

A Influência da Referência de Tensão na Avaliação de Indicadores de Qualidade de Energia

F. P. Marafão, *Member, IEEE*, S. M. Deckmann, *Member, IEEE* e H. K. Morales P.

Resumo – Este artigo discute a importância da definição correta do ponto de referência para a medida das tensões em uma rede elétrica, especialmente do ponto de vista da monitoração da qualidade da energia e instrumentação de sistemas de potência. Considerando as condições de operação de alguns circuitos elétricos, será demonstrado que a escolha incorreta do referencial de tensão pode resultar na quantificação errônea de alguns indicadores de qualidade de energia, sobretudo no caso de circuitos trifásicos com condutor de retorno. Duas abordagens clássicas foram consideradas: referencial de tensão em um ponto comum virtual e referencial no condutor de retorno. Através de resultados de simulação pôde-se comprovar a influência da escolha do referencial de tensão nos indicadores de distorção harmônica total, fator de desequilíbrio ou mesmo na identificação de afundamentos de tensão. Por fim, fazendo uso do Teorema de Blakesley, o artigo ainda discute um método para equalização das duas abordagens.

Palavras-chave — circuitos não lineares, medidas em sistemas elétricos, medidas de tensões, qualidade de energia, sistemas elétricos de potência.

I. INTRODUÇÃO

Quando se busca aprofundar as discussões e conceitos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica, depara-se com questões básicas relacionadas à medição de grandezas como tensões e correntes. Tais questões não surgem apenas devido à evolução das técnicas digitais de medição, mas principalmente devido à necessidade de entender melhor como se comporta o sistema trifásico sob condições desbalanceadas ou desequilibradas e sob alimentação com formas de ondas não senoidais.

Essas questões são fundamentais, tanto na definição de indicadores de perturbações como na formulação de conceitos relacionados com parcelas da potência suprida com formas de onda não senoidais e/ou desequilibradas. Prova disso são as várias conferências dedicadas ao tema e o crescente número de artigos publicados sobre o assunto [1]-[9].

Nesse sentido, diversas publicações têm tratado de novas “teorias de potências”, mais adequadas às condições atuais das

instalações elétricas. Destacam-se as contribuições de autores como *Debenbrock* [1], *Emanuel e Willems* [2]-[6].

As discussões têm demonstrado que a escolha do ponto de referência pode influenciar a definição dos componentes de potência e fator de potência [2]-[5], conseqüentemente, influenciando aplicações como faturamento, compensação e projeto de sistemas elétricos. Entretanto, considerando duas das abordagens de maior relevância [1], [8], no que diz respeito, por exemplo, à definição e quantificação do fator de potência, pode-se demonstrar que as diferenças quantitativas são praticamente irrelevantes em condições normais de operação, como discutido e demonstrado em [9].

Contudo, a questão em torno do referencial de tensão é muito mais ampla do que a definição ou o cálculo da potência e do fator de potência e pode ter influência direta em diversas aplicações relacionadas com a instrumentação, análise, proteção, compensação, etc.

Portanto, o foco deste trabalho trata do problema básico da escolha da referência de tensão nos sistemas trifásicos com três e quatro condutores, a fim de enfatizar que, sob certas circunstâncias, tal escolha compromete significativamente o valor das grandezas medidas, bem como a monitoração de indicadores de qualidade da energia elétrica e, por isso mesmo, merece especial atenção, tanto por parte dos usuários de instrumentos como de organismos responsáveis pelas questões normativas do setor elétrico.

II. ESCOLHA DA REFERÊNCIA DE TENSÃO EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Não é possível discutir a escolha do referencial de tensão de um circuito sem antes resgatar a definição do clássico trabalho de Blondel [10], no qual foi demonstrado que em um sistema polifásico com m condutores entre a fonte e a carga são requeridos apenas $m-1$ medidores para medir a potência total transferida da fonte para a carga. Para isso, um dos condutores é assumido como a referência nas medidas das tensões, seja ele um condutor de fase ou de retorno (neutro) (Fig. 1).

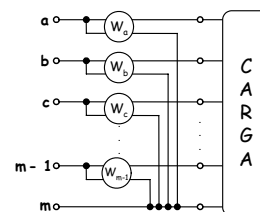


Fig. 1. Ilustração do método de medição segundo Blondel.

Tal hipótese foi estendida para várias outras aplicações de sistemas de potência, tais como: proteção, controle, análise,

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pelo apoio financeiro.

F. P. Marafão é professor do curso de Engenharia de Controle e Automação da UNESP de Sorocaba e pesquisador colaborador da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP, Brasil (e-mail: fmarafao@sorocaba.unesp.br).

S. M. Deckmann é professor aposentado da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP (e-mail: sigmar@fee.unicamp.br).

H. K. Morales P. é doutorando da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da UNICAMP, Brasil (e-mail: hmoales@dsce.fee.unicamp.br).

monitoramento, e vem sendo utilizada até os dias de hoje, como pode ser observado, por exemplo, através da proposta da IEEE Standard 1459-2000 [8]. Entretanto, outras propostas também têm sido discutidas, como a utilização de um ponto de referência externo ao circuito de potência [1],[3],[7],[10]. A seguir, será apresentada uma breve discussão sobre os dois casos e mais adiante será demonstrado como o Teorema de Blakesley [11] (Teorema de Transformação de Fontes) pode ser utilizado para associar as medições feitas através dessas duas opções para o referencial de tensão.

