

EXPERIMENTOS DE LABORATÓRIO USANDO CARGAS EM ESTRELA COM E SEM NEUTRO: IMPORTÂNCIA DO CONDUTOR NEUTRO EM CARGAS RESIDENCIAIS E COMERCIAIS

PAULO, R. F. DE M. BASTOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
RUA ARISTIDES NOVIS, 02 – FEDERAÇÃO – SALVADOR-BA. CEP.40.210-630
E-MAILS: *PBASTOS@UFBA.BR*

ALISSON S. DO A. DIVINO

RAFAEL C. SOARES

E-mails: *alisson.divino@outlook.com*, *rafaeldti@gmail.com*

Abstract— The professional qualification is a constant concern in the academic environment. The computer simulation of various electrical circuits is easy and has often been carried out in several courses in detriment of traditional laboratory experiments. However, conducting experiments allows the student to choose equipment, accuracy and scales, and live with problems like a bad contact, for example. Experiments allow better absorption of content for those whose visual memory is strong. Aiming to disseminate experiments two are described: one aiming to introduce the contents of symmetrical components, and other the importance of neutral in residential and commercial circuits. In the first one works with grounded circuits with balanced loads or not, with the disequilibrium obtained by opening or by changing the load of a phase; the student finds that the voltage distribution are almost always unbalanced, and determines symmetrical components of voltage and current, confirming the neutral current corresponds to three times the zero sequence component. The second are used the same settings, but with interruption of the neutral, checking up the appearing of sustained undervoltage or overvoltage, when the loads are unbalanced, that is, in most real circuits. They are used a three-phase measurer of electrical quantities and resistive loads.

Keywords— Circuit experiments, unbalanced circuits, symmetrical components, neutral conductor, star load.

Resumo— A formação profissional é uma preocupação constante no ambiente acadêmico. A simulação computacional dos diversos circuitos elétricos é fácil e tem sido realizada frequentemente nos cursos em detrimento dos experimentos tradicionais de laboratório. Entretanto, a realização de experimentos permite ao aluno escolher equipamentos, sua precisão e escalas, e conviver com problemas como, por exemplo, mau contato. Experimentos possibilitam melhor absorção do conteúdo para aqueles cuja memória visual é forte. Objetivando difundir experimentos este artigo descreve dois: um visando introduzir o conteúdo de componentes simétricos, e outro a importância do neutro nos circuitos residenciais e comerciais. No primeiro trabalha-se com circuitos aterrados com cargas equilibradas ou não, sendo os desequilíbrios obtidos pela abertura ou pela alteração da carga de uma das fases; o aluno verifica que as tensões em distribuição são quase sempre desequilibradas, e determina componentes simétricos de tensão e corrente, confirmando que a corrente do neutro corresponde ao triplo da componente de sequência zero. No segundo são usadas as mesmas configurações, porém com a interrupção do neutro, verificando-se o aparecimento de subtensões ou sobretensões sustentadas, quando as cargas são desequilibradas, ou seja, na grande maioria dos circuitos reais. São usados um medidor trifásico de grandezas elétricas e cargas resistivas.

Palavras-chave— Experimentos de circuitos, circuitos desequilibrados, componentes simétricos, condutor neutro, cargas em estrela.

1 Introdução

O ensino dos circuitos elétricos trifásicos é bastante praticado com ênfase nos circuitos equilibrados, embora nos sistemas de distribuição a maioria das tensões seja desequilibrada. Também as cargas largamente utilizadas são desequilibradas, em especial as cargas residenciais e comerciais. Isto porque os desequilíbrios em geral não são excessivos.

As tensões e correntes desequilibradas são representadas por fasores equilibrados que são os seus componentes simétricos, e para os sistemas trifásicos trabalha-se com os componentes de sequência positiva, negativa e zero. A simulação dos circuitos elétricos através de programas computacionais está muito difundida, porém a experimentação através montagem de circuitos em laboratório permite realizar experimentos que mais facilmente ficam gravados na memória dos alunos, na maioria das vezes.

