

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Leonardo de Freitas Silveira

**ANÁLISE DO DESBALANÇO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA TRIFÁSICOS À DOIS FIOS**

Santa Maria, RS
2023

© 2023

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo de Freitas Silveira. A reprodução de parte ou da totalidade deste trabalho só poderá ser realizada mediante citação da fonte.

E-mail: leonardofsil@hotmail.com

Leonardo de Freitas Silveira

**ANÁLISE DO DESBALANÇO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA TRIFÁSICOS À DOIS FIOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Aécio de Lima Oliveira

Santa Maria, RS
2023

Leonardo de Freitas Silveira

**ANÁLISE DO DESBALANÇO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA TRIFÁSICOS À DOIS FIOS**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 13 de fevereiro de 2023:

Aécio de Lima Oliveira, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Jean Pereira Rossini, Me. (UFSM)

Miguel Spagnolo Martins, Me. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Paulo Ricardo Vieira Silveira e Luciane Schramm de Freitas, pela educação, pelos princípios, pelo apoio em todas as situações e por proporcionarem a possibilidade de dedicar-me inteiramente à vida acadêmica durante o período de minha graduação.

À minha avó, Ione Marlei Schramm de Freitas, pelo afeto, pelo amor, pelo apoio em minhas escolhas e por fazer parte de minha educação, estando presente em todos os momentos importantes de minha vida.

Ao restante de minha família, irmã, afilhada, avós, tios, tias, primos e primas pelo carinho e incentivo durante esta caminhada.

À minha namorada, Giovanna Ferraz, por todo amor, pelo apoio pelos, incentivos e por estar ao meu lado independente da situação.

A todos meus colegas e amigos, em especial ao Artur Dala Nora Quatrin, Lucas Bisêlo Piton, Miguel Spagnolo Martins, Leonardo Felipe dos Santos, Gregory Espirito Santo, Luis Henrique Scher, Luiz Fernando Menegazzo e Guilherme Gemi Pissaia pela companhia nos momentos de descontração, mas também por se manterem ao meu lado em momentos de dúvida e dificuldade, demonstrando apoio incondicional durante minha jornada pela faculdade.

A todo corpo docente e quadro de funcionários do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria por possibilitarem a formação de Engenheiros e Engenheiras com máxima excelência.

Ao Professor e Orientador Dr. Aécio de Lima Oliveira pela confiança depositada, conselhos, disponibilidade e por proporcionar oportunidades ímpares no meio acadêmico.

Aos Professores Dr. Ghendy Cardoso Jr., Dr Gustavo Marchesan e Dr. Diego Berlezi Ramos pelo apoio e por estarem presentes durante todo o andamento do projeto.

À equipe de pesquisadores do Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos pela excelência na realização das tarefas, pela dedicação excepcional, pela disponibilidade, companheirismo e por proporcionarem um ambiente de trabalho agradável e afetuosos.

Por fim, a todos aqueles não citados nominalmente, mas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

*"Nunca ande por trilhas, pois assim só
irá até onde outros já foram"*

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

ANÁLISE DO DESBALANÇO DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA TRIFÁSICOS À DOIS FIOS

AUTOR: Leonardo de Freitas Silveira
ORIENTADOR: Aécio de Lima Oliveira

A crescente demanda por maiores níveis de potência elétrica no meio rural é reflexo direto da modernização do campo. Este fenômeno levou as concessionárias de energia a investirem em tecnologias que viabilizem a repotenciação dos sistemas de distribuição em média tensão existentes, além da implementação de novas redes. Dentre os diversos modelos existentes, o sistema de distribuição trifásico à dois fios mostra-se uma nova alternativa economicamente viável, capaz de suprir demanda trifásica utilizando-se de apenas dois condutores para as fases aéreas além do solo como elemento para a condução da terceira fase. Uma característica intrínseca ao sistema em questão é a presença de um desbalanço de tensão entre as fases que alimentam as cargas. Este aspecto do sistema deve-se à diferença de impedância entre os condutores aéreos e o solo. O presente trabalho apresenta em seu corpo dois artigos científicos que abordam a qualidade do fornecimento de energia no sistema proposto, discutindo parâmetros que possibilitam a sua implementação de forma viável conforme estabelecido em normas de qualidade de serviço, além de apresentar diferentes metodologias que visam reduzir o desequilíbrio de tensão. Os estudos apresentados foram desenvolvidos em sua totalidade através do *software* de simulação *MATLAB/Simulink*. Os resultados obtidos demonstraram uma vasta possibilidade de implementações dentro dos limites admitidos de desbalanço de tensão. Além disso, para sistemas que não se adequem às normas, é apresentada uma metodologia capaz de eliminar com grande eficiência estes desequilíbrios.

Palavras-chave: Sistema de distribuição trifásico à dois fios. Desbalanço de tensão. Repotenciação dos sistemas de distribuição. Média tensão.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE VOLTAGE UNBALANCE PHENOMENON IN THREE-PHASE TWO-WIRE DISTRIBUTION SYSTEMS

AUTHOR: Leonardo de Freitas Silveira

ADVISOR: Aécio de Lima Oliveira.

The growing demand for higher levels of electrical power in rural areas is a reflection of the modernization of the countryside. This phenomenon has led energy concessionaires to invest in technologies that enable the repowering of existing medium voltage distribution systems, in addition to the implementation of new networks. The three-phase two-wire distribution system is a new economically viable alternative, capable of supplying three-phase demand at full power, using only two overhead wires and the ground as conductors. An inherent characteristic of this system is the presence of a voltage unbalance between the phases that supply the loads. This aspect of the system is due to the impedance difference between the overhead phases and the one transmitted by the ground. This work presents two scientific articles that address the quality of the energy supply in the proposed system, discussing parameters that allow its implementation in a viable way according to the norms, besides presenting different methodologies that aim to remedy the unbalance between the phases. The studies presented were developed in their entirety using the MATLAB/Simulink simulation software. The obtained results demonstrated a wide possibility of implementations within the acceptable patterns of voltage unbalance. In addition, it is presented a methodology capable of eliminating these unbalances with great efficiency in systems that do not conform to the norms.

Keywords: Three-phase two-wire distribution system. Voltage Unbalance. Repowering of distribution systems. Medium voltage.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1	QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA	10
1.1.1	Métodos para a estimativa do desbalanço de tensão	11
1.1.2	Impactos e consequências do desbalanço entre fases.....	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2.	ARTIGO 1 – ANALYSIS OF THE VOLTAGE UNBALANCE PHENOMENON IN A THREE-PHASE TWO-WIRE DISTRIBUTION SYSTEM.	16
3.	ARTIGO 2 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO T2F: VERIFICAÇÃO DA EFETIVIDADE DAS METODOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO	22
4.	CONTRIBUIÇÕES ADICIONAIS	31
5.	DISCUSSÕES.....	35
6.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	37

1. INTRODUÇÃO

O fato do Brasil possuir dimensões continentais reflete na existência de demanda por potência elétrica em regiões afastadas dos centros urbanos. De acordo com a divulgação de dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD, 2015), cerca de 15,28% da população brasileira vive em áreas rurais.

Além disso, nas últimas décadas pôde-se observar o fenômeno da modernização do campo, com o surgimento de novas tecnologias agrárias, resultando em uma crescente demanda de eletricidade em localidades distantes das subestações de energia. Neste cenário, os ramais de distribuição de energia elétrica de menor dimensão, que compõem a vasta maioria das redes de alimentação existentes nas zonas rurais, têm se mostrado incapazes de suprir estas novas cargas.

Sob este contexto, fez-se necessário o desenvolvimento de tecnologias economicamente favoráveis e tecnicamente viáveis para a repotenciação de redes existente e implementação de novos trechos. O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Trifásico à Dois Fios (T2F) mostra-se uma alternativa aprazível e de baixo custo para esta finalidade. Este modelo caracteriza-se pela transmissão de energia elétrica trifásica utilizando apenas dois condutores aéreos e o solo como caminho para a terceira fase (BORGES, 2017).

1.1 QUALIDADE DO FORNECIMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA

A presença de cargas em regiões distantes dos alimentadores implica diretamente nos parâmetros de qualidade do fornecimento de energia. Características como potência demandada e dimensões físicas das redes de distribuição estão dentre os principais fatores que influenciam nestes padrões.

Além de possuírem o papel de transmitir potência desde a fonte até a carga, os sistemas de distribuição de energia elétrica precisam operar de acordo com certos padrões de qualidade. Por décadas, os estudos e pesquisas sobre estas redes focaram-se no primeiro tópico, deixando de lado questões de confiabilidade e excelência no fornecimento de energia. A partir dos primeiros anos da década de 1980 passou-se a observar uma mudança de atitude, começando pela definição de parâmetros de qualidade na demanda energética da indústria e comércio e expandindo-se para os sistemas de atendimento de cargas residenciais (BOLLEN, M. H. J., 1999). No Brasil, os padrões de qualidade de energia são definidos de acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – módulo 8 (ANEEL, 2009).

De acordo com Paulillo, G. (1996, p. 03),

“[...] caracteriza-se como um problema de qualidade da energia qualquer distúrbio ou ocorrência manifestada nos níveis de tensão, nas formas de onda de tensão ou corrente, que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema elétrico.”

Dentre os principais parâmetros que definem a qualidade do fornecimento de energia, podem ser ressaltados:

- Interrupções transitórias momentâneas, temporárias ou sustentadas;
- Variações de tensão de curta ou longa duração;
- Distúrbios de curtíssima duração, como surtos atmosféricos ou distúrbios oscilatórios;
- Distúrbios periódicos, como distorções harmônicas ou cortes;
- Cintilações;
- Ruído de sinal elétrico;
- Rádio interferência.

O desequilíbrio de tensão figura, dentro do escopo da qualidade de energia em sistemas trifásicos, como variação de tensão de longa duração. Este fenômeno pode ser caracterizado como uma condição na qual as três fases do sistema de distribuição apresentam defasagem angular diferente de 120° elétricos ou valores de tensão diferentes em módulo.

Esta categoria de desbalanço, de modo geral, pode apresentar dois tipos de origem: funcional ou estrutural. Os desequilíbrios de natureza funcional estão diretamente ligados às características das cargas atendidas pelo sistema, seja pela má distribuição de potência entre as fases, pela presença de ramificações monofásicas ou pela variação dos ciclos de demanda de cada fase. Os desequilíbrios de natureza estrutural, por sua vez, estão ligados à parâmetros da rede elétrica, como impedância das fases, bancos de capacitores mal dimensionados ou transformadores avariados.

1.1.1 Métodos para a estimativa do desbalanço de tensão

Existem diversas metodologias que visam quantificar o desequilíbrio entre fases, de modo geral, categorizando o fenômeno em uma escala percentual que indica o quão desbalanceado se encontra o sistema trifásico. Dentre os principais métodos para mensurar o desbalanço, destacam-se:

- a) Método IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*): Leva em consideração o máximo desvio entre os níveis de tensão do sistema trifásico, quantificando o fator de desequilíbrio como uma razão da diferença entre o maior e menor valor de tensão de fase pela soma das tensões das três fases (IEEE Standard 112, 1991), como demonstrado em 1.

$$\%DT = \frac{3 \cdot (V_{m\acute{a}x} - V_{m\acute{i}n})}{V_A + V_B + V_C} \times 100\% \quad (1)$$

No qual $V_{m\acute{a}x}$ e $V_{m\acute{i}n}$ representam o máximo e mínimo valor de tensão de fase do sistema e V_A , V_B e V_C correspondem aos valores de tensão em cada uma das fases.