A. Referência de tensão externa

Neste caso, todos os condutores, inclusive o do neutro (retorno), devem ser conectados a um ponto comum externo ao circuito (flutuante), como mostra a Fig. 2. Esse ponto comum foi designado por Depenbrock como ponto de *referência virtual ou estrela virtual* (*) [1]. Assim como no trabalho de Blondel, originalmente, o autor direcionou o problema da escolha do referencial de tensão, do ponto de vista da transferência de potência.

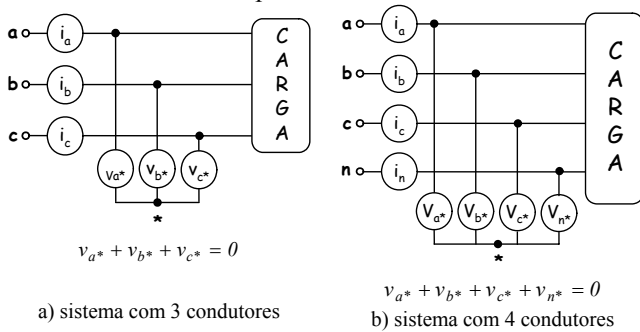


Fig. 2. Tensões medidas em relação a um "ponto virtual" (*).

Na prática, o método requer que se estabeleça como referência para medida das tensões um ponto virtual (*), e para obter esse ponto, basta conectar resistências (ou impedâncias) iguais entre cada condutor em que se deseja medir a tensão e unir as outras extremidades dessas resistências em um ponto flutuante. As quedas de tensão sobre esses resistores correspondem às tensões que caracterizam corretamente as forças eletromotrizes envolvidas.

Depenbrock demonstrou que as tensões medidas entre condutores e referência sempre somam zero, atendendo à Lei de Tensões de Kirchhoff. Portanto, o método se aplica a qualquer número de condutores, ultrapassando a questão do tipo de conexão (Y_n , Y ou Δ). Um ponto importante a ser destacado é que as tensões medidas em relação ao ponto virtual podem ser interpretadas como tensões virtuais de fase, porém, não necessariamente expressam as tensões sobre cada ramo de uma carga ligada em Y_n , Y ou Δ , especialmente quando esta for desequilibrada. Portanto, o uso das tensões em relação ao ponto virtual requer um tratamento especial para se extrair as grandezas de interesse por fase ou de linha, como será mostrado mais adiante.

B. Referência de tensão interna

Com base na proposta de Blondel, as recentes discussões e recomendações feitas pela STD 1459-2000 [8] sugerem que as tensões deveriam ser medidas em relação a um dos condutores

do sistema, resultando em tensões fase-fase (tensões de linha) ou fase-neutro (tensões de fase), dependendo da topologia do sistema abordado. Nesta abordagem, o número de sensores de tensão é menor do que no caso da medição em relação ao ponto virtual. A Fig. 3 ilustra a proposta de medição em relação a um dos condutores do sistema, seja ele de 3 ou 4 condutores.

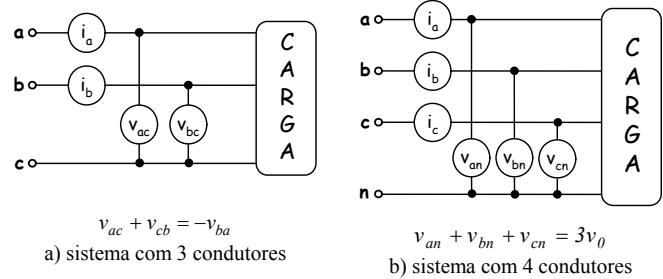


Fig. 3. Tensões medidas em relação a um dos condutores.

III. SISTEMAS ELÉTRICOS TRIFÁSICOS

A. Sistemas trifásicos com três condutores

A não-existência do condutor de retorno permite tanto a seleção de um ponto de referência virtual (Fig. 2a) quanto a de um dos três condutores (Fig. 3a) para medição das tensões.

Na conexão trifásica a três fios (sistema sem condutor de retorno), além de não haver circulação de correntes de seqüência zero, a tensão de seqüência zero também é eliminada das grandezas medidas entre fases. Essa é uma consequência direta das leis de Kirchhoff.

Em se tratando de sistemas a três fios, e considerando diferentes aplicações, ambos os métodos de medição podem apresentar vantagens e desvantagens. Por exemplo:

- Considerando aplicações de baixa tensão, pode-se concluir que a medição de grandezas de linha (Fig. 3a) resulta em redução dos custos associados aos transdutores de tensão;
- Com a referência no ponto comum externo (Fig. 2a), as medidas têm que ser manipuladas (adequadas) para se obter as tensões de linha;
- Entretanto, se considerarmos aplicações de média e alta tensão, a medição baseada no esquema da Fig. 3a pode não ser a mais adequada. Nesses níveis de tensão, em geral, duas metodologias costumam ser empregadas: a primeira prevê a utilização de transformadores de tensão (TPs), os quais, por trabalharem com tensões de linha elevadas, possuem custo elevado. A segunda estratégia, com custos reduzidos, é o emprego de divisores capacitivos, os quais, em geral, utilizam o aterramento físico do sistema elétrico como referencial de medida. O problema é que tal aterramento é o caminho natural de circulação para correntes transitórias, correntes de fuga, descargas atmosféricas, etc., resultando em sistemas com baixo nível de proteção para os equipamentos de medição;
- Assim, considerando o caso anterior (média e alta tensão), a utilização da referência em um ponto virtual pode ser uma boa estratégia, já que garantiria que os equipamentos não estejam sujeitos a tais

distúrbios relacionados à malha de aterramento do sistema. No entanto, essa conexão com ponto de referência flutuante pode criar problemas de segurança ao operador do instrumento, uma vez que, durante transitórios, a tensão do ponto comum pode flutuar e atingir valores elevados em relação ao terra real (operador).