Outro aspecto que está nas normas brasileiras relativas às instalações elétricas em baixa tensão é a necessidade do condutor neutro e do condutor de proteção (aterramento), com a definição dos esquemas de aterramento [ABNT, 2004]. Como as ligações residenciais e comerciais podem ser monofásicas, bifásicas e trifásicas, as cargas são quase sempre ligadas em estrela com neutro aterrado, e em várias situações o aterramento está na subestação ou na entrada. Deve-se levar até as cargas os condutores neutro e de proteção (esquema TN-S), embora ainda existam instalações antigas onde o mesmo condutor tinha as funções de neutro e terra. A importância do aterramento é enfatizada nas disciplinas que tratam das instalações, da proteção e da segurança tanto humana quanto dos equipamentos.

Neste artigo são descritos dois experimentos de laboratório, um focado em circuitos equilibrados e desequilibrados, sendo a carga em estrela (Y) com neutro aterrado, de modo a permitir a realização de cálculos usando malhas e/ou componentes simétricos, e a rea-

lização da comparação dos resultados obtidos com aqueles teóricos esperados. São enfatizadas as comparações das correntes de neutro e as componentes de sequência zero das correntes de fase.

No segundo experimento, são realizadas as mesmas configurações, porém o condutor neutro é interrompido, e são medidas as tensões que aparecem entre o ponto central nas cargas e o neutro que se mantém ligado ao terra na subestação ou entrada, o que possibilita verificar como as subtenções e sobretensões resultantes do deslocamento do centro da estrela são influenciadas pelas cargas efetivamente ligadas em cada fase. Esta prática permite confirmar a importância do condutor neutro, cuja descontinuidade está caracterizada como uma interrupção (falha) da concessionária, conforme procedimentos da agência reguladora (ANEEL, PRODIST, Módulo 1, 2016).

2 Breve fundamentação teórica

Em 1918 Fortescue desenvolveu uma ferramenta para lidar com circuitos polifásicos desequilibrados, em que um sistema desequilibrado de n fasores correlacionados pode ser decomposto em sistemas de fasores equilibrados denominados componentes simétricas (Stevenson, 1986). Para os sistemas trifásicos, as tensões desequilibradas $\hat{U}_a$, $\hat{U}_b$ e $\hat{U}_c$ podem ser decompostas em suas componentes simétricas, componentes de sequência positiva, negativa e zero. Assim, a corrente I_a é dada por

$$\hat{I}_A = \hat{I}_{a0} + \hat{I}_{a1} + \hat{I}_{a2} \quad (1)$$

A corrente I_c função dos seus componentes simétricos é

$$\hat{I}_C = \hat{I}_{c0} + \hat{I}_{c1} + \hat{I}_{c2} \quad (2)$$

A sequência positiva é uma sequência de fasores equilibrados, módulos iguais e diferenças angulares de 120° , que giram em sentido anti-horário (ou direto), a sequência negativa também é composta por fasores equilibrados, mas que giram em sentido horário (ou inverso), e a zero por fasores iguais em módulo e ângulo. Estas representações dos fasores tensões ($\hat{U}$) das fases A, B e C estão mostradas na Figura 1, sendo os subíndices 1, 2 e 0 correspondentes às sequências positiva, negativa e zero, respectivamente.

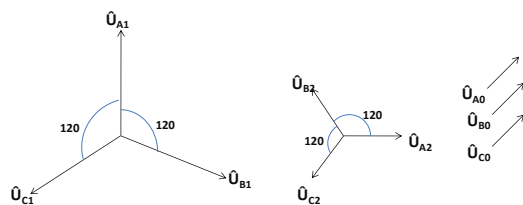


Figura 1. Componentes simétricas de sequência.

O fasor “a” é unitário, rotacional, logo $a = 1 / 120^\circ$. Então, as componentes de $\hat{U}_a$, $\hat{U}_b$ e $\hat{U}_c$ podem ser obtidas a partir de suas componentes simétricas como mostra esta equação

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_{a0} \\ \hat{U}_{a1} \\ \hat{U}_{a2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

A partir de (3) obtém-se a equação matricial que relaciona os componentes de sequência em função das tensões de fase, como

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{a0} \\ \hat{U}_{a1} \\ \hat{U}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

As equações de corrente são análogas, sendo suficiente apenas trocar $\hat{U}$ por $\hat{I}$ nas equações (3) e (4).

