

Análise do Comportamento do Fator K Complexo e das Componentes Simétricas com a Variação dos Fasores de Tensão

Marcus V. Chaffim Costa, Anésio L. Ferreira Filho, *Member, IEEE* e Francisco A. de Oliveira Nascimento, *Member, IEEE*

Resumo—Este artigo apresenta os principais aspectos observados nas análises do comportamento do Fator K e das componentes de seqüência positiva e negativa em vista da variação das amplitudes e dos ângulos das tensões. Com o intuito de facilitar o entendimento, expõem-se os resultados considerando-se algumas especificidades no que diz respeito às condições do desequilíbrio. Com isso, objetiva-se identificar os possíveis inconvenientes relacionados ao emprego dos índices em questão, investigar a aplicabilidade do módulo e do ângulo do Fator K Complexo na análise do desequilíbrio de tensão e avaliar, para diversas condições de desequilíbrio, se o Fator K é mais sensível a variações dos ângulos que a variações das amplitudes dos fasores de tensão.

Palavras-chave—Desequilíbrio de Tensão, Comportamento do Fator K Complexo, Variação dos Fasores de Tensão.

I. INTRODUÇÃO

ALGUNS autores [1]-[3] têm apresentado estudos que ratificam, para algumas condições específicas, que diversas características relacionadas ao desempenho e vida útil de elementos do sistema se dão de maneira distinta para cada condição de desequilíbrio. Isso se dá em função da sensibilidade de cargas como motores de indução a fasores desequilibrados.

Indubitavelmente, qualquer solução que seja idealizada para a maximização da vida útil e o funcionamento eficiente perante distúrbios da rede elétrica, esta deve apoiar-se na quantificação adequada e no conhecimento dos parâmetros envolvidos no processo. Neste ínterim, surgiu a idéia de desenvolvimento do presente trabalho, que visa apresentar os principais resultados oriundos das análises do comportamento Fator K Complexo e das componentes de seqüência positiva e negativa ante variações das amplitudes e dos ângulos dos fasores de tensão.

Inicialmente, com o intuito de facilitar o entendimento, expõem-se os resultados considerando-se algumas especificidades no que diz respeito às condições do desequilíbrio, a saber: análise considerando-se os ângulos das tensões constantes nos seus valores nominais; análise considerando-se as amplitudes das tensões constantes nos

seus valores nominais; e análise considerando-se a variação de uma amplitude e de um ângulo da tensão. Com esta abordagem deseja-se identificar os possíveis inconvenientes relacionados ao emprego dos índices mencionados, investigar a aplicabilidade do módulo e do ângulo do Fator K Complexo na análise do desequilíbrio, e avaliar, para diversas condições de desequilíbrio, se o Fator K é mais sensível à variação do ângulo do que da amplitude das tensões.

II. FATOR K COMPLEXO DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

A despeito da existência de diversos índices de cálculo do nível do desequilíbrio de tensão [4]-[6], denominado Fator K, será utilizado o Método das Componentes Simétricas, por ser o adotado pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) no Brasil. Sejam \mathbf{V}_a , \mathbf{V}_b , e \mathbf{V}_c o conjunto das tensões de fase. As componentes de seqüência zero, seqüência positiva e seqüência negativa (respectivamente, \mathbf{V}_0 , \mathbf{V}_1 , e \mathbf{V}_2) podem ser obtidas a partir da seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

sendo $\mathbf{a} = \exp(j2\pi/3)$ o operador de Fortescue, ou seja, \mathbf{a} tem módulo unitário e causa uma rotação de 120° .

Para este método, o desequilíbrio de tensão é definido pelo IEC (*International Electrotechnical Commission*) como a relação entre os módulos da componente de seqüência negativa, \mathbf{V}_2 , e da componente de seqüência positiva, \mathbf{V}_1 , de acordo com (1).

$$K = \left| \frac{\mathbf{V}_2}{\mathbf{V}_1} \right| \times 100 \% \quad (2)$$

O Fator K Complexo é uma generalização da definição anterior e é definido por

$$\mathbf{K}_C = \left(\frac{\mathbf{V}_2}{\mathbf{V}_1} \right) \times 100 \% = K_C \angle \theta_C \quad (3)$$

De fato, a magnitude K_C do Fator K Complexo é a mesma que a do Fator K, enquanto que o ângulo é o ângulo que a seqüência negativa está adiantada da seqüência positiva.

III. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Diversas condições de desequilíbrio de tensão foram contempladas nas simulações realizadas e para cada uma destas foi avaliado o comportamento Fator K Complexo e das componentes de seqüência. As variações dos fasores de tensão simuladas foram, a saber: amplitudes de duas fases (com os ângulos constantes); ângulos de duas fases (com as amplitudes constantes); amplitude de uma fase e o ângulo desta mesma; amplitude de uma fase e o ângulo de outra fase. As Figs. 1 e 2 ilustram os resultados das avaliações do módulo e do ângulo do Fator K Complexo com a variação de duas amplitudes da tensão, mantendo os ângulos dos fasores constantes em seus valores nominais.

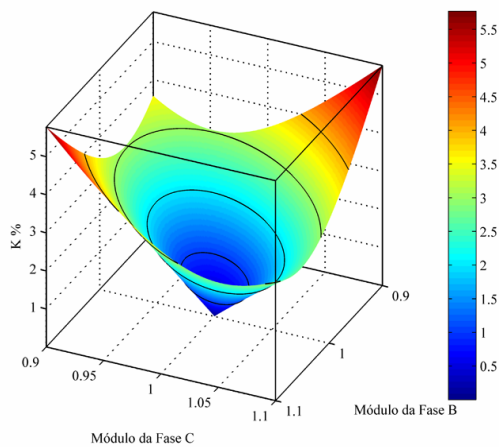


Fig. 1. Comportamento do módulo do Fator K Complexo com variações das amplitudes de duas fases.

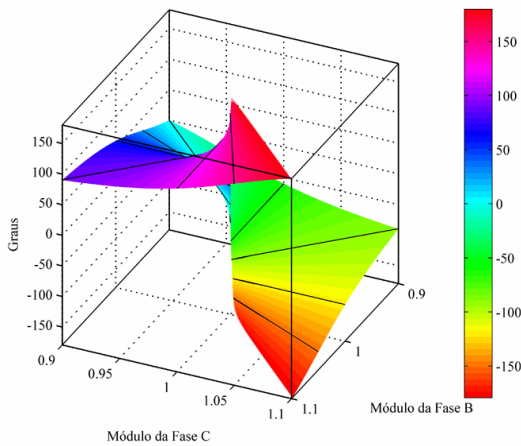


Fig. 2. Comportamento do ângulo do Fator K Complexo com variações das amplitudes de duas fases.

IV. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS ÍNDICES

Esse tópico reúne os principais aspectos observados nas análises do comportamento do Fator K e das componentes de seqüência positiva e negativa. Com o intuito de se facilitar o entendimento, expõe-se os resultados considerando-se algumas especificidades no que diz respeito

às condições do desequilíbrio, a saber:

- 1) Análise considerando-se os ângulos das tensões constantes nos seus valores nominais;
- 2) Análise considerando-se as amplitudes das tensões constantes nos seus valores nominais; e
- 3) Análise considerando-se a variação de uma amplitude e de um ângulo da tensão.

Os resultados estão divididos em análise do módulo e do ângulo dos seguintes índices: Fator K Complexo e componentes de seqüência positiva e negativa.

A. Ângulos das tensões constantes (valores nominais)

1) Módulos do Fator K e das componentes de seqüência

A Tabela I apresenta os valores máximos dos módulos do Fator K e das componentes de seqüência positiva e negativa quando da variação nas amplitudes das tensões da ordem de 10% em relação ao valor base, considerando-se os ângulos constantes nos seus valores nominais.

Vale ressaltar que a componente negativa é avaliada em porcentagem da tensão de base para tornar possível uma avaliação comparativa com o Fator K. O valor médio das tensões de fase é calculado para cada condição de desequilíbrio simulada. O valor médio das tensões e o módulo da seqüência positiva estão em p.u. da tensão de base. No caso da seqüência positiva e do valor médio das tensões, exibem-se um valor máximo positivo e um negativo.