B. Sistemas trifásicos com quatro condutores

A presença do condutor de retorno permite a existência de componentes de seqüência zero (homopolares: i_0 , v_0), seja da fundamental ou de harmônicas e, neste caso, é extremamente importante que tais componentes sejam consideradas nas análises da qualidade da energia ou mesmo no cálculo das potências envolvidas. De acordo com a Fig. 3b, a referência no condutor de retorno permite a detecção da tensão de seqüência zero (v_0) somando-se as tensões das fases.

Conforme a Fig. 2b, a detecção de eventuais componentes homopolares seria medida diretamente através do quarto transdutor para o ponto virtual (v_{n^*}), o qual representa um ponto comum flutuante, cujo potencial absoluto é irrelevante, uma vez que somente as diferenças de tensão são impostas ao sistema trifásico. Da mesma forma que para os sistemas com 3 condutores, algumas discussões e comentários devem ser destacados em função das medidas de tensão para os sistemas a 4 condutores:

- Em se tratando dos custos associados aos transdutores, fica evidente que a topologia sugerida na Fig. 3b seria a mais indicada, pela redução de um sensor de tensão;
- Por outro lado, diversas referências propõem a medição das tensões de fase (a,b,c) e também do neutro (n) [12-16]. O problema nesse caso é que nem sempre fica claro quem é a referência de tensão e qual a informação contida nas medições realizadas. Usualmente, as tensões de fase são consideradas em relação ao condutor neutro e a tensão de neutro é medida em relação à terra ou a um ponto comum flutuante (*), o que pode não fornecer o mesmo resultado. Para satisfazer a Lei de Kirchhoff, o somatório das tensões medidas deve ser zero, o que só acontece quando as tensões são medidas em relação ao mesmo potencial;
- Comparando-se as equações referentes às conexões 2b e 3b, fica a questão: qual é a relação entre v_{n^*} e $3v_0$, uma vez que as tensões medidas em relação ao ponto virtual são diferentes das medidas em relação ao neutro? Portanto, considerando as duas topologias, é imprescindível a discussão sobre o impacto na avaliação de componentes homopolares (seqüência zero), bem como no cálculo do valor eficaz (RMS) ou durante variações de tensão de curta duração (VTCDs), etc. Como será demonstrado, a tensão medida em relação a um ponto virtual tem suas componentes homopolares (fundamental ou harmônicas), atenuadas de um fator $1/m$ ($m = 4$ condutores), o que tem impacto direto na avaliação da qualidade da energia de um sistema.

IV. INFLUÊNCIA DO REFERENCIAL DE TENSÃO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA

Serão apresentadas várias simulações de tensões em sistemas trifásicos com 3 e 4 condutores. O principal objetivo é focalizar a influência da escolha da referência para medição das tensões sobre os principais indicadores de Qualidade da Energia Elétrica. As medições das tensões resultantes das duas formas de medição (referência em um dos condutores ou no ponto virtual) serão comparadas com as medições nos terminais da carga, na presença de distúrbios, tais como:

- Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD);
- Distorções Harmônicas;
- Desequilíbrio das Tensões.

No primeiro caso, são gerados eventos na fonte de tensão na forma de subtensões, para quantificar o impacto da referência das tensões na análise de VTCD's. No segundo caso, são geradas distorções na fonte de tensão injetando-se harmônicos ímpares até a décima quinta ordem, com amplitudes de 50% da fundamental para salientar o efeito de sua presença. No terceiro caso, são impostos desequilíbrios através da fonte de tensão, gerando fatores de desequilíbrio de seqüência negativa e zero, respectivamente, para cada sistema (3 ou 4 condutores).

Os resultados obtidos através de simulação foram confirmados através de medições utilizando-se uma fonte programável Califórnia 4500iL.

A. Medições trifásicas com três condutores

Considerando a avaliação de grandezas de linha (carga em delta), no caso da medição em relação ao ponto virtual é necessário fazer uma adaptação no algoritmo, já que estas tensões são tensões virtuais de fase, e as tensões de linha podem ser expressas como:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{a^*} - V_{b^*} \\ V_{bc} &= V_{b^*} - V_{c^*} \\ V_{ca} &= V_{c^*} - V_{a^*} \end{aligned}$$

No caso de um evento de subtensão, a Fig. 4 mostra que os dois métodos de medição representam adequadamente o impacto sofrido efetivamente pela carga (curvas sobrepostas), seja em termos de magnitude como de duração do afundamento.

A Fig. 5 mostra que as duas topologias de medição discutidas são equivalentes sob a ótica da medição das componentes harmônicas, assim representando seu impacto sobre as cargas (espectros sobrepostos).