- b) Método NEMA (*National Electrical Manufacturers Association of USA*): Determina a estimativa do desequilíbrio de tensão a partir da razão do máximo desvio entre as tensões de linha pelo seu valor médio (ANSI/NEMA Standard MG1, 1993), como apresentado em 2.

$$\%DT = \frac{\Delta V}{V_{med}} \times 100\% \quad (2)$$

Em que V_{med} corresponde ao valor médio das tensões de linha e ΔV representa o máximo desvio entre as tensões de linha em relação ao valor médio.

- c) Método das componentes simétricas: Quantifica o desbalanço de tensão por meio da decomposição das tensões de fase do sistema em componentes de sequência equilibradas (positiva, negativa e zero). Após isso, o fator de desequilíbrio é obtido através da razão entre os módulos das sequências de fase negativa (V_2) e positiva (V_1) (BLACKBURN, J. L., 1993), como pode ser visto na equação (3).

$$\%DT = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (3)$$

- d) Método CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*): Correlaciona os valores das tensões de linha em um valor adimensional (β) que é utilizado para estimar o desbalanço percentual entre as fases (GOSBELL, V., 2002), como demonstrado em 4 e 5.

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

$$\%DT = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \times 100\% \quad (5)$$

Onde V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} correspondem as tensões de linha entre as respectivas fases.

1.1.2 Impactos e consequências do desbalanço entre fases

Por menor que seja o desequilíbrio de tensão, este fenômeno pode ser extremamente prejudicial ao sistema trifásico. Um desbalanço equivalente à 3,5% nas tensões entre as fases pode ocasionar um aumento de 20% das perdas de motores de indução, enquanto um desequilíbrio de 5% pode rapidamente destruir este tipo de equipamento. Além disso, este fenômeno pode ocasionar aumentos de temperatura, diminuição do fator de potência, alteração nos tempos de partida e surgimento de torque eletromagnético no sentido contrário à rotação do eixo (ELETROBRÁS, 2004).

Ademais, um desequilíbrio de tensão acentuado pode ocasionar o surgimento de correntes de sequência negativas que fluem através do estator de máquinas síncronas, resultando no surgimento de um campo magnético girante com a mesma velocidade angular do rotor, porém com sentido de rotação contrário ao definido pela sequência positiva.

Apesar de boa parte das regulações normativas estipularem o limite do desequilíbrio de tensão em valores próximos à 2%, pequenos desbalanços entre fases, da ordem de 1 a 2%, podem ser prejudiciais à rede. Mesmo inferiores aos limites admissíveis, esses valores podem ocasionar aumentos significativos no consumo de energia, principalmente em sistemas com motores elétricos. Por este motivo, muitas vezes faz-se necessário a aplicação de métodos que visam corrigir o desbalanço de tensão através de compensações nas fases, como por exemplo a adição de elementos de impedância em certos pontos da rede.

Em suma, uma rede trifásica desbalanceada pode ocasionar defeitos e avarias à equipamentos elétricos, além de reduzir significativamente o tempo de vida útil destes dispositivos.

1.2 OBJETIVOS

O sistema de distribuição de energia elétrica trifásico à dois fios possui características construtivas que proporcionam uma diferença de impedância entre suas fases. Este fato reflete na presença de desbalanços de tensão de natureza estrutural, que podem ser observados nos trechos em baixa tensão que conectam as cargas ao ramal elétrico. O presente trabalho tem como principal objetivo apresentar uma análise do comportamento de sistemas T2F no que diz respeito a este parâmetro de qualidade de energia. Sob esta perspectiva, as principais contribuições desta monografia relativas ao estado da arte estão descritas a seguir:

- Estudo de viabilidade de implementação do sistema T2F, analisando quais distâncias são factíveis para a utilização do modelo sem a necessidade de elementos de compensação, ainda mantendo-se dentro dos limites de desbalanço de tensão estipulados.
- Verificação da possibilidade da utilização de elementos de equalização dispostos na rede em diferentes topologias com a finalidade de compensar as impedâncias das fases, mitigando ou eliminando o efeito do desequilíbrio de tensão.
- Averiguação da efetividade de modelo matemático para a obtenção dos valores de impedância a serem adicionados ao sistema T2F com a finalidade de compensar as impedâncias das fases.
- Desenvolvimento de metodologia computacional para obtenção de valores ideais dos elementos de compensação, com a finalidade de eliminar completamente o desequilíbrio entre as fases do T2F.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em capítulos que abordam assuntos específicos de acordo com a seguinte composição: o capítulo 2 contempla o primeiro artigo científico utilizado no desenvolvimento deste trabalho, abordando um estudo de viabilidade de implementação do sistema de distribuição trifásico à dois fios considerando os limites de desbalanço de tensão admissíveis. O capítulo 3 apresenta o segundo artigo científico utilizado no desenvolvimento deste trabalho, que aborda uma análise de diferentes metodologias para a compensação do

desequilíbrio de tensão, considerando diferentes cenários e topologias de compensação. O capítulo 4 possui contribuições algébricas que complementam o estudo desenvolvido no artigo do capítulo 3. O capítulo 5 discute os resultados obtidos nas seções anteriores. Por fim, o capítulo 6 apresenta uma conclusão dos estudos realizados, retomando tópicos relevantes percorridos durante o desenvolvimento do trabalho.

2. ARTIGO 1 – ANALYSIS OF THE VOLTAGE UNBALANCE PHENOMENON IN A THREE-PHASE TWO-WIRE DISTRIBUTION SYSTEM.

Neste capítulo está apresentado o primeiro artigo científico utilizado no desenvolvimento desta monografia. Este trabalho foi submetido, tendo resumo previamente aceito, à “*International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*”, Roma, Itália, 2023, e está de acordo com as normas de submissão do congresso.

Este trabalho aborda um estudo de viabilidade do T2F, analisando um sistema testes em diferentes configurações de distância e distribuição de cargas, observando para quais cenários o modelo T2F mantém-se adequado aos limites de desequilíbrio de tensão admitidos para redes de distribuição trifásicas.

ANALYSIS OF THE VOLTAGE UNBALANCE PHENOMENON IN A TREE-PHASE TWO-WIRE DISTRIBUTION SYSTEM

Leonardo DE FREITAS SILVEIRA
UFSM¹ – Brazil
leonardofsil@hotmail.com

Ghendy CARDOSO JUNIOR
UFSM¹ – Brazil
ghendy@ufsm.br

Aécio DE LIMA OLIVEIRA
UFSM¹ – Brazil
accio.oliveira@ufsm.br

Gustavo MARCHESAN
UFSM¹ – Brazil
gutomarchesan@gmail.com

Leyla KRAULICH
UFSM¹ – Brazil
leylakraulich3@gmail.com

Leonardo Felipe DA SILVA DOS SANTOS
UFSM¹ – Brazil
leonardo.santos@acad.ufsm.br

Miguel SPAGNOLO MARTINS
UFSM¹ – Brazil
martins.miguel@acad.ufsm.br

Rogimar MATIAS RÊGO
Grupo Equatorial² – Brazil
rogimar.rego@equatorialenergia.com.br

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Brazil

² Grupo Equatorial Energia / CEEE-D

ABSTRACT

The three-phase two-wire electrical energy distribution system is an unconventional network that proposes itself to transmit three-phase electrical energy using only two overhead cables and the earth as a conductor for the third phase. Due to this characteristic, the system in question presents the phenomenon of voltage unbalance, resulting from the impedance differences between its phases. Based on this concept, the present study develops a feasibility analysis for the implementation of a three-phase two-wire system, analysing the possibilities of using the model within the acceptable limits of quality in the supply of three-phase power. For this study, it was concluded that the proposed system is capable of operating within acceptable voltage unbalance limits for the vast majority of considered scenarios.

INTRODUCTION

Electric power distribution systems are susceptible to a very large mutability when compared to transmission lines. This fact is due to the variations of the load demands characteristics in the medium voltage systems. This feature becomes more noticeable in rural areas, where the maneuverability of the load supply becomes limited due to the radial characteristic of the system in these districts. This circumstance, added to the recent modernizations on the countryside, has resulted in a growing load demand in areas far from the feeders in the distribution systems.

As shown in [1], most of the electrical networks in rural areas are single-phase systems. Such configurations are limited in the amount of load they can supply, resulting in several studies that aim to present proposals for the repowering of existing systems.

In [2], different alternatives for rural electrification are analyzed. During the study, the use of the Single Wire Earth Return (SWER) is considered. This system was first developed in New Zealand [3] and has a low implementation cost when compared to a conventional distribution network. However, the SWER is limited to the

supply of single-phase loads only.

In [4] it is presented a methodology based on electromagnetic arrangements that's able to supply three-phase loads through the use of a two-wire distribution system. Despite inducing three phases in the secondary of distribution transformers, the system is only capable of supplying the power equivalent of a two-phase system. This phenomenon occurs because the system uses only two conductors through which all the power flows.

The three-phase two-wire distribution system (TPTW), initially presented in [5], is an unconventional proposal for repowering single wire earth return (SWER), single-phase with neutral return and conventional two-phase systems, with emphasis on networks located in rural areas. The differential of the TPTW in relation to other systems is the use of only two overhead conductors for the distribution of three-phase energy, the third phase being transmitted through the ground. Despite using only two cables in the overhead lines, the TPTW is not limited in two-phase power, being able to supply three-phase loads at full power without harming the energy supply.

In [6] it is executed an analysis of the three-phase two-wire system, observing different possibilities of constructive characteristics and how these parameters affect the quality of the energy supply.

In addition to the study presented in [6], this work analyzes the voltage unbalance (%VU) in the TPTW, considering how the system behaves during the supply of multiple loads at different distances in relation to the feeder. The main contributions of this paper regarding the state of art are:

- Development of a highly customizable test system for TPTW, containing multiple loads with variable power and distance parameters.
- Demonstration that the three-phase two-wire distribution system has characteristics that allow the implementation of long-distance distribution branches without compromising the power quality.

- Verification of the possibility of using the TPTW to power multiple loads from a single distribution network.

The present work is structured in such a way as to initially introduce the main constructive concepts of the TPTW, demonstrating the impedance characteristics that result in a voltage unbalance inherent to the system, and, subsequently, presenting the methodology for estimating this parameter. After that, a methodology for analyzing the behavior of the system is defined. This study is accomplished through the implementation of a test system composed of multiple loads fed by a TPTW branch. From this test system the results are obtained, and these are analyzed and discussed in the following section. At last, the final considerations of the work are presented, resuming the subject and concluding the study.

THREE-PHASE TWO-WIRE DISTRIBUTION SYSTEM

The main feature that differentiates TPTW from conventional three-phase distribution systems is the existence of only two overhead conductors. In this system, the third phase is transmitted through the ground. This feat is accomplished by grounding this phase at the beginning and at the end of the branch.

The characteristic that allows the grounding of one of the phases is the fact that the TPTW is isolated from the rest of the power supply system. This is achieved through an isolation transformer with a transformation ratio one to one. From the secondary winding of this device, one of the phases is connected to a grounding mesh, sized according to the power of the electrical system. The remaining two phases are transmitted normally through overhead conductors until they are connected to the primary winding of a distribution transformer. The third phase in the primary of this equipment is also grounded in a similar way to that executed at the beginning of the section.

Fig. 1. is a circuit representation of a TPTW branch in its most simplified form. This illustration shows the isolation and distribution transformers with their respective connections, both delta-wye. The figure also presents the self and mutual impedances between the overhead conductors Z_S and Z_M , the grounding impedances Z_g , the capacitance between conductors C_{WW} and between conductor and ground C_{Wg} .

