço, CAA 1/0. Com os seguintes parâmetros elétricos a resistência de 0,969 Ω /condutor/km e a reatância indutiva a 60Hz de 0,497732/condutor/km. A resistência do solo é aproximadamente 0,06 Ω /km, equivale a um cabo de 480mm ² , sendo então a impedância do solo representada por 0,047 Ω /km.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.4 – Identifica os parâmetros da figura 5.52

Impedâncias das linhas (Z_L)	0,17725 + j0,098475
Impedância de terra (Z_G)	0,014805+j0,133325
Impedância de compensação(Z_E)	0,16245+ j0,096525
Capacitância entre condutores e terra (C_{CT})	1nF
Capacitância entre condutores (C_{CC})	0,81175nF
Capacitância de equalização (C_{equa})	0,373nF
Resistência da malha de terra do TI (R_{aterr})	11,3 Ω
Resistência da malha de terra do TC (R_{aterr})	20 Ω
Frequência	60Hz

Fonte: Próprio autor.

A fim de comparar a funcionalidade do sistema proposto em escala reduzida, com um sistema trifásico em 13,8 kV, esse item, apresenta as simulações que demonstram a factibilidade da proposta.

5.5.1 Avaliação do sistema proposto trifásico 13,8 kV por meio de simulações computacionais

A realização dos testes tem como finalidade a simulação de um sistema de distribuição trifásico em média tensão (13,8 kV), equilibrado, sequência de fases positiva ABC, defasada de 120°. Sendo que no secundário o sistema se mostra desequilibrado, em função de suas características técnicas. Duas fases são compostas por condutores aéreos de 50 mm² ou 1/0 AWG (NEXANS, 2010) representadas pela impedância dos cabos. E a terceira fase é o próprio solo, representado pela impedância de retorno da corrente (RUDENBERG, 1950).

As simulações foram realizadas utilizando-se o programa ATP (Alternative Transients Program), já consagrado nos meios acadêmicos, concessionárias de energia, centros de pesquisas. A figura 5.52 mostra o sistema elétrico com cargas variadas, e a distância de 250m do transformador isolador (TI) ao transformador do consumidor (TC), além dos parâmetros de linha e os dados dos equipamentos e a carga. Um suprimento de energia elétrica é mostrado para uma “carga equivalente”. Um ramal trifásico deriva do tronco principal, passa por uma chave tripolar e alimenta o primário do transformador isolador (TI). No secundário do transformador isolador saem três fases, duas aéreas, representadas pelas impedâncias dos cabos aéreos (Z_L), e a terceira fase, representada pela impedância do solo (Z_G) mais a impedância de compensação (Z_E), que tende a equilibrar as impedâncias dos cabos aéreos

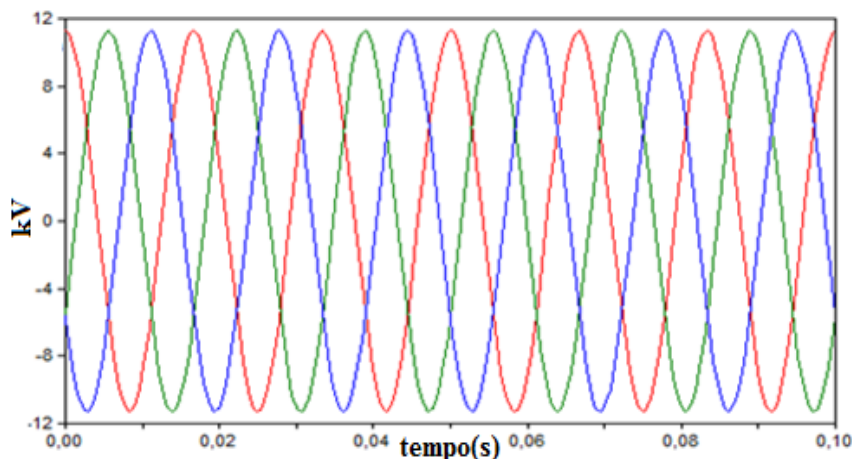
com a impedância do solo que é muito menor. Dada a disposição dos cabos em relação ao solo, as capacitâncias entre os cabos aéreos (C_{CC}) e as capacitâncias entre os cabos aéreos e o solo (C_{CT}) têm valores diferentes. Para equilibrar essas capacitâncias foi calculada uma capacitância de equalização (C_{equa}). As resistências da malha de aterramento R_{aterr} do TI, em que é injetada a corrente que flui pelo solo como terceira fase. E a resistência da malha R_{aterr} do TC onde é drenada a corrente que alimenta a terceira fase do transformador do consumidor. Não se pode afirmar nada em relação ao sistema proposto se ocorreria ou não o fenômeno de ferroressonância, visto que as capacitâncias estão desequilibradas e se na prática deverá ou não submeter o sistema a essa equalização. Como acontece com o (PRE), como descrito nesse trabalho, em que ambos têm uma grande semelhança, pois ainda não foi possível fazer essa comprovação em um experimento prático. Mas estudos futuros poderão sanar essa dúvida.

O secundário do (TI) alimenta o primário do (TC). Por sua vez, o secundário do (TC) supri a carga trifásica rural equilibrada em estrela. Outra carga desequilibrada foi considerada com a intenção de observar o comportamento do sistema. As análises feitas por meio do ATP utilizaram as impedâncias dos condutores e do solo e também os parâmetros internos dos transformadores, as quedas de tensões e as perdas nos dispositivos.

5.5.2 Simulação do sistema 13,8 kV com carga equilibrada

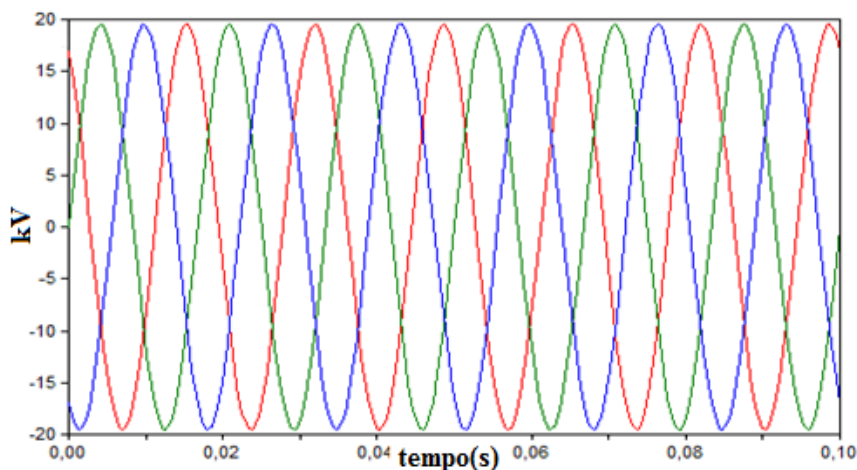
A carga rural a ser utilizada terá o seguinte valor de impedância de $5,22667 + j1,5627\Omega$ /fase. As figuras 5.53 e 5.54 apresentam respectivamente as tensões instantâneas e eficazes do ramal que alimentou o transformador TI. Sendo a tensão de fase eficaz de 7,967 kV e a tensão eficaz de linha 13,8 kV.

Figura 5.53 – Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 11,267 kV, fase B = 11,265 kV, fase C= 11,259 kV. Tensão eficaz fase A = 7,9669 kV, fase B = 7,9666 kV, fase C = 7.9613 kV



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.54 – Tensão de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC(verde), CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 19,513kV, fase BC = 19,503 kV, fase CA= 19,506 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,7977 kV, linha BC = 13798 kV, linha CA = 13,794kV

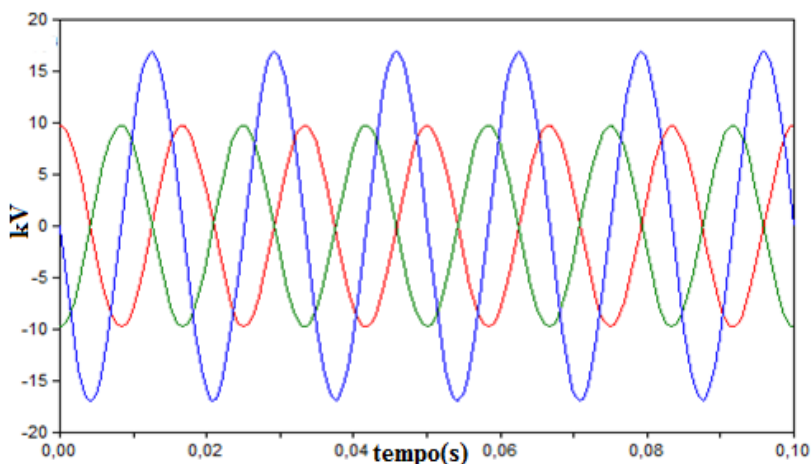


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Observa-se na figura 5.55 que as amplitudes das tensões de fase A e B é 57,85% da amplitude da tensão da fase C, no secundário do transformador do (TI). Essas condições estão ligadas ao sistema não convencional, em que uma das fases é o solo e as outras duas são cabos metálicos aéreos. Como as resistências dos cabos metálicos são muito menores do que a

resistência de retorno de terra há o desequilíbrio entre as tensões. No decorrer desse trabalho soluções serão apresentadas em razão desse desequilíbrio.

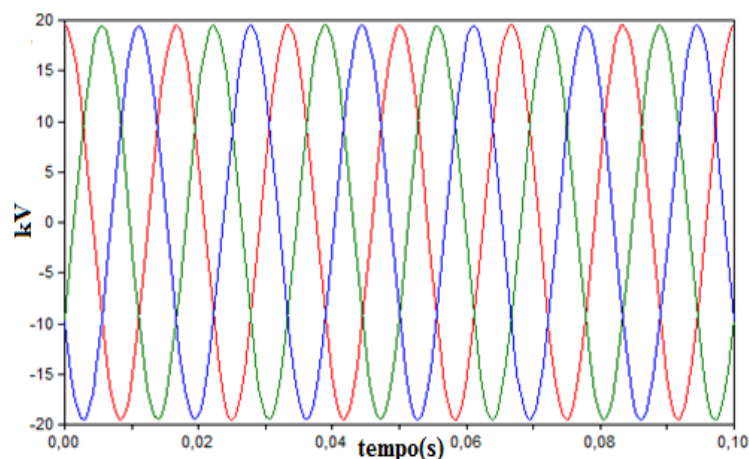
Figura 5.55 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 9,7537 kV, fase B = 9,7558 kV, fase C = 16,854 kV. Tensão eficaz fase A = 6,8969 kV, fase B = 6,8984 kV, fase C = 11,9218 kV



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Ressalta-se que na figura 5.56, as tensões estão na sequência de fase ABC com defasagem de 120° entre elas, mantendo a sequência das tensões do tronco principal que supri o transformador isolador. Na prática, o sistema só tem tensões de linha no secundário do transformador isolador, tendo o valor do fator de desequilíbrio FD% de 0,080% muito inferior ao que determina a norma estabelecida pela ANEEL, que tem o máximo de 2%. Isto demonstra a eficácia do sistema quando comparado a um sistema convencional; essa mesma tensão alimentou o primário do transformador do consumidor.