Observa-se da Tabela I, considerando-se simultaneamente os ângulos das tensões constantes nos seus valores nominais e a variação nas amplitudes das tensões da ordem de 10%, que os valores máximos dos módulos do Fator K e da componente de seqüência negativa não transpõem 6%. Além disso, eles são próximos entre si. Adicionalmente, verifica-se que a componente positiva e a média das tensões não ultrapassam 1.04 p.u., e nem apresentam valores inferiores a 0.96 p.u.. Assim como aconteceu na comparação entre o módulo do Fator K e a seqüência negativa, a média das tensões e a componente positiva ilustram valores próximos entre si. Para a ratificação desta informação, a Tabela II exhibe os resultados dos cálculos dos índices de correlação de um banco de dados formado pelos fasores de tensão com ângulos nominais e amplitudes entre 201 e 231 volts.

Da Tabela II, pode-se observar que o valor da correlação entre os módulos do Fator K e V_2 é muito próximo de 1. Para os ângulos do Fator K e V_2 , e ainda para as médias das

TABELA I
VALORES MÁXIMOS DO FATOR K, DAS COMPONENTES DE SEQÜÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA, E DA MÉDIA DAS TENSÕES DE FASE

Condição do desequilíbrio	Fator K (%)	Componente negativa (%)	Componente positiva (p.u.)	Média aritmética das tensões (p.u.)
Variação em uma fase	3.448%	3.333%	0.967	0.967
			e	1.033
Variação em duas fases	5.774%	5.778%	0.933	0.933
			e	1.067

TABELA II
ÍNDICES DE CORRELAÇÃO PARA UM BANCO DE DADOS COM ÂNGULOS DAS TENSÕES CONSTANTES

	Entre os módulos do Fator K e V_2	Entre os ângulos do Fator K e V_2	Entre as médias das tensões de fase e V_1
Correlação	0.99904	1	1

tensões de fase e V_1 , a correlação é igual a 1. Isso indica que, duas a duas, estas variáveis apresentam um comportamento semelhante a cada condição de desequilíbrio presente no banco de dados em avaliação.

Das análises efetuadas nos estudos aqui relatados, ainda conclui-se que nem sempre a variação das amplitudes de duas fases, simultaneamente, culmina em um maior módulo do Fator K e das componentes de seqüência negativa e positiva, comparado às alterações da amplitude de uma única fase, mantendo-se as mesmas proporções.

Os valores exatos das amplitudes e dos ângulos das tensões que constituem alguns dos fasores simulados neste item encontram-se na Tabela III, na qual ainda são apresentados os valores do Fator K e das componentes de seqüência determinados para cada condição em estudo.

Apesar da variação de 10% nas amplitudes das tensões das fases B e C (exemplo 2), o módulo do Fator K dessa condição de desequilíbrio é menor do que o resultado encontrado quando da variação de 10% em relação à tensão de base somente na fase C (exemplo 1).

2) Ângulos do Fator K e das componentes de seqüência

A Tabela IV apresenta os ângulos do Fator K e da componente negativa para algumas condições de desequilíbrio. Vale ressaltar que, da análise da componente positiva, conclui-se que, para todas as condições onde os ângulos das tensões são mantidos em seus valores nominais, os ângulos da seqüência positiva são iguais a 0° .

Da Tabela IV verifica-se que a variação dos ângulos do Fator K e da componente de seqüência negativa são semelhantes para situações onde os ângulos das tensões são mantidos constantes em seus valores nominais.

Quando se constata a inexistência de variação nos ângulos das tensões é possível utilizar os módulos do Fator K e da componente negativa para compreender quão desequilibrado o sistema está, e os seus ângulos para indicar quais foram as condições que geraram o desequilíbrio.

TABELA III
VALORES DO FATOR K E DAS COMPONENTES DE SEQÜÊNCIA PARA OS FASORES DA FIGURA 3.21

Ex	Fasores de tensões	Fator K (%)	Componente negativa (%)	Componente positiva (%)
1	$V_A=220 \angle 0^\circ$	3.448	3.333	0.967
	$V_B=220 \angle -120^\circ$			
	$V_C=198 \angle +120^\circ$			
2	$V_A=220 \angle 0^\circ$	3.125	3.333	1.066
	$V_B=242 \angle -120^\circ$			
	$V_C=242 \angle +120^\circ$			

Ângulos constantes em seus valores nominais.