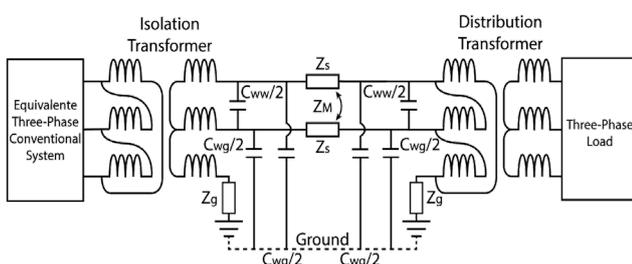


Fig. 1. Three-phase two-wire equivalent circuit

It is worth mentioning that the TPTW distribution system is not limited to the supply of only one load. It is possible to serve multiple customers from the main branch of the power supply system, provided that the elements are properly sized according to their demand of power.

The construction of the TPTW is extremely adaptable, being able to be executed according to the most diverse standards of different energy concessionaires and regulatory agencies. Furthermore, the implementation of this system can be accomplished in a very simple way, not using crossarms on common poles in the branch.

Fig. 2. presents a simplified representation of the construction of a TPTW network.

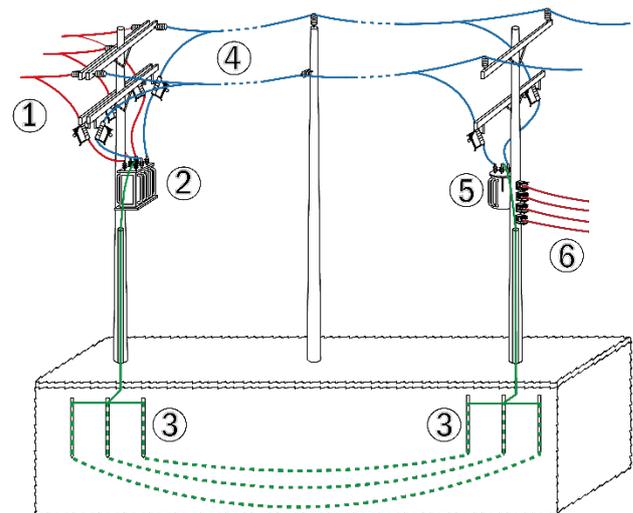


Fig. 2. Simplified representation of a three-phase two-wire network: 1 is the conventional three-phase network, 2 is the isolation transformer, 3 are the grounding spots, 4 are the overhead conductors, 5 is the distribution transformer and 6 is the three-phase low voltage network for powering the loads.

Voltage Unbalance on the TPTW

A fact to be observed in the TPTW model is the impedance difference between the phases on the overhead conductors and the phase transmitted through the ground. Due to the characteristic of the cross-sectional area through which the current flows in the third phase, for medium and long distances, the ground impedance is significantly lower than that of conductor cables. For the three-phase two-wire model the impedance of the grounded phase is mostly defined by the resistance at the grounding spots.

The impedance difference between the phases results in a voltage unbalance observed in the secondary of distribution transformers.

According to the standards defined in the IEEE 1159 [7], a maximum voltage unbalance of 2% between phases is allowed to guarantee quality in the supply of three-phase loads connected to distribution systems.

In order to define the voltage unbalance in the three-phase

two-wire system, it was used the method recommended by the *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ), which correlates the phase-to-phase voltages observed by the load in a dimensionless value, as seen in (1), which is later used to calculate the unbalance as a percentage value, demonstrated in (2).

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (1)$$

$$\% VU = \left(\sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \right) \cdot 100\% \quad (2)$$

METHODOLOGY

As demonstrated in the previous section, the three-phase two-wire distribution system has the characteristic of voltage unbalance intrinsic to its constructive model. Criteria such as load power and network length can have a considerable impact on this parameter.

For an in-depth analysis in the field of power quality related to TPTW, it was implemented a simulation model using the Matlab/Simulink computational software. The purpose of the study is to analyze the behavior of the proposed system for the most diverse implementation scenarios.

Development of a Test System

In order to perform the proposed studies, it was developed a test system through simulation, consisting of a section of the TPTW distribution network that feeds multiple loads with variable power and distance characteristics. The system in question has eight balanced three-phase loads with variable parameters, as can be seen in Fig. 3.

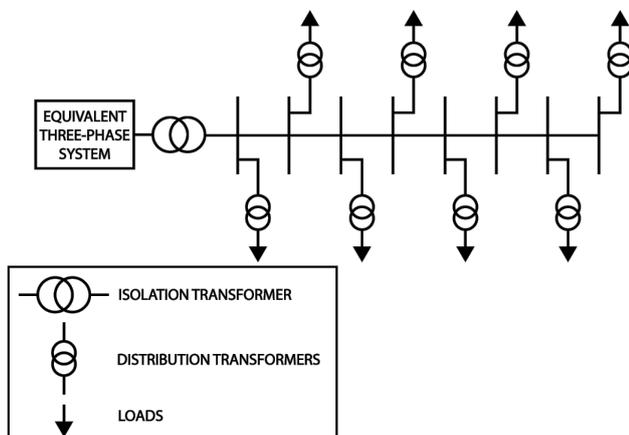


Fig. 3. TPTW test system

The developed test model consists in a radial distribution system that presents the following line parameters:

- 2 AWG aluminum with steel core wires for the overhead conductors, 1.6 m as distance between conductors and 10.37 m as height from the ground to the overhead network.
- The isolation transformer has a one-to-one transformation ratio, operating in medium voltage, at 13.8 kV, with a delta-wye connection between its primary and secondary windings. This equipment has a nominal power of 300 kVA, which is the maximum possible power demand of the implemented electrical system.
- The distribution transformers have a transformation ratio of 13.8 kV to 380 V, with a delta-wye connection. These elements are sized according to the respective loads so as not to exceed, in terms of total power, the nominal limit of the isolation transformer.
- The system feeds eight balanced three-phase loads with a 0.92 inductive power factor. These loads can assume apparent power equal to 15 kVA, 30 kVA, 45 kVA and 75 kVA. The distances between the isolating transformer and each of the loads can vary within a defined range, according to each implementation need.
- The resistance values in the grounding mesh were defined according to the admitted limits for each transformer power connected to the system.

For the purpose of the present study, it was considered the estimation of the voltage unbalance observed by the loads directly on the terminals of the secondary winding of the distribution transformers.

Tests and Results

The dynamics of the tests performed on the developed system were executed as follows: Initially, it was defined a maximum length for the distribution system, which represents the distance between the isolation transformer and the last load fed by the network. After that, all loads were iterated in order to assume all power and distance values within the defined intervals. In this way, for each round of simulations, the system assumes all possible topologies for the eight loads, considering their possible values of power and distance from the beginning of the section.

When performing the simulations, the system obtains and stores the voltage unbalance values for each of the loads in all simulated topologies.

After this stage, it is executed a statistical analysis of the results, returning the arithmetic mean of all voltage unbalances, as well as the standard deviation of the distribution of these values. In addition, it is obtained the information on the maximum voltage unbalance observed throughout the process, indicating which topology presents the worst result among all simulated possibilities. At last, a new maximum length value for the network is

defined, and the system is once again simulated for the new distance parameters.

For the study developed in this work, the following maximum lengths were considered for the TPTW stretch: 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, 35 km, 40 km, 45 km, 50 km, 55 km and 60 km. These distance intervals were chosen in order to consider the economic and technical feasibility of implementing the three-phase two-wire model.

The results of maximum voltage unbalance, average %VU and standard deviation for the multiple simulated scenarios are presented in Table 1.

Subsequently, the results of the simulations are presented graphically, correlating the average unbalance and standard deviation data in Fig. 4., and maximum unbalance observed on the system in Fig. 5.

TABLE 1

VOLTAGE UNBALANCE ON THE MULTI-LOAD TPTW SYSTEM			
Max. Distance	Max. %VU	Mean %VU	S.D.
10 km	0.25 %	0.14 %	0.07 %
15 km	0.63 %	0.16 %	0.09 %
20 km	1.00 %	0.24 %	0.11 %
25 km	1.36 %	0.33 %	0.17 %
30 km	1.71 %	0.44 %	0.23 %
35 km	2.06 %	0.55 %	0.28 %
40 km	2.41 %	0.67 %	0.34 %
45 km	2.74 %	0.77 %	0.40 %
50 km	3.07 %	0.88 %	0.45 %
55 km	3.44 %	1.00 %	0.50 %
60 km	3.72 %	1.11 %	0.55 %

It is worth highlighting the fact that, for all distance scenarios considered for the study, a specific topology stood out for presenting the maximum voltage unbalance among all other iterations.

When considering the possible power values for each of the eight loads, so that the total apparent power of the system does not exceed the limit of the isolating transformer, it was observed that, regardless of the maximum distance of the branch, the maximum voltage unbalance was observed always in the following topology: Five loads of 15 kVA located in the initial portion of the network and three loads of 75 kVA located as far as possible from the isolation transformer, totaling a power

demand equal to the maximum value allowed by the system sizing.

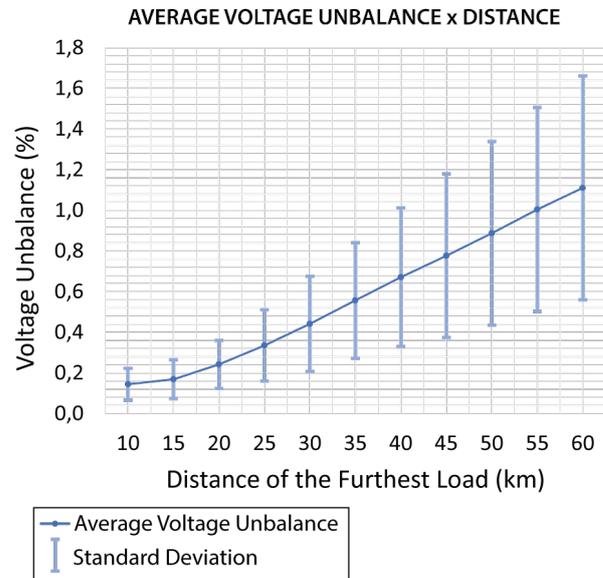


Fig. 4. Average voltage unbalance for each distance

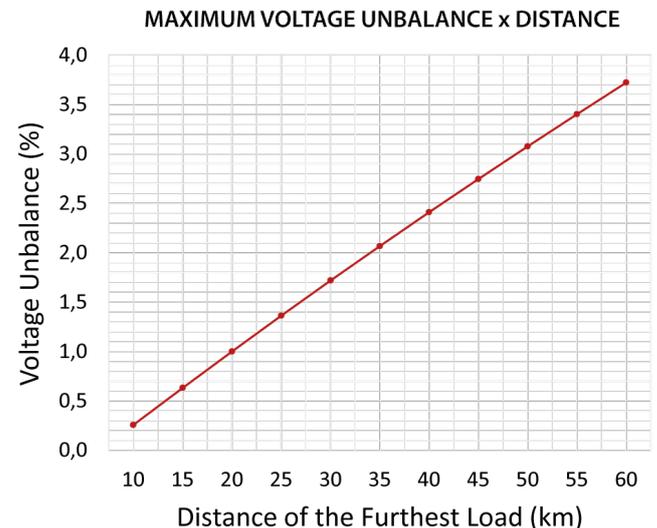


Fig. 5. Maximum voltage unbalance for each distance

Discussion of Results on the Multi-Load Test System

Although the three-phase two-wire distribution system presents the characteristic of voltage unbalance inherent to its constructive model, it was proven through the simulations performed that: For a TPTW system sized according to the established power limit, in a network of up to 30 km, it can be guaranteed a voltage unbalance of less than the 2% defined by the standards.