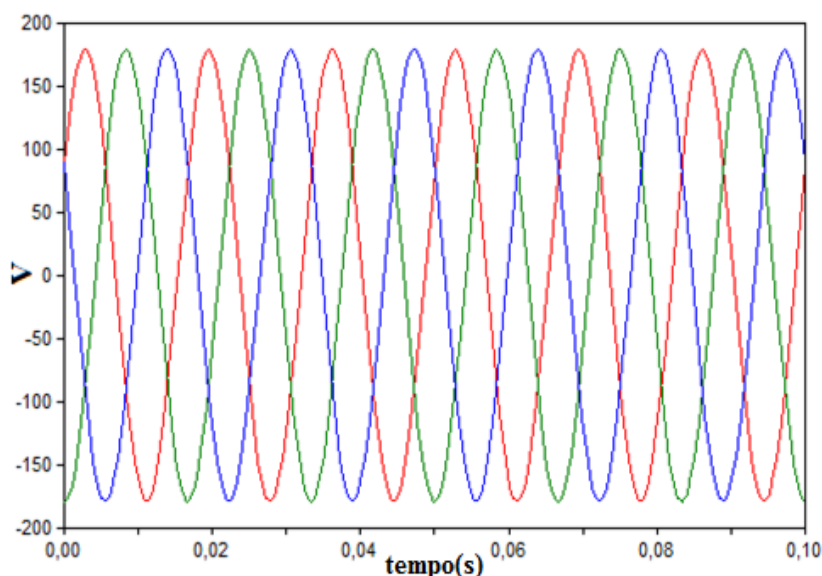
Figura 5.56 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); Tensão de pico de linha AB = 19,514 kV, BC = 19,495 kV, CA= 19,488 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,798 kV, BC =13,785 kV, CA = 13,780 kV. **FD% = 0,080 %**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

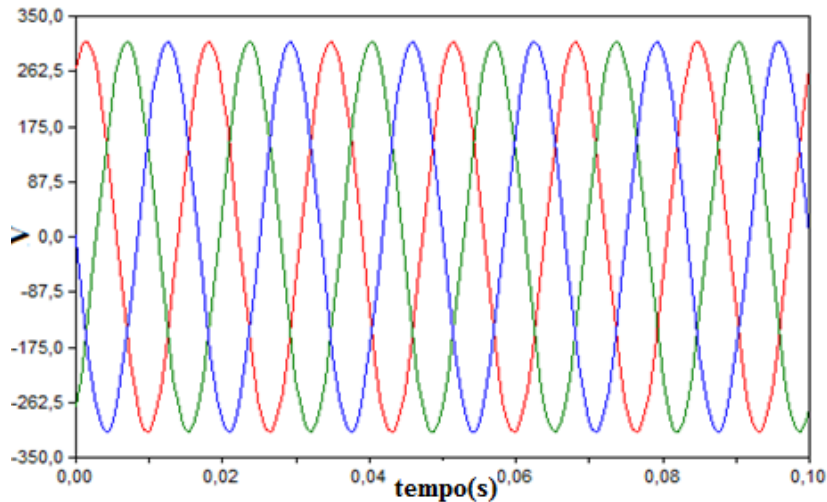
O ATP registrou as tensões de fase e de linha no secundário do transformador trifásico do consumidor, no lado de baixa tensão conforme figuras 5.57 e 5.58. O desequilíbrio calculado para o sistema das tensões de linha é de 0,050%, muito abaixo de valores observados em sistema de distribuição rural convencional.

Figura 5.57 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); Tensão de pico de fase A = 178,76V, fase B = 178,83V, fase C = 178,72V. Tensão eficaz fase A = 126,40V, fase B = 126,45V, C = 126,37V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

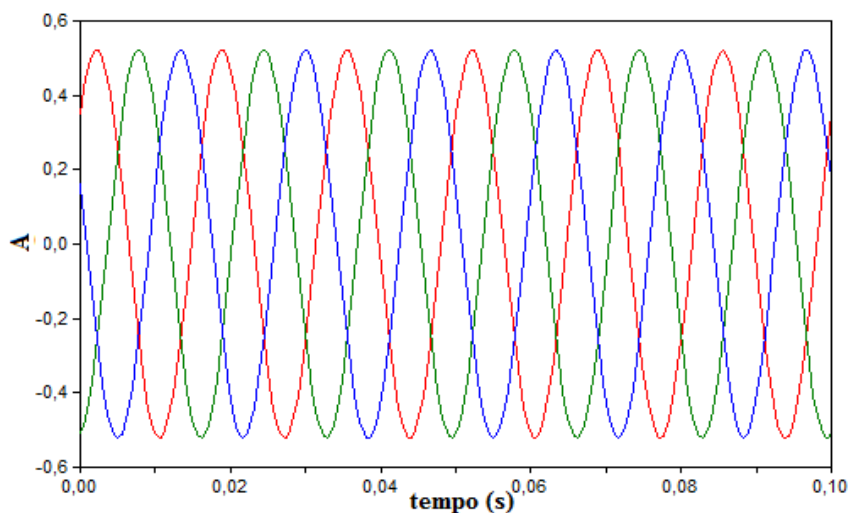
Figura 5.58 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); tensão de pico de linha AB = 309,81V, BC = 309,74V, CA= 309,55V. Tensão eficaz de linha AB =219,07 V, BC =219,02 V, CA = 218,88 V **FD% = 0,050 %**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 5.59 mostra as correntes de linha no secundário do (TI). A corrente que flui pelo solo está equilibrada com as correntes que fluem pelos cabos aéreos. Essas correntes circulam no secundário do transformador isolador, que está em estrela, com uma das fases aterrada no solo. A corrente flui pelo solo para alimentar a fase do primário do (TC) em delta, que está aterrada.

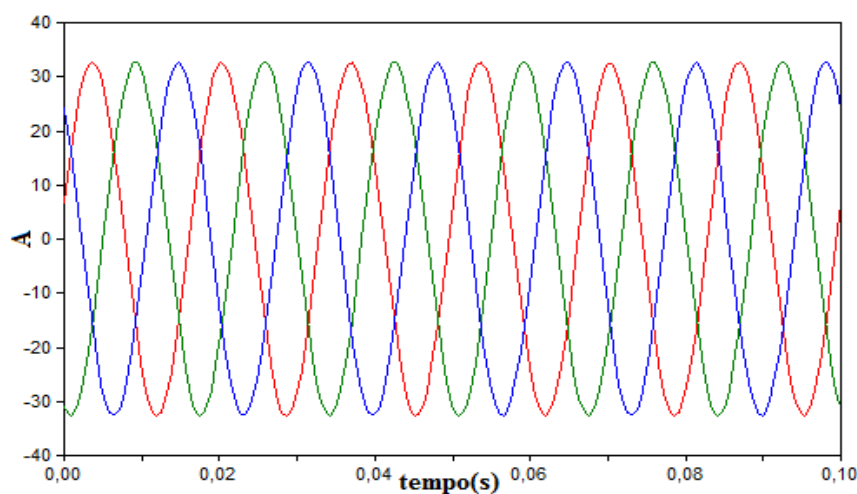
Figura 5.59 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico linha A =0,52A, B = 0,52A e C= 0,52A. Corrente eficaz linha A = 0,37A, B = 0,37A e C = 0,37A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 5.60 mostra as correntes de linha que circulam entre os enrolamentos do secundário do transformador trifásico e a carga rural, pois estão conectados em estrela. Observa-se que as correntes que estão circulando nos enrolamentos do secundário do transformador trifásico que supri a carga rural têm módulos iguais e defasagem angular de 120° entre si, com sequência de fase positiva ABC.

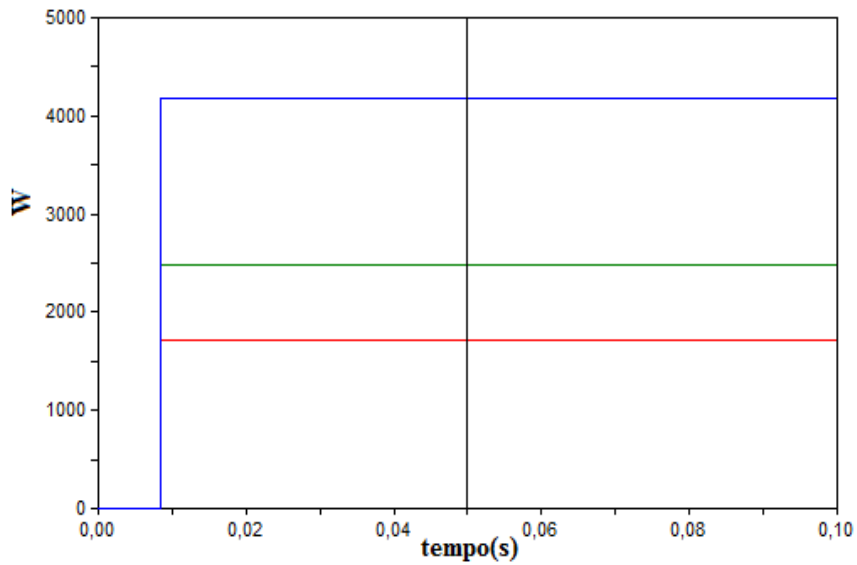
Figura 5.60 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico de linha A = 32,59A, B = 32,61A e C = 32,58A. Corrente eficaz de linha A = 23,0A, B = 23,1 A e C = 23,0A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

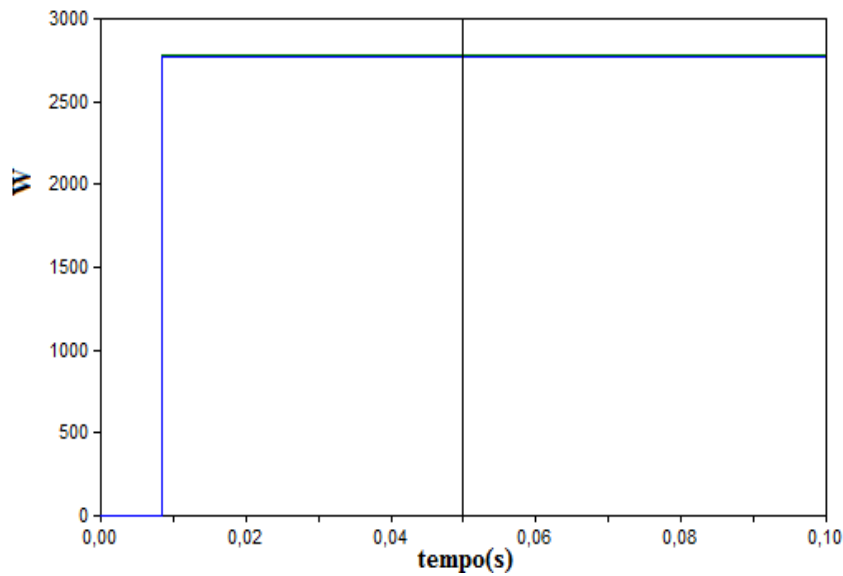
As figuras 5.61 e 5.62 representam as potências ativas nos lados primário e secundário do transformador do consumidor, respectivamente. Devido à estrutura assimétrica da linha de transmissão na qual uma das fases é o próprio solo, um dos enrolamentos delta no lado de alta tensão ficou sobrecarregado, embora no lado do secundário do transformador do consumidor a distribuição de potência esteja equilibrada. Esse desequilíbrio no primário pode ser corrigido por meio de uma impedância de compensação, como foi analisado na simulação do protótipo em escala reduzida.

Figura 5.61 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 1,708kW, fase B =2,487kW , fase C= 4,176kW



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.62 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 2,80kW, fase B =2,80kW, fase C= 2,80kW



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

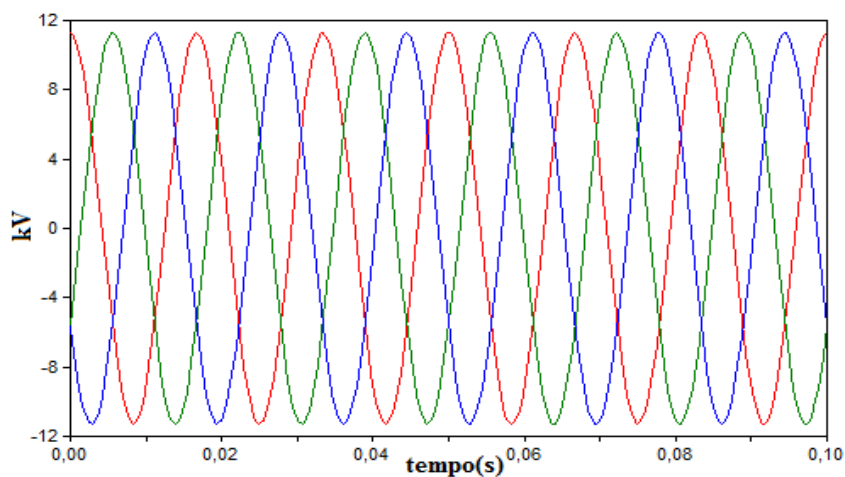
5.5.3 Simulação do sistema 13,8 kV com carga desequilibrada

Os estudos seguem a mesma metodologia realizada com as cargas equilibradas feitas anteriormente. Nesta simulação, a carga rural será substituída por uma carga fortemente desequilibrada, com impedância constante, conexão estrela.

$$Z_a = 1,536 + j0\Omega; \quad Z_b = 1,431 + j1,4963\Omega; \quad Z_c = 3,523 + j0,3879\Omega.$$

A figura 5.63 mostra a tensão de fase no lado do primário do transformador isolador.