TABELA IV
ÂNGULOS DO FATOR K E DA COMPONENTE NEGATIVA PARA ALGUMAS CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Fator K	Componente negativa
Primeiro	Amplitudes das tensões de duas fases acima do valor de base	-120° a $+180^\circ$	-120° a $+180^\circ$
		$+180^\circ$ a $+120^\circ$	$+180^\circ$ a $+120^\circ$
Segundo	Amplitude da tensão de uma fase acima do seu valor de base e de uma outra abaixo do valor de base	$+120^\circ$ a $+60^\circ$	$+120^\circ$ a $+60^\circ$
Terceiro	Amplitudes das tensões de duas fases abaixo do valor de base	$+60^\circ$ a -60°	$+60^\circ$ a -60°
Quarto	Amplitude de uma fase da tensão acima do seu valor de base e de uma outra abaixo do valor de base	-60° a -120°	-60° a -120°

B. Amplitudes das tensões constantes (valores nominais)

1) Módulos do Fator K e das componentes de seqüência

A Tabela V apresenta os valores máximos dos módulos do Fator K e das componentes de seqüência positiva e negativa quando de variações nos ângulos das tensões da ordem de 10% em relação ao nominal, considerando-se as amplitudes constantes nos seus valores nominais.

Observa-se da Tabela V, ao considerar-se simultaneamente as amplitudes das tensões constantes nos seus valores nominais e as variações nos ângulos das tensões da ordem de 10%, que os valores máximos dos módulos do Fator K e da componente de seqüência negativa não excedem o patamar de 7.1% para a variação em uma única fase e de 13% para alterações em duas fases. Além disso, eles são próximos entre si. Verifica-se que a componente positiva apresenta valores diferentes a 1 p.u., apesar de não se alterar as amplitudes das tensões. O menor módulo da componente positiva não é inferior a 0.98 p.u.. A média das tensões exibe sempre valores iguais a 1 p.u., conforme esperado.

A Tabela VI exibe os resultados dos índices de correlação de um banco de dados formado pelos fasores de tensão com amplitudes constantes em seus valores nominais. Nela é possível observar valores de correlação entre os módulos e ângulos de K e V_2 , e ainda entre as médias das tensões de

TABELA V
VALORES MÁXIMOS DO FATOR K E DAS COMPONENTES POSITIVA E NEGATIVA

Condição do desequilíbrio	Fator K (%)	Componente negativa (%)	Componente positiva (p.u.)	Média aritmética das tensões (p.u.)
Variação em uma fase	7.003%	6.969%	0.995	1
Variação em duas fases	12.92%	12.73%	0.985 e 0.995	1

TABELA VI
ÍNDICES DE CORRELAÇÃO PARA UM BANCO DE DADOS COM AMPLITUDES DAS TENSÕES CONSTANTES

	Entre os módulos de K e V ₂	Entre os ângulos de K e V ₂	Entre as médias das tensões de fase e V ₁
Correlação	0.99922	0.99964	0.9998

fase e V₁, próximos de 1. Isso indica que, duas a duas, estas variáveis apresentam um comportamento semelhante a cada condição de desequilíbrio presente no banco de dados em avaliação.

Das análises efetuadas a partir das simulações conclui-se que nem sempre a variação dos ângulos das tensões de duas fases, simultaneamente, culmina em um maior módulo do Fator K e das componentes de seqüência negativa e positiva quando comparados às alterações do ângulo de uma única fase, mantendo-se as proporções.

Quando os ângulos das tensões de duas fases variam em iguais proporções tendendo a reduzir as suas distâncias angulares em relação à referência 0°, têm-se módulos do Fator K e da componente negativa menores do que os determinados quando da variação tendendo para 180°. Já as componentes positivas apresentam módulos semelhantes para variação de mesmas proporções dos ângulos tendendo para 0° e 180°.

