

# REDUÇÃO DO DESEQUILÍBRIO DE CORRENTES EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO

Eng. Edson José Nunes

Mestrando em Regulação da Indústria de Energia – UNIFACS – Salvador - BA

[edson.nunes@ymail.com](mailto:edson.nunes@ymail.com)

## RESUMO

Este artigo apresenta os resultados preliminares obtidos na redução do grau de desequilíbrio das correntes em alimentadores de distribuição, utilizando-se uma metodologia simples de cálculos. Consiste em simular as alterações das fases das derivações e calcular as novas correntes no alimentador, escolhendo-se aquela opção que apresentar o menor grau de desequilíbrio entre as correntes.

Esta metodologia permite indicar a interligação mais adequada para uma derivação (trifásica, bifásica ou MRT), de tal modo que seja reduzido o desequilíbrio das correntes na saída do alimentador ou em algum outro ponto de interesse ao longo do mesmo.

O mérito desta sistemática está na simplicidade de se utilizar apenas medições dos módulos das correntes em alguns pontos pré-determinados do alimentador, sendo que os primeiros resultados obtidos se mostraram satisfatórios.

**Palavras-chave:** alimentadores de distribuição, equilíbrio de correntes

## REDUCTION OF THE CURRENT IMBALANCE IN DISTRIBUTION FEEDERS

### ABSTRACT

This article presents the preliminary results obtained in reducing the level of the current imbalance of distribution feeders, using a simple methodology of calculations.

Is to simulate changes in the stages of derivation and calculating the new currents in the feeder, picking up that option to show the lowest degree of imbalance between the currents.

This methodology allows the state to a more appropriate interconnection bypass (triphasic, biphasic or MRT), so that reduced the imbalance of currents in the output of the distribution feeder or some other point of interest along the same.

The merit of this system is the simplicity of using only measurements of the modules of the currents in some pre-determined points of the distribution feeder, and the first results were satisfactory.

**Key words:** distribution feeders, phase balancing

**Área temática:** Eficiência energética, redução de perdas técnicas.

## I. INTRODUÇÃO

Com a expansão do sistema elétrico de distribuição, cargas desequilibradas como os ramais bifásicos e monofásicos são continuamente ligadas à rede, provocando problemas como o aumento das perdas técnicas de energia, níveis indesejados de tensão, sobrecargas em condutores e equipamentos, atuações indevidas de sistemas de proteção, etc.

O controle natural destes desequilíbrios consiste em se ligar tais cargas alternadamente nas fases ao longo do alimentador, porém a sua operacionalização se mostra difícil quando o volume de obras a serem interligadas à rede de distribuição é muito elevado e não se dispõe de indicadores de quais fases são mais adequadas para a ligação de cada uma das novas cargas (ramais bifásicos e monofásicos).

Na execução do programa federal de eletrificação rural “Luz para Todos”, um número muito elevado de ramais bifásicos e MRT's estão sendo construídos pela COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia, sendo que as interligações destes ramais têm provocado uma elevação bastante acentuada no grau de desequilíbrio das correntes nas saídas de alimentadores e ao longo dos mesmos.

Quando uma atuação da proteção é associada ao desequilíbrio das correntes em um alimentador, ações rápidas são requeridas e as mais comuns são alterações dos ajustes da proteção, porém, é necessário reduzir o grau de desequilíbrio das correntes para se preservar a segurança e atuação adequada da proteção quanto aos níveis mínimos de curto-circuito.

Este artigo apresenta os resultados preliminares obtidos na redução do grau de desequilíbrio das correntes de alimentadores de distribuição, utilizando-se uma metodologia simples para reordenamento das fases de algumas derivações ao longo dos mesmos. Foi concebida uma planilha eletrônica denominada SISTEC – Sistemática para Redução do Desequilíbrio de Correntes em Alimentadores de Distribuição, que permite indicar a interligação mais adequada para uma derivação (trifásica, bifásica ou MRT), de tal modo que seja reduzido o desequilíbrio das correntes na saída do alimentador e/ou em algum outro ponto de interesse ao longo do mesmo.