According to the standard deviation data obtained, it can also be stated that: For a network with the same power

characteristics and a maximum distance of 60 km, approximately 84% of all the implementation topologies simulated presented a voltage unbalance lower than 1.7 %, being that approximately 68% of these cases presented a voltage unbalance between 0.56% and 1.66%.

Furthermore, from the performed study, it was possible to identify which implementation topology characteristics present the worst behaviors related to quality supply in the three-phase system. According to what was obtained, it was noted that systems that have two concentrated cores of power demand divided by a distribution section without loads present a significant increase in the voltage unbalance, mainly for the loads located more distant from the isolation transformer.

CONCLUSION

The three-phase two-wire distribution system is a viable alternative for the repowering of distribution lines, mainly within networks located in rural areas. Despite having only two cables for conducting energy, it is capable of supplying three-phase loads operating at full demand.

Due to its construction characteristics, the TPTW presents an impedance difference between each of its phases, resulting in a voltage unbalance between the phases observed by the loads. This parameter can be said as one of the main topics associated with the quality of three-phase power supply.

The characteristics in a distribution branch that have the most impact on the measured voltage unbalance value are the length of the network and the power demanded by the system. Considering this fact, this work presented a proposal for a test system that can have its parameters varied in order to adapt to any required experiments.

From the developed system, it was performed a battery of simulations in order to determine the behavior of the TPTW network for the most diverse implementation scenarios.

The results obtained through the experiments demonstrated that, with regard to the voltage unbalance, the three-phase two-wire system can be seen as a viable alternative for repowering distribution networks. According to these same data, it could be concluded that for the vast majority of the analyzed scenarios the unbalance between phases is such that it is not necessary to actively act on the system in order to compensate the impedance differences of the distribution lines.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the *Equatorial Energia* for contributing to this work through Research and Development Program of Brazilian Electricity Regulatory Agency (Contract: CEEE-D 5000003852). We would also like to thank the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES/PROEX) Funding Code 001 and National Council for Scientific and

Technological Development (PQ1D 306375/2018-4) for the financial support.

REFERENCES

- [1] C.W. Holland, “Single Wire Earth Return for Remote Rural Distribution Reducing Costs and Improving Reliability”, CRC Press. Maunsell Ltd., An AECOM Company, 47 George St., Newmarket, Auckland, New Zealand, 2017.
- [2] J. S. C. Huertas and M. C. Tavares, "Analyzing Rural Electrification Topologies Based on Induced Voltage at Insulated Shielding Wires," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 53-62, Feb. 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2880427.
- [3] L. Mandeno, “Rural Power Supply, especially in back country areas”, *Proc. N. Z. Inst. Eng.* 33 (1947), 234.
- [4] J. C. O. Fandi, J. R. Macedo, I. N. Gondim, J. C. de Oliveira, and G. C. Guimarães, “Two-wire distribution system for supplying three-phase rural loads,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 24, no. 4, pp. 481–492, Aug. 2013, doi: 10.1007/s40313-013-0036-z.
- [5] P. R. O. Borges et al., “Repowering rural single-phase distribution network: A non-conventional proposal using two overhead wires and the ground as the third phase,” *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 105–117, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.001.
- [6] G. Marchesan et al., "Three-phase-two-wire rural distribution network: influence of design characteristics on voltage unbalance," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3196602.
- [7] IEEE Std 1159, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, vol. 2019. 2019.

3. ARTIGO 2 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO T2F: VERIFICAÇÃO DA EFETIVIDADE DAS METODOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

Neste capítulo está apresentado o segundo artigo científico utilizado no desenvolvimento desta monografia. Este trabalho foi submetido, aprovado, publicado e apresentado ao “**IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**”, Santa Maria, RS, Brasil, 2022, e está de acordo com as normas de submissão do congresso.

Este trabalho apresenta um complemento ao estudo anterior ao analisar diferentes metodologias que se propõe a eliminar o fenômeno do desequilíbrio de tensão do sistema de distribuição trifásico à dois fios.

SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO T2F: VERIFICAÇÃO DA EFETIVIDADE DAS METODOLOGIAS DE COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO

Silveira, Leonardo de Freitas*, Oliveira, Aécio de Lima*,
Junior, Ghendy Cardoso*, Marchesan, Gustavo*

* Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência – CEESP
Santa Maria, RS, Brasil
E-mail: leonardofsil@hotmail.com

Abstract: This work presents a study of the effectiveness of the compensation impedance calculation methodology for the intrinsically unbalanced three-phase power distribution system (T2F). The calculation methodology in question is based on the Carson's image method to obtain impedance values that, when arranged longitudinally and transversally to the system, equalize it in order to reduce voltage unbalance levels (%DT). The comparison of the effectiveness of the calculated compensation is performed through the proposal of a computational method to obtain the impedance values that equalize the system in order to completely eliminate the unbalance between the phases. This study shows that factors such as the value of impedances implemented and their arrangement in the system directly imply the results of %DT measured in the load coupled to the circuit.

Resumo: O presente trabalho apresenta um estudo da efetividade da metodologia de cálculo de impedâncias de compensação para o sistema de distribuição de energia trifásica a dois fios (T2F), intrinsecamente desbalanceado. A metodologia de cálculo em questão baseia-se no método das imagens de Carson para a obtenção dos valores de impedâncias que, quando dispostas de forma longitudinal e transversal ao sistema, equalizam o mesmo de modo a reduzir os níveis de desequilíbrio de tensão (%DT). A comparação da efetividade da compensação calculada é realizada através da proposta de um método computacional para a obtenção dos valores de impedância que equalizam o sistema de forma a eliminar completamente o desbalanço entre as fases. Este estudo mostra que fatores como o valor das impedâncias implementadas e a disposição das mesmas no sistema implicam diretamente nos resultados de %DT medidos na carga acoplada ao circuito.

Keywords: Compensation impedance; T2F; Carson's image method; Voltage unbalance; Computational method;

Palavras-chaves: Impedâncias de compensação; T2F; Método das Imagens de Carson; Desequilíbrio de tensão; Método computacional;

1. INTRODUÇÃO

O modelo de distribuição de energia elétrica T2F, proposto em [1] consiste em um ramal trifásico onde duas fases são transmitidas através de condutores aéreos enquanto a terceira fase é transmitida pelo solo. Este tipo de implementação é uma solução aprazível para a redução de custos nos processos de repotenciação de linhas de distribuição, com enfoque nas malhas localizadas em zonas rurais, como demonstrado em [2].

Neste aspecto, a metodologia T2F tem como principal justificativa incrementar as capacidades de transmissão de potência de sistemas de distribuição já existentes, como os modelos monofilar com retorno por neutro (MRN) e monofilar com retorno por terra (MRT) [3], vastamente utilizados para alimentar cargas rurais devido ao baixo custo com material (ferragens, cruzetas, isoladores, etc.), além da maior facilidade de implementação se comparados à modelos tradicionais.

Todavia, estes sistemas vêm experienciando uma crescente demanda energética devido às modernizações no campo, nas esferas da agricultura e agropecuária, com a difusão de novas tecnologias voltadas a automatização de diversas atividades que eram anteriormente realizadas de forma manual.

Por vezes, os atuais modelos de sistemas de distribuição que alimentam cargas rurais não são suficientemente dimensionados de forma a suprir esta crescente demanda de potência, fazendo com que se busque alternativas viáveis para a repotenciação das malhas. Dentre diversas alternativas surgiram sistemas como o apresentado em [4], que propõem a alimentação de cargas trifásicas com dois condutores baseado em conceitos de diferenças de ângulos entre as fases no primário. Sistemas de distribuição com esta configuração, porém, acabam sendo limitados pela máxima potência trifásica que pode ser entregue a carga.

Sob esta ótica, o sistema T2F demanda uma menor quantidade de componentes materiais se comparado a modelos trifásicos tradicionais, devido à utilização de apenas

dois condutores aéreos além do reaproveitamento de diversos componentes já existentes nos sistemas de distribuição monofásicos e bifásicos. Além disso, não possui os fatores limitantes presentes em [4]. Estas características o tornam uma alternativa significativamente viável nos processos de incrementação dos sistemas de distribuição.

Apesar de menos oneroso, por definição, o modelo T2F possui um desbalanço de tensão intrínseco entre as fases, devido às diferenças das características de resistividade entre o solo e os condutores aéreos. Este fenômeno resulta na observação de tensões desequilibradas nas cargas acopladas ao sistema que, por vezes, superam os limites máximos de desequilíbrio de tensão admitidos no sistema trifásico.

Desta forma, o presente estudo propõe uma sistemática para a análise comparativa da real efetividade do método de cálculo conhecido para a correção destes desequilíbrios entre as fases do sistema de distribuição trifásica a dois fios.

2. METODOLOGIA PARA CÁLCULO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO ENTRE AS FASES (%DT)

Em diversas situações ao longo deste estudo foi necessária a informação dos valores de desequilíbrio de tensão entre as fases, medido juntamente a carga acoplada ao sistema de distribuição. Em [5] e [6] foram realizadas análises da eficácia dos métodos mais utilizados para a estimação dos níveis de desbalanço. Nestes estudos os autores realizam uma análise comparativa entre quatro métodos conhecidos para o cálculo de %DT, dentre eles o método das componentes simétricas, o método NEMA, o método CIGRÉ e o método IEEE. É concluído pelos autores que dentre as metodologias empregadas, o método das componentes simétricas e o método de CIGRÉ retornam valores praticamente idênticos de %DT, ao passo que o método IEEE apresenta os valores mais discrepantes dentre os quatro estudados.

Dado os resultados dos estudos descritos acima, para as implementações realizadas no decorrer desta pesquisa, foi utilizado o método CIGRÉ (*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*) com a finalidade de estimar os valores de desbalanço de tensão. A aplicação de tal método se dá, inicialmente, correlacionando os valores de tensão fase-fase em uma grandeza adimensional, como visto em (3), que posteriormente é utilizada para calcular %DT, como visto em (4).

$$\beta = \frac{V_{AB}^4 + V_{BC}^4 + V_{CA}^4}{(V_{AB}^2 + V_{BC}^2 + V_{CA}^2)^2} \quad (3)$$

$$\%DT = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}{1 + \sqrt{3 - 6 \cdot \beta}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Os limites para %DT são definidos por normas emitidas por diversos órgãos reguladores de diferentes países de acordo com o nível de tensão em que o sistema opera. Uma relação com os principais valores máximos de desbalanço pode ser observada na Tabela 1.

Para este trabalho foram considerados os limites definidos de acordo com os padrões e procedimentos de distribuição de energia elétrica (PRODIST) normatizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [7]. Durante o estudo, todas as estimativas de %DT foram realizadas de acordo com os níveis de tensão medidos nos terminais do enrolamento primário do transformador de distribuição, operando em média tensão. Por este motivo, de acordo com a Tabela 1, foi definido 2% como o máximo desbalanço admissível para o sistema de distribuição implementado.

Tabela 1
LIMITES DE %DT CONFORME NÍVEL DE TENSÃO

Norma	Limites de %DT		
	BT	MT	AT
PRODIST/ANEEL	-	2%	2%
ANSI	3%	3%	3%
IEC	2%	2%	2%
NOS	2%	2%	2%
IEEE Orange Book	2%	2%	2%

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA IMPEDÂNCIAS DE COMPENSAÇÃO

Ao considerarmos o modelo de distribuição T2F em sua forma mais simples, observa-se um ramal contendo dois transformadores cujos uma das fases é aterrada além de dois condutores aéreos, como pode ser visto na Figura 1. É válido ressaltar, porém, que neste circuito estão omitidas as capacitâncias próprias e mútuas do sistema.