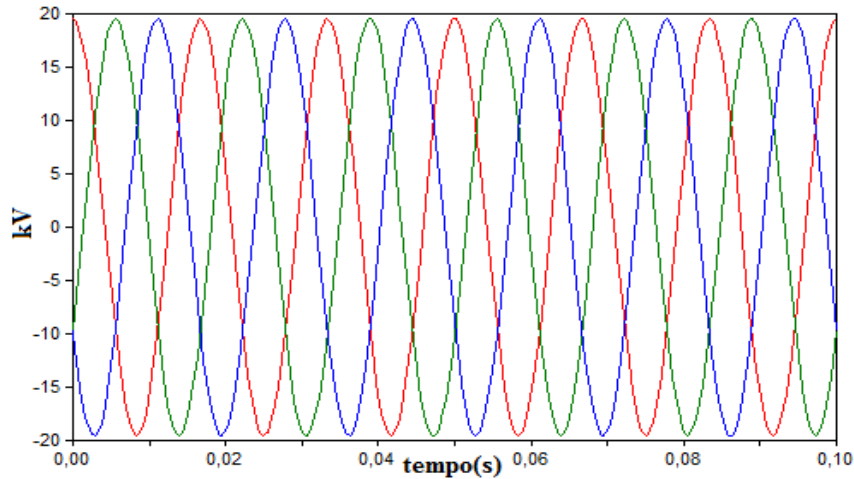
Figura 5.63 – Tensão de fase instantânea no lado do primário transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); tensão de pico de fase A = 11,267kV, fase B = 11,265 kV, fase C= 11,259 kV. Tensão eficaz fase A = 7,9669 kV, fase B = 7,9666kV, fase C = 7.9613 kV



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 5.64 mostra que as tensões de linha que alimentam o primário do transformador isolador, estão equilibradas com sequência ABC positiva, e defasadas de 120° elétricos.

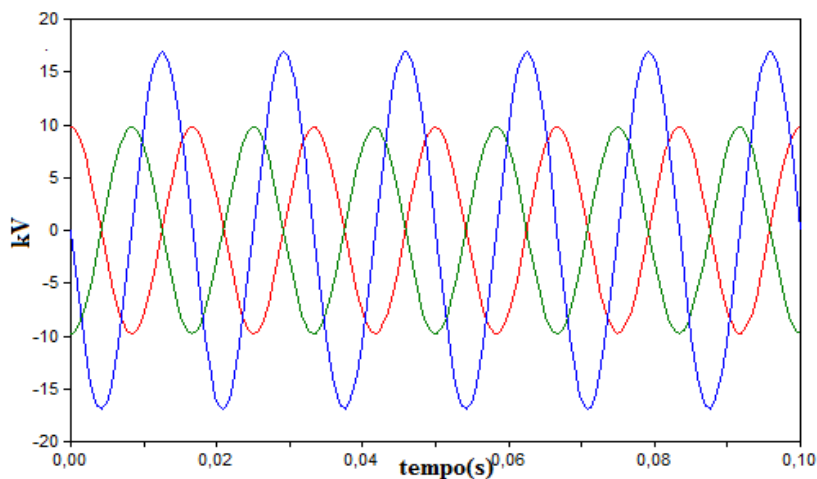
Figura 5.64 – Tensão de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC(verde) e CA (azul); tensão de pico de linha AB = 19,514kV, BC = 19,511 kV e CA= 19,500 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,798 kV, BC =13,796 kV e CA = 13,789kV **FD% = 0,039%**



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

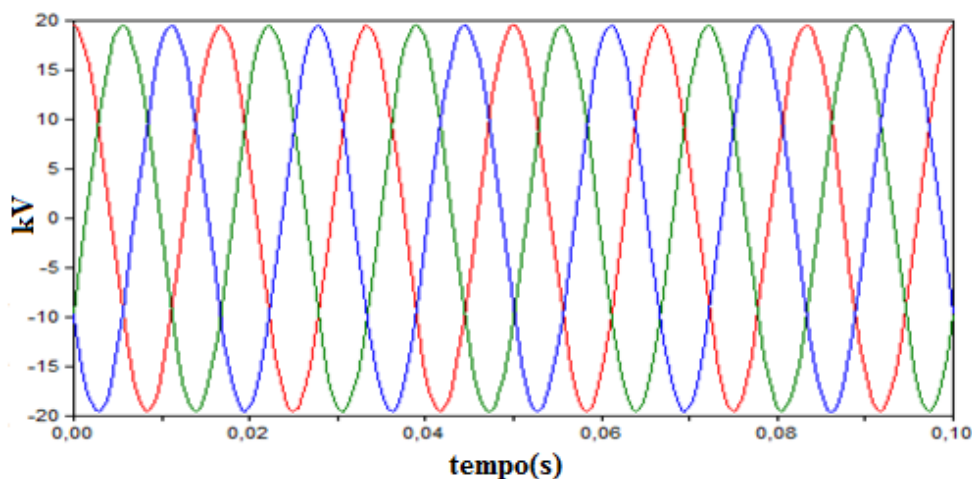
A figura 5.65 mostra as tensões de fase desequilibradas em módulo e ângulo. Essa simulação ainda ocorre com as condições originais do circuito sem levar em consideração o balanceamento das impedâncias dos condutores, sendo esse desequilíbrio esperado. Porém, a figura 5.66 mostra que as tensões de linha no secundário do transformador isolador têm um FD% igual ao do primário, dentro do valor limite do método. Repetem-se as condições, já verificadas, com as cargas equilibradas.

Figura 5.65 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); tensão de pico de fase A = 9,7537 kV, fase B = 9,7558 kV, fase C= 16,854 kV. Tensão eficaz fase A = 6,8969 kV, fase B = 6,8984kV, fase C = 11,9218 kV



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.66 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador (ramal de média tensão), AB (vermelha), BC (verde), e CA (azul); tensão de pico de linha AB = 19,514kV, BC = 19,511 kV e CA= 19,500 kV. Tensão eficaz de linha AB = 13,798 kV, BC =13,796 kV e CA = 13,789kV **FD% = 0,039%**

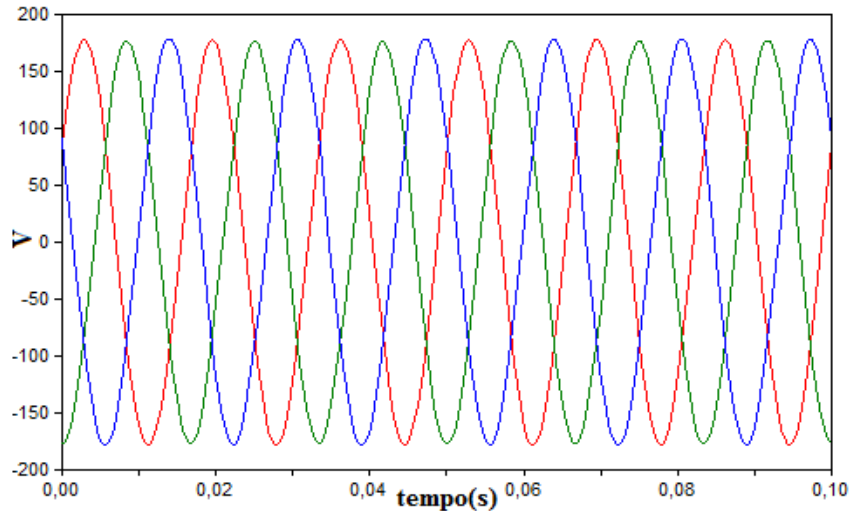


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As tensões de linha no primário do transformador trifásico que supri a carga rural é a mesma da figura 5.66, isto é, a tensão do secundário do (TI) apresenta defasagem angular de 120° , e mantém a sequência de fase positiva.

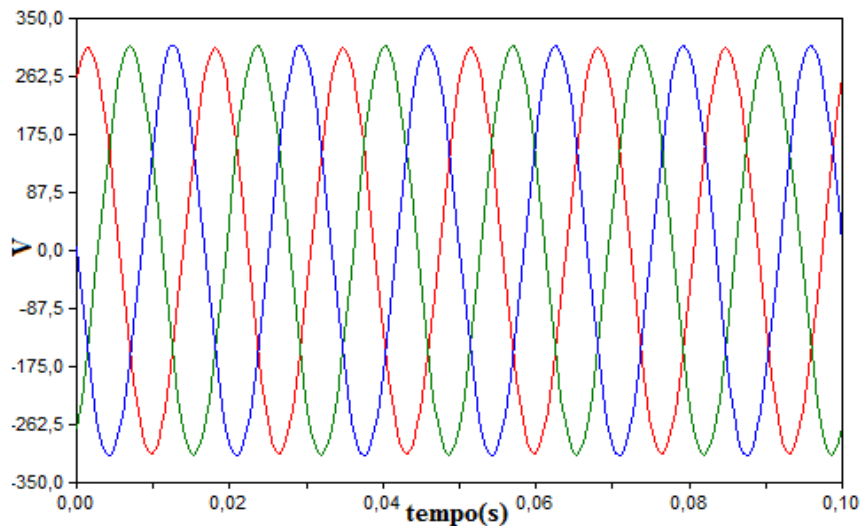
Em relação às tensões de fase e de linha no secundário do transformador trifásico do consumidor, que alimenta a carga trifásica em estrela, os resultados das simulações apontam para os módulos de tensão com valores aproximados. O cálculo do fator de desequilíbrio na tensão de linha do secundário do transformador trifásico foi de 0,73%, muito abaixo dos 2% preconizados pelo método. As formas de ondas são mostradas nas figuras 5.67 e 5.68, respectivamente.

Figura 5.67 – Tensão de fase instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); tensão de pico de fase A = 177,92V, fase B = 176,64V, fase C= 178,54V. Tensão eficaz fase A = 125,80V, fase B = 124,90V, fase C = 126,24V



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

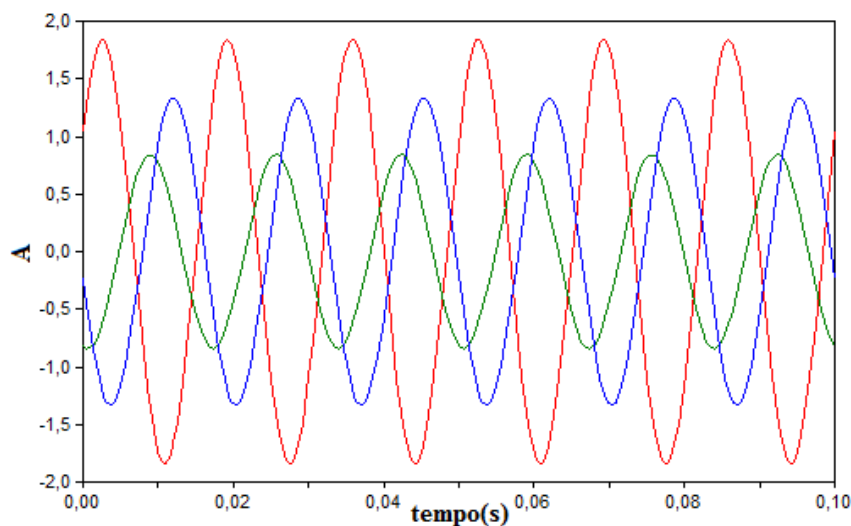
Figura 5.68 – Tensão de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul); tensão de pico de linha AB = 305,78V, BC =307,93V e CA= 309,68V. Tensão eficaz de linha AB =216,22V, BC =217,74V e CA = 218,98V FD% = 0,73%



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

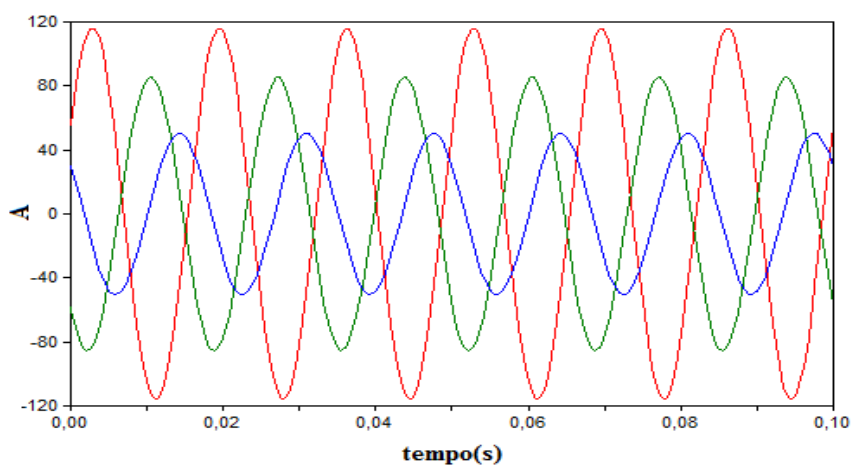
As figuras 5.69 e 5.70 mostram os comportamentos das correntes de linha que circulam no secundário do transformador isolador (TI) e as correntes que circulam no secundário do transformador do consumidor (TC) e a carga rural, respectivamente. As correntes circulam nos enrolamentos do secundário do transformador e na carga conectada em estrela. O desequilíbrio entre as correntes caracterizam-se pela carga fortemente desequilibrada.