Aborda-se também neste trabalho, de uma forma bastante simplificada, a redução das perdas técnicas devido à redução do desequilíbrio das correntes entre as fases dos alimentadores.

Conforme mencionado anteriormente, os resultados são preliminares, estando em elaboração uma proposta de projeto de pesquisa a nível de mestrado para testar e aperfeiçoar a

metodologia.

## II. METODOLOGIA

A sistemática utilizada consiste em simular as alterações das fases das derivações e calcular as novas correntes ao longo do alimentador, escolhendo-se aquela opção que apresentar o menor grau de desequilíbrio entre as correntes nos vários pontos de interesse.

Propõe-se utilizar nos cálculos apenas os módulos das correntes medidas em pontos previamente definidos ao longo do alimentador.

Consideremos a figura 1 abaixo.

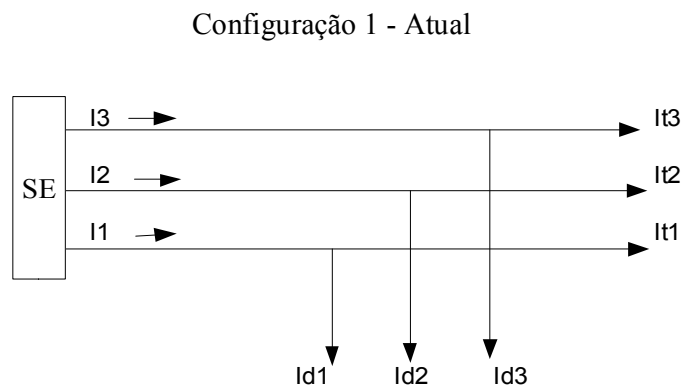


Figura 1

Onde:

$I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  – correntes na saída do alimentador

$I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d3}$  – correntes na derivação trifásica

$I_{t1}$ ,  $I_{t2}$  e  $I_{t3}$  – correntes no tronco do alimentador após a derivação

O desequilíbrio das correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  pode ser calculado pela seguinte equação:

$$D = \frac{I_{\text{mais afast}} - I_{\text{med}}}{I_{\text{med}}} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde:

$D$  - desequilíbrio entre as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$

$I_{\text{mais afast}}$  - corrente mais afastada da média

$I_{med}$  - média das correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$

Supondo-se que o valor do desequilíbrio calculado acima seja inadequado para o funcionamento do alimentador, adotemos uma segunda configuração para a conexão da derivação, conforme mostra a figura 2 a seguir, e recalculamos o valor do desequilíbrio na saída do alimentador.

Configuração 2

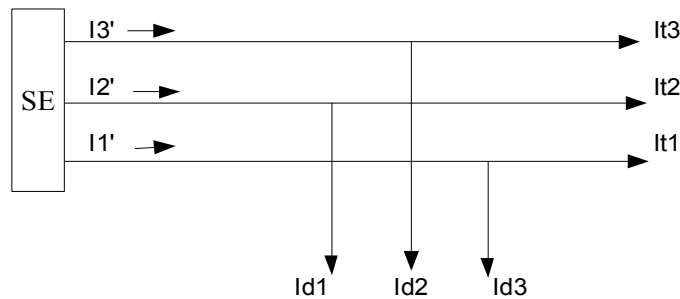


Figura 2

Onde:

$I_1'$ ,  $I_2'$  e  $I_3'$  – novas correntes na saída do alimentador

$I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d3}$  – correntes na derivação trifásica

$I_{t1}$ ,  $I_{t2}$  e  $I_{t3}$  – correntes no tronco do alimentador após a derivação

Com a alteração das conexões da derivação, os novos valores das correntes na saída do alimentador são:

$$I_1' = I_1 - I_{d1} + I_{d3}$$

$$I_2' = I_2 - I_{d2} + I_{d1}$$

$$I_3' = I_3 - I_{d3} + I_{d2}$$

Nesta nova configuração, podemos calcular o desequilíbrio entre as correntes  $I_1'$ ,  $I_2'$  e  $I_3'$  pela equação (1) e compará-lo com o da configuração inicial, obtendo-se já uma possível alternativa para reduzir o grau de desequilíbrio entre as correntes deste alimentador.

Temos ainda outra configuração possível para a conexão da derivação, a qual é mostrada na

figura 3 abaixo.

Configuração 3

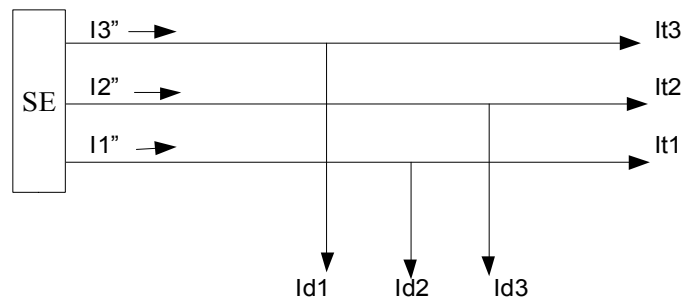


Figura 3

Onde:

$I1''$ ,  $I2''$  e  $I3''$  – novas correntes na saída do alimentador

$Id1$ ,  $Id2$  e  $Id3$  – correntes na derivação trifásica

$It1$ ,  $It2$  e  $It3$  – correntes no tronco do alimentador após a derivação

Com esta outra alteração das conexões da derivação, os novos valores das correntes na saída do alimentador são:

$$I1'' = I1 - Id1 + Id2$$

$$I2'' = I2 - Id2 + Id3$$

$$I3'' = I3 - Id3 + Id1$$

Analogamente, para esta terceira configuração podemos calcular pela equação (1) o desequilíbrio entre as correntes  $I1''$ ,  $I2''$  e  $I3''$  e compará-lo com os calculados para as duas configurações anteriores.

Desta forma, simulando-se as duas possíveis alterações das conexões da derivação, obtemos correntes na saída do alimentador que podem apresentar um menor grau de desequilíbrio.

Indica-se como configuração proposta aquela que fornecer o menor desequilíbrio dentre as três configurações possíveis.

As três configurações acima descritas mantêm a mesma sequência de fases original, o que deve ser garantido às cargas trifásicas ligadas na derivação.

Para o caso de derivações bifásicas e monofásicas, a sistemática de cálculos e escolha da melhor configuração é a mesma.

Muitas vezes é necessário proceder à alterações em duas ou mais derivações para se obter um grau de desequilíbrio aceitável para as correntes na saída do alimentador.

É importante salientar que, de forma simultânea, também deve-se procurar equilibrar as correntes em vários pontos do circuito, inclusive no ponto em que se fazem as alterações das derivações.

### III. RESULTADOS

Para validar os resultados da planilha SISTEC, utilizando-se o software Scilab 4.0 (Open Source), concebeu-se um modelo matemático de rede bem simplificado, que permite simular as correntes do alimentador e comparar os resultados teóricos e os propostos pela sistemática da planilha, considerando-se inclusive o critério de desequilíbrio da IEC, mostrado na equação (2) a seguir.

$$Diec = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

Diec - desequilíbrio entre as correntes de sequência negativa  $I_2$  e positiva  $I_1$

$I_2$  - módulo da corrente de sequência negativa

$I_1$  - módulo da corrente de sequência positiva

Na figura 4 abaixo é mostrado o circuito equivalente do modelo matemático simplificado da rede, para as simulações de derivações trifásicas e bifásicas, devendo-se observar que esta rede apresenta neutro isolado.

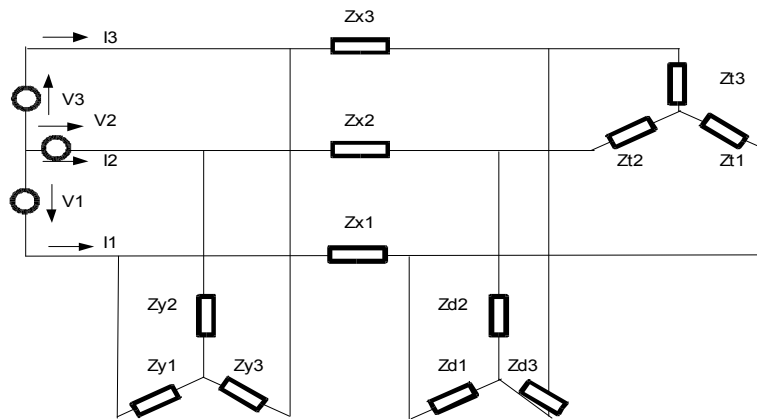


Figura 4

Na figura 5 a seguir apresenta-se o circuito equivalente do modelo matemático simplificado da rede, para as simulações das derivações monofásicas (MRT).

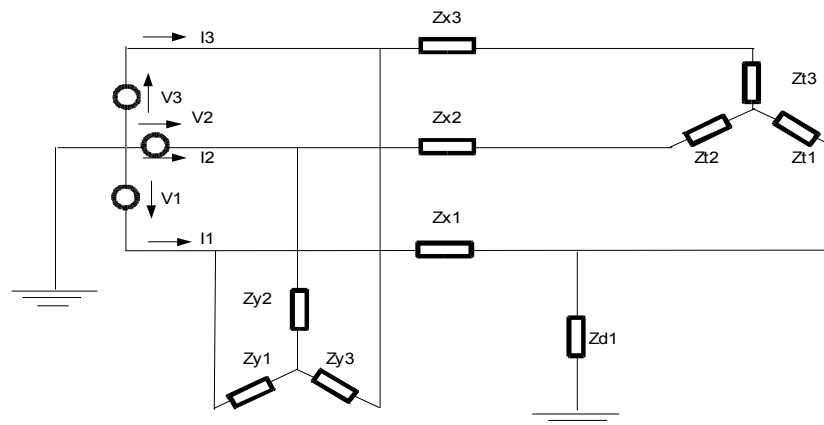


Figura 5

Onde:

$V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  - tensões fase-terra na saída do alimentador

$Z_{y1}$ ,  $Z_{y2}$  e  $Z_{y3}$  - impedâncias equivalentes das cargas antes da derivação

$Z_{x1}$ ,  $Z_{x2}$  e  $Z_{x3}$  - impedâncias equivalentes da rede entre as cargas - antes e após a derivação

$Z_{d1}$ ,  $Z_{d2}$  e  $Z_{d3}$  - impedâncias equivalentes das cargas da derivação

$Z_{t1}$ ,  $Z_{t2}$  e  $Z_{t3}$  - impedâncias equivalentes das cargas após a derivação

Na sequência são mostrados resultados de simulações realizadas, onde se compara o grau de

desequilíbrio calculado pelas metodologias da IEC e da NEMA com a sistemática proposta.

### Simulação 1 – Derivação Trifásica

Parâmetros do circuito equivalente para simulação do modelo matemático simplificado:

$$V=[1.02*7967*\exp(\%i*2*\%pi/180); 7967*\exp(-\%i*118*\%pi/180);$$

$$0.96*7967*\exp(\%i*120*\%pi/180)]$$

$$Zy=[80*\exp(\%i*24*\%pi/180); 150*\exp(\%i*28*\%pi/180); 100*\exp(\%i*21*\%pi/180)]$$

$$Zx=[3*\exp(\%i*35*\%pi/180); 3*\exp(\%i*35*\%pi/180); 3*\exp(\%i*35*\%pi/180)]$$

$$Zd=[250*\exp(\%i*35*\%pi/180); 170*\exp(\%i*25*\%pi/180); 120*\exp(\%i*31*\%pi/180)]$$

$$Zt=[70*\exp(\%i*33*\%pi/180); 100*\exp(\%i*30*\%pi/180); 40*\exp(\%i*38*\%pi/180)]$$

GRANDE ZA	CONFIG 1 - ATUAL	CONFIG 2	CONFIG 3
I1 (A)	232,3	250,2	240,1
I2 (A)	199,3	189,1	207,8
I3 (A)	261,0	253,6	243,3
Id1 (A)	34,1	52,9	45,3
Id2 (A)	45,2	35,0	54,2
Id3 (A)	51,8	43,3	33,2
Desequilíbrio IEC (%)	15,56	17,56	<b>9,64</b>
Desequilíbrio NEMA (%)	13,04	9,80	<b>5,60</b>
Desequilíbrio SISTEC (%)	13,04	18,48	<b>10,82</b>

Tabela 1

Na Tabela 1 acima, a configuração 3 é a que apresenta o menor desequilíbrio entre as correntes do alimentador, sendo que esta configuração é validada pelas três sistemáticas de

cálculo do desequilíbrio: 9,64 % pela IEC; 5,60 % pela NEMA e 10,82 % pela SISTEC.

### Simulação 2 – Derivação Bifásica – Fases 1 e 3

Parâmetros do circuito equivalente para simulação do modelo matemático simplificado:

$$V=[1.02*7967*\exp(\%i*2*\%pi/180); 7967*\exp(-\%i*118*\%pi/180);$$

$$0.96*7967*\exp(\%i*120*\%pi/180)]$$

$$Zy=[80*\exp(\%i*24*\%pi/180); 150*\exp(\%i*28*\%pi/180); 100*\exp(\%i*21*\%pi/180)]$$

$$Zx=[3*\exp(\%i*35*\%pi/180); 3*\exp(\%i*35*\%pi/180); 3*\exp(\%i*35*\%pi/180)]$$

$$Zd=[250*\exp(\%i*35*\%pi/180); 1000000000*\exp(\%i*25*\%pi/180);$$

$$120*\exp(\%i*31*\%pi/180)]$$

$$Zt=[70*\exp(\%i*33*\%pi/180); 100*\exp(\%i*30*\%pi/180); 40*\exp(\%i*38*\%pi/180)]$$

GRANDE ZA	CONFIG 1 - ATUAL	CONFIG 2	CONFIG 3
I1 (A)	229,8	228,6	199,8
I2 (A)	156,0	185,1	187,7
I3 (A)	243,5	212,9	238,6
Id1 (A)	34,1	35,8	0,0
Id2 (A)	0,0	35,8	34,7
Id3 (A)	34,1	0,0	34,7
Desequilíbrio IEC (%)	25,06	<b>12,10</b>	15,32
Desequilíbrio NEMA (%)	16,05	<b>9,44</b>	14,32
Desequilíbrio SISTEC (%)	16,05	<b>9,55</b>	16,08

Tabela 2

Pela Tabela 2 anterior, percebe-se que a configuração 2 é a que apresenta o menor desequilíbrio entre as correntes do alimentador, sendo que esta configuração é validada pelas

três sistemáticas de cálculo do desequilíbrio: 12,10 % pela IEC; 9,44 % pela NEMA e 9,55 % pela SISTEC.

### Simulação 3 – Derivação Monofásica – MRT na Fase 1

Parâmetros do circuito equivalente para simulação do modelo matemático simplificado:

$$V=[1.02*7967*\exp(\%i*2*\%pi/180); 7967*\exp(-\%i*118*\%pi/180);$$

$$0.96*7967*\exp(\%i*120*\%pi/180)]$$

$$Zy=[80*\exp(\%i*24*\%pi/180); 150*\exp(\%i*28*\%pi/180); 100*\exp(\%i*21*\%pi/180)]$$

$$Zx=[3*\exp(\%i*35*\%pi/180); 3*\exp(\%i*35*\%pi/180); 3*\exp(\%i*35*\%pi/180)]$$

$$Zd=[250*\exp(\%i*35*\%pi/180)]$$

$$Zt=[70*\exp(\%i*33*\%pi/180); 100*\exp(\%i*30*\%pi/180); 40*\exp(\%i*38*\%pi/180)]$$

GRANDEZ A	CONFIG 1 - ATUAL	CONFIG 2	CONFIG 3
I1 (A)	229,5	199,6	199,4
I2 (A)	156,0	185,5	155,8
I3 (A)	212,6	212,9	240,0
Id1 (A)	30,8	30,3	28,6
Desequilíbrio IEC (%)	21,82	<b>7,93</b>	25,25
Desequilíbrio o NEMA (%)	15,13	<b>6,78</b>	20,94
Desequilíbrio o SISTEC (%)	15,13	<b>6,64</b>	22,08

Tabela 3

Nota-se pela Tabela 3 acima, que a configuração 2 é a que apresenta o menor desequilíbrio entre as correntes do alimentador, sendo que esta configuração é validada pelas três sistemáticas de cálculo do desequilíbrio: 7,93 % pela IEC; 6,78 % pela NEMA e 6,64 % pela SISTEC.

## **Desequilíbrio das correntes em alimentadores e as perdas técnicas**

O desequilíbrio das correntes em alimentadores de distribuição contribui de forma significativa para o aumento das suas perdas técnicas.

Consideremos um alimentador trifásico com 10 km de extensão, construído em cabos de alumínio #4/0 CAA, que apresenta uma resistência ôhmica  $r=0,3679 \Omega/\text{km}$  e com as seguintes correntes:  $I_a=100 \text{ A}$ ,  $I_b=150 \text{ A}$  e  $I_c=50 \text{ A}$ .

As perdas joule aproximadas são dadas pela equação 3:

$$P = R \cdot I_a^2 + R \cdot I_b^2 + R \cdot I_c^2 \quad (3)$$

As perdas calculadas são da ordem de 130 kW. Se o circuito fosse equilibrado, ou seja,  $I_a=100 \text{ A}$ ,  $I_b=100 \text{ A}$  e  $I_c=100 \text{ A}$ , estas perdas seriam de aproximadamente 110 kW.

Logo, uma redução no desequilíbrio das correntes dos alimentadores de distribuição provoca uma redução imediata nas perdas do sistema, pois as perdas são função do quadrado das correntes. O mesmo efeito é ainda mais evidente na redução das perdas de potência reativa, porque a relação  $X/R$  da maior parte dos condutores é superior a um.

O mérito desta sistemática está na simplicidade de se utilizar apenas medições dos módulos das correntes em alguns pontos pré-determinados do alimentador.

Os primeiros resultados práticos obtidos com o auxílio desta metodologia indicam que os desequilíbrios de correntes em alimentadores de distribuição podem ser reduzidos de forma eficaz, mostrando que, apesar da simplicidade da metodologia a sua eficácia poderá ser verificada.

## **IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] BARROS, M. C. **Compensação de Desequilíbrios em Redes Elétricas**. Ilha Solteira – SP, 2000. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas de Energia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP – Universidade Estadual Paulista.

- [2] ANNEL – Agência Nacional de Energia Elétrica – **Legislação Básica do Setor Elétrico**. Brasília – DF, 1998.
- [3] MENEZES, P. N. Z. **Dimensionamento Otimizado de Compensadores Estáticos Tipo RCT**. Ilha Solteira – SP, 2003. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP – Universidade Estadual Paulista.
- [4] JOUANNE, A. V.; BANERJEE, B. Assessment of Voltage Unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 4, October – 2001.