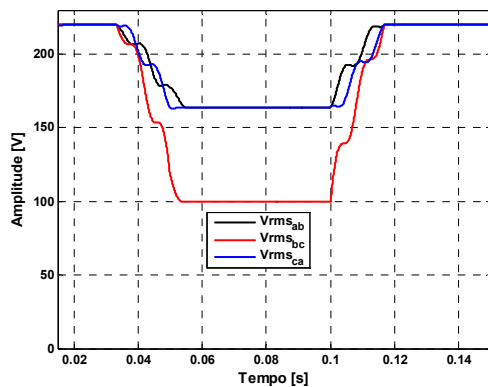


Fig. 4. Evolução do valor RMS das tensões de linha durante um afundamento de tensão entre as fases B e C, de 220V para 100V para 100V (4 ciclos).

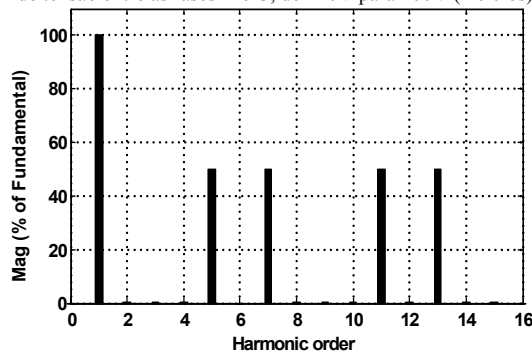


Fig. 5. Análise espectral de uma das tensões de linha para ambas as topologias de medição.

Para a avaliação do desempenho das duas metodologias, quanto ao indicador de desequilíbrio de tensão, a fonte trifásica foi definida com valores de amplitude e fase como indicado na Tabela I.

TABELA I – TENSÕES E ÂNGULOS PROGRAMADOS NA FONTE.

Tensões na fonte	Teste 1		Teste 2	
	Amplitude	Ângulo	Amplitude	Ângulo
v_a	179.61 V	0°	179.61 V	0°
v_b	159.81 V	-104.4°	159.81 V	-104.4°
v_c	208.59 V	132.1°	208.59 V	144°
	Teste 3		Teste 4	
	Amplitude	Ângulo	Amplitude	Ângulo
v_a	197.57 V	0°	197.57 V	0°
v_b	171.34 V	-125.21°	171.34 V	-114.79°
v_c	171.34 V	125.21°	171.34 V	114.79°

Neste caso, o fator de desequilíbrio de seqüência negativa ($K^- = |V^-/V^+|$) resulta idêntico para as duas metodologias de

medição (respectivamente 15.92, 19.49, 10, 0, para os testes de 1-4), coincidindo também com o valor teórico e a medição nos terminais da carga. Como era esperado, o fator de desequilíbrio de seqüência zero ($K^0 = |V^0/V^+|$) resulta nulo em função da não-existência de condutor de retorno.

B. Medições trifásicas com quatro condutores

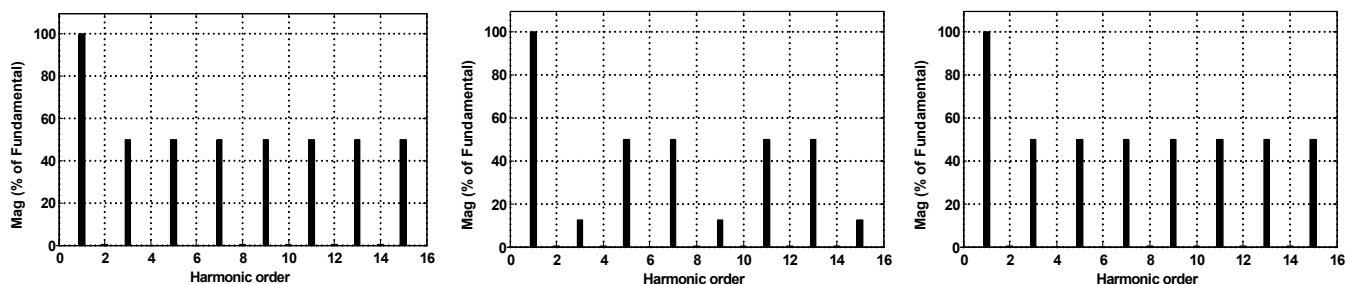
A Fig. 6a mostra que a medição utilizando a referência das tensões no condutor de retorno detecta corretamente a presença dos harmônicos ímpares, com amplitudes de 50%. Portanto, nesta configuração está sendo quantificado o verdadeiro impacto na carga, Fig. 6c. Notar que, utilizando o ponto virtual como referência das tensões (Fig. 6b), os harmônicos múltiplos de 3 não foram detectados corretamente. Tais componentes homopolares são atenuadas pelo fator de $1/4$ com relação ao espectro esperado da tensão sobre a carga, Fig. 6c. As demais componentes harmônicas, por serem de seqüência positiva ou negativa, não sofreram atenuação.