Cabe ressaltar que para a solução de circuitos desequilibrados por componentes simétricos, terão que ser montados os diagramas de impedância das respectivas sequências, positiva, negativa e zero, e uma grande facilidade é que nestes referidos diagramas somente circulam as suas próprias correntes, isto é, no diagrama de sequência positiva apenas circulam as correntes de sequência positiva, no de sequência negativa apenas as de sequência negativa, etc. O artigo não detalha por ser algo comum na literatura de sistemas elétricos de potência.

Outra facilidade associada à teoria dos componentes simétricos vem com a observação de $\hat{I}_{a0}$ em (4): conclui-se que só circula esta componente de sequência nos circuitos com neutro, pois são aqueles que permitem que a soma das correntes de fase seja diferente de zero. Assim, nas cargas em delta e em estrela sem neutro, não circulam correntes de sequência zero, ou, como colocado por Stevenson (1986), “*num sistema trifásico, a soma das correntes de linha é igual à corrente I_n no caminho de retorno ao neutro*”. Logo,

$$\hat{I}_n = 3 \cdot \hat{I}_{a0} = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (5)$$

Nas ligações trifásicas com ligação em estrela a quatro fios, onde se leva até as cargas os três condutores de fase e o neutro, estando o neutro aterrado, e sendo solidamente aterrado, com impedância de terra pequena, garante-se que as tensões que aparecem entre neutro (o centro da estrela) e a terra são relativamente pequenas e, portanto, não comprometem a segurança das pessoas e das instalações. À medida que a impedância de aterramento cresce aparece uma tensão $\hat{U}_{ON}$, entre o centro da estrela (O) e a terra (neutro aterrado, N) que pode ser significativa, fenômeno abordado na literatura como “deslocamento do neutro” (Edminister, 1985, pp.212-223).

O sistema a quatro fios que tenha experimentado a ruptura do condutor neutro transforma-se no denominado sistema a três fios, no qual devido ao deslocamento do neutro, podem aparecer tensões elevadas entre o centro da estrela e a terra, bem como sub-tensões ou sobretensões nas fases (Barreto et al, 2012). Em circuitos com carga desequilibrada em estrela sem neutro, a tensão que aparece entre o centro da estrela (ponto 0) e o neutro aterrado (N) é dada por (Barreto et al, 2012, p.144)

$$\hat{U}_{ON} = [Y_a \cdot \hat{U}_{AN} + Y_b \cdot \hat{U}_{BN} + Y_c \cdot \hat{U}_{CN}] / (Y_a + Y_b + Y_c) \quad (6)$$

Exemplo clássico é quando num sistema estrela a três fios, com carga equilibrada desliga-se a carga da fase A; então, as cargas das fases B e C ficam submetidas não mais a tensão de linha dividido por raiz de três, porém apenas à metade da tensão de linha, metade de $\hat{U}_{BC}$, experimentando portanto sub-tensões, reduzindo a potência dissipada no caso de cargas resistivas, e com risco de danos no caso de cargas como motores. Neste exemplo da fase A ser desligada, caso as cargas das fases B e C não sejam iguais, forma-se um divisor de tensão, e aquela carga de maior impedância fica submetida a uma tensão maior.

A importância do neutro, e mais ainda do neutro aterrado nas instalações de baixa tensão é garantir que o ponto central da estrela não irá se deslocar, mantendo-se, portanto, os requisitos de segurança.

3 Os dois experimentos sugeridos

3.1 Circuitos a quatro fios, cargas em estrela

Este experimento é objeto de aulas com alunos da graduação em engenharia elétrica há mais de seis anos. São usadas lâmpadas incandescentes (LI) de 60 W e 40W, 127 Volts (V), amperímetro Engro, fundo de escala 600mA, voltímetro Engro, escala 120V, ambos exatidão de 0,5%, e para a medição das grandezas potência, tensão e corrente tanto um analisador de grandezas elétricas da Embrasul, modelo RE-6000, como atualmente o analisador de potência e harmônicas da Instrutherm, modelo AE-200.

Por ocasião dos experimentos sempre há ligeiro desequilíbrio nas tensões, sendo mostrados os resultados nos quais o desequilíbrio foi maior. São realizadas três configurações diferentes para o circuito trifásico em estrela a quatro fios, com neutro aterrado: carga equilibrada, um condutor aberto e circuito desequilibrado. Inicia-se com carga equilibrada, usando-se três lâmpadas incandescentes de 60W, 127V. Sendo a tensão secundária no laboratório da Escola Politécnica da UFBA 220/127V, teoricamente se esperaria tensões equilibradas, mesmo módulo nas três fases, defasadas de 120° ; considera-se a fase A como referência (0 graus). Conforme cálculo teórico as correntes devem ser equilibradas, correspondendo a um módulo de 472mA e ângulo zero para fase A, e

120° negativos para a fase B. Também, teoricamente, apenas deveria existir $\hat{I}_{a1}$, igual a $\hat{I}_A$.

Como o alicate de corrente do AE-200 é para 100 e 10 Amperes, utilizou-se o recurso do mesmo abraçar com 10 voltas os condutores de fase, e portanto os resultados de corrente e potência estão multiplicados por 10 nas fotos aqui mostradas como figuras.

Por outro lado, nas tabelas mostrando os resultados os valores destas duas grandezas já estão divididos por dez. Para a carga em estrela equilibrada, a ligação foi feita conforme Figura 2, e os resultados obtidos estão vistos em fotografia como na Figura 3.

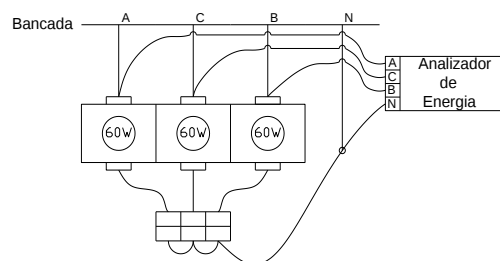


Figura 1

Figura 2. Carga em estrela equilibrada, com neutro.

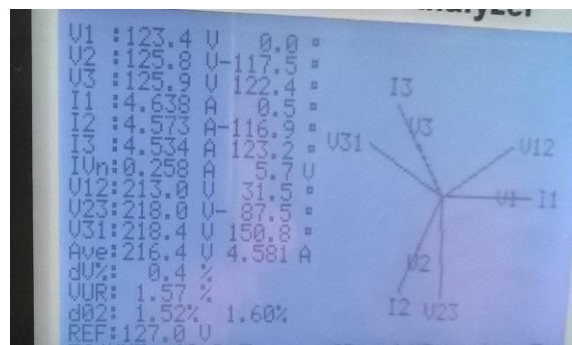


Figura 3. Carga Y equilibrada, tela das medidas das grandezas e diagrama fasorial.

Estes resultados, com correntes em mA e potência em Watt são mostrados na Tabela 1, onde $|\hat{U}|$ são as tensões (Volt), ângulos das tensões e correntes estão em graus, e $|\hat{I}|$ são os módulos das correntes nas fase A, B e C (mA). Nesta situação o amperímetro colocado no neutro não registrou corrente, e a tensão entre o centro da Y e o neutro aterrado ($\hat{U}_{ON}$) foi de 0,7V.

Tabela 1 – Grandezas medidas, carga Y equilibrada.

	Fase A	Fase B	Fase C
$ \hat{U} $ (Volt)	123,4	125,8	125,9
Ang. $\hat{U}$ (grau)	0	-117,5	122,4
$ \hat{I} $ (mA)	464	457	453
Ang. $\hat{I}$ (grau)	0,5	-116,9	123,2
P (Watt)	57,2	57,4	57,0

Este caso de ligação Y com neutro e carga equilibrada, uma vez calculadas as componentes simétricas da

tensão e das correntes, encontram-se os valores colocados nas equações (7) e (8), respectivamente em Volt e miliAmpère.

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{a0} \\ \hat{U}_{a1} \\ \hat{U}_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,9 \angle -112,1^\circ \\ 125,0 \angle +1,6^\circ \\ 2,0 \angle -114,7^\circ \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,6 \angle -70,5^\circ \\ 458,1 \angle +2,3^\circ \\ 6,7 \angle -61,3^\circ \end{bmatrix} \quad (8)$$

Vê-se que o desequilíbrio de tensão não é significativo sendo de 1,6%, relação ente módulos das sequencias negativa e positiva. O módulo da sequencia positiva (125,0V) representa 98,4% da tensão nominal (127V). Para as correntes predomina também a sequencia positiva estando 3% abaixo do valor esperado, mas como dito, a tensão não foi a nominal.

Para a tensão de 98,4%, sendo a carga resistiva, impedância constante, seria esperada uma potência trifásica total de 174,3W e não 180,0W, mas se mediu 171,6W, justificado em função da precisão dos instrumentos, dos desvios tolerados no valor da resistência das lâmpadas incandescentes, e da dependência das mesmas em relação à temperatura.

No segundo caso do primeiro experimento, a LI da fase A é substituída por uma de 40W, logo há um desequilíbrio da carga, que teoricamente totaliza 160W. Os valores das tensões, correntes e potências registradas são vistos na foto da Figura 4 alertando que para as correntes e potências reais os valores em tela devem ser divididos por 10. O módulo da corrente da fase A é de 304,1mA, da fase B 456,7mA, e da fase C 453,3mA; já a potência da Fase A é 37,6W.

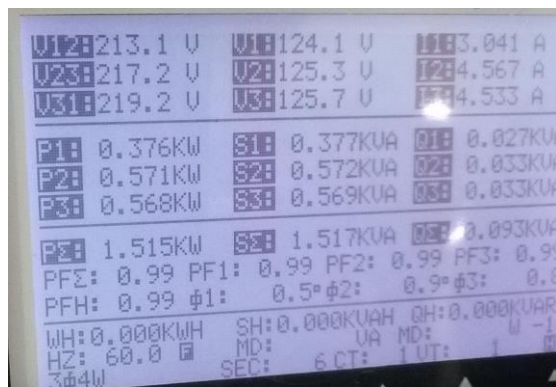


Figura 4. Medidas com carga Y desequilibrada a 4 fios.

Os valores dos ângulos de tensão e correntes são obtidos em outra tela enquanto a corrente registrada no neutro foi de 160mA. Uma vez calculadas as componentes simétricas das correntes, foram determinados os valores em mA indicados na equação (9).

Vê-se que o triplo da componente de sequência zero ($3\hat{I}_{a0}$) corresponde a 147,9mA, valor bem próximo de 160mA registrado no miliamperímetro colocado no

neutro. Melhor aproximação não foi conseguida devido a resolução do amperímetro usado.

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_{a0} \\ \hat{f}_{a1} \\ \hat{f}_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 49,3 \angle +189,4^\circ \\ 404,6 \angle +2,5^\circ \\ 51,9 \angle +186,9^\circ \end{bmatrix} \quad (9)$$

Por fim, no terceiro caso com neutro aterrado provoca-se um desequilíbrio maior abrindo-se a fase A, antes com uma LI de 40W. A carga são duas LI de 60W nas fases B e C, tendo as correntes nestas fases registrado valores próximos ao da carga equilibrada (455mA em B e 451mA em C), mas na fase A a corrente é nula. A corrente medida no neutro foi 450mA. São efetuados os cálculos dos componentes simétricos destas correntes:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_{a0} \\ \hat{I}_{a1} \\ \hat{I}_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 146,4 \angle +182,8^\circ \\ 302,0 \angle +2,3^\circ \\ 155,5 \angle +182,7^\circ \end{bmatrix} \quad (10)$$

Constata-se que o desequilíbrio de correntes é bem maior que no caso anterior, e que $3I_{a0}$ agora vale 439mA, valor 2,4% diferente da medição de $\hat{I}_n$.

Em todos os três casos, determinadas as componentes simétricas de tensão e corrente, é interessante também comparar a potência trifásica medida com o valor calculado para a potência total como

$$S = 3 \cdot [\hat{U}_{a0} \cdot \hat{I}_{a0}^* + \hat{U}_{a1} \cdot \hat{I}_{a1}^* + \hat{U}_{a2} \cdot \hat{I}_{a2}^*] \quad (11)$$

Outros circuitos desequilibrados já fizeram parte dos experimentos, mas não foram descritos face a limitação do texto. Por exemplo, carga trifásica composta de uma LI de 40W na fase A, outra de 60W na fase B, e a fase C em aberto, situação na qual $\hat{I}_n$ é da ordem de 415 mA, e os módulos de $\hat{I}_{a0}$ e $\hat{I}_{a2}$ são iguais. Outra configuração usada é desequilibrar bastante com a carga monofásica, isto é, colocando-se a LI de 60W apenas em uma das fases, quando se obtém a corrente de neutro igual a de fase.