Figura 5.69 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador isolador (TI), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico de linha A = 1,8366A, B = 0,8404 A e C = 1,3277A. Corrente eficaz de linha A = 1,2987A, fase B = 0,594 A e fase C = 0,9388 A



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.70 – Corrente de linha instantânea no lado secundário do transformador consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); corrente de pico de linha A = 116,01A, B = 85,35A e C = 50,37A. Corrente eficaz de linha A = 82,03A, B = 60,35A e C = 35,62 A

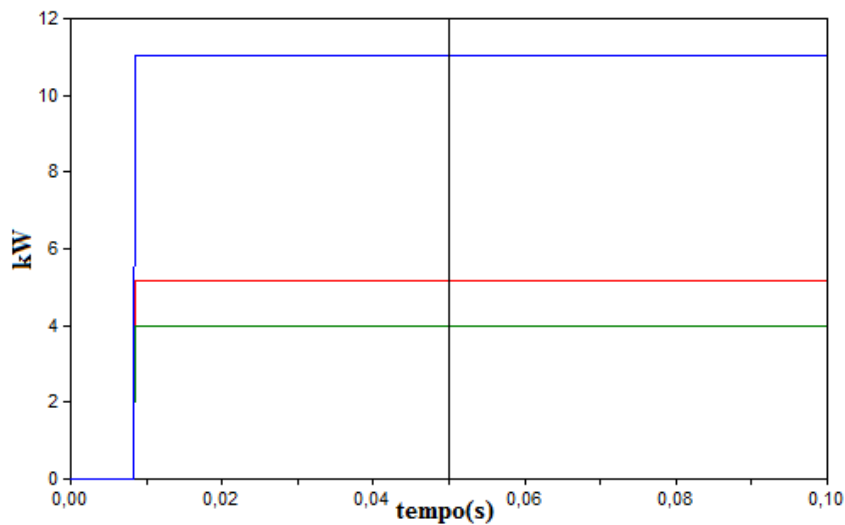


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As figuras 5.71 e 5.72 mostram a distribuição de potência ativa por fase no lado primário e secundário do transformador do consumidor, respectivamente. Há semelhança do circuito com as cargas equilibradas. A potência no primário do transformador do consumidor, com cargas desequilibradas, flui com o maior percentual. Na fase representada pelo solo, em torno de 54,66% da carga total, já com a carga equilibrada, o percentual também é alto, em

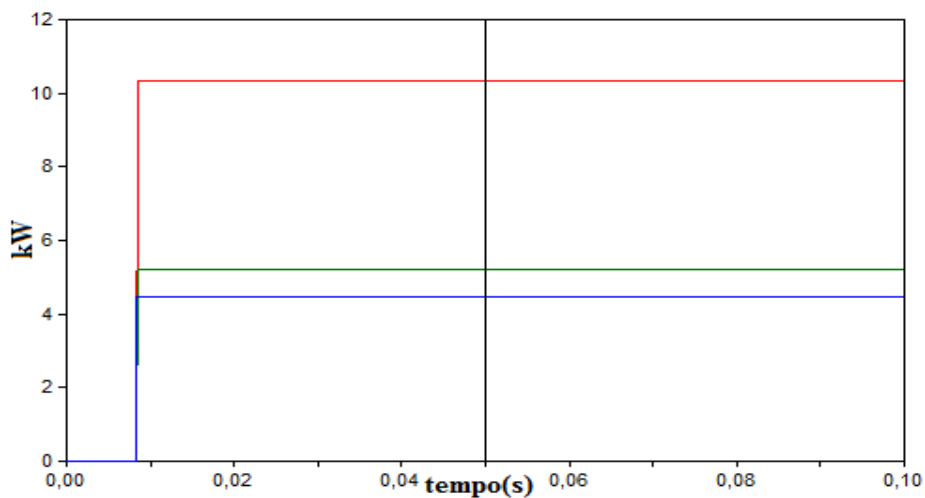
torno 49,93%. Isso se justifica dadas as características do sistema proposto já comentado. Em relação ao secundário, percebe-se que se as fases estão equilibradas, melhor é a distribuição da potência. Mas quando a carga é fortemente desequilibrada, uma das fases ficou sobrecarregada, como visto na figura 5.72.

Figura 5.71 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 5,149kW, fase B = 3,989kW, fase C = 11,015kW



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 5.72 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 10,321kW, fase B = 5,215kW, fase C = 4,471kW

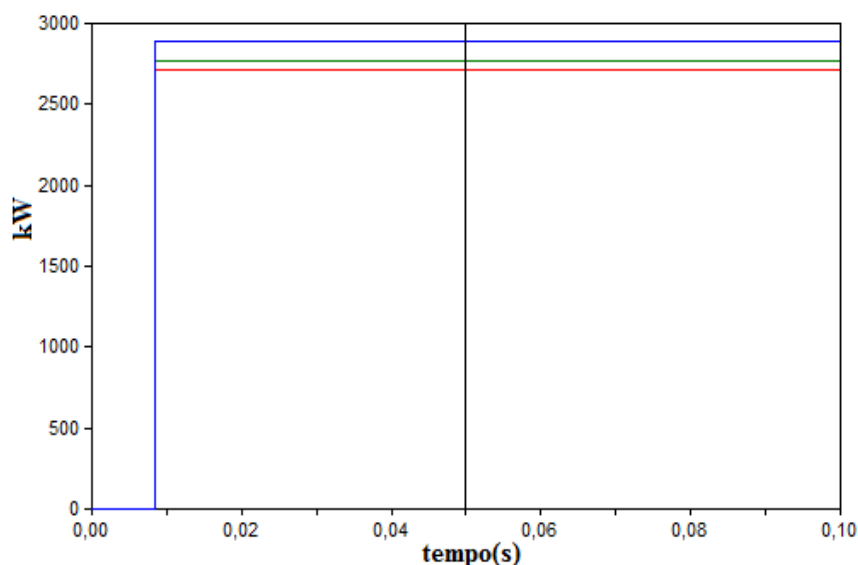


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As análises feitas nos circuitos com cargas equilibradas e desequilibradas mostrou o comportamento do sistema proposto sem a impedância de compensação. O circuito apresentou em relação a distribuição de potência ativa no secundário do (TI), mesmo com a carga equilibrada uma sobrecarga em uma das fases, conforme figura 5.61. A condição mais crítica estabeleceu-se na distribuição das potências ativas entre as fases. Em relação aos outros parâmetros como formas de ondas das tensões e correntes, a resposta foi satisfatória.

Na condição do circuito equilibrado com os cabos aéreos e o solo utilizando a impedância de compensação (Z_E), apesar de não serem mostrados todos os gráficos, os resultados foram muito parecidos com o circuito desequilibrado. Excetuando a potência ativa que é mostrada na figura 5.73 com as cargas equilibradas comparadas à figura 5.52. Com a utilização da impedância de compensação (Z_E), em série com a impedância de terra (Z_G), e com a carga equilibrada, a figura 5.73 mostra uma melhor distribuição das potências entre as fases.

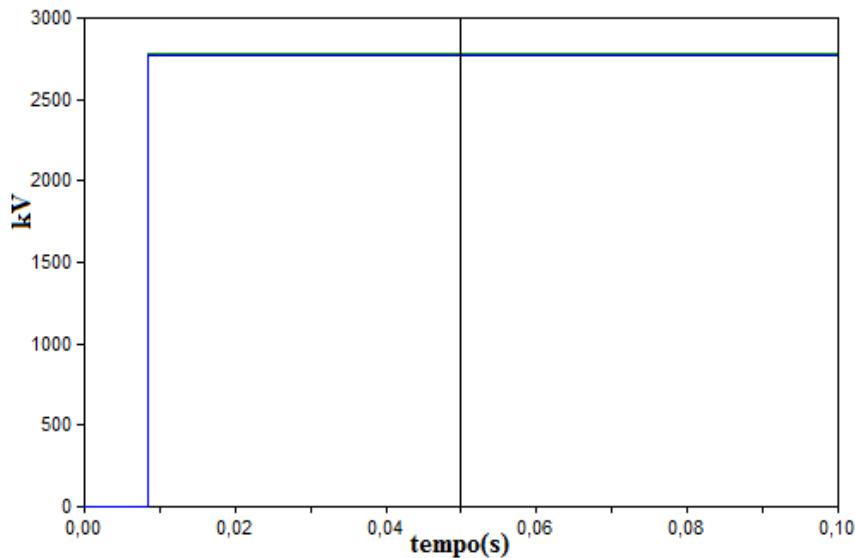
Figura 5.73 – Potência ativa instantânea no lado do primário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 2,714kW, fase B =2,769kW , fase C= 2,888kW



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 5.74 representa a potência ativa no secundário do transformador do consumidor, em que a resposta em termos de equilíbrio entre as fases é a mesma que o sistema sem compensação apresentou.

Figura 5.74 – Potência ativa instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor (TC), fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul); potência ativa fase A = 2,80kW, fase B =2,80kW , fase C= 2,80kW



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A presença da impedância de compensação faz com que haja melhor equilíbrio na distribuição de potência entre as fases, porém aumenta o custo.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Objetivando a comprovação da eficiência do sistema proposto para atendimento para cargas trifásicas rurais, estabeleceu-se um modelo matemático, e a sua viabilidade técnica foi comprovada por meio de simulações computacionais. Dois sistemas foram testados: um, em escala reduzida 220/380/220 V, e o outro, numa estrutura normal 13,8 kV /220/127 V. Os resultados fizeram-se muito condizente com o esperado. Um protótipo foi desenvolvido para aplicações experimentais em laboratório, suprindo diversos tipos de cargas. Verificou-se que as correntes na carga são muito semelhantes às correntes medidas em campo e que estão descritas na Tabela 5.2. Isto vem corroborar para que o sistema proposto responda aos diversos tipos de cargas instaladas na área rural. Os testes aplicados responderam por meio das formas de ondas obtidas com um alinhamento aos resultados de forma analítica e computacional. Esse capítulo mostrou a grande possibilidade da aplicação do sistema em condições reais.

6 COMPORTAMENTOS DO SISTEMA PROPOSTO DIANTE DE PERTURBAÇÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A energia elétrica para consumo passa efetivamente por medidas técnicas que garantam sua utilização. Além disso, demanda uma tarifação com custos adequados para produção. Isto equivale dizer que o produtor rural, que é o foco desse trabalho, necessita de um fornecimento confiável e seguro. Hoje, nas áreas urbanas ou rurais, a presença de equipamentos eletro/eletrônicos com grande sofisticação tecnológica, impõe-se o fornecimento de energia em parâmetros adequados, sem distúrbios que possam afetar o desempenho ou provocar defeitos.

6.1.1 O comportamento do sistema proposto em condições de perturbações

Numa rede de distribuição urbana ou rural pode ocorrer faltas acidentais provocadas por:

- condutores aéreos partidos;
- descargas atmosféricas;
- pássaros;
- galhos;
- falhas nos isolamentos dos isoladores;
- roubo de cabos
- outros objetos estranhos jogados na rede.

Essas situações caracterizam não só uma perturbação momentânea, mas afetam o bom desempenho das redes de distribuição, sejam essas urbanas ou rurais. Os órgãos reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e as agências reguladoras estaduais, bem como os agentes envolvidos buscam incessantemente definir medidas e estabelecer procedimentos que visam garantir os direitos dos consumidores. O setor rural é o mais penalizado, dadas as características do fornecimento de energia elétrica, em sua grande maioria feita por longos circuitos e com tensões monofásicas. As distâncias das linhas de média tensão, ao seu longo, acabam provocando quedas de tensão na entrega no primário do transformador do consumidor rural. Ficando esses, sujeitos a todo tipo de perturbações.

Soluções são colocadas por parte das concessionárias no sentido de melhorar a qualidade da energia quanto aos afundamentos de tensão nas áreas rurais, instalando reguladores de tensão no lado de alta tensão dos transformadores monofásicos de distribuição, buscando amenizar custos, instalando bancos de capacitores no lado de baixa tensão.

Outras fontes de perturbações nas redes de distribuição rurais são eventuais curtos-circuitos e os inúmeros motores instalados, alguns casos mal dimensionados, quando da partida, provocam frequentes afundamentos momentâneos de tensão.

Os motores elétricos que acionam as bombas de irrigação necessitam de elevadas correntes de partida que atingem, em muitos casos, valores bem superiores à corrente de carga das linhas rurais de distribuição onde estão instalados (ELEKTRO, 2013).

E ainda motores elétricos para acionamento de bombas de irrigação podem provocar flutuações de tensão durante o seu acionamento ou mesmo durante seu regime normal de operação. Esta flutuação da tensão pode provocar flicker. As flutuações de tensão, dependendo de sua intensidade, podem ocasionar perturbações às instalações elétricas dos consumidores ligados na mesma rede de distribuição, afetando o funcionamento de equipamentos eletrônicos e iluminação (ELEKTRO, 2013).

O setor rural continua avançando nitidamente em razão de sua contribuição no setor econômico. Com isto, equipamentos com sofisticação tecnológica têm sido adquiridos pelos produtores rurais. Um fornecimento confiável, seguro e econômico da eletricidade é uma das responsabilidades das empresas fornecedoras de energia elétrica.

Outra grande preocupação de distúrbios elétricos nas redes rurais diz respeito às descargas atmosféricas que são responsáveis por aproximadamente 80% das interrupções acidentais causadas por fenômenos naturais (RAMOS, 2010).

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8, da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, determina faixas para valores de regime permanente considerados aceitáveis ou não. Para a tensão de leitura (TL) associada é classificada em uma das três categorias: adequadas, precárias ou críticas, baseando no afastamento do valor TL verificada, em relação a tensão nominal de referência (TR). Os valores de tensão obtidos por medições devem ser comparados à tensão de referência (TR), a qual deve ser a tensão nominal ou a contratada, Deckmann e Pomílio (2015).

A tabela 6.1 e 6.2 define os limites de tensão em regime permanente, as quais classificam as tensões de atendimento (TA) verificadas como adequadas, precárias ou críticas, Deckmann e Pomílio (2015).

Tabela 6.1 – Definições de limites de tensão em regime permanente, inferior a 1 KV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação de Tensão de Leitura (TL) em relação à Tensão Nominal (TN)
Adequada	$0,92TN \leq TL \leq 1,05TN$
Precária	$0,87TN \leq TL < 0,92TN$ ou $1,05TN < TL \leq 1,06TN$
Crítica	$TL < 0,87TN$ ou $TL > 1,06TN$

Fonte: adaptado PRODIST. (2010).

Tabela 6.2 – Limites para redes 220/127 V

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL \leq 202)$ ou $231 < TL \leq 233$ / $(110 \leq TL \leq 117)$ ou $(133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191$ ou $TL > 233) / (TL < 110 < TL$ ou $TL > 135)$

Fonte: adaptado PRODIST. (2010).

Há necessidade de uma energia elétrica sem distúrbios que possam afetar o desempenho ou o funcionamento dos equipamentos, sujeitando-os a falhas ou mesmo a danos graves (FANDI, 2013).

Há outros tipos de interrupções que não provocam o desligamento total da carga, mas criam condições inadequadas para a produção rural que lida com produtos sensíveis a variações de temperaturas, como o leite. Tais eventos podem trazer prejuízos se o seu aparecimento for frequente, o que é denominado de variações de tensão de curta duração (VTCDs). É um evento aleatório de tensão, caracterizado por desvio significativo, por curto intervalo de tempo, do valor eficaz da tensão. Calcula-se o valor eficaz da tensão a partir da média quadrática dos valores instantâneos da tensão, em período mínimo de meio ciclo e máximo de um ciclo. A VTCD refere-se normalmente à tensão fase-neutro e é descrita monofasicamente pelos parâmetros amplitude e duração. A amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado enquanto perdurar o evento. A duração da VTCD é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado ultrapassa determinado limite, e o instante em que essa

variável volta a cruzar esse limite. Alguns destes eventos são variações de tensão momentâneas com duração de até 3 segundos, outros são considerados variação temporária de tensão que compreende eventos com duração superior a 3 e inferior ou igual a 1 minuto, esses eventos podem provocar: interrupção, afundamento e elevação temporária de tensão.

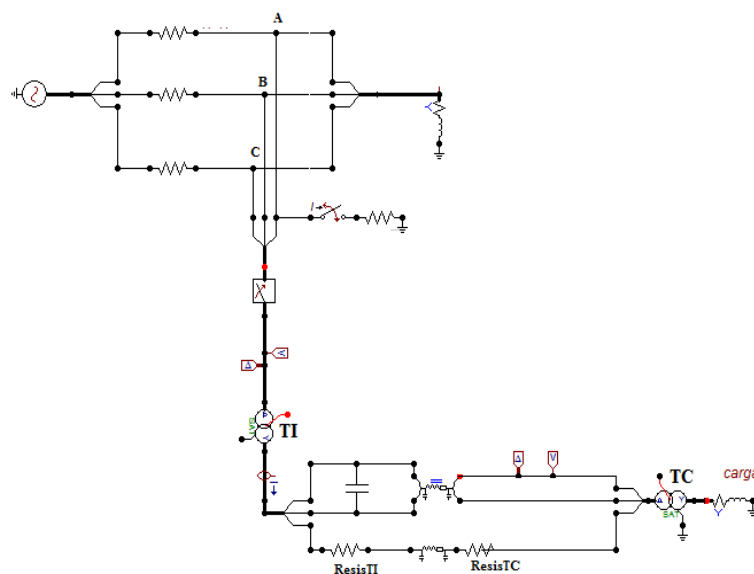
Afundamentos são eventos responsáveis por perdas de qualidade e erros na especificação dos produtos, além das desvantagens relacionadas à retomada da produção, o que demanda tempo e energia elétrica.

6.1.2 Simulação das perturbações no sistema provocada por curto circuito

São comparados os resultados experimentais e computacionais em condições de perturbação. A figura 6.1 representa o sistema proposto do protótipo, com um circuito trifásico do laboratório que alimenta o primário do (TI) com tensões nominais de linha de 220 V, sequência de fase ABC. Do secundário do (TI) saem tensões em 380 V que fornecerão energia elétrica ao primário do (TC).

O secundário do (TC) supre uma carga trifásica equilibrada, conectada em estrela, e de impedância constante por fase $100 + j113$ (resistência 100Ω /fase, indutância 300 mH /fase). As resistências das malhas de aterramentos do (TI) e do (TC) são respectivamente de 12Ω e 20Ω .

Figura 6.1 – Sistema de distribuição (protótipo) com dois condutores aéreos e o solo, modelado no ATP para análise de perturbações na rede

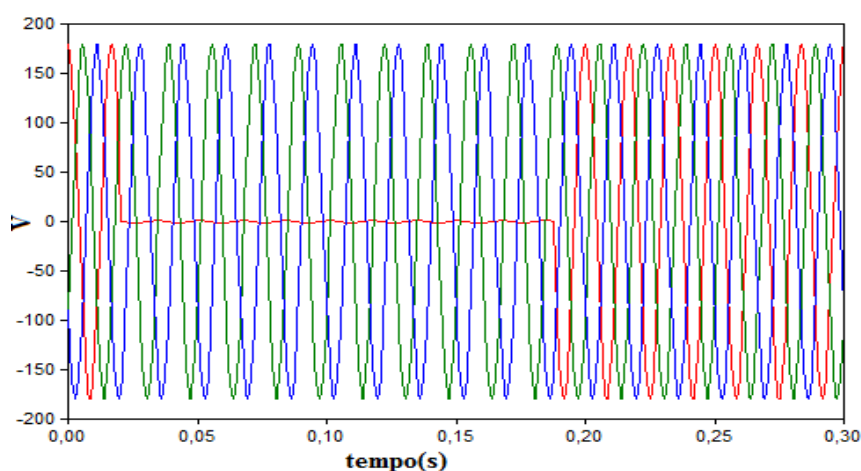


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

6.1.2.1 Resultados das perturbações no sistema provocados por curto circuito

A figura 6.2 e 6.3 apresentam as tensões de fase e de linha, respectivamente, registradas nos alimentadores do primário do (TI) durante a perturbação, que teve início 0,02s e término 0,18s, com duração de 10 ciclos ou 0,167s, provocado por um curto-circuito na fase A do alimentador para terra. A tensão na fase que ocorreu o evento tende para zero, enquanto as outras duas tensões ficaram normais, conforme figura 6.2.

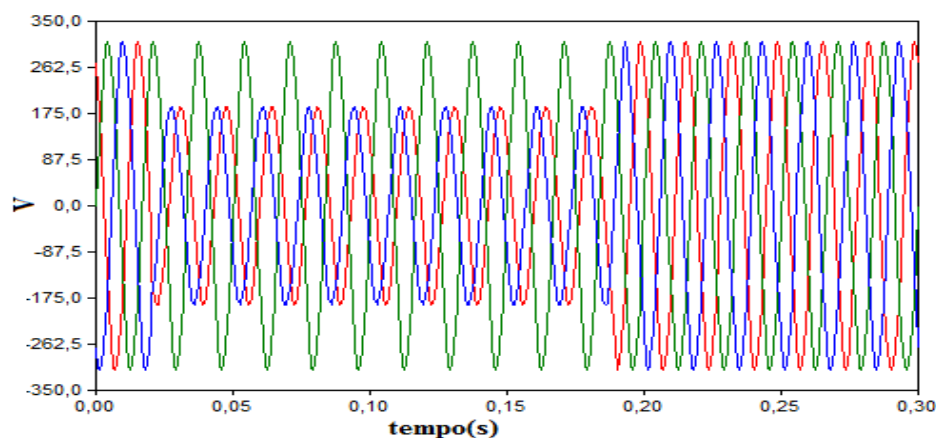
Figura 6.2 – Tensão de fase instantânea no lado do primário do transformador isolador, fase A (vermelha), fase B (verde), fase C (azul)



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

As tensões de linha durante o evento no alimentador apresentam um afundamento de 60,36 % em AB e CA ficando CB normal, conforme figura 6.3.

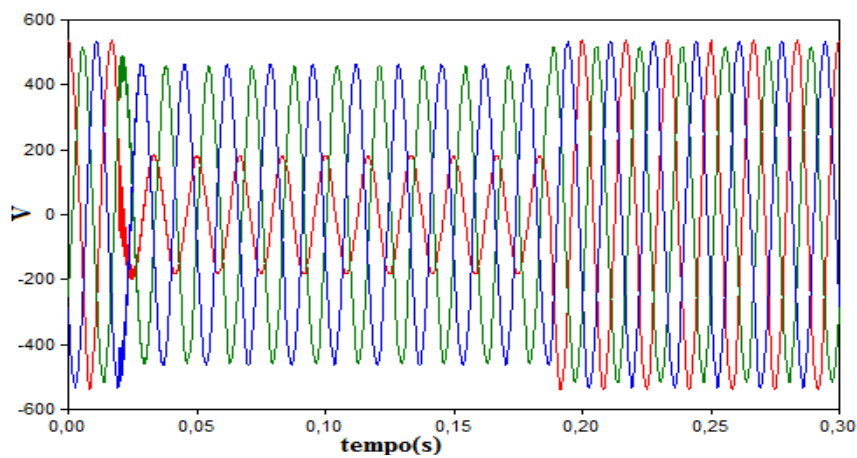
Figura 6.3 – Tensões de linha verificadas no primário do transformador isolador em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul)



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 6.4 mostra tensões de linha registradas no secundário do transformador isolador em relação ao evento já citado. Observa-se que a tensão de linha AB tem um afundamento de 65,92% enquanto as BC e CA sofrem uma variação de 13,59%. Apesar das tensões estarem desequilibrada, ainda durante o evento, o circuito continua com as tensões trifásicas.

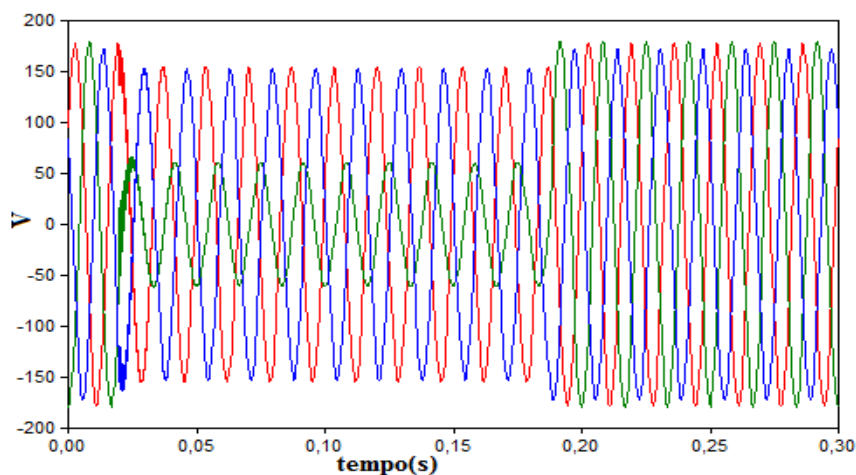
Figura 6.4 – Tensões de linha verificadas no secundário do transformador isolador em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do secundário do transformador isolador, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul)



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Procedendo do lado de baixa tensão do transformador do consumidor (TC), durante a referida perturbação, a tensão de fase sobre a carga durante o evento sofre um afundamento de 66% na fase B. Enquanto que nas fases A e C ocorrem um variação de 13,64%.

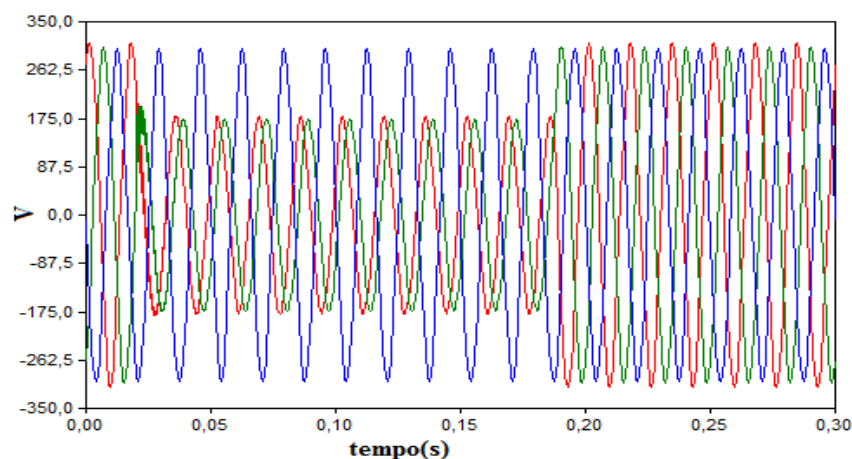
Figura 6.5 – Tensões de fase verificadas no secundário do transformador consumidor em condições de perturbação. Tensões de fase, A (vermelha), B (verde), C (azul)



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A figura 6.6 mostra as tensões de linha sobre a carga durante o evento. Observa-se que ocorre um afundamento nas tensões de linha AB e BC 42,94%, e a CA encontra-se normal. As tensões apesar de desequilibradas, durante o VTCD, continuam trifásica sobre a carga.

Figura 6.6 – Tensões de linha verificadas no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do secundário do transformador do consumidor, AB (vermelha), BC (verde), CA (azul)

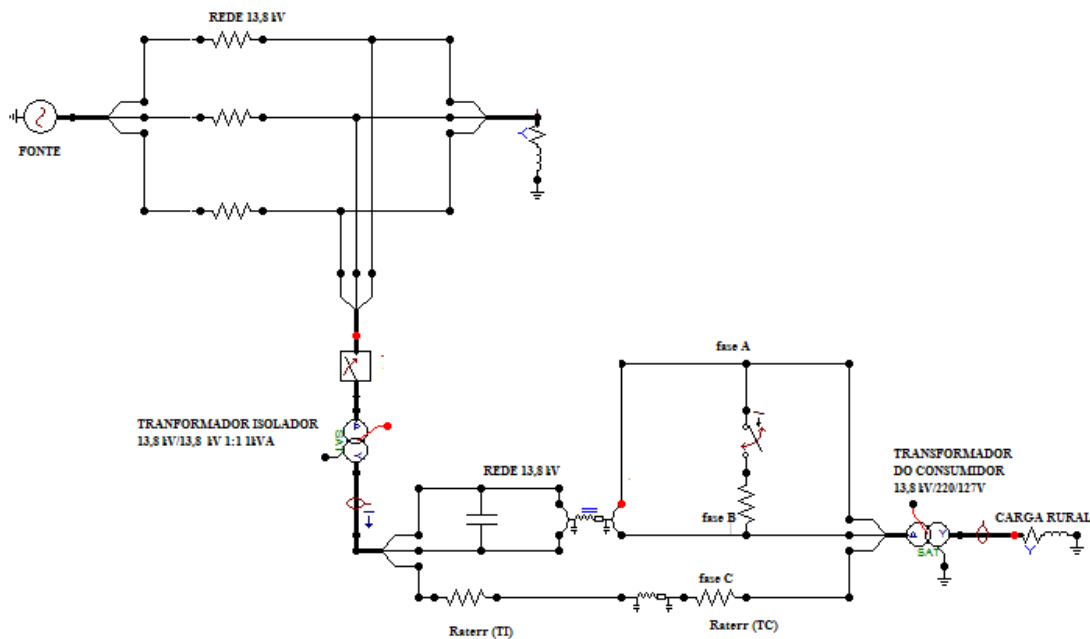


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

A estrutura do sistema proposto em 13,8 kV é submetida a um evento de curto-circuito ocorrido com as fases A e B no secundário do transformador isolador. A figura 6.7 representa o sistema proposto em 13,8 kV, um ramal é derivado de um tronco principal alimentando o

primário do (TI), os parâmetros são mostrados nas tabelas 5.3 e 5.4. O sistema proposto no protótipo de 220/380 V também foi submetido à mesma perturbação com as mesmas fases, com a intenção de ser feita comparações com o sistema de 13,8kV.

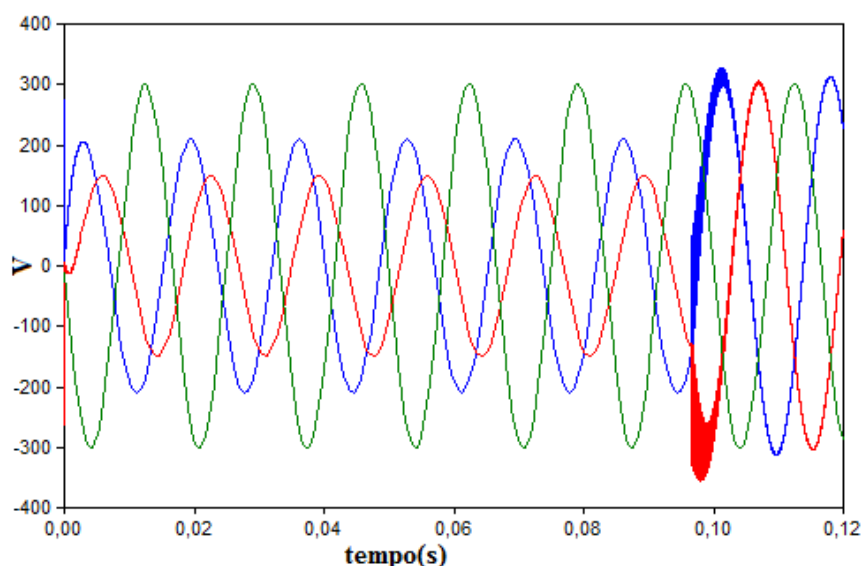
Figura 6.7 – Sistema de distribuição trifásico não convencional simulado no ATP em condições de perturbação ocasionada por um curto circuito entre as fases aéreas A e B



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

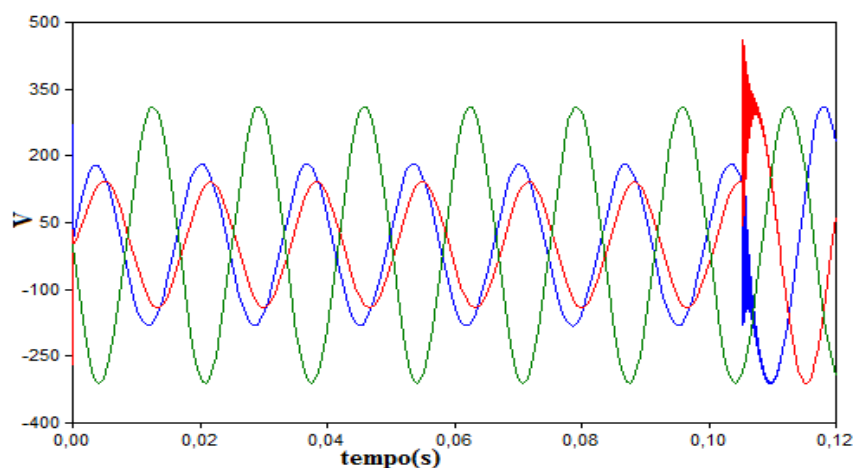
As figuras 6.8 e 6.9 mostram respectivamente as simulações ocorridas tanto no protótipo 220/380 V quanto no sistema proposto 13,8 kV. Durante a perturbação, provocada por um curto-circuito entre as fases aéreas A e B, que teve início 0,0s e término 0,10s, o VTCD teve a duração aproximada de 6 ciclos ou 0,10s. Esse tempo fora ajustado dentro deste período, a fim de concatenar com o experimento em campo. Verifica-se que os resultados são perfeitamente compatíveis. As leituras foram realizadas na carga. Para acompanhar as cores definidas no experimento pelo osciloscópio, as próximas figuras de simulações terão as seguintes configurações de tensões de linha: AB (Azul), BC (Vermelha) e CA (Verde), a sequência continua sendo ABC, com faseamento de 120°.

Figura 6.8 – Tensões de linha verificadas no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador, AB (azul), BC (vermelha), CA (verde)



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

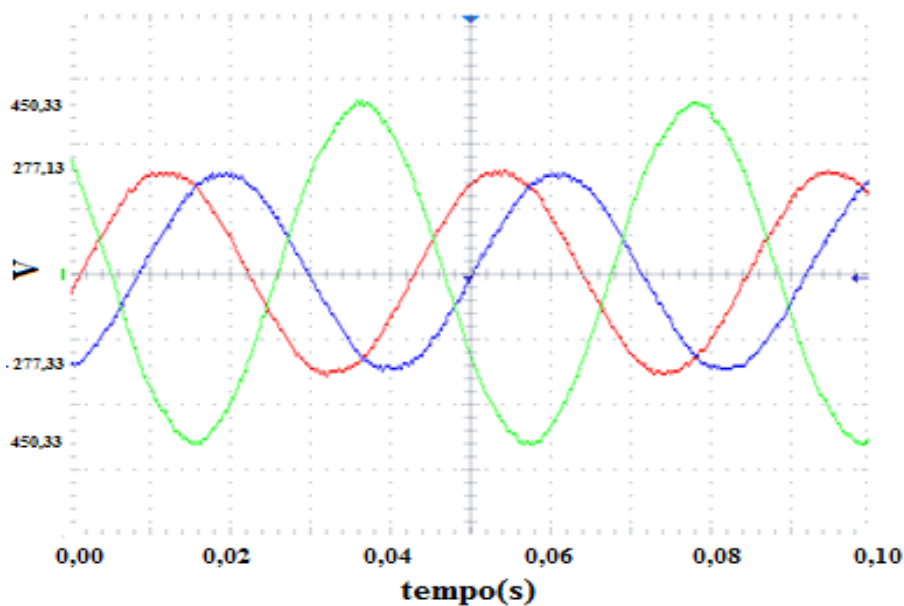
Figura 6.9 – Tensões de linha verificadas no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea no lado do primário do transformador isolador, AB (azul), BC (vermelha), CA (verde)



Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Em relação aos resultados experimentais e computacionais obtidos no referido evento de afundamento de tensão, a leitura é feita no secundário do transformador do consumidor que alimenta a carga. A figura 6.10 mostra o resultado experimental, porém ela registra somente o tempo da ocorrência da VTCD entre 0,0s e 0,10s, provocado pelo curto-circuito entre as fases aéreas A e B. Mas não descaracteriza a qualidade dos resultados alcançados tendo o mesmo comportamento das simulações realizadas nas figuras 6.8 e 6.9.

Figura 6.10 – Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (azul), BC (vermelha), CA (verde)



Fonte: Próprio autor.

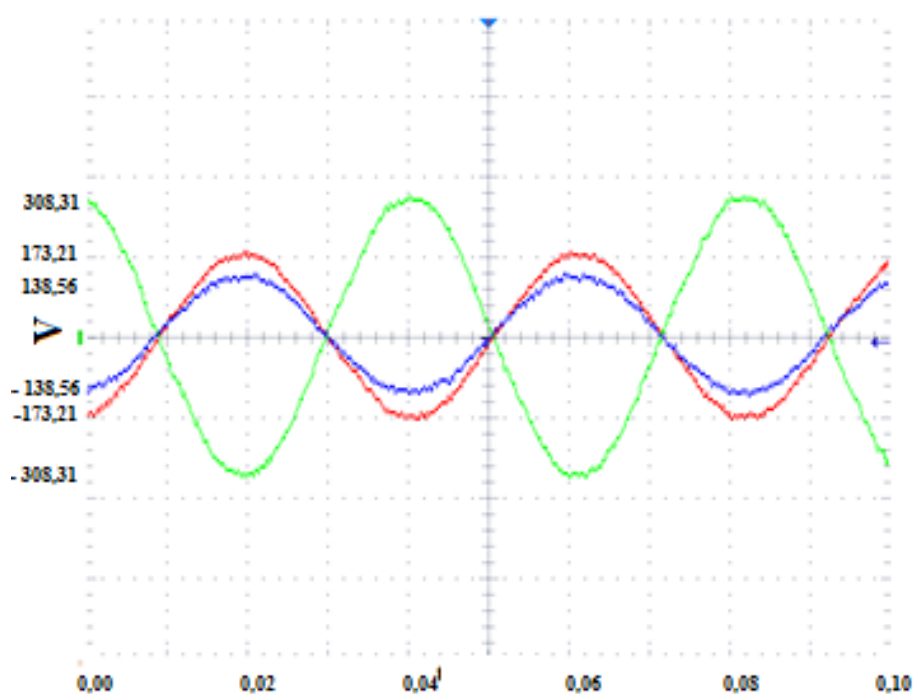
As figuras de 6.8 até 6.10 mostraram que os resultados, tanto o experimental quanto o computacional, são compatíveis com o comportamento de um sistema trifásico convencional, submetido a um afundamento de tensão da mesma magnitude.

6.1.2.2 Resultados das perturbações no sistema provocados pela abertura monofásica sem curto-circuito

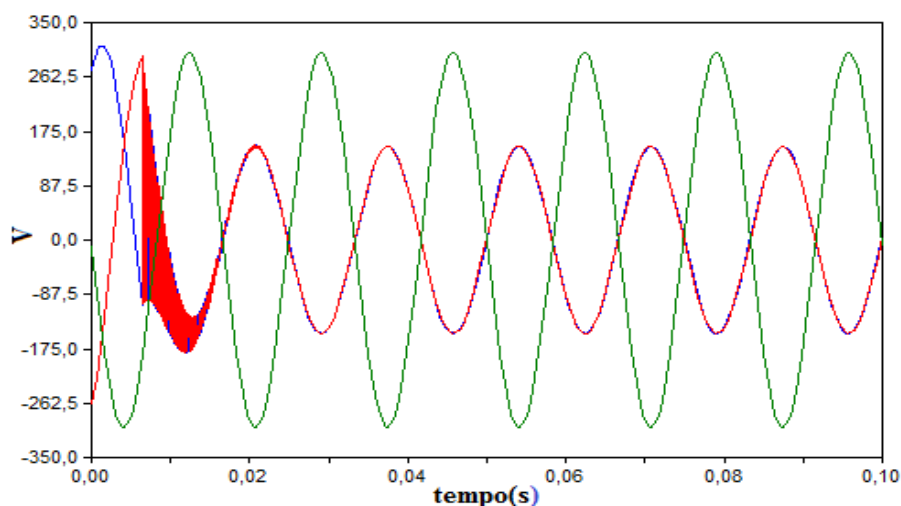
A chave do ATP simula uma chave fusível trifásica, com a abertura da fase A a partir de 0,0s. O alimentador do sistema trifásico 13,8 kV e do protótipo 220/380V, conforme figuras 6.11(B) e (C) respectivamente, a partir desse momento, alimentaram os transformadores isoladores, faltando uma fase. O sistema experimental também foi submetido ao mesmo evento, em que a fase A correspondente foi desligada aos 0,0s. Ambos refletiram o comportamento do sistema submetido a essas condições. Em um sistema real observa-se que o consumidor ficaria submetido a uma tensão desequilibrada. Se providências urgentes não fossem tomadas, poderia ocasionar queimas de equipamentos e outros prejuízos. A figura 6.11 ilustra os resultados obtidos por meio de leituras feitas no secundário do transformador do consumidor, que alimenta as cargas. Em função das características de cores do osciloscópio, nos eventos a seguir, as tensões de linha passaram a ter o seguinte padrão de

cores: AB (azul), BC (vermelho) e CA (verde), mantendo a mesma sequência de fase e o defasamento de 120° . As figuras 6.11 (B) e (C) apresentam as tensões de linha AB e BC, com um afundamento de 50%. A figura 6.11(A) tem uma pequena diferença em relação ao valor dos afundamentos para as mesmas tensões, em torno de 56% e 45%, porém não desqualifica a comprovação do fenômeno.

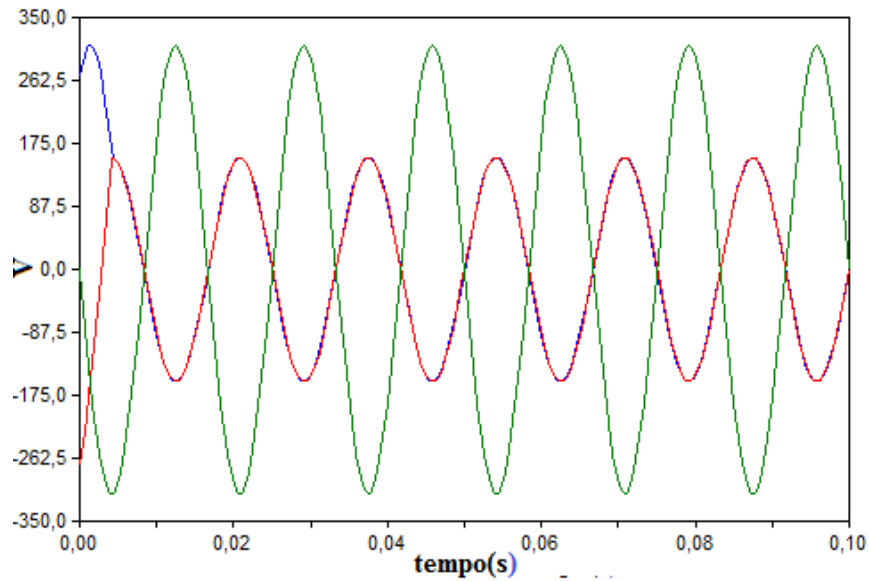
Figura 6.11 – Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (vermelha), BC (verde), CA (azul). Experimental do protótipo 220/380V (A), simulação do protótipo 220/380V (B), simulação do sistema proposto 13,8kV (C)



(A)



(B)



(C)

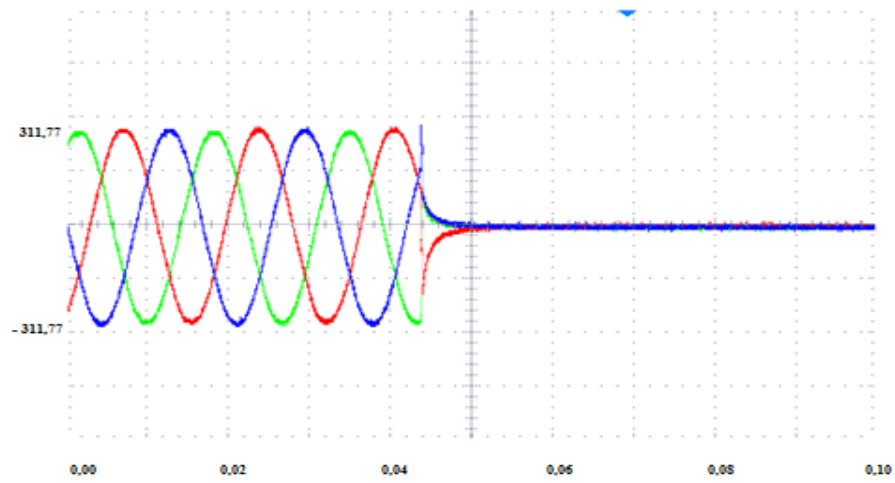
Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Considerando o comportamento da abertura monofásica, os resultados das simulações são compatíveis com o comportamento das medições realizadas no laboratório. Os resultados apresentados são similares a um sistema convencional que sofre o mesmo tipo de perturbação

6.1.2.3 Resultados das perturbações no sistema provocados pela abertura bifásica sem curto-circuito

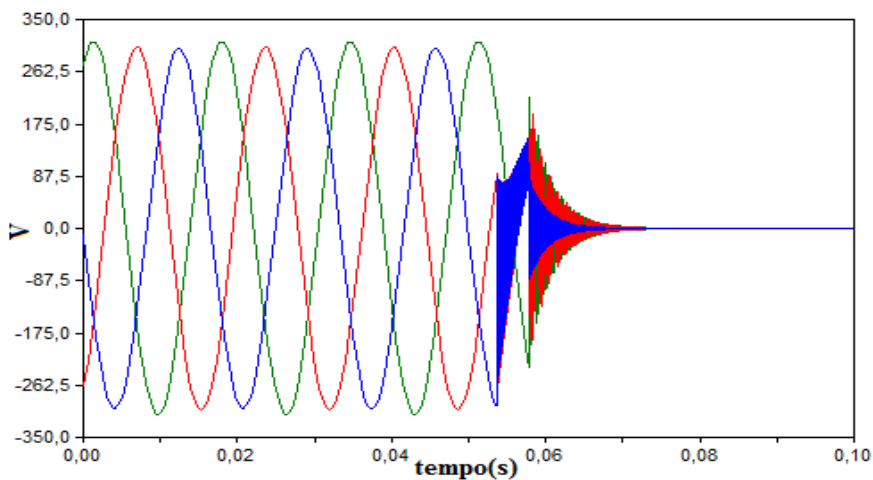
A figura 6.12 mostra o resultado do protótipo sendo submetido a uma condição de perturbação com abertura simultânea de duas fases A e B, num tempo inicial de 0,04s. As tensões de linha medidas na carga alimentadas pelo secundário do (TC), após o evento, estão zeradas. Já as figuras 6.13 A e B são resultados das simulações realizadas no protótipo 220/380 V e no sistema trifásico de 13,8 kV respectivamente. As simulações comprovam o resultado experimental.

Figura 6.12 – Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (verde), BC (vermelha), CA (azul) sequência ABC. Medições em laboratório

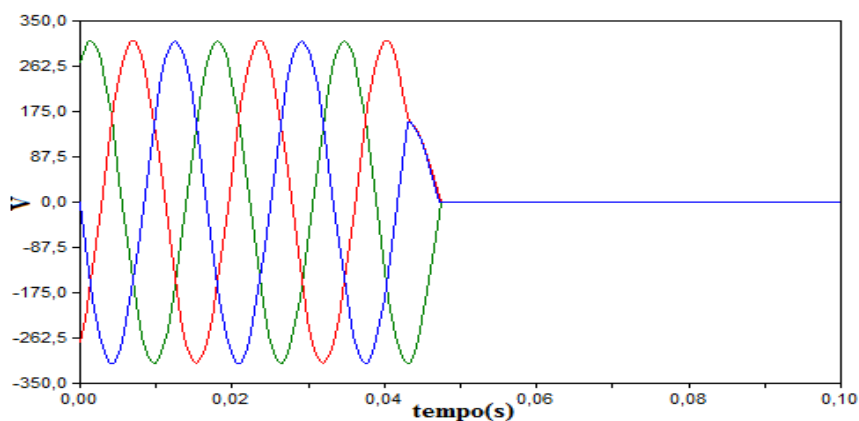


Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

Figura 6.13 – Tensões de linha resultantes no secundário do transformador do consumidor em condições de perturbação. Tensões de linha instantânea AB (vermelha), BC (verde), CA (azul).



(A)



(B)

(A) Simulação Protótipo 220/ 380 V
(B) Simulação sistema proposto 13,8 kV

Fonte: Próprio autor (Atpdraw).

6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema proposto de distribuição trifásica para área rural utilizando o solo como uma das fases foi comprovada por meio de simulações computacionais e experimentais, por um protótipo instalado num ambiente com as características próprias para a sua avaliação. Sendo analisado em condições de perturbações relacionado à qualidade da onda de tensão. Apresentou desempenho compatível com as redes de distribuição trifásicas convencionais. As condições técnicas conferem ao sistema proposto, capacidade de ser uma nova proposta energética para a eletrificação trifásica rural.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho mostrou uma metodologia para suprimento de energia elétrica trifásica para propriedades rurais, utilizando dois condutores aéreos e o solo como a terceira fase. Considerando que a eletrificação rural no Brasil e no mundo é basicamente composta por ramais monofásicos, estes podem ser repotencializados convertendo em ramais bifásicos ou trifásicos, com custos relativamente menores.

Esta nova concepção tem a sua funcionalidade baseada nas características trifásicas de um transformador delta-estrela, com o primário alimentado por um sistema trifásico convencional. No lado do secundário saem duas fases aéreas e a terceira fase é conectada ao solo, proporcionando um sistema desequilibrado. Do lado do consumidor um outro transformador trifásico delta/estrela aterrado terá uma das fases do lado primário conectada diretamente ao solo mais as duas fases aéreas.

Os testes simulados por meio do programa ATP mostraram as duas condições dos circuitos em estudo com a utilização de uma impedância de balanceamento em série com a fase que flui pelo solo e a outra sem o uso dessa. Os resultados obtidos no suprimento de energia elétrica em nível de tensão e corrente nas cargas, em ambas as condições, foram satisfatórios.

O desempenho da metodologia proposta, visando à concepção de sistema de distribuição para atendimento a cargas rurais trifásicas, usando o solo como condutor, foi comprovado por meio de desenvolvimentos analíticos, computacionais e experimentais, ensejando, em termos científicos, apresentação de resultados práticos inspiradores.

Buscando dar maior clareza ao desenvolvimento da tese, na sequência, será descrita a evolução do trabalho.

Inicialmente, foi realizada a abordagem da eletrificação rural como um importante fator indutor do desenvolvimento humano, econômico e social nas áreas rurais. Feita uma breve revisão bibliográfica na intenção de mostrar o estado da arte, definiu-se a estrutura da tese. Em seguida, foi realizado um levantamento histórico da eletrificação rural no Brasil e no mundo. Apresentaram-se as limitações técnicas dos sistemas monofásicos, dando ênfase à necessidade de o Brasil ter que investir na eletrificação rural, buscando novos modelos. Informações de vários tipos de técnicas utilizadas para eletrificação rural foram apresentadas das mais tradicionais, como MRT, até as mais sofisticadas, que propõem mudanças em âmbito de suprimento de energia elétrica na área rural. A comprovação matemática da

proposta desta tese deu embasamento à sustentação da implementação de um sistema elétrico trifásico de distribuição, usando o solo como um condutor.

O sistema trifásico proposto por meio dos estudos aqui desenvolvidos permite garantir confiabilidade e segurança aos consumidores supridos. Comportou-se com eficiência diante das variadas cargas submetidas. Em relação aos distúrbios, apresentou desequilíbrio dentro das normas previstas; seu comportamento é compatível com um sistema convencional.

Os resultados obtidos vêm ao encontro das necessidades de um sistema trifásico que possa responder às carências de uma eletrificação rural mais robusta, consagrando essa nova tecnologia inédita em termos mundiais.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros são apresentadas as seguintes sugestões:

- estudo dos sistemas de aterramentos visando a uma melhor compreensão das tensões de passo e toque para o sistema proposto;
- análise dos comportamentos do sistema em relação à ferroressonância;
- a utilização do solo como um condutor bifásico;
- estudo de viabilidade na otimização dos circuitos, a fim transmitir sinais de alta frequência (internet).
- análise econômica a fim de demonstrar a sua aplicabilidade em termos financeiros.

7.2 PUBLICAÇÕES

Os seguintes artigos foram publicados:

1. **Análise do Desempenho da Linha de Transmissão 230 kV do Sistema de Transmissão de Rondônia Operando com Cabos Para-Raios Isolados e Energizados Em Média Tensão.** XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu-PR , outubro de 2015.
2. **Índices Operacionais de Referência para Aplicação da Tecnologia Cabos Para-Raios Energizados.** CONTECC 72^a SOEA, Fortaleza-CE, setembro 2015.
3. **Repowering Rural Single-Phase Distribution Network: A Non Conventional Proposal using Two Overhead Wires and the Ground as Third Phase. Electric Power Systems Research,**
Electric Power Systems Research–ELSEVIER, disponível em:
[http:// dx.doi.org/ 10.1016/j.epsr.2017.05.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2017.05.001), maio de 2017.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5440:2011. **“Transformadores para redes aéreas de distribuição – Requisitos”**. 2011.
- ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica-**Procedimentos de Distribuição de Energia elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**, 2012.
- BARNES, D. F. **Draft for Discussion Meeting the Challenge of Rural Electrification in Developing Nations: The Experience of Successful Programs**, 2005.
- BERTOLLO, H. C. **Contribuições ao Estudo dos Aterramentos de Sistemas Monofilares com Retorno pela Terra**. p. 30-31. 2008. Dissertação (Mestrado Universidade Federal de Viçosa)
- BROWN, H. M. **Electricity Transmission A Primer National Conference of State Legislatures**, 2004.
- CARSON, J. R. “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return,” **Bell System Technical Journal**, New York, v. 5, 1926.
- CELPA REDE ENERGIA DO PARÁ, **NTD 14 – Montagem de Redes de Distribuição Aérea Rural – 13,8 kV E 34,5 kV**, 2009.
- CEPEL. Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. **Seleção de Sistema –MRT- RER-05**, 2002.
- CINIERI, E. “A new lossless circuit balancing the MV distribution systems from insulated shield wires of HV lines.” IEEE Conference Publications, v. 2, p. 722-728, 1999.
- CIPRIANO, E.; JACOBINA, C. B.; SILVA, E. R. C. “Single-Phase to Three-Phase Power Converter: State of the Art”, IEEE Transactions on Power Electronics, v. 27, n. 5, 2012.
- CRUZ, C. N. P.; MOURAD, A. L.; MORÍNIGO, M. A.; SANGA, G. **Eletrificação rural: Benefícios em Diferentes Esferas. Enc. Meio Rural**, UNICAMP, 2004.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. p. 1-3, DSE-FEEC-UNICAMP, 2005.
- DEWAN, S. B.; SHOWLEH, M. “A novel static single- to three-phase converter”. IEEE Transactions on Magnetics, v. 17, n. 6, p. 3287-3289, 1981.
- ELEKTRO ELETRICIDADE E SERVIÇOS S.A. **Ligações de Cargas de Irrigação nas Redes de Distribuição de Energia Elétrica**, NORMA ND.53, 2013.
- 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.

GARWOOD, G. T.; WEBSDALE. **The Phase /Neutral System of Supply for Rural H.V. Distribution**. Proceedings of the IEE-Part II: Power Engineering, v. 97, Issue 57. p. 294-295, DOI: 10.1049/pi-2.1950.0088, 1950.

GATTA, F. M.; ILICETO, F.; LAURIA, S.; MASATO, P. **“Balancing Methods of the “3-Phase Shield Wire Schemes”**. Power Tech, IEEE, Russia, 2005.

HAYFORD, L. C.; DOKYI, G. O.; CINIEMI, 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, v. 4, n. 4, 1989.

HISANO, K.; KOBAYASHI, H.; KOBAYASHI, T. **”A New Type Single-Phase to Three-Phase Converter”**. INTERMAG Conference, Stuttgart, Germany, 1966.

HOLLAND, C. W. **Single Wire Earth Return for Remote Rural Distribution Reducing Costs and Improving Reliability**, Maunsell Ltd, an AECOM Company, 2003. New Zealand.

ILICETO, F. et al. **Rural Electrification in Developing Countries With the Shield Wire Scheme. Applications in Laos**, CIGRÉ Session, Paris, 2004.

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

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO. **Aterramento Elétrico**, 3. ed. modificada e ampliada, Editores SAGRA-D.C. LUZZATO, Porto Alegre, p. 71, 1995.

MAGGS, A. H. **“Single-phase to three-phase conversion by the Ferraris’s Arno system”**. **Journal of the Institution of Electrical Engineers**, Part I, v. 93, n. 68, p. 82-96, 1946.

MANDENO, L. **Rural Power Supply Especially in Back Country Areas**, **Proceedings of the New Zealand Institution of Engineers**, v. 33, p. 234-87, 1947.

NEXANS. Nexans Brings Energy to Life. **Catálogos de cabos para linhas Aéreas**. Cabos num de alumínio. Disponível em: www.nexans.com.br. Acesso em: 11 abr. 2014.

RAGGI, L. M. R **Projeto de Malhas de Aterramento: Contribuição ao Cômputo da Estratificação do Solo**. p. 9-16. 2009. Dissertação (Mestrado Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais).

RAMOS, J. E. et al. **The Brazilian Experience With the Use of the Shield Wire Line Technology (SWL) for Energy Distribution**, IEEE Latin America Transactions, v. 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)

RESENDE, O. H. P.; SAMESEMA, M. I. **Efeitos do Desequilíbrio de tensões de suprimentos nos Motores e Indução Trifásico**. Disponível:<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857>. Acesso em: 19 fev. 2016.

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**, first Edition, McGRA-HILL BOOK COMPANY, INC. NEW YORK, p. 324, 1950.

SAINT, R. **Rural Distribution System Planning using Smart Grid Technologies**. IEEE 978-1-4244-3419-0/09, 2009.

SILVA, A. J.; MUNHOZ, F. C.; CORREIA, P. B. Qualidade na utilização de energia elétrica no setor rural: Problemas, legislação e alternativas. **Enc. Energ. Meio Rural**, 2002.

SILVA, M. R. **Avaliação de Alternativa para Eletrificação Rural no contexto dos programas de Universalização do Atendimento de Energia no Brasil**. p. 58. 2006. Dissertação (Mestrado Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG)

SOUZA, J. C. N. **Modelagem de Redes Aéreas com Retorno por Terra em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Análises de Falhas de Alta Impedância**. p. 56. 2006. Dissertação (Mestrado Universidade Federal do Maranhão-UFMA)

TESLA, N. **Art of Transmitting Electrical Energy Through the Natural Mediums**. Patent United States Patent Office, 1905.

WADDLE, D. **Meeting the Challenge of Rural Electrification in Developing Nations: The Experience of Successful Programs**, p. 81-111, mar. 2005.

WOLMAN, P. **Meeting the Challenge of Rural Electrification in Developing Nations: The Experience of Successful Programs**, p. 282- 315, mar. 2005.

ANEXO A – DIAGONALIZAÇÃO DE UMA MATRIZ

Sejam A, B matrizes $n \times n$. Dizemos que B é semelhante a A , se existe uma matriz invertível P tal que:

$$B = P^{-1}AP.$$

Dizemos que uma matriz é diagonalizável, se ela é semelhante a uma matriz diagonal.

Seja A uma matriz $n \times n$. Dizemos que um número real λ é um autovalor de A se existir um vetor não nulo v de \mathbf{R}^n tal que:

$$Av = \lambda v$$

O vetor v é chamado um autovetor de A , corresponde ao autovalor λ . Uma matriz $A_{n \times n}$ é diagonalizável se e somente se, ela possui n autovetores linearmente independentes.

Feitas as definições devem ser encontrados os autovalores da matriz a partir dos quais se obtém autovetores correspondentes. Com estes fica definida a matriz de transformação que relaciona as variáveis do sistema acoplado para o desacoplado e vice-versa.