Quando a variação dos ângulos das tensões de duas fases se dá em sentidos opostos, os módulos do Fator K e da componente negativa aumentam mais aceleradamente do que os obtidos com a variação na mesma proporção de igual sentido. Contudo, quando a variação dos ângulos das tensões se dá em sentidos opostos, o módulo da componente positiva decresce mais acentuadamente do que o obtido quando da variação de igual sentido, na mesma proporção.

2) Ângulos do Fator K e das componentes de seqüência

A Tabela VII apresenta os ângulos do Fator K e da componente negativa para algumas condições de desequilíbrio. Para qualquer condição onde a variação dos ângulos das tensões se dá acima de 10%, as curvas que dividem os quadrantes não são retas. Isto inviabiliza qualquer conclusão utilizando os ângulos do Fator K e os ângulos da componente negativa.

Da Tabela VII verifica-se que a variação dos ângulos do Fator K e da componente de seqüência negativa são semelhantes para situações nas quais as amplitudes das tensões são mantidas constantes em seus valores nominais e com variação máxima dos ângulos das tensões de até 10%.

Quando se constata a inexistência de variação nas amplitudes das tensões e variação máxima dos ângulos das tensões de até 10% é possível utilizar os módulos do Fator K e da componente negativa para se compreender quão desequilibrado está o sistema, e os seus ângulos para se inferir quais foram as condições causadoras do desequilíbrio.

TABELA VII
ÂNGULOS DO FATOR K E DAS COMPONENTES NEGATIVA PARA ALGUMAS CONDIÇÕES DE DESEQUILÍBRIO

Quadrante	Condição do desequilíbrio	Fator K	Componente negativa
Primeiro	Ângulos da fase B e C da tensão acima dos valores nominais	-30° a -150°	-30° a -150°
Segundo	Ângulo da fase B menor do que o nominal e ângulo da fase C da tensão acima do valor nominal	-150° a +150°	-150° a +150°
Terceiro	Ângulos das fases B e C da tensão abaixo dos valores nominais	+150° a +30°	+150° a +30°
Quarto	Ângulo da fase C menor do que o nominal e ângulo da fase B da tensão acima do valor nominal	+30 a -30°	+30 a -30°

C. Variação da amplitude e do ângulo de uma tensão, simultaneamente

1) Módulos do Fator K e das componentes de seqüência

A Tabela VIII apresenta os valores máximos dos módulos do Fator K e das componentes de seqüência positiva e negativa quando da variação de uma amplitude e de um ângulo da tensão de 10% em relação aos valores de base e ao nominal, respectivamente, considerando-se as demais grandezas constantes nos seus valores nominais.

Observa-se da Tabela VIII, quando da variação de uma amplitude e de um ângulo da tensão de 10% em relação aos valores de base e ao nominal, respectivamente, que os valores máximos dos módulos do Fator K e da componente de seqüência negativa não excedem o patamar de 8% para a variação em uma única fase, e de 10.5% para alterações em duas fases. Além disso, eles são próximos entre si.

Verifica-se ainda que a componente positiva e a média das tensões não ultrapassam 1.03 p.u., e nem apresentam valores inferiores a 0.96 p.u. Assim como aconteceu na

TABELA VIII
VALORES MÁXIMOS DO FATOR K E DAS COMPONENTES POSITIVA E NEGATIVA

Condição do desequilíbrio	Fator K (%)	Componente negativa (%)	Componente positiva (p.u.)	Média aritmética das tensões (p.u.)
Variações simultâneas de 10% na amplitude e no ângulo de uma mesma fase da tensão	7.813%	8.033%	0.962	0.967
			e 1.028	e 1.033
Variações simultâneas de 10% na amplitude de uma fase e no ângulo de uma outra	10.25%	9.861%	0.962	0.967
			e 1.028	e 1.033

TABELA IX
ÍNDICES DE CORRELAÇÃO PARA UM BANCO DE DADOS COM AMPLITUDES E
ÂNGULOS VARIANDO SIMULTANEAMENTE

	Entre os módulos de K e V_2	Entre os ângulos de K e V_2	Entre as médias das tensões de fase e V_1
Correlação	0.99882	0.98265	0.9998

comparação entre o módulo do Fator K e a seqüência negativa, a média das tensões e a componente positiva ilustram valores próximos entre si. A Tabela IX exhibe os resultados dos cálculos dos índices de correlação de um banco de dados formado pelos fasores de tensão com amplitudes entre 201 e 231 volts e ângulos com variação de até 5° dos respectivos valores nominais. A variação da tensão é de 1 volt para as amplitudes e 0.25° para os ângulos.