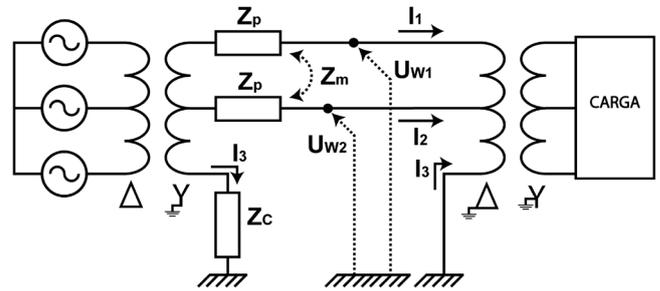


Fig. 1: Circuito equivalente de impedâncias T2F.

Onde U_{w1} e U_{w2} são os fasores de tensão condutor-terra, I_1 , I_2 e I_3 são as correntes que fluem pelas três fases, Z_p são as impedâncias próprias e Z_m é a impedância mútua dos condutores. Ao desconsiderar os efeitos capacitivos, através da lei das tensões de Kirchoff, é possível equacionar as malhas dos condutores aéreos de acordo com (5) e (6).

$$U_1 = Z_p \cdot I_1 + Z_m \cdot I_2 \quad (5)$$

$$U_2 = Z_p \cdot I_2 + Z_m \cdot I_1 \quad (6)$$

Onde U_1 e U_2 são as quedas de tensão nas fases transmitidas pelos condutores.

Sabe-se que a soma das correntes do sistema deve ser igual a zero, desta forma o retorno de corrente pelo solo pode ser definido como a soma das correntes que fluem pelos condutores. Sob esta ótica pode-se definir a queda de tensão na fase transmitida pelo solo de acordo com (7).

$$U_3 = Z_s \cdot I_3 = Z_s \cdot (I_1 + I_2) \quad (7)$$

Onde Z_s é a impedância equivalente do solo.

A impedância de cada um dos condutores aéreos pode ser definida como a diferença entre a impedância própria de cada uma das fases e a impedância mútua entre os condutores, como visto em (8). Este valor, porém, é diferente da impedância equivalente de solo, o que resulta em um desbalanço de tensão inerente a este modelo de sistema de distribuição trifásico.

$$Z_L = Z_p - Z_m \quad (8)$$

Com a finalidade de tornar o sistema equilibrado, adiciona-se uma impedância de compensação em série à fase aterrada. Tal impedância pode ser calculada de acordo com (9).

$$Z_C = Z_L - Z_S = Z_p - 2 \cdot Z_m \quad (9)$$

A compensação longitudinal, porém, não é suficiente para corrigir completamente o desequilíbrio inerente ao sistema, desta forma, faz-se necessário a implementação de uma equalização transversal. Tal elemento tem a finalidade de compensar as diferenças capacitivas entre as fases, resultado das diferentes distâncias entre os condutores e o solo. O valor desta impedância pode ser extraído da matriz das capacitâncias do sistema. Tal matriz é obtida ao calcular a inversa da matriz dos coeficientes de potencial próprios e mútuos do sistema, definida a partir do método das imagens de Carson [8], definido em (10).

$$V_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot \sum_{n=1}^N q_n \cdot \ln \frac{D_{nj}}{D_{ni}} \quad (10)$$

Onde ϵ é a permissividade média, que pode ser definida relacionando a permissividade do ar ($8,85 \times 10^{12} F/m$) e a permissividade média relativa ($\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$). A densidade de carga de cada um dos condutores n é dada por q_n , ao passo que D_{ni} é a distância entre o condutor n e o condutor i e D_{nj} é a distância entre o condutor n e o condutor j , ambas

medidas em metros. Aplicando esta metodologia para um sistema composto por dois condutores aéreos e o solo como terceira fase, pode-se obter a queda de tensão total entre o condutor i e suas imagens, demonstrado em (11), tal como a queda de tensão entre este mesmo condutor i e a terra, apresentado em (12).

$$V_{ii'} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \cdot (2 \cdot q_i \ln \frac{D_{ii'}}{R_{Di}} + 2 \cdot q_j \ln \frac{D_{ij'}}{D_{ij}}) \quad (11)$$

$$V_{ig} = \frac{1}{2\pi\epsilon} (q_i \ln \frac{D_{ii'}}{R_{Di}} + q_j \ln \frac{D_{ij'}}{D_{ij}}) \quad (12)$$

Onde i' e j' são as imagens dos condutores i e j , respectivamente e R_{Di} é o raio do condutor i . Este valor é utilizado quando é adicionado ao equacionamento a distância entre um condutor e ele próprio.

Os coeficientes de potencial próprios e mútuos podem ser definidos a partir de (12) escrevendo-a como mostrado em (13).

$$V_{ig} = \hat{P}_{ii} \cdot q_i + \hat{P}_{ij} \cdot q_j \quad (13)$$

Neste caso \hat{P}_{ii} representa o coeficiente de potencial próprio enquanto \hat{P}_{ij} representa o coeficiente de potencial mútuo. Considerando os valores de permissividade em pico Farad por metro e assumindo a permissividade média relativa do ar como 1,0, pode-se definir estes coeficientes como demonstrado em (15) e (16).

$$\epsilon_{ar} = 1,0 \times 8,85 \text{ pF} / m \quad (14)$$

$$\hat{P}_{ii} = 1,7984 \times 10^{-2} \ln \frac{D_{ii'}}{R_{Di}} \quad (15)$$

$$\hat{P}_{ij} = 1,7984 \times 10^{-2} \times \ln \frac{D_{ij'}}{D_{ij}} \quad (16)$$

A matriz apresentada em (17) representa a forma reduzida da matriz primitiva dos coeficientes de potencial próprios e mútuos que descrevem um sistema trifásico com n condutores em ligação do tipo estrela aterrada. Esta matriz pode ser submetida a redução de Kron, apresentada em (18), com a finalidade de se obter a inversa da matriz das capacitâncias próprias e mútuas do sistema.

$$\hat{P}_{primitiva} = \begin{bmatrix} \hat{P}_{ij} & \hat{P}_{in} \\ \hat{P}_{nj} & \hat{P}_{nm} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] \cdot [\hat{P}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{P}_{nj}] \quad (19)$$

Desta forma, basta inverter a matriz dos coeficientes de potencial a fim de se obter a matriz das capacitâncias próprias e mútuas do sistema, mostrada em (20), da qual será extraída a informação da capacitância de equalização correspondente à linha implementada. A obtenção deste valor para a compensação transversal do sistema se dá a partir do cálculo da diferença entre a capacitância de uma das fases para com o solo e a capacitância mútua entre os condutores aéreos. Esta operação está descrita em (21).

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} \quad (20)$$

$$C_{eq} = C_{AT} - C_{AB} = C_{BT} - C_{AB} \quad (21)$$

A disposição das capacitâncias no sistema T2F se dá de acordo com o representado na Figura 2.

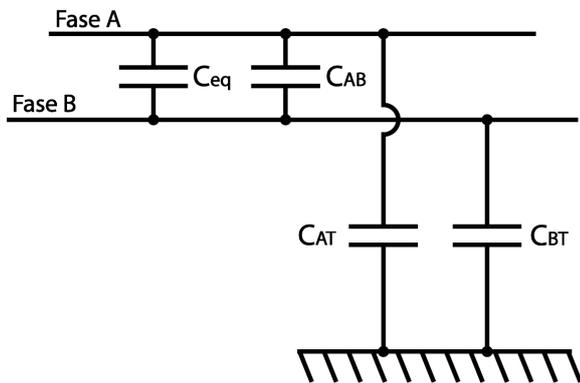


Fig. 2: Circuito equivalente de Capacitâncias T2F.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

De forma a observar a real efetividade da metodologia descrita para o cálculo das impedâncias de compensação, inicialmente foi proposto um sistema teste composto por um ramal T2F alimentando uma única carga trifásica balanceada. Este sistema é composto por um transformador isolador 1:1 com ligação delta-estrela, seguido de um trecho de sistema de distribuição trifásico a dois fios operando em tensão 13,8 kV, um transformador de distribuição 13800:380 V com ligação delta-estrela, uma carga trifásica de 45 kVA com fator de potência 0,8 além de componentes de compensação em série com a fase aterrada e entre os condutores aéreos. O trecho de distribuição foi implementado em software de simulação (*Matlab/Simulink*) utilizando os seguintes parâmetros construtivos:

Comprimento do trecho: 60 km;

Condutores aéreos: Condutor de alumínio bitola 2 AWG;

Distância entre os condutores aéreos: 1,2 m;

Distância entre o condutor mais alto e o solo: 10,372 m;

Impedância própria dos condutores: $1,1612 + j 0,9446 \Omega/\text{km}$;

Impedância mútua dos condutores: $0,0592 + j 0,4949 \Omega/\text{km}$;

É válido ressaltar que para a implementação em questão foi considerado um sistema de distribuição adaptado composto por postes sem cruzetas com isoladores distanciados verticalmente com distância entre os condutores aéreos tal qual descrito acima, como ilustrado na Figura 3.

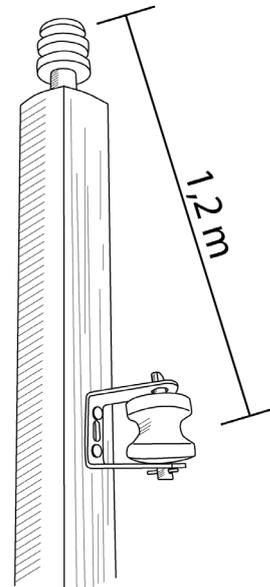
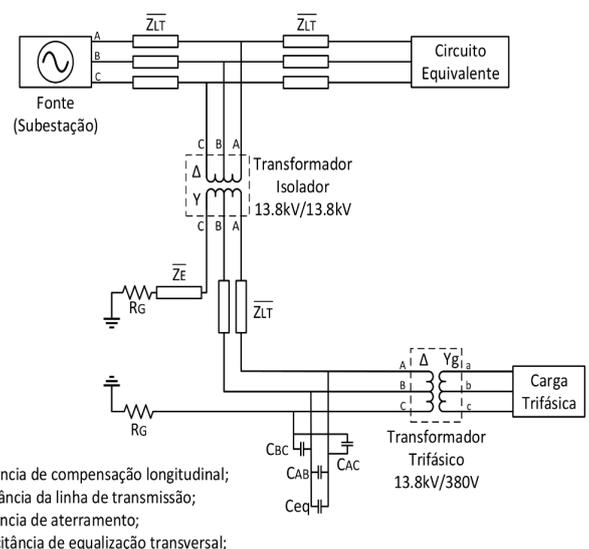


Fig. 3: Poste adaptado para implementação do T2F.

4.1. Implementação do Circuito Teste

Dadas as características do sistema como descrito anteriormente foi implementado o circuito para testes dos valores de desbalanço de tensão para diferentes situações. A representação esquemática do circuito teste está apresentada na Figura 4, enquanto o circuito simulado, implementado com o auxílio do software *Matlab/Simulink*, pode ser observado na Figura 5.



\bar{Z}_E = Impedância de compensação longitudinal;
 \bar{Z}_{LT} = Impedância da linha de transmissão;
 R_G = Resistência de aterramento;
 C_{eq} = Capacitância de equalização transversal;

Fig. 4: Esquemático do circuito teste.

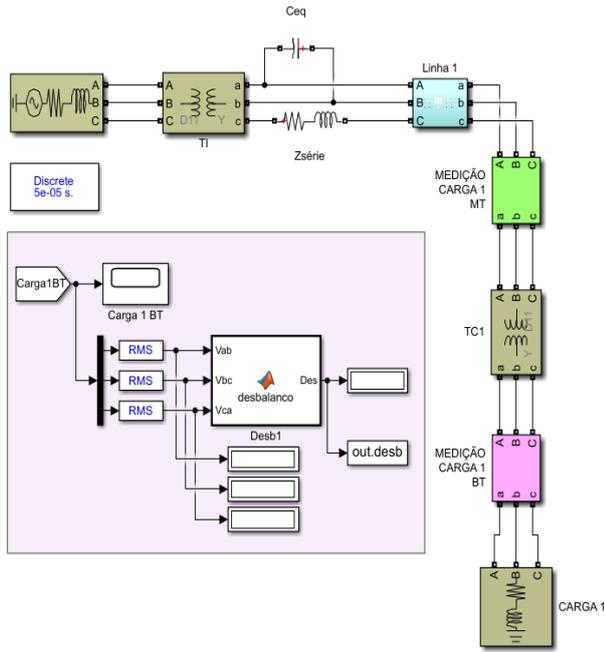


Fig. 5: Circuito implementado para simulação.

4.2. Efetividade da metodologia de compensação comparada ao sistema não compensado.

Após implementado o circuito de simulação para testes, foram obtidos os dados de tensão medidos na carga trifásica alimentada pelo ramal de distribuição T2F. Tais valores foram utilizados para avaliar os níveis de desbalanço de tensão entre as fases, inicialmente para o sistema não compensado, e posteriormente considerando a implementação das impedâncias de compensação de acordo com a metodologia proposta em [8], descrita anteriormente.

Para o ramal de distribuição T2F com 60 km de extensão, implementado de acordo com as especificações descritas no item 3 deste documento, obteve-se os seguintes valores para as compensações em série à fase aterrada e entre os condutores aéreos:

$$Z_{série} = 62,5669 - j \cdot 2,7073 \Omega \quad (5)$$

$$C_{eq} = 1.4619 \times 10^{-7} F \quad (6)$$

Para o sistema operando em 60 Hz obteve-se uma reatância negativa com um valor muito próximo de zero como resultado na impedância série de compensação. Por este motivo, para fins de simulação, adotou-se zero para este valor de reatância, compensando longitudinalmente o sistema apenas com elementos resistivos.

Com a finalidade de se obter o melhor desempenho na compensação de desbalanço de tensão com a inserção das impedâncias obtidas em (5) e (6) foram utilizadas três topologias para a implementação destes componentes. Na primeira topologia, ambos os elementos de compensação são dispostos diretamente a jusante do transformador isolador, como pode ser visto na figura 6. Para a segunda topologia,

impedância série é mantida à jusante do transformador isolador ao passo que a capacitância de equalização é disposta à montante do transformador de distribuição, juntamente a carga, como observado na figura 7. Por fim, na terceira topologia, a impedância série é mantida novamente à jusante do transformador isolador enquanto a equalização entre as fases aéreas é realizada metade junto ao transformador isolador e metade junto ao transformador de distribuição próximo à carga, como demonstrado na figura 8.

Para as três topologias implementadas tal qual para o sistema não compensado fora realizadas as estimativas dos valores de %DT percebidos nos terminais do transformador de distribuição, de acordo com a metodologia descrita no item 2 deste estudo.

Para todas as representações a seguir foram omitidas as capacitâncias do sistema, com exceção da capacitância de equalização, tal como as impedâncias mútuas entre as fases, com a finalidade de se ter uma melhor visualização da disposição dos componentes de compensação.

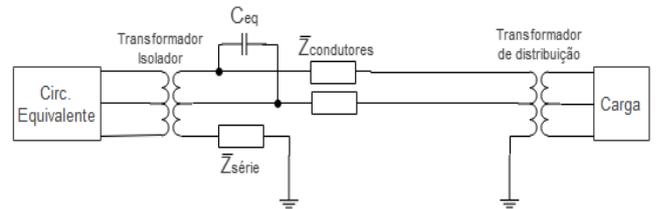


Fig. 6: Topologia de compensação 1.

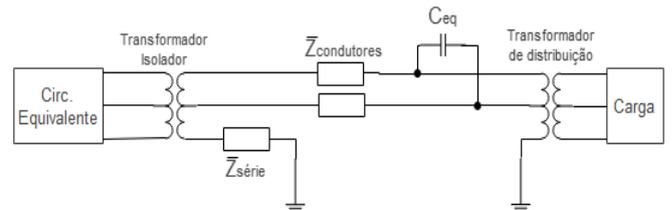


Fig. 7: Topologia de compensação 2.

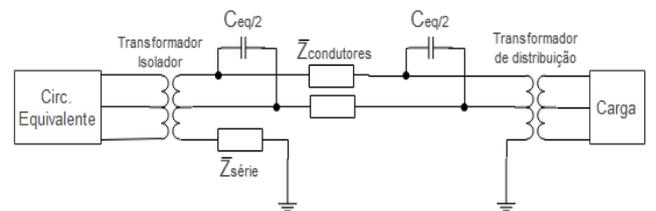


Fig. 8: Topologia de compensação 3.

4.3. Desequilíbrios de tensão para a compensação através do método de cálculo.

A partir da implementação em software de simulação das três topologias descritas para a compensação e do sistema não compensado, obteve-se os valores de desequilíbrio de tensão medidos na carga. Estes dados estão apresentados na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2

DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO MEDIDOS

Sistema	%DT
Não Compensado	0,95%
Compensado (Topologia 1)	0,52%
Compensado (Topologia 2)	0,19%
Compensado (Topologia 3)	0,34%

Como pode ser visto a partir dos dados obtidos, a inserção dos elementos de compensação calculados apresenta um impacto significativo na redução do desequilíbrio de tensão. Ademais, a forma como são dispostos os elementos de compensação transversal também implicam diretamente neste valor. Desta forma, concluiu-se que: para o sistema teste estudado, a disposição da capacitância de equalização de acordo com a topologia 2, onde este elemento é inserido próximo a carga alimentada pelo T2F, apresentou o menor desequilíbrio de tensão dentre todos os quatro cenários implementados. A implementação de acordo com a topologia 1 foi a menos efetiva, apesar de apresentar uma significativa redução de %DT se comparada ao sistema não compensado.

5. MÉTODO PARA A OBTENÇÃO DAS COMPENSAÇÕES ÓTIMAS

Como explicitado em [2] e comprovado durante o presente estudo, as impedâncias de compensação obtidas através do método para cálculo proposto são de grande importância para reduzir os níveis de desbalanço de tensão, porém, não são suficientes para eliminá-lo completamente. Isto se dá principalmente pelo fato destas impedâncias estarem concentradas em um único elemento de compensação, ao invés de distribuídas uniformemente por toda a extensão do T2F. Apesar do método de cálculo não ser completamente eficiente, existem matematicamente valores de impedâncias que equalizam completamente o sistema, resultando na ausência de desequilíbrios entre as fases medidos na carga acoplada.

Baseado nisso foi proposto um método computacional para encontrar estes valores de impedância de compensação ditos ótimos, que eliminem completamente os desbalanços de tensão no sistema T2F.

5.1. Definição de um espaço amostral.

O método proposto consiste em definir um espaço amostral composto por um intervalo para as impedâncias de compensação. Após definido este intervalo, são extraídos valores de impedância de forma discretizada deste espaço amostral, sendo estes utilizados como elementos de compensação do sistema T2F. Para cada combinação de elementos de compensação longitudinal e transversal são extraídas armazenadas as informações de desequilíbrio de tensão até que se obtenha um desbalanço nulo.

Como mencionado, o método de definição das impedâncias de compensação se dá através da discretização do intervalo de busca. Isto implica que a resolução da discretização, que define o número de amostras do intervalo, impacte diretamente na eficiência computacional do código. Desta maneira, os intervalos entre as amostras devem ser definidos de forma a se obter uma boa eficiência do processo computacional, porém obedecendo os critérios para intervalos de amostragem definidos por Nyquist com a finalidade de evitar a perda de mínimos globais, como ilustrado na Figura 9.

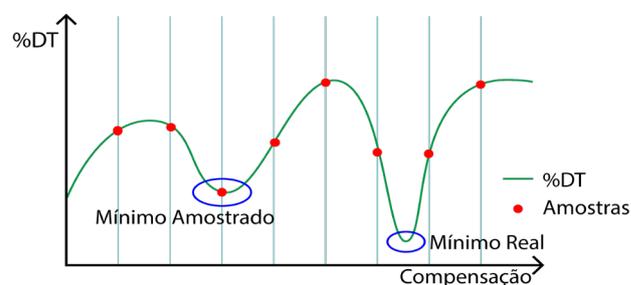


Fig. 9: Critério para intervalos de amostragem.

Ainda com a finalidade de aumentar a eficiência computacional do método, foi proposto um modelo de busca discretizado em duas etapas, como ilustrado na Figura 10. Na primeira etapa é definido um intervalo de busca com uma certa resolução de amostragem, e para tal são realizadas as operações a fim de se obter os desequilíbrios de tensão no sistema. Após isso, é encontrado o menor %DT dentre todas as amostras utilizadas, e, a partir das impedâncias correspondentes, é definido um novo intervalo de busca menor, o que permite uma resolução de amostragem consideravelmente maior se comparado intervalo inicial. Para esta segunda etapa são realizadas novamente as medições e a partir do menor %DT dentre todas as amostras são obtidas as impedâncias de compensação correspondente.

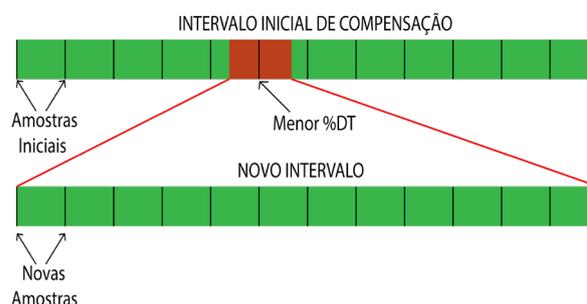


Fig. 10: Definição dos intervalos de busca.

5.2. Desequilíbrios de tensão para o sistema compensado pelo método computacional.

Assim como feito para o método de cálculo para definir as impedâncias de compensação, para a metodologia computacional também foram consideradas três topologias com diferentes disposições dos elementos capacitivos transversais. Estas topologias são exatamente as mesmas mostradas nas figuras 4, 5 e 6, apresentadas na seção 4.2 deste estudo.

Definido o método para a busca dos valores ótimos de impedância de compensação, a próxima etapa foi estabelecer intervalos de impedâncias para o espaço amostral inicial. Estes intervalos foram utilizados para a primeira busca em todas as três topologias testadas. Os limites dos intervalos definidos são as seguintes:

- R_{eq} variando de 0Ω a 100Ω com intervalos de 10Ω .
- L_{eq} variando de $0H$ a $150mH$ com intervalos de $15mH$.
- C_{eq} variando de $0F$ a $300nF$ com intervalos de $30nF$.

Após estabelecidos os intervalos foram realizadas as simulações para as três topologias. A partir do resultado de menor %DT encontrado para cada caso foram estimados os novos intervalos de busca, de acordo com o descrito pelo método proposto. É válido ressaltar que a reatância série de compensação ótima apresenta um valor negativo muito próximo de zero para as três topologias implementadas no sistema teste estudado. Por este motivo, a compensação série a priori indutiva foi desconsiderada para a segunda etapa de busca computacional, assumindo apenas a implementação de componentes resistivos em série a fase aterrada.

Os resultados de impedâncias ótimas e %DT obtidos a partir dos intervalos iniciais de busca para cada uma das topologias implementadas podem ser observados na Tabela 3. De forma semelhante, estes mesmos dados referentes as buscas nos novos espaços amostrais estão descritos na Tabela 4.

Tabela 3

RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA DE BUSCA

Topologia	Intervalo Inicial (Ω)(H)(F)	Impedâncias Ótimas	%DT
1 (Fig. 4)	$R_{eq} = [0 - 100, 10]$	$R_{eq} = 70\Omega$	0,029%
	$L_{eq} = [0 - 0.15, 0.015]$	$L_{eq} = 0H$	
	$C_{eq} = [0 - 0.3\mu, 30n]$	$C_{eq} = 0,27\mu F$	
2 (Fig. 5)	$R_{eq} = [0 - 100, 10]$	$R_{eq} = 40\Omega$	0,065%
	$L_{eq} = [0 - 0.15, 0.015]$	$L_{eq} = 0H$	
	$C_{eq} = [0 - 0.3\mu, 30n]$	$C_{eq} = 0,15\mu F$	
3 (Fig. 6)	$R_{eq} = [0 - 100, 10]$	$R_{eq} = 60\Omega$	0,050%
	$L_{eq} = [0 - 0.15, 0.015]$	$L_{eq} = 0H$	
	$C_{eq} = [0 - 0.3\mu, 30n]$	$C_{eq} = 0,21\mu F$	

Tabela 4

RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA DE BUSCA

Topologia	Intervalo Inicial (Ω)(H)(F)	Impedâncias Ótimas	%DT
1 (Fig. 4)	$R_{eq} = [60 - 80, 2]$	$R_{eq} = 74\Omega$	0,006%
	$L_{eq} = 0H$	$L_{eq} = 0H$	
	$C_{eq} = [225n - 375n, 15n]$	$C_{eq} = 0,270\mu F$	
2 (Fig. 5)	$R_{eq} = [30 - 50, 2]$	$R_{eq} = 44\Omega$	0,038%
	$L_{eq} = 0H$	$L_{eq} = 0H$	
	$C_{eq} = [75n - 225n, 15n]$	$C_{eq} = 0,165\mu F$	
3 (Fig. 6)	$R_{eq} = [50 - 70, 2]$	$R_{eq} = 56\Omega$	0,022%
	$L_{eq} = 0H$	$L_{eq} = 0F$	
	$C_{eq} = [135n - 285n, 15n]$	$C_{eq} = 0,195\mu F$	

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser observado a partir dos resultados das simulações, após as duas etapas propostas para a busca computacional, obteve-se valores de desequilíbrio de tensão praticamente desprezíveis considerando as dimensões do circuito teste implementado. Associados a estes valores de %DT também foram encontrados os valores de impedância de compensação correspondentes.

Ao comparar as topologias estudadas observa-se uma diferença significativa nos valores de impedâncias ótimas. Este fato implica que a disposição das capacitâncias de equalização impacta não somente no desbalanço medido, mas também no valor de resistência de compensação série necessário para se obter o menor %DT.

Observando os resultados para as diferentes disposições estudadas nota-se que para a topologia 2, onde a capacitância de equalização é acoplada diretamente a montante do transformador de distribuição, os valores de compensação tanto longitudinal quanto transversal que retornaram o menor %DT foram os menores dentre as topologias. Este fato é de grande importância pois os valores de impedância de compensação, principalmente a potência reativa capacitiva a ser acoplada ao sistema, estão diretamente ligados com os custos de instalação.

6.1. Efetividade do método de cálculo das impedâncias de compensação.

Ao obter os resultados pelo método computacional que retornem %DT muito próximo de zero pode se fazer uma análise comparativa da discrepância entre os valores de impedância de compensação calculados e os valores ideais para cada uma das topologias. A Tabela 5 apresenta os erros absolutos e relativos percentuais para cada modelagem

implementada. Ao assumir que a reatância de compensação série foi desconsiderada na maioria das etapas estudadas, esta não foi submetida às comparações.

Tabela 5

COMPARATIVO ENTRE O MÉTODO DE CÁLCULO E O MÉTODO COMPUTACIONAL

Topologia	Compensação Calculada	Impedância Ótima	Erro Absoluto	Erro Relativo
1	$R_{eq} = 66,57\Omega$	$R_{eq} = 74\Omega$	$-7,43\Omega$	$-11,16\%$
	$C_{eq} = 0,146\mu F$	$C_{eq} = 0,270\mu F$	$-124nF$	$-84,93\%$
2	$R_{eq} = 66,57\Omega$	$R_{eq} = 44\Omega$	$22,57\Omega$	$+33,90\%$
	$C_{eq} = 0,146\mu F$	$C_{eq} = 0,165\mu F$	$-19nF$	$-13,01\%$
3	$R_{eq} = 66,57\Omega$	$R_{eq} = 56\Omega$	$10,57\Omega$	$15,87\%$
	$C_{eq} = 0,146\mu F$	$C_{eq} = 0,195\mu F$	$-49nF$	$-33,56\%$

A partir desta análise pode-se concluir que as diferenças entre o método de cálculo e as impedâncias ótimas foram variados para os elementos longitudinais e transversais. Para a compensação série, a topologia para qual o método de cálculo mais se aproximou dos valores ideais foi a 1, ao passo que a topologia 2 apresentou a maior discrepância entre os valores. Para a compensação transversal, por sua vez, a topologia 2 apresentou a menor diferença, à medida que a topologia 1 foi a mais discrepante.

Ao observar os valores de desbalanço de tensão obtidos para o método de cálculo nas três topologias, e fazer uma relação com os erros nos valores de impedância calculados, pode-se afirmar que variações na compensação transversal resultam em um impacto maior no %DT se comparado a variações na compensação longitudinal.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo propôs a verificação da real efetividade do método conhecido para a determinação através de cálculo das impedâncias de compensação longitudinal e transversal a serem acopladas ao sistema de distribuição T2F. Esta averiguação foi realizada através da análise comparativa entre os valores de compensação calculados e os valores ditos ótimos, que apresentam %DT desprezível, obtidos através de métodos computacionais.

Como observado para as duas metodologias estudadas, nota-se que a disposição dos elementos de compensação transversal implica diretamente nos valores de desequilíbrio de tensão medidos na carga. Este fato é comprovado pela mudança diretamente nos resultados de %DT para o método de cálculo e pela obtenção de diferentes valores de impedâncias ótimas para o método computacional.

Ao analisar a forma de compensação empregada no sistema estudado conclui-se que, para o método de cálculo, os valores de desbalanço de tensão diferem de zero devido ao fato de que os elementos compensativos se encontram concentrados em um espaço físico pontual do sistema elétrico ao invés de igualmente distribuídos ao longo da malha de distribuição.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a contribuição financeira da Equatorial Energia através do programa P&D ANEEL ciclo/2020-21 com a parceria Equatorial e a UFSM, o que tornou possível a realização deste trabalho. E também agradecer ao INCT-GD, o CNPq (processos 465640/2014-1 e 306317/2015-0), à CAPES (processo 23038.000776/2017-54), e à FAPERGS (17/2551- 0000517-1) pelo apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] P. R. Borges, J. E. Ramos, C. A. Carvalho, V. A. Pires, G. Cardoso, D. B. Ramos, A. P. de Moraes, “Repowering rural single-phase distribution network: A non-conventional proposal using two overhead wires and the ground as the third phase,” *Electric Power Systems Research*, vol. 150, pp. 105–117, 2017.
- [2] E. Giuliani, A. L. Oliveira, G. Cardoso, G. Marchesan, L. F. Silveira, G. D. N. Filho, “Análise de desequilíbrio de tensão para sistema de distribuição de energia elétrica não convencional.” *13th Seminar on Power Electronics and Control – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)*, 2021.
- [3] CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica / Eletrobrás, “Centrais Elétricas Brasileiras: Seleção de Sistemas – MRT – RER – 05.” pp. 1-22, 2002.
- [5] J. C. O. Fandi, J. R. M. Jr, S. Member, I. N. Gondim, J. C. D. Oliveira, and G. C. Guimarães, “Two wire distribution systems for supplying three phase rural loads,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 182-189, 2014.
- [5] A. Ferreira Filho, “Análise do Comportamento do Fator do Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do ângulo da Tensão.” Ph.D. dissertation, Universidade de Brasília, 2008.
- [6] F. G. Torrezan, S. A. Pessoa, and P. E. T. Martins, “Estudo do Desequilíbrio de Tensão em um Sistema de distribuição,” *Congresso Brasileiro de Automática - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)*, 2018.
- [7] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, (2018), “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8. Resolução Normativa nº 728/2016.”
- [8] J. R. Carson, “Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return,” *Bell System Technical Journal*, vol. 4, 1926.

4. CONTRIBUIÇÕES ADICIONAIS

Em adição à seção 3 referente ao artigo apresentado no capítulo anterior, intitulada “METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA IMPEDÂNCIAS DE COMPENSAÇÃO” é apresentada a seguinte contribuição:

É constatado, através de revisão bibliográfica, que a capacitância de equalização para o sistema T2F pode ser obtida a partir da matriz de capacitâncias das fases aéreas do modelo, como demonstrado na equação (7). Esta matriz, por sua vez, é o resultado da inversa da matriz dos coeficientes de potencial próprios e mútuos do sistema, tal como apresentado na equação (6).

$$[C_{ABC}] = [P_{ABC}]^{-1} \quad (6)$$

Onde $[C_{ABC}]$ é a matriz de capacitâncias e $[P_{ABC}]$ é a matriz dos coeficientes de potencial próprios e mútuos.

$$C_{eq} = C_{AT} - C_{AB} = C_{BT} - C_{AB} \quad (7)$$

Onde C_{eq} é a capacitância de equalização a ser adicionada ao sistema, C_{AT} e C_{BT} são as capacitâncias entre os condutores aéreos e o solo e C_{AB} é a capacitância entre os condutores aéreos.

A obtenção deste valor de equalização pode ser, por vezes, bastante onerosa, por depender de manipulações algébricas envolvendo matrizes, além da determinação, em antemão, dos coeficientes de potencial do sistema trifásico.

Com a finalidade de simplificar a obtenção, através do método matemático, do valor de capacitância de equalização para o caso específico do sistema de distribuição trifásica à dois fios, foi realizado o seguinte desenvolvimento:

Das equações (15) e (16) do artigo anterior, têm-se os coeficientes de potencial próprios e mútuos como recordado em (8) e (9), respectivamente:

$$P_{ii} = 1,7984 \times 10^{-2} \times \ln\left(\frac{D_{ii'}}{R_{Di}}\right) \quad (8)$$

$$P_{ij} = 1,7984 \times 10^{-2} \times \ln\left(\frac{D_{ij'}}{D_{ij}}\right) \quad (9)$$

Onde $D_{ii'}$ é a distância entre o condutor i e sua imagem, R_{Di} é o raio do condutor aéreo utilizado, $D_{ij'}$ é a distância entre o condutor i e a imagem do condutor j e D_{ij} é a distância entre os condutores aéreos do sistema T2F.

Para fins de simplificação matemática, considerou-se os condutores aéreos instalados com mesma altura em relação ao solo. Desta forma, pode-se afirmar que os coeficientes de potencial próprios e mútuos de cada condutor se equivalem, como mostrado nas equações (10) e (11).

$$P_{ii} = P_{jj} \quad (10)$$

$$P_{ij} = P_{ji} \quad (11)$$

A matriz das capacitâncias para este sistema pode ser expressa de acordo com (12).

$$[C] = [P]^{-1} = \begin{bmatrix} C_{ii} & C_{ij} \\ C_{ji} & C_{jj} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde C_{ii} e C_{jj} são as capacitâncias próprias e C_{ij} e C_{ji} são as capacitâncias mútuas dos condutores. Ao considerar as relações apresentadas em (10) e (11), é válido afirmar que estes valores de capacitância são equivalentes para ambos condutores, como demonstrado em (13) e (14).

$$C_{ii} = C_{jj} \quad (13)$$

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (14)$$

As capacitâncias entre condutor e solo e entre condutores podem ser calculadas de acordo com as equações (15) e (16), respectivamente.

$$C_{AT} = C_{BT} = C_{ii} + C_{ij} \quad (15)$$

$$C_{AB} = C_{BA} = -C_{ij} \quad (16)$$

Ao substituir as equações (15) e (16) na equação (7), pode-se definir a capacitância de equalização tal como mostrado em (17).

$$C_{eq} = C_{ii} + 2 \cdot C_{ij} \quad (17)$$

A inversa de uma matriz $[A]$ dois-por-dois qualquer pode ser obtida através de uma relação entre seu determinante e sua matriz adjunta, como apresentado em (18).

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\det [A]} \times \text{adj}[A] \quad (18)$$

Ao utilizar este princípio matemático para a relação entre matriz de capacitâncias e matriz de coeficientes de potencial (12), obtém-se a relação apresentada em (19).

$$[C] = \frac{1}{\det [P]} \times \begin{bmatrix} P_{jj} & -P_{ji} \\ -P_{ij} & P_{ii} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Considerando as relações constatadas em (10) e (11), têm-se (20).

$$[C] = \frac{1}{\det [P]} \times \begin{bmatrix} P_{jj} & -P_{ij} \\ -P_{ij} & P_{ii} \end{bmatrix} \quad (20)$$

A relação apresentada em (20) pode ser utilizada em (17), como demonstrado em (21).

$$C_{eq} = \frac{1}{P_{ii}^2 - P_{ij}^2} \times (P_{ii} - 2 \cdot P_{ij}) \quad (20)$$

Ao substituir os coeficientes de potencial próprios e mútuos apresentados em (8) e (9), e manipulá-los algebricamente, pode-se obter a capacitância de equalização transversal para o sistema trifásico à dois fios tal qual apresentado na equação (21).

$$C_{eq} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha}{\beta^2}\right)}{k \cdot \ln(\alpha \cdot \beta) \cdot \ln\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)} \times (0,621371192) \quad (F/km) \quad (21)$$

em que:

$$\alpha = \frac{4 \cdot h}{\phi} \quad (22)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{D_{ij}^2 + 4 \cdot h^2}}{D_{ij}} \quad (23)$$

$$k = 11,17689 \times 10^6 \quad (24)$$

Em que h é a altura do chão até os condutores aéreos, ϕ é o diâmetro dos condutores e D_{ij} é a distância entre cabos, ambos valores em metros.

O propósito desta manipulação é apresentar uma forma de se obter o valor de capacitância de equalização do sistema a partir de um equacionamento que dependa apenas de parâmetros construtivos dos T2F, como dimensionamento dos condutores e altura da rede. Desta forma, não se faz necessário a obtenção dos coeficientes de potencial nem sequer são utilizadas operações com matrizes para a obtenção da impedância de compensação transversal.

5. DISCUSSÕES

O primeiro artigo científico apresentado no corpo deste trabalho aborda um estudo de viabilidade, discutindo para quais distâncias e arranjos de cargas é possível a implementação do sistema de distribuição trifásico à dois fios mantendo-se dentro dos parâmetros de qualidade de energia estipulados por norma. Esta análise se estrutura, inicialmente, apresentando o sistema T2F e descrevendo as características que o tornam inerentemente desequilibrado. Após isto, foi escolhido um método dentre os apresentados para a estimativa do desbalanço de tensão. Com a finalidade de observar o comportamento do T2F em diferentes cenários, foi utilizado um sistema teste de parâmetros customizáveis que foi submetido à uma bateria de simulações, visando angariar dados de desequilíbrio de tensão nas mais diversas topologias possíveis de implementação.

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram que o sistema apresenta desbalanços inferiores à 2% para a vasta maioria dos cenários simulados com ramais de até 60 km de comprimento. No que diz respeito à qualidade de energia, por mais que possua uma diferença de impedâncias entre fases intrínseca às suas características construtivas, o sistema trifásico à dois fios se mostrou uma alternativa viável tanto para a repotenciação de redes existentes, quanto para a implementação de novos trechos.

Como comentado na seção 1.1.2 deste trabalho, por vezes é vantajoso eliminar completamente o desbalanço de tensão nos sistemas de distribuição, visando diminuir perdas e gastos excessivos de energia, além de evitar desgastes e avarias em equipamentos conectados à rede. Sob esta ótica, o segundo artigo científico apresentado no desenvolvimento deste trabalho apresenta uma averiguação da efetividade de métodos para a compensação dos desequilíbrios entre fases através da adição de elementos passivos de impedância no sistema trifásico à dois fios.

Neste estudo é apresentada uma metodologia matemática para a obtenção dos valores de impedância de compensação transversais e longitudinais. Posteriormente, é realizada a implementação de um novo sistema testes, constituído por um trecho de T2F que alimenta uma única carga trifásica isolada. Neste modelo são testadas diferentes topologias para os elementos de compensação e a sua efetividade na eliminação do fenômeno do desequilíbrio de tensão. A partir dos resultados obtidos nesta etapa, foi concluído que o método matemático para a obtenção dos valores de compensação não é capaz de eliminar completamente o desbalanço entre fases. Esta característica do modelo de cálculo se dá principalmente pelo fato de os

elementos de compensação serem inseridos de forma pontual, em locais específicos do sistema, e não distribuídos igualmente ao longo do trecho.

Com o propósito de melhorar a efetividade da compensação, foi desenvolvido uma metodologia computacional que retorna os valores ideais para estas impedâncias. Este algoritmo se baseia em buscas dentro de intervalos pré-definidos para os elementos transversais e longitudinais. De acordo com os resultados obtidos, ficou provado que o modelo computacional foi capaz de eliminar completamente o fenômeno do desequilíbrio no sistema T2F. Devido à grande versatilidade do método desenvolvido, este pode ser iterado tantas vezes quanto se queira de forma a retornar os valores de compensação ideais com um grande nível de acurácia.

Por fim, foi realizado um estudo estatístico apontando os erros associados ao modelo matemático quando comparado aos valores ideais para a compensação do sistema trifásico à dois fios. Neste estudo ficou constatado que não só o valor das impedâncias adicionadas ao sistema, mas também a topologia na qual estas são arranjadas no trecho influencia diretamente na efetividade e no dimensionamento destes elementos.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

O sistema de distribuição de energia elétrica trifásico à dois fios trata-se de uma proposta não convencional que visa atender cargas isoladas principalmente no meio rural. Devido à sua possibilidade de construção simplificada, sem a utilização de cruzetas e com uma menor quantidade de ferragens e isoladores, o T2F tem se mostrado uma alternativa aprazível tanto para a implementação de novos trechos quanto para a repotenciação de redes existentes.

Uma característica deste tipo de implementação, porém, é o desbalanço de tensão observado no secundário dos transformadores de distribuição conectados as cargas. Este fenômeno se dá pela diferença de impedâncias entre as fases nos condutores aéreos e a terceira fase, transmitida pelo solo.

No decorrer deste trabalho foram realizados estudos de qualidade de energia para o T2F, indicando que o modelo é viável para implementações de curta e média distâncias, mantendo-se dentro dos limites de desequilíbrio admitidos por norma para a vasta maioria dos cenários simulados.

Ademais, para topologias específicas onde busca-se eliminar por completo o desbalanço de tensão, foram verificadas as efetividades de diferentes modelos para a obtenção dos valores de impedância de compensação. Nesta etapa do estudo constatou-se que o modelo matemático para o dimensionamento destes elementos, por vezes, não é capaz de obter valores que eliminem por completo o desequilíbrio entre fases, a depender da topologia de implementação utilizada. Em contra partida, a metodologia computacional proposta apresenta grande efetividade, sendo capaz de retornar valores de compensação transversais e longitudinais capazes de equalizar com acurácia as impedâncias das fases do sistema T2F, reduzindo o desequilíbrio para valores praticamente nulos, com tanta precisão quanto se queira.

Por fim, conclui-se que o sistema de distribuição de energia elétrica trifásico à dois fios é viável, no que diz respeito à qualidade de energia, para implementações dentro dos parâmetros abordados durante o desenvolvimento deste trabalho.

Vale ser ressaltado que as possibilidades de implementação do T2F estão muito além do apresentado nos casos específicos abordados durante o desenvolvimento deste trabalho. Apesar de suas características construtivas simplificadas, o sistema não está limitado aos níveis de tensão e potência utilizados. Sob esta perspectiva, com a finalidade de complementar o estudo apresentado, ressalta-se a necessidade de verificação dos seguintes tópicos em trabalhos futuros:

- Análise do comportamento para diferentes níveis de tensão nominal nos ramais de distribuição T2F (23 kV, 34.5 kV, ...);
- Estudo de qualidade de energia em redes trifásicas à dois fios com maior demanda de potência;
- Verificação de parâmetros de qualidade de energia frente à adição de sistemas de geração distribuída em redes T2F.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: “**Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**”, 2009.
- ANSI/NEMA Standard MG1-1993", **Motors and Generators**, 1993.
- BLACKBURN, J. L. **Symmetrical Components for Power Systems Engineering**, Marcel Dekker, Nova York, 1993.
- BOLLEN, M. H. J. **Understanding power quality problems: voltage sags in interruptions**. Wiley-IEEE Press, Oct. 1999.
- BORGES, P. R. de O. **REPOTENCIALIZAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO RURAIS MONOFÁSICOS POR MEIO DE DOIS CABOS AÉREOS E O SOLO COMO A TERCEIRA**. 2017. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- ELETROBRÁS / PROCEL. Programa de eficientização industrial: modulo motor elétrico. Rio de Janeiro. 130 p. MEHL, Edvaldo L. M. **Qualidade da energia elétrica.**, 2004. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>> Acesso em 22 jan. 2023.
- GOSBELL, V., PERERA, S., SMITH, V. **Voltage Unbalance. Technical Note 06**, Integral, Energy Power Quality Centre, University of Wollongong, School of Electrical, Computer & Telecommunications Engineering, 2002.
- IBGE Educa. **Conheça o Brasil - População POPULAÇÃO RURAL E URBANA**. Boulder, 2015. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>>. Acesso em 22 jan. 2023.
- IEEE Standard 112, **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**, 1991.
- PAULILLO, G. **Um compensador de desequilíbrios de tensão**. Dissertação de Mestrado (Universidade Federal de Itajubá), Itajubá-MG, 1996.

NUP: 23081.019672/2023-36

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação

125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
8	Ata de defesa de trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.322)	TCC - Leonardo de Freitas Silveira.pdf

Assinaturas

24/02/2023 17:13:42

AÉCIO DE LIMA OLIVEIRA (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR)
07.37.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - DESP

27/02/2023 08:17:31

DIEGO BERLEZI RAMOS (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR)
07.37.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - DESP



Código Verificador: 2408332

Código CRC: 68a09561

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