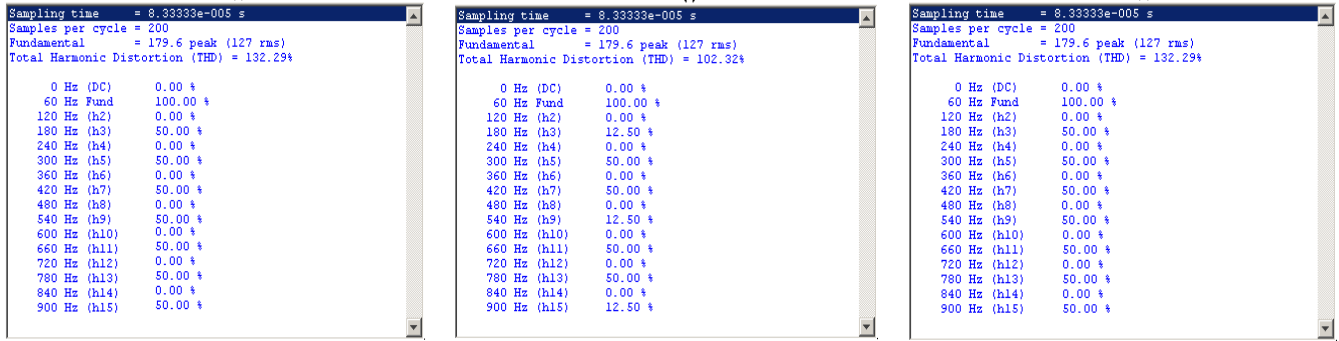
A Fig. 7 mostra que, com a referência no neutro, o evento foi corretamente detectado e quantificado (amplitude e duração) em todas as fases, representando, portanto, exatamente o impacto sobre a carga (Fig. 7c). No entanto, com a utilização do ponto de referência virtual como referência das tensões, ocorreu a detecção do evento, mas não da forma como foi gerado e percebido pela carga (Fig. 7b). Portanto, este método de medição influencia a avaliação do impacto de uma VTCD.

Segundo a Tabela II, tanto com a referência de tensão no condutor de retorno como no ponto virtual, serão acusados desequilíbrios iguais para a componente negativa (K^-). No entanto, o indicador de seqüência zero (K^0) para a medição com o ponto de referência das tensões no ponto virtual resulta diferente do esperado, sendo atenuado de um fator de $1/4$ ($1/m$).

V. ATENUAÇÃO E RECUPERAÇÃO DA COMPONENTE DE SEQÜÊNCIA ZERO

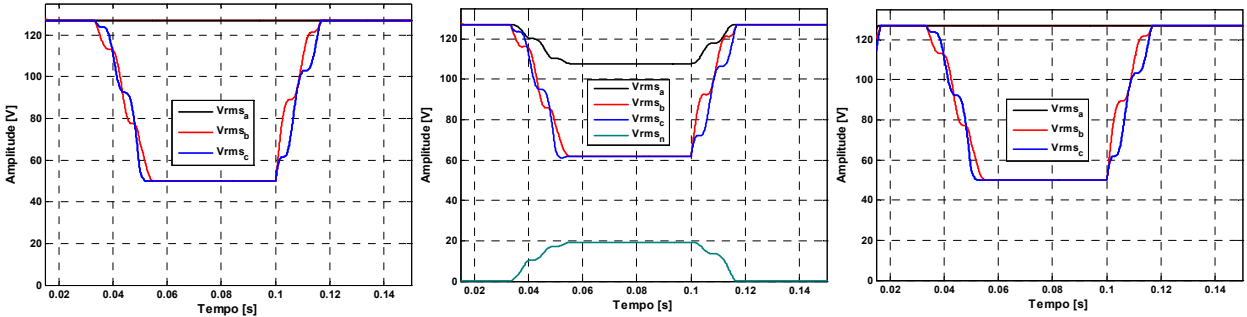
Dos resultados anteriores, conclui-se que, no caso de circuitos com condutor de retorno e na presença de componentes de seqüência zero (fundamentais ou harmônicas), existe uma diferença clara entre os dois métodos estudados. Portanto, é necessário fazer uma análise criteriosa da relação entre as duas metodologias e das diferenças encontradas.





a) Referência no neutro b) Referência no ponto virtual c) Medição nos terminais da carga

Fig. 6. Análise espectral de acordo com cada topologia de medição (4 condutores).



a) Referência no neutro b) Referência no ponto virtual c) Medição nos terminais da carga

Fig. 7. Evolução do valor RMS durante um afundamento de tensão nas fases B e C, de 127V para 50V (4 ciclos).

TABELA II: FATOR DE DESEQUILÍBRIO CALCULADO DE ACORDO COM CADA TOPOLOGIA DE MEDIÇÃO

Teste	Valor teórico		Referência na fase B		Referência no ponto virtual		Medição nos terminais da carga	
	K^- (%)	K^0 (%)	K^- (%)	K^0 (%)	K^- (%)	K^0 (%)	K^- (%)	K^0 (%)
1	15.92	0.00	15.92	0.00	15.92	0.00	15.92	0.00
2	19.49	8.02	19.49	8.02	19.49	2.01	19.49	8.02
3	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00
4	0.00	10.00	0.00	10.00	0.00	2.50	0.00	10.00

Considere-se um conjunto de fontes de tensões trifásicas e periódicas v_a , v_b e v_c , conectadas conforme a Fig. 8. Em termos de componentes simétricas, essas tensões podem ser expressas como:

$$v_a = v_a^+ + v_a^- + v_0 \tag{1}$$

$$v_b = v_b^+ + v_b^- + v_0 \tag{2}$$

$$v_c = v_c^+ + v_c^- + v_0 \tag{3}$$

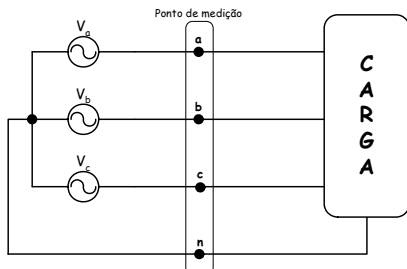


Fig. 8. Sistema trifásico a quatro condutores.