Na Tabela IX é possível observar valores de correlação entre os módulos e ângulos de K e V_2 , e ainda entre as médias das tensões de fase e V_1 , próximos de 1. Isso indica que, duas a duas, estas variáveis apresentam um comportamento semelhante a cada condição de desequilíbrio presente no banco de dados em avaliação.

A variação simultânea na amplitude da tensão de 10% do valor de base e no ângulo de 10% do valor nominal, ambos em uma mesma fase, acarretam, em geral:

- 1) Maiores módulos do Fator K e da componente negativa comparados com os obtidos na variação de duas amplitudes das tensões, sob as mesmas condições.
- 2) Menores módulos da componente positiva comparados com os obtidos na variação de duas amplitudes das tensões, sob as mesmas condições.
- 3) Menores módulos do Fator K e da componente negativa comparados com os obtidos na variação de dois ângulos das tensões, sob as mesmas condições.
- 4) Maiores módulos das componentes positivas comparados com os obtidos na variação de dois ângulos das tensões, sob as mesmas condições.
- 5) Maiores módulos do Fator K e da componente negativa comparados com os obtidos na variação de uma amplitude ou de um ângulo da tensão, sob as mesmas condições.
- 6) Maiores módulos das componentes positivas comparados com os obtidos na variação de uma amplitude ou de um ângulo da tensão, sob as mesmas condições.

A variação simultânea de 10% do valor de base na amplitude da tensão de uma fase e de 10% do valor nominal no ângulo de uma outra fase acarretam, em geral:

- 1) Maiores módulos do Fator K e da componente negativa comparados com os obtidos na variação de uma amplitude da tensão, sob as mesmas condições.
- 2) Alterações do módulo da componente positiva maiores que os obtidos com a variação de um ângulo ou de dois ângulos simultaneamente, sob as mesmas condições.

2) Ângulos do Fator K e das componentes de seqüência

Há de se destacar neste item que, em função dos seus comportamentos, não é possível associar faixas de variação dos ângulos do Fator K e das componentes positiva e negativa com os respectivos quadrantes, para todas as condições de desequilíbrio. Logo, observa-se a ausência de informações úteis a partir da utilização dos índices relacionados à quantificação do desequilíbrio, quando da variação simultânea de ângulos e amplitudes das tensões.

D. Principais resultados gerais

Neste tópico são apresentados os resultados de um levantamento das principais constatações de cunho geral relacionadas às análises do comportamento do Fator K e das componentes de seqüência negativa e positiva. São elas:

- 1) Variações dos ângulos das tensões implicam em módulos do Fator K e da componente negativa sempre mais elevados do que os adquiridos quando da variação, nas mesmas proporções e condições, das amplitudes das tensões. Logo, observa-se que o Fator K e a componente negativa são mais sensíveis às alterações nos ângulos das tensões do que nas amplitudes.
- 2) A variação das amplitudes das tensões gera uma maior variação do módulo da componente de seqüência positiva comparado às alterações nas mesmas proporções e condições dos ângulos das tensões.
- 3) Os ângulos do Fator K não representam informações úteis quando se sabe que o sistema tem uma variação acentuada dos ângulos e das amplitudes das tensões, simultaneamente.
- 4) Somente em situações específicas como a ausência da variação dos ângulos das tensões ou inexistência de variação nas amplitudes, o ângulo do Fator K bem como o ângulo da componente de seqüência negativa revelam informações consistentes a respeito das condições que geraram o desequilíbrio.
- 5) Para se conhecer melhor o comportamento do desequilíbrio é recomendável, inicialmente, uma avaliação da variação dos ângulos das tensões. A condição em que os ângulos das tensões não variam acentuadamente oferece simplificações nas análises com possibilidades de generalizações que não se tem quando se trabalha com 5 variáveis.
- 6) Variação de até 1° nos ângulos das tensