

ANÁLISE DE CURTOS-CIRCUITOS: UMA COMPREENSÃO SOBRE A DECOMPOSIÇÃO DE FASORES TRIFÁSICOS

Eduardo Mendes da Silva Correa, mendes.correa@acad.ifma.edu.br¹

Marcos Fortaleza da Sousa Silva, marcos.fortaleza@acad.ifma.edu.br²

Yesus Christian Silva Sousa, yesus.christian@acad.ifma.edu.br³

Domingos Robson Silva Costa, domingos.costa@ifma.edu.br⁴

^{1,2,3,4} Instituto Federal do Maranhão, (Avenida Newton Bello, S/N Vila Maria. 65906-335 - Imperatriz-Ma).

Resumo: Neste artigo será apresentado um estudo de um sistema elétrico trifásico a fim de obter suas componentes simétricas associada com as faltas assimétricas, com auxílio do software *Matlab*. O sistema trifásico é a forma mais comum de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em corrente alternada. Neste sistema, é como se houvessem três fontes de tensão balanceadas com mesma amplitude e frequência, mas defasadas entre si em 120°, de forma a equilibrar o sistema, o tornando muito mais eficiente ao se comparar com três sistemas isolados. Um sistema encontra-se desequilibrado quando suas tensões e correntes não estão defasadas entre si em 120°. A análise de uma rede desequilibrada é usualmente feita decompondo o sistema desequilibrado em três sistemas equivalentes com sequência positiva, negativa e zero. Os resultados apresentados são baseados em um sistema trifásico desequilibrado escolhido aleatoriamente e são apresentados seu diagrama fasorial de sequência positiva, negativa e zero, a corrente de linha, assim como sua importância para o estudo de faltas para evitar efeitos térmicos e transtornos e contribuição para sistemas trifásicos em configuração estrela e triângulo.

Palavras-chave: Fasores, Fortescue, Componentes, Simétricos, Faltas.

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda de consumo de energia elétrica, devido tanto ao aumento populacional, quanto a demanda industrial, surgem novos desafios para os operadores dos sistemas elétricos. Consequentemente, o número de curtos-circuitos tende a aumentar e, por isto, os estudos direcionados a análise de faltas deve estar em constante evolução a fim de evitar que o problema aconteça e/ou minimizar as consequências ora sociais, ora econômicas. Neste trabalho será apresentado o estudo, com auxílio do software *Matlab*, de um sistema elétrico trifásico de transmissão e distribuição a fim de obter suas componentes simétricas associadas com as faltas assimétricas. Os resultados obtidos por meio de simulação serão comparados com situações reais a fim de comprovar a veracidade dos dados.

2. SISTEMAS TRIFÁSICOS

O circuito trifásico é um caso particular dos circuitos polifásicos, que são sistemas nas quais as fontes em corrente alternada operam na mesma frequência. O sistema trifásico é a forma mais comum de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em corrente alternada. Neste sistema, é como se houvesse três fontes de tensão balanceadas com mesma amplitude e frequência, mas defasadas entre si em 120°, de forma a equilibrar o sistema, o tornando muito mais eficiente ao se comparar com três sistemas isolados.

O sistema trifásico possui a flexibilidade de poder atender cargas monofásicas, bifásicas e trifásicas sem qualquer alteração em sua configuração. Um sistema trifásico pode ser equilibrado ou desequilibrado. Uma carga, em delta ou estrela, composta por impedâncias iguais, é um sistema equilibrado. Neste caso, um gerador também equilibrado irá fornecer um conjunto de três correntes, no qual serão defasadas entre si em 120°.

3. REDES DESEQUILIBRADAS: COMPONENTES SIMÉTRICAS

Um conjunto de tensões simétricas, ou equilibradas, em um sistema trifásico, tem as expressões seguintes para as três fases A, B e C; a fase *a* é considerada como referência e tem um ângulo de fase de 0 rad:

$$U_{A1} = V \angle 0$$

$$U_{B1} = V \angle \frac{-2\pi}{3} = a^2 * U_{A1} \quad (2)$$

$$U_{C1} = V \angle \frac{2\pi}{3} = a * U_{A1} \quad (3)$$

Onde $a = 1 \angle \frac{2\pi}{3}$ são um número complexo usado para simplificar a notação.

Esta sequência é chamada de sequência positiva. Para as correntes trifásicas de um sistema equilibrado pode ser escrita uma equação similar. As tensões de um sistema equilibrado também podem ser escritas como:

$$U_{A2} = V \angle 0 \quad (4)$$

$$U_{B2} = V \angle \frac{2\pi}{3} = a * U_{A1} \quad (5)$$

$$U_{C2} = V \angle \frac{-2\pi}{3} = a^2 * U_{A1} \quad (6)$$

Esta sequência de três fases é chamada de sequência negativa. Um terceiro sistema de tensões também é possível:

$$U_{A0} = V \angle 0 \quad (7)$$

$$U_{B0} = V \angle 0 = U_{A0} \quad (8)$$

$$U_{C0} = V \angle 0 = U_{A0} \quad (9)$$

Essa é chamada de sequência de zeros.

A maioria das redes é equilibrada, ou se pode assumir que é equilibrada, e as fases são escolhidas para ser de sequência positiva. Algumas vezes é necessário lidar com redes desequilibradas. A análise de uma rede desequilibrada é usualmente feita decompondo o sistema desequilibrado em três sistemas equivalentes com sequência positiva, negativa e zero. Isso é possível porque as três tensões de um sistema desequilibrado podem ser escritas como a soma de três sistemas equilibrados distintos de sequência positiva, negativa e zero. Isso é chamado de decomposição de Fortescue. (EXPÓSITO et. al. 2015).

Esta decomposição pode ser expressa matematicamente através de

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{a0} \\ U_{b0} \\ U_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{a1} \\ U_{b1} \\ U_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{a2} \\ U_{b2} \\ U_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde U_0, U_1, U_2 representam U_{a0}, U_{a1}, U_{a2} , ou de forma mais compacta

$$U_{abc} = A * U_{012} \quad (11)$$

Onde A é uma matriz regular, cuja inversa é

$$A_- = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

O fato de que a matriz A é uma matriz regular significa que, para um sistema de tensões desequilibradas, a decomposição de Fortescue é única. As componentes de sequência de um sistema de tensões desequilibradas têm um valor único que pode ser encontrado como

$$U_{012} = A_- * U_{abc} \quad (13)$$

A mesma decomposição pode ser aplicada a um sistema desequilibrado de correntes.

No sistema trifásico desequilibrado é necessário tratar as diferentes fases individualmente, o que torna os cálculos mais trabalhosos se comparado com o sistema trifásico equilibrado (SATO e FREITAS, 2015).

Por definição, as correntes de linha são definidas a partir das equações (14), (15) e (16).

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2} \quad (14)$$

$$I_B = I_{A0} + a^2 * I_{A1} + a * I_{A2} \quad (15)$$

$$I_C = I_{A0} + a * I_{A1} + a^2 I_{A2} \quad (16)$$

4. CURTO-CIRCUITO

Em uma rede elétrica, um curto-circuito acontece quando dois ou mais pontos se encontram em diferentes níveis de tensão em condições normais de operação, acidentalmente entram em contato entre eles através de uma impedância pequena ou zero. Isso geralmente acontece quando a isolamento falha devido a diferentes causas: perdas das propriedades ambientais do isolante, sobretensões, ou diversos efeitos mecânicos. (EXPÓSITO et. al. 2015, p.256).

Os curtos circuitos devem ser estudados durante o planejamento e a operação da rede elétrica. São importantes para a seleção e o projeto dos condutores do sistema, das estruturas de suporte e do sistema de proteção. O conhecimento prévio dos valores de curtos-circuitos em uma rede elétrica é necessário para estudos e análises de alguns problemas, quais sejam (SATO e FREITAS, 2015): determinação da capacidade de interrupção dos equipamentos de chaveamento; determinação das capacidades térmica e dinâmica dos equipamentos; cálculos de ajustes dos relés de proteção; seleção de reatores limitadores de corrente; cálculo do esforço mecânico nos elementos estruturais das instalações elétricas; cálculos da malha de aterramento.

Os efeitos prejudiciais das faltas são numerosos e estão principalmente relacionados às altas correntes que podem aparecer no sistema. Os principais efeitos das faltas são: Aquecimento do condutor devido ao efeito joule; forças eletromecânicas; Variações nas tensões. As correntes de curto-circuito que fluem através de vários equipamentos do SEP geram efeitos térmicos nos condutores e equipamentos devido ao aquecimento e dissipação de potência, conforme descreve a Lei de Joule. No entanto, como a duração dos curtos-circuitos é curta, a perda de calor dos condutores durante o curto-circuito é geralmente muito baixa (TLEIS, 2008). Entretanto, a queda de tensão que ocorre no instante do curto-circuito provoca graves transtornos aos consumidores considerando que algumas cargas são sensíveis às quedas de tensão, como por exemplo: sistemas de iluminação, computacional e de controle (SATO e FREITAS, 2015).

Os curtos-circuitos são geralmente classificados como equilibrados ou desequilibrados. No primeiro caso, as três fases entram em curto-circuito ao mesmo tempo em um único ponto, e, portanto, o circuito resultante é também equilibrado. Caso sejam desequilibrados, é necessário usar modelos trifásicos, os quais depois de usar técnicas matemáticas de redução adequadas, podem ser reduzidos em três circuitos monofásicos acoplados. (EXPÓSITO et. al. 2015, p.256).

O componente que mais sofre desligamento forçado é a linha de transmissão, apresentando uma frequência de 64,7% em relação aos outros componentes do sistema. Tal percentual expressivo é justificado devido ao grande comprimento da linha, que percorre vários trajetos hostis e é submetida a ações de fenômenos naturais (descargas atmosféricas, temporais, ventos) condições ambientais adversas (queimadas, poluição) e ações humanas inapropriadas. As ações por fenômenos naturais e condições ambientais adversas representam 45% dos desligamentos forçados causados por curto-circuito nas linhas de transmissão. O percentual aumenta para 80% quando se trata das linhas de subtransmissão (69 kV e 34,5 kV) (CPFL, 1996).

4.1 Curto circuito permanente e temporário

Os curtos-circuitos podem ser do tipo permanentes ou temporários (fortuito).

- Os curtos-circuitos permanentes são do tipo irreversíveis espontaneamente, necessitando de conserto na rede para restabelecer o sistema. Após a abertura do disjuntor, a equipe de manutenção deverá deslocar-se até o local do defeito e, somente após o conserto, o sistema será restabelecido (KINDERMANN, 1997).
- Os curtos-circuitos temporários são aqueles que ocorrem sem haver defeito na rede, após a atuação da proteção o sistema pode ser restabelecido sem problemas. São oriundos de várias causas, tais como: contaminação do isolador pela poeira e poluição, umidade, galhos de árvores, pássaros e entre outros (KINDERMANN, 1997).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Simulação auxiliada por software (*Matlab*)

O *Matlab* é uma plataforma de programação e computação numérica usada por milhões de engenheiros e cientistas para analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos. (MathWorks, 1994-2022).

A partir do software *MatLab* foi desenvolvido um código que tem por objetivo o cálculo das componentes simétricas de fasores desequilibrados, e também para a composição destes fasores com base nas componentes simétricas. No código, primeiramente, se escolhe o tipo de transformação que se quer obter: componentes simétricas ou corrente de linha. Ao compilar, quando se digita 1, ele habilita a parte do código que obtém as componentes simétricas (sequência positiva, negativa e zero) do sistema trifásico de fasores desequilibrados e, ao digitar 2, ele retorna o valor dos fasores originais.

5.2 Decomposição de fasores trifásicos desequilibrados em componentes simétricas

Nesta seção serão abordados os resultados da análise acerca da obtenção das componentes simétricas associadas com faltas assimétricas (fase-fase, fase-fase-terra e fase-terra) de um sistema trifásico desequilibrado a partir do teorema de Fortescue.

O sistema trifásico a ser analisado é apresentado no livro Sistemas Elétricos de Potência (MOHAN, 2016, p.188).

$$I_A = 2, 2\angle -26,66 \quad (17)$$

$$I_B = 0,6 \angle -156,8 \quad (18)$$

$$I_C = 0,47 \angle 138,7 \quad (19)$$

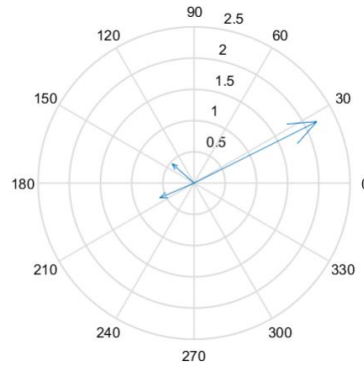


Figura 1: Fasores trifásicos desequilibrados de entrada.

5.3 Componentes simétricas de sequência zero

Considerando a entrada como a da seção 5.1.1, aplicando o valor de $a = 1 \frac{2\pi}{3} = \cos \frac{2\pi}{3} + 1i * \sin \frac{2\pi}{3}$, obtemos a sequência zero:

$$Sequencia_{zero}A0 = [A0', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (20)$$

$$Sequencia_{zero}B0 = [B0', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (21)$$

$$Sequencia_{zero}C0 = [C0', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (22)$$

Temos que o valor da sequência zero é:

Tabela 1: Sequência Zero.

Componente	Módulo	Fase	Forma Numérica
A0	0,5	44,9012	$I_{A0} = 0,5 \angle 44,9$
B0	0,5	44,9012	$I_{B0} = 0,5 \angle 44,9$
C0	0,5	44,9012	$I_{C0} = 0,5 \angle 44,9$

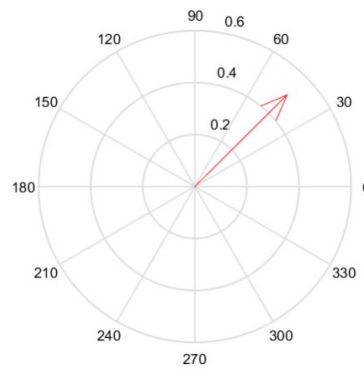


Figura 2: Gráfico das componentes simétricas da sequência zero.

5.4 Componentes simétricas de sequência positiva

$$Sequencia_{positiva}A1 = [A1', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (23)$$

$$Sequencia_{positiva}B1 = [B1', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (24)$$

$$Sequencia_{positiva}C1 = [C1', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (25)$$

Temos que o valor da sequência positiva é:

Tabela 2: Componentes simétricas obtidas no *Matlab* de sequência positiva.

Componente	Módulo	Fase	Forma Numérica
A1	0,9984	15,0227	$I_{A1} = 0,9984 \angle 15,02$
B1	0,9984	-104,9773	$I_{B1} = 0,9984 \angle -104,97$
C1	0,9984	135,0227	$I_{C1} = 0,9984 \angle 135,02$

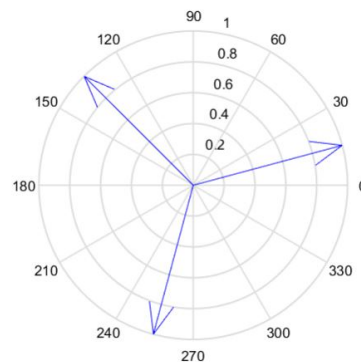


Figura 3: Componentes simétricas da sequência positiva.

5.5 Componentes simétricas de sequência negativa

$$Sequencia_{negativa} A2 = [A2', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (26)$$

$$Sequencia_{negativa} B2 = [B2', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (27)$$

$$Sequencia_{negativa} C2 = [C2', abs(M(1,1)), angle(M(1,1)) * 180/\pi] \quad (28)$$

Temos que o valor da sequência negativa é:

Tabela 3: Componentes simétricas obtidas no *Matlab* de sequência negativa.

Componente	Módulo	Fase	Forma Numérica
A2	0,7484	29,9201	$I_{A2} = 0,7484 \angle 29,92$
B2	0,7484	149,9201	$I_{B2} = 0,7484 \angle 149,92$
C2	0,7484	-90,0799	$I_{C1} = 0,7484 \angle -90,07$

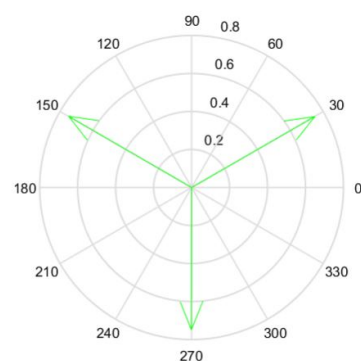


Figura 4: Componentes simétricas da sequência negativa.

5.6 Diagrama Fasorial

Conforme SATO e FREITAS (2015), o teorema de Fortescue é resumido como: “Um sistema trifásico desequilibrado pode ser decomposto em três sistemas equilibrados.”. O diagrama fasorial apresentado na imagem 5, apresenta:

- Em azul - componente de sequência positiva: constituída por três fasores de módulos iguais e defasados 120° , tendo a mesma sequência de fase do sistema original;
- Em verde - componente de sequência negativa: constituída por três fasores de módulos iguais e defasados 120° ;

- Em vermelho - componente de sequência zero: constituída por três fasores de módulos iguais e em fase.

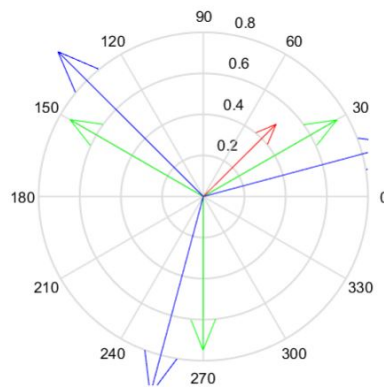


Figura 5: Diagrama fasorial.

5.7 Fasores Originais

Tendo calculado as componentes simétricas, temos os valores de $I_{A0} = 0,5 \angle 44,9$ (1º Componente de Sequência Zero), $I_{A1} = 0,9984 \angle 15,02$ (1º Componente de Sequência Positiva) e $I_{A2} = 0,7484 \angle 29,92$ (1º Componente de Sequência Negativa). A tabela 4 compara os valores de (MOHAN,2016, p.188) com os encontrados no algoritmo.

Tabela 4: **Comparativo entre encontrado e o esperado** (I_{A0}, I_{A1}, I_{A2}).

Encontrado	Esperado
$I_{A0} = 0,5 \angle 44,9$	$I_{A0} = 0,5 \angle 45$
$I_{A1} = 0,9984 \angle 15,02$	$I_{A1} = 1 \angle 15$
$I_{A2} = 0,7484 \angle 29,92$	$I_{A2} = 0,75 \angle 30$

A partir destes valores é possível encontrar o valor dos fasores originais.

Tabela 5: **Componentes simétricas obtidas dos Fasores Originais.**

Componente	Módulo	Fase	Forma Numérica
IA	2,1999	26,598	$I_A = 2,199 \angle 26,598$
IB	0,6	-156,795	$I_B = 0,6 \angle -156,795$
IC	0,47	138,694	$I_C = 0,47 \angle 138,694$

Tabela 6: **Comparativo entre encontrado e o esperado (Fasores Originais).**

Encontrado	Esperado
$I_A = 2,199 \angle 26,598$	$I_A = 2,2 \angle 26,6$
$I_B = 0,6 \angle -156,795$	$I_{A1} = 0,6 \angle -156,8$
$I_C = 0,47 \angle 138,694$	$I_{A2} = 0,47 \angle 138,7$

6. DISCUSSÃO

O teorema de Fortescue é bastante importante para o estudo de faltas em sistemas de transmissão e distribuição. Conforme apresentado por SATO E FREITAS (2015), em caso de faltas, os sistemas de proteção devem atuar para evitar os efeitos térmicos nos condutores e equipamentos, assim como minimizar os transtornos aos consumidores no instante do curto-circuito em sistemas de iluminação, computacionais e de controle.

Para corrente é utilizado a mesma formulação que para tensão, porém é necessário ressaltar alguns detalhes da corrente de sequência zero que são aplicados para proteção do sistema elétrico. (CUNHA, 2020, p.10).

Para um sistema trifásico com configuração Y aterrado ou com o neutro, como as componentes de sequência positiva e negativa são equilibradas, elas não irão contribuir para a corrente de neutro. Esta corrente apenas ocorre quando há desequilíbrios no sistema. Caso tenha impedância no neutro, essa não é vista pelas sequências positiva e negativa, ela será vista apenas pela sequência zero. Já para um sistema trifásico com configuração Y não aterrado e desbalanceado, é possível observar que não haverá corrente de sequência zero, já que essa precisa de um circuito fechado para circular. (CUNHA, 2020, p.10).

Nos sistemas trifásicos em TRIÂNGULO desbalanceado, pela lei de Kirchhoff, o somatório das correntes que entram no caminho fechado será zero, desta forma, também não há corrente de sequência zero presente nas correntes de linha. (CUNHA, 2020, p.10).

7. REFERÊNCIAS

- CPFL, 1996. "Análise estatística das atuações das proteções de linhas de transmissão em 1995". [S.l.], Relatório OSPP-002/96.
- Cunha, Z.F.C., 2020. "Análise de níveis de curto-circuito: Estudo de caso de um complexo eólico". ESCOLA POLITÉCNICA - UFRJ.
- Gomes, N.O.N., 2018. "Análise de faltas simultâneas no sistema elétrico de potência de 57 barras através do software anafas".
- GÓMEZ-EXPÓSITO, A., CONEJO, A. and Cañizares, C., 2011. "Sistemas de energia elétrica: análise e operação". Tradução e revisão técnica de Antônio Padilha Feltrin, José Roberto Sanches Mantovani, Rubén Romero, Vol. 1.
- Kindermann, G., 1997. "Curto-circuito, 2ª". Edição—Porto Alegre—Sagra Luzzatto.
- MENEZES, V.P.d., 2015. "Linhas de transmissão de energia elétrica aspectos técnicos, orçamentários e construtivos". Rio de Janeiro, Vol. 1.
- Mohan, N., 2016. "Sistemas elétricos de potência-curso introdutório". Travessa Ouvidor, Vol. 11.
- Nasser, D.T. and Tleis, A., 2008. "Power systems modelling and fault analysis: theory and practice". Published by Elsevier Ltd.
- SATO, F. and Freitas, W., 2015. "Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica". Rio de Janeiro: Elsevier.
- Stevenson, W.D., 1974. Elementos de análise de sistemas de potência. McGraw-Hill do Brasil.
- (CPFL, 1996) (Cunha, 2020) (GÓMEZ-EXPÓSITO *et al.*, 2011) (Gomes, 2018) (Kindermann, 1997) (MENEZES, 2015) (Mohan, 2016) (Nasser and Tleis, 2008) (SATO and Freitas, 2015) (Stevenson, 1974)

8. RESPONSABILIDADE AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

SHORT CIRCUIT ANALYSIS: AN UNDERSTANDING OF THE DECOMPOSITION OF THREE-PHASE PHASORS

Eduardo Mendes da Silva Correa, mendes.correa@acad.ifma.edu.br¹

Marcos Fortaleza da Sousa Silva, marcos.fortaleza@acad.ifma.edu.br²

Yesus Christian Silva Sousa, yesus.christian@acad.ifma.edu.br³

Domingos Robson Silva Costa, domingos.costa@ifma.edu.br⁴

^{1,2,3,4} Instituto Federal do Maranhão, (Avenida Newton Bello, S/N Vila Maria. 65906-335 - Imperatriz-Ma).

Abstract: In this paper will be presented a study of a three-phase electrical system in order to get its symmetrical components associated with the asymmetrical faults, with the contribution of the software Matlab. The three-phase system is the most common form of generation, transmission and distribution of electrical energy in alternating current. In this system, it is like three sources with the same amplitude and frequency, but out of phase with each other by 120°, in three more balanced ways of the system, or in three ways more efficient when compared to isolated systems. A system is balanced when are not out of phase with each other by 120°. An equivalent analysis of an unbalanced network is normally done by decomposing the unbalanced system into systems with positive, negative and zero sequence. The results presented are from its negative line, altered in a system of random trisequimes and are presented in its negative diagram, the positive sequence current, as well as its negative systems to avoid the study of thermal changes and help to avoid thermal effects and electrical. Three-phase in star and triangle configuration.

keywords: Phasors, Fortescue, Components, Symmetric, Faults.