A. Medidas com referência de tensão no neutro

A Fig. 9 mostra um circuito no qual o neutro é utilizado como referência de tensão, sendo R a resistência equivalente do medidor de tensão.

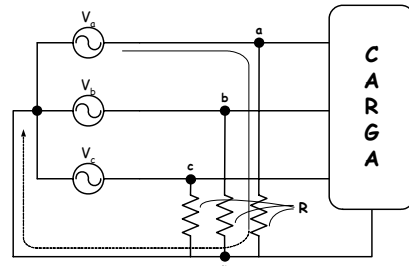


Fig. 9. Medição em relação ao neutro.

Considerando que o valor de R é muito maior que o valor das impedâncias das cargas, podem-se considerar apenas os laços formados pelas fontes de tensão e os instrumentos de medição, bem como a substituição das tensões das fontes por suas respectivas componentes de seqüência. Assim, o circuito da Figura 9 pode ser representado como na Fig. 10.

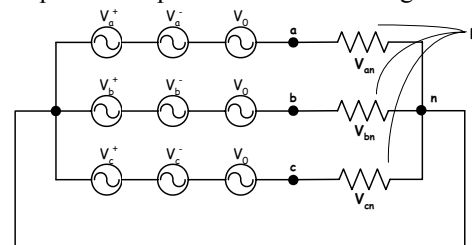


Fig. 10. Circuito equivalente para medição em relação ao neutro.

Sendo v_{an} , v_{bn} e v_{cn} , as quedas de tensão sobre cada uma das resistências do instrumento resultam nas seguintes relações:

$$v_{an} = v_a^+ + v_a^- + v_0 \quad (4)$$

$$v_{bn} = v_b^+ + v_b^- + v_0 \quad (5)$$

$$v_{cn} = v_c^+ + v_c^- + v_0 \quad (6)$$

Dessa forma, observa-se que as tensões medidas em relação ao neutro correspondem às tensões impostas pela fonte de tensão, contendo todas as componentes de seqüência (positiva, negativa e zero), como foi mostrado nos testes de VTCD's, Harmônicas e de Desequilíbrio no item anterior.

B. Medidas com referência de tensão no ponto virtual

A Fig. 11 mostra um circuito no qual um ponto virtual é utilizado como referência de tensão. Da mesma forma que no circuito da Fig. 10, podemos representar o circuito da Fig. 11 através de suas componentes de seqüência (Fig. 12).

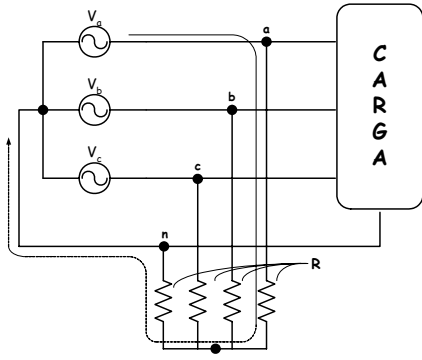


Fig. 11. Medição em relação ao ponto virtual.

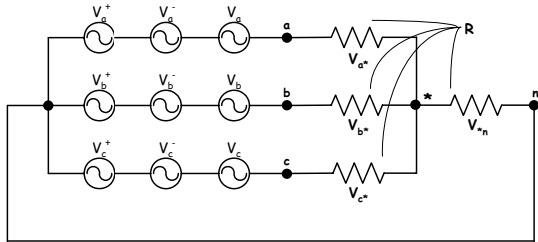
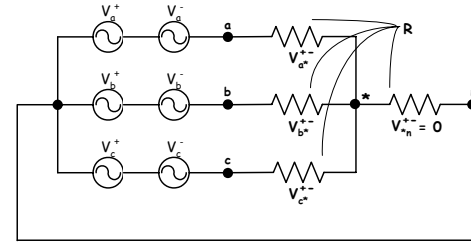


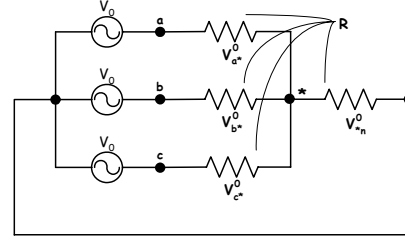
Fig. 12. Circuito equivalente para medição em relação ao ponto virtual.

Como é sabido, as componentes de seqüência negativa e zero são indicações de condições anormais (desequilíbrios e/ou harmônicas) de um circuito elétrico. Considerando que as componentes de seqüência negativa "enxergam" praticamente o mesmo circuito que as componentes de seqüência positiva, elas não necessitam, portanto, do condutor de retorno (neutro), ao contrário da componente da corrente de seqüência zero, que só ocorre na presença do condutor de retorno.

Dessa forma, considerando o teorema da superposição, pode-se decompor o circuito da Fig. 12 em um circuito contendo as componentes positiva e negativa (Fig. 13a) e um outro circuito contendo apenas as componentes de seqüência zero (Fig. 13b).



a) Circuito de seqüência positiva e negativa.



b) Circuito de seqüência zero.

Fig. 13 Circuitos de seqüência decompostos (teorema da superposição).

Do circuito da Fig. 13a temos:

$$v_{a^*}^{+-} = v_a^+ + v_a^- \quad (7)$$

$$v_{b^*}^{+-} = v_b^+ + v_b^- \quad (8)$$

$$v_{c^*}^{+-} = v_c^+ + v_c^- \quad (9)$$

Portanto, segundo o teorema da superposição, as tensões medidas em relação ao ponto virtual podem ser escritas como:

$$v_{a^*} = v_{a^*}^{+-} + v_{a^*}^0 \quad (10)$$

$$v_{b^*} = v_{b^*}^{+-} + v_{b^*}^0 \quad (11)$$

$$v_{c^*} = v_{c^*}^{+-} + v_{c^*}^0 \quad (12)$$

Por outro lado, a Fig. 13b pode ser ainda representada pelo circuito mostrado na Fig. 14, com base na transformada de Blakesley [13].

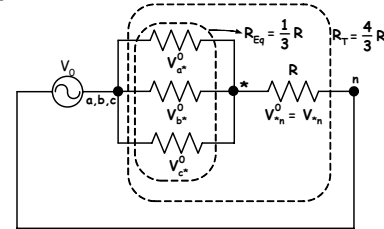


Fig. 14. Circuito de seqüência zero transformado (Teorema de Blakesley).

Assim, para o circuito da Fig. 14, temos:

$$v_{a^*}^0 = v_{b^*}^0 = v_{c^*}^0 = \frac{R_{Eq}}{R_T} \cdot v_0 = \frac{1}{4} \cdot v_0 \quad (13)$$

$$v_{n^*} = \frac{R}{R_T} \cdot v_0 = -v_{n^*} = -\frac{3}{4} \cdot v_0 \quad (14)$$

As equações (13) e (14) são as componentes de seqüência zero das tensões de fase e neutro em relação ao ponto virtual, representando apenas a componente de seqüência zero.

Desse modo, as tensões totais medidas em relação ao ponto virtual, considerando as componentes de seqüência positiva, negativa e zero, podem ser obtidas substituindo-se (13) em (10), (11) e (12):

$$v_{a^*} = v_a^+ + v_a^- + \frac{1}{4} \cdot v_0 \quad (15)$$

$$v_{b*} = v_b^+ + v_b^- + \frac{1}{4} \cdot v_0 \quad (16)$$

$$v_{c*} = v_c^+ + v_c^- + \frac{1}{4} \cdot v_0 \quad (17)$$

Observar que a componente de seqüência zero é atenuada por um fator $\frac{1}{4}$ de seu valor real, o que significa que, para aplicações nas quais sua quantificação seja necessária, deve-se realizar a correção do valor identificado. Tal adequação pode ser feita somando-se ($\frac{3}{4} v_0$) em ambos os lados da igualdade nas equações (15), (16) e (17):

$$v_{a*} + \frac{3}{4} v_0 = v_a^+ + v_a^- + v_0 \quad (18)$$

$$v_{b*} + \frac{3}{4} v_0 = v_b^+ + v_b^- + v_0 \quad (19)$$

$$v_{c*} + \frac{3}{4} v_0 = v_c^+ + v_c^- + v_0 \quad (20)$$

De (14) tem-se que:

$$\frac{3}{4} v_0 = -v_{n*} \quad (21)$$

A equação (21) fornece finalmente a relação entre a tensão medida entre o neutro e o ponto virtual e a componente de seqüência zero (homopolar).

Essa equação permite, portanto, relacionar as duas metodologias de medição, bem como prever algoritmos nos instrumentos de medição e de monitoração da QEE que podem ser adequados em função da forma de conexão adotada pelo usuário.

VI. CONCLUSÕES

Demonstrou-se que, para sistemas sem condutor de retorno, as duas metodologias fornecem resultados idênticos, devido à ausência das componentes homopolares (seqüência zero), que são filtradas pela própria topologia do sistema. No entanto, para sistemas com condutor de retorno, é necessário levar em consideração alguns aspectos, como, por exemplo, a atenuação das componentes homopolares (seqüência zero).

Dessa forma, para a medição da tensão nas instalações atuais, com a presença de distorções e desequilíbrios, a escolha do ponto de referência deve ser feita de forma criteriosa e suas implicações devem ser consideradas em aplicações como tarifação, medição, monitoramento da qualidade de energia, compensação, proteção, etc.

Apesar da demonstração de como recuperar a atenuação das componentes homopolares, atenuadas pelo ponto virtual, a forma de conexão referenciada ao neutro segue sendo a melhor opção, especialmente para aplicações em baixa tensão, em virtude de utilizar um sensor a menos para medição. Entretanto, considerando aplicações em sistemas de alta tensão (3 condutores), a utilização de um ponto virtual externo pode ser interessante, do ponto de vista da proteção dos equipamentos.

Por fim, vale destacar que a metodologia proposta para associar os dois métodos de medição das tensões, através do Teorema de Blakesley, também pode ser usada para encontrar uma convergência entre as diferentes abordagens de teorias de potência.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Depenbrock, "The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 381-387, May 1993.
- [2] A. E. Emanuel, "Reflections on the Effective Voltage Concept", in *Proc. 2003 International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-sinusoidal Conditions*, pp. 1-8.
- [3] J. L. Willems and J. A. Ghijselen, "The Choice of the Voltage Reference and the Generalization of the Apparent Power", in *Proc. 2003 International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-sinusoidal Conditions*, pp. 9-18.
- [4] J. L. Willems, "Reflections on Apparent Power and Power Factor in Non-sinusoidal and Poly-phase Situations", *IEEE Trans. Power Delivery*, Apr. 2004.
- [5] J. L. Willems, J. A. Ghijselen and A. E. Emanuel, "The Apparent Power Concept and the IEEE Standard 1459-2000", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 876-884, Apr. 2005.
- [6] A. E. Emanuel, "The Buchholz-Goodhue Apparent Power Definition: The Practical Approach For Nonsinusoidal and Unbalanced Systems". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 344-350, Apr. 1998.
- [7] F. P. Marafão, "Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais", Ph.D. dissertation, Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas, Brasil, 2004.
- [8] *IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*, IEEE Standard 1459-2000, 2000.
- [9] A. C. Moreira, F. P. Marafão, S. M. Deckmann, H. K. Morales P., "Análise Comparativa das Técnicas de Medição de Potência Baseadas na Recomendação IEEE 1459-2000 e no Método FBD", in *Proc. 2006 IEEE Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, 2006.
- [10] A. Blondel, "Measurement of Energy of Polyphase currents", in *Proc. International Electrical Congress Chicago III*, pp. 112-117, 1893.
- [11] T. H. Blakesley, "A New Electrical Theorem", in *Proc. of the Physical Society of London*, vol.13, pp. 65-67, 1894.
- [12] Lem Norma GmbH, "Power Quality Analyser TOPAS 1000 – Faster completion of measuring tasks in power networks with a single tool". Disponível em: http://www.suparule.com/docs/Topas_1000_User_Manual.pdf. Acesso em: 9 de agosto de 2007.
- [13] Fluke Corporation, "Fluke 1750 Three-Phase Power Quality Recorder – Operator manual". Available on: [http://www.fluke.com.br/brpt/products/ProductManuals.htm?cs_id=35706\(FlukeProducts\)&category=PHASE3\(FlukeProducts\)](http://www.fluke.com.br/brpt/products/ProductManuals.htm?cs_id=35706(FlukeProducts)&category=PHASE3(FlukeProducts)). Access on: 9 August 2007.
- [14] Dranetz – BMI, "Power Analyzer – User's guide". Disponível em: <http://www.google.com.br/search?hl=ptBR&q=model+658+power+quality+analyzer+&meta=>. Access on: 9 August 2007.
- [15] Reason – Tecnologia, "Registador de Parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica – Guia de usuário". Disponível em: http://ias.reason.com.br/reason/admin/uploads/File/produtos_documento/RQE-III/R007-GU.pdf. Acesso em: 9 de agosto de 2007.
- [16] Cck Automação, "Monitor de Tensão para qualidade de energia". Disponível em: <http://www.cck.com.br/portugues/index.htm>. Acesso em: 9 de agosto de 2007.



Fernando Pinhabel Marafão, nascido em 26/09/1975 em José Bonifácio (SP), é engenheiro eletricista (1997) pela Universidade Estadual Paulista, mestre (2000) e doutor (2004) pela Universidade Estadual de Campinas. Em 2002, foi pesquisador visitante no Departamento de Engenharia de Informação da Universidade de Pádua (Itália). Atualmente, é Professor Assistente na Universidade Estadual Paulista (Campus Sorocaba), onde integra o Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI). Áreas de interesse: técnicas de processamento e controle digital aplicadas em eletrônica de potência e sistemas de energia, filtros ativos de potência, qualidade de energia e definições de potência na presença de distorções e assimetrias. Dr. Marafão é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP), da Sociedade Brasileira de Automática (SBA) e do IEEE.



Sigmar Maurer Deckmann, nascido em 06/04/1946 em Cruz Alta (RS), é engenheiro eletricitista (1973), mestre (1976) e doutor (1980) pela Universidade Estadual de Campinas. É professor aposentado da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas desde 1974. De 1986 a 1988, foi chefe do Departamento de Sistemas e Controle de Energia. De 1999 a 2003, foi vice-diretor da faculdade. Também tem liderado diversos projetos

sobre Flicker, monitoração de qualidade de energia e instrumentação digital. Suas principais linhas de pesquisa têm sido: dinâmica do sistema de potência, instrumentação, qualidade de energia, monitoração de distúrbios, estudos sobre a propagação de harmônicos e Flicker e filtros ativos de potência.



Helmo Kelis Morales Paredes, nascido em 08/09/1979 em Puno, Peru, é engenheiro eletricitista (2002) pela Universidad Nacional San Agustín de Arequipa (UNSA) e mestre (2006) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Atualmente, é Doutorando na UNICAMP. Áreas de interesse: Instrumentação, qualidade de energia e definições de potência na

presença de distorções e assimetrias.