3.2 Circuitos a três fios, carga em estrela - configuração análoga a estrela quatro fios com interrupção do neutro

Estas três configurações, uma de carga equilibrada e duas com as cargas desequilibradas, são repetidas neste segundo experimento em Y a três fios, já que o condutor neutro é interrompido. Usa-se ainda o analisador de energia nas medições trifásicas, mas no neutro troca-se o amperímetro pelo voltímetro para medir as tensões entre ON, visando avaliar as subtenções e sobretensões resultantes do deslocamento do

centro da estrela que é influenciado pelas cargas ligadas em cada fase.

Com a carga trifásica equilibrada, três LI de 60W em cada fase, os resultados são semelhantes ao primeiro descrito no item anterior, apenas registrando-se 2,4V entre centro da estrela e neutro aterrado ($\hat{U}_{ON}$).

Para a segunda configuração a Figura 5 mostra a inserção do voltímetro para medir $\hat{U}_{ON}$, e o desequilíbrio devido a LI de 40W na fase A. A solução teórica é obtida a partir das correntes de malha, ou pelo método do deslocamento do neutro (Barreto et al, 2012). Por malha, visualizando-se a Figura 6, escreve-se:

$$\begin{aligned}\hat{I}_a &= \hat{I}_1 \\ \hat{I}_b &= \hat{I}_2 - \hat{I}_1 \\ \hat{I}_c &= -\hat{I}_2\end{aligned}\quad (12)$$

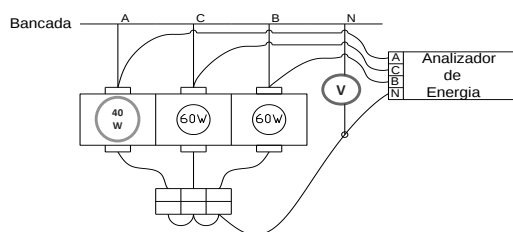


Figura 5. Sistema a 3 fios, carga Y dequilibrada, e voltímetro para medir $\hat{U}_{ON}$. Olhando a Figura 6, as equações de malha são

$$Z_a \cdot \hat{I}_1 + Z_b (\hat{I}_1 - \hat{I}_2) = \hat{U}_{AB} \quad (13)$$

$$Z_b \cdot (\hat{I}_2 - \hat{I}_1) + Z_c \cdot \hat{I}_2 = \hat{U}_{BC} \quad (14)$$

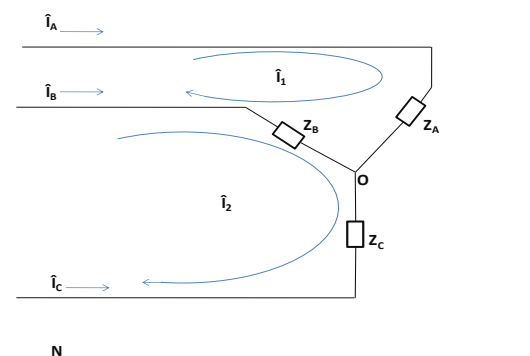


Figura 6. Malha do sistema a 3 fios, carga Y dequilibrada, solução por malhas.

Onde $\hat{U}_{AB}$ é a tensão entre as fases A e B, e $\hat{U}_{BC}$ entre as fases B e C, lembrando que se usou o circunflexo sobre I e U para denotar os fasores.

A solução pelo método do deslocamento do neutro (Menezes, 2016), faz-se usando (Barreto et al, 2012, p.143), equação (6) vista no item anterior.

Para este caso da carga Y desequilibrada a três fios, teoricamente, usando os valores relativos as admitâncias das LI de 40W ligada na fase A e LI de 60W nas demais, e empregando a equação (6), determina-se $\hat{U}_{ON} = -15,87$ V. Deste modo, espera-se uma sobretensão na fase A pois,

$$\hat{U}_{AO} = \hat{U}_{AN} - \hat{U}_{ON} = 127,0 + 15,87 = 142,9 \text{ V} \quad (15)$$

Nas fase B e C são esperadas subtensões de :

$$\hat{U}_{BO} = 119,8 \text{ V} \angle -113,4^\circ \quad (16)$$

$$\hat{U}_{CO} = 119,8 \text{ V} \angle 113,4^\circ \quad (17)$$

Teoricamente as LI das fases B e C consumiriam 53,4W e não 60W, e a da fase A 50,6W devido à sobretensão, ou seja 26,5% além da potência nominal; a corrente Ia seria 354mA, e as demais 446mA.

Montado o experimento, os valores encontrados correspondem àqueles visualizados na foto da Figura 7, quais sejam (em módulo, V, e ângulo, graus)

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{AO} \\ \hat{U}_{BO} \\ \hat{U}_{CO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 141,9 \angle 0,0^\circ \\ 116,1 \angle -111,6^\circ \\ 120,6 \angle +112,8^\circ \end{bmatrix} \quad (18)$$

A sobretensão medida na fase A é 11,7% superior à nominal, 127V; se a carga for um motor ou equipamento eletrônico poderá queimar. As correntes medidas (Figura 7) são (módulo, mA, e ângulo em graus)

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_A \\ \hat{I}_B \\ \hat{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 328 \angle 0,6^\circ \\ 439 \angle -110,8^\circ \\ 443 \angle +113,4^\circ \end{bmatrix} \quad (19)$$

Vê-se que a fase A registra uma sobrecorrente, e nas demais fases há subcorrente

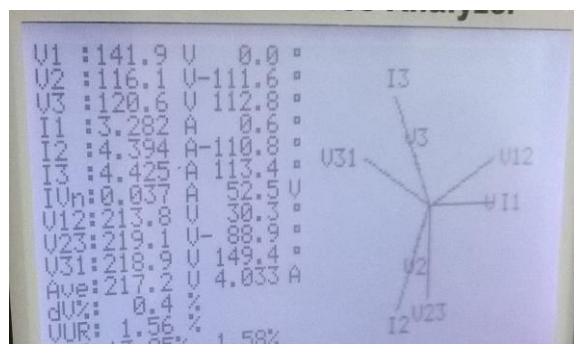


Figura 7. Sistema a 3 fios: medidas da carga Y dequilibrada.

Passando à terceira configuração do experimento, carga em Y a três fios, porém com a fase A em aberto (resistência infinita): neste caso $Y_A = 0$. A solução por malha, Figura 6, fica fácil já que $\hat{I}_1$ é nula, bem como $\hat{I}_A$, enquanto $\hat{I}_B = -\hat{I}_C$. Este é o caso de condutor aberto, no qual as equações de contorno são iguais às do curto fase-fase, entre B e C; àqueles alunos que já estudaram faltas, pede-se a solução utilizando este recurso.

A solução usando o deslocamento do neutro resulta

$$\hat{U}_{ON} = -63,5 \text{ V} \quad (20)$$

Vê-se que a tensão entre o centro da Y e o neutro aterrado já supera 30,0V, sendo bastante perigoso qualquer pessoa tocar neste ponto central. A sobre-tensão esperada na fase A é

$$\hat{U}_{AO} = \hat{U}_{AN} - \hat{U}_{ON} = 127,0 + 63,5 = 190,5 \text{ V} \quad (21)$$

O valor teórico para a corrente na fase B seria

$$|\hat{I}_B| = 220 / (2.268) = 410 \text{ mA} \quad (22)$$

Teoricamente a tensão sobre cada uma das LI de 60W seria a metade de 220V, daí com tal subtensão a potência dissipada esperada é de 45W. O ponto central (O) desloca-se para o meio de $\hat{U}_{BC}$.

Interessante é que no experimento esta subtensão nas lâmpadas é representativa, tanto que se nota a diminuição da potência pela luz irradiada, a qual cai bastante, sendo percebida visualmente. Os valores de tensão e corrente medidos, bem como o diagrama fasorial, estão na foto mostrada na Figura 8.

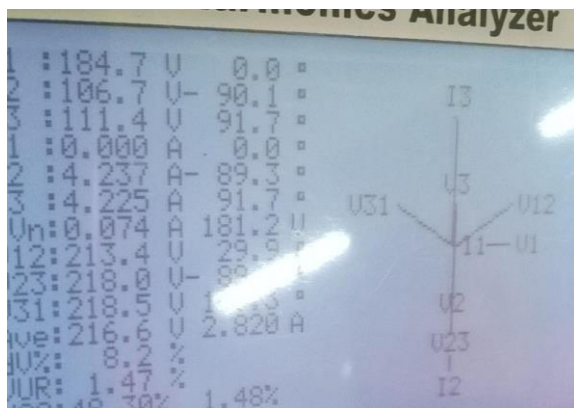


Figura8. Sistema a 3 fios: medidas só com LI nas fases B e C.

Teoricamente $\hat{U}_{BO}$ teria módulo de 110V e ângulo de -90° , tendo-se medido 106,7V e ângulo de $-90,1^\circ$. A tensão $\hat{U}_{CO}$ seria de 110V e ângulo de $+90^\circ$, medindo-se no experimento 111,4V e ângulo de $91,7^\circ$. Os módulos medidos para as correntes foram 424mA para $\hat{I}_B$, e 423mA para $\hat{I}_C$. As divergências são fruto das tolerâncias nos valores das resistências das LI, e devido ao desequilíbrio das tensões secundárias da rede. A potência total teórica esperada era de 90,0W, e o valor medido foi de 92,1W.

Ainda com o neutro interrompido, vale mostrar aos alunos que na hipótese de uma destas LI queimar ou vir a ser desligada, a outra também se apaga, e nesta condição a tensão $\hat{U}_{ON}$ tem módulo de 127V, sendo extremamente perigoso tocar no ponto central da ligação Y da carga.

Outras situações podem ser experimentadas, inserindo-se propositalmente um resistor entre os pontos O e N, situações não descritas face aos limites do artigo.

4 Conclusão

São mostrados dois experimentos com carga em estrela a quatro fios e a três fios. Em cada um foram examinadas três configurações distintas de carga.

O primeiro experimento permitiu comprovar os valores teóricos esperados quando realizadas as medições, em especial mostrando a circulação da corrente pelo neutro quando há desequilíbrio das cargas nas fases, e a relação da corrente de neutro com a componente de sequência zero das correntes.

No segundo, carga Y a três fios, verifica-se o quanto é perigosa a interrupção do neutro, podendo gerar sobretensões e subtensões nas demais fases. Foram verificadas as elevadas tensões que aparecem entre o ponto central da estrela e o neutro aterrado, constituindo-se em grande perigo o eventual toque ao ponto central da carga em estrela.

Agradecimentos

A PROAE – Pró-Reitoria de Ações Afirmativas e Assistência Estudantil da UFBA pelas bolsas concedidas aos alunos Alisson S. do A. Divino e Rafael C. Soares, selecionados no Sistema Permanecer.

Referências Bibliográficas

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR-5410, Instalações Elétricas de baixa Tensão, 2004.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 1, Introdução, revisão 9, p.40, vigência 01.3.16, disponível em <http://www.aneel.gov.br>, acesso em 22.4.16.
- Barreto, Gilmar, Castro Junior, C. A. de, Murari, Carlos A. de F., Sato, Fujio. Circuitos de corrente alternada: fundamentos e prática. Oficina de Texto, São Paulo, 2012.
- Edminister, Joseph A. Circuitos Elétricos, Tradução Lauro Santos, 2ª ed. McGraw-Hill, Coleção Schaum, São Paulo, 1985.
- Stevenson, William. Elementos de Análise de Sistemas de Potência, 458p, 2ª Ed. McGraw-Hill, São Paulo, 1986.
- Menezes, Antonio S. C. de. O problema do deslocamento de neutro em circuitos trifásicos estrela desequilibrados. Material didático disponível em <http://app.cear.ufpb.br/~asergio/Eletrotécnica/Trifásico/Deslocamento%20de%20neutro.pdf>, acesso em 25.5.16.