

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 apazível 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.

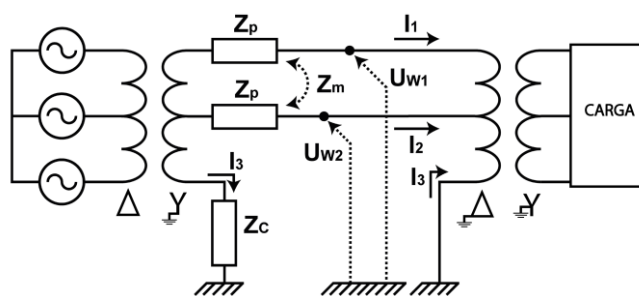


Fig. 1: Circuito equivalente de impedâncias T2F.

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).

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

Neste caso P_{ii} representa o coeficiente de potencial próprio enquanto 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).

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

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

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

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.

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

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

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.

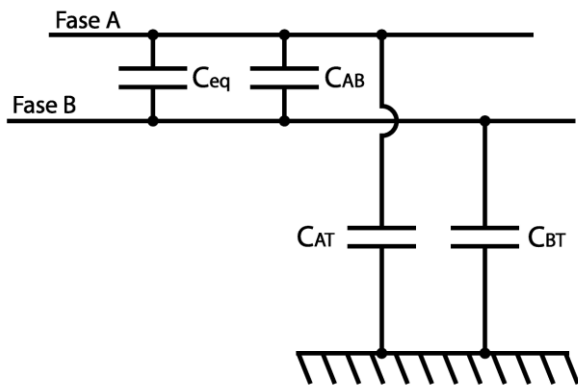


Fig. 2: Circuito equivalente de Capacitâncias T2F.

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.

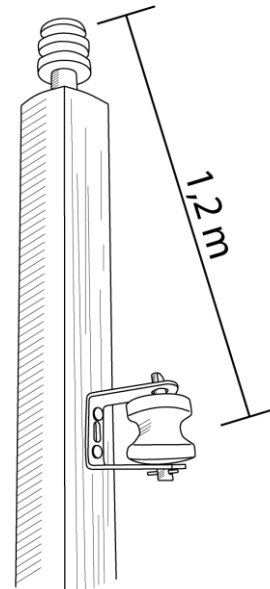
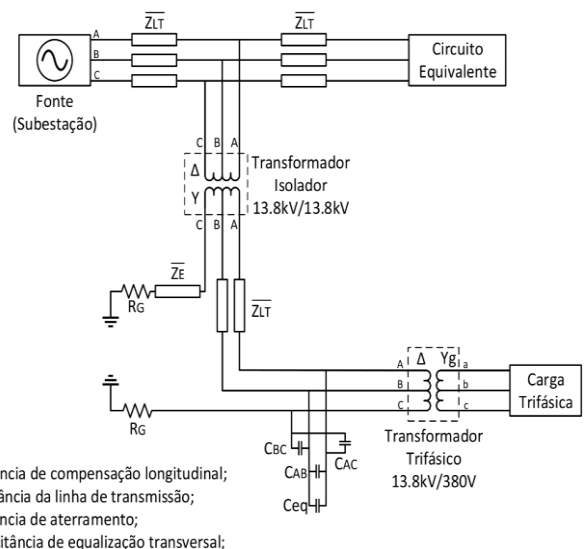


Fig. 3: Poste adaptado para implementação do T2F.

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.

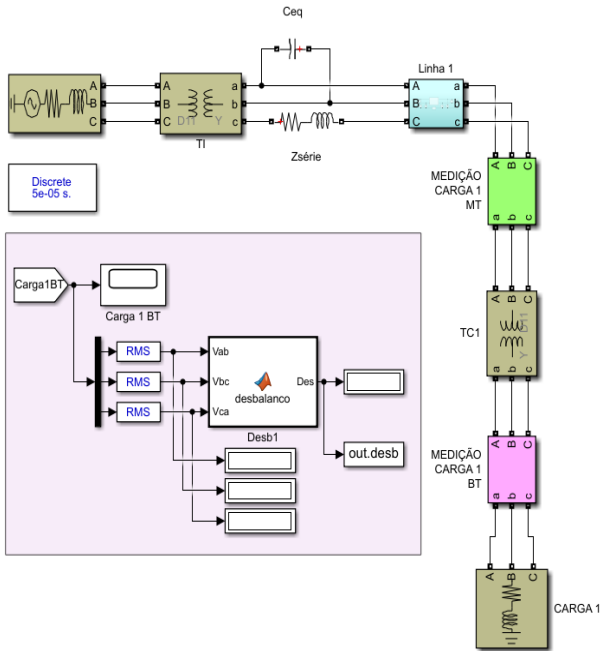


Fig. 5: Circuito implementado para simulação.

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.

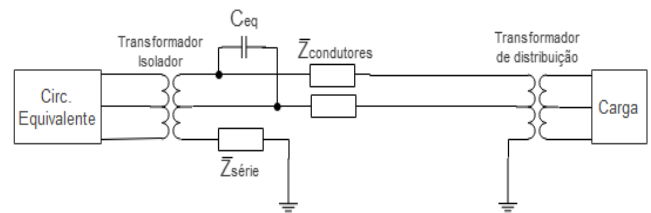


Fig. 6: Topologia de compensação 1.

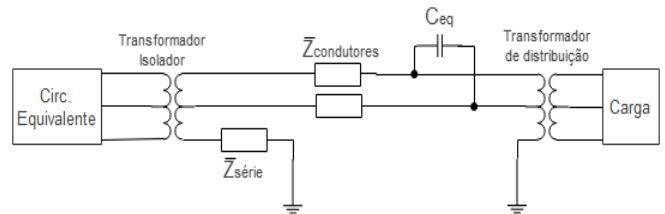


Fig. 7: Topologia de compensação 2.

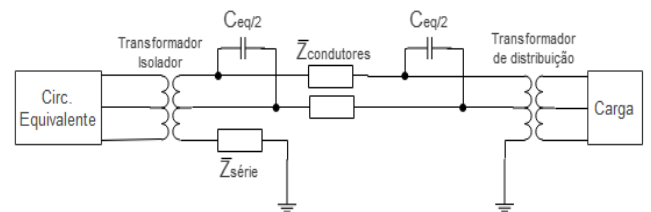


Fig. 8: Topologia de compensação 3.

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.

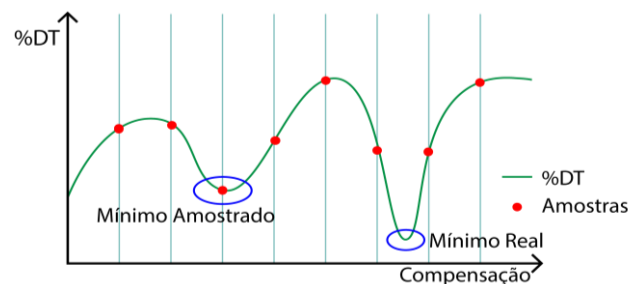


Fig. 9: Critério para intervalos de amostragem.

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.

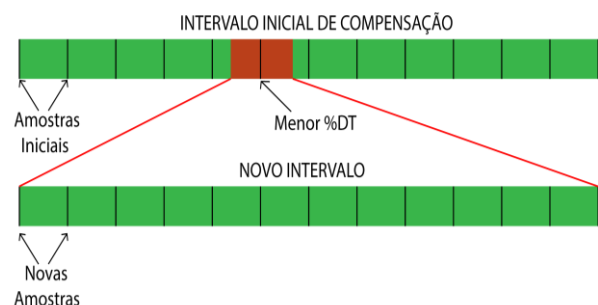


Fig. 10: Definição dos intervalos de busca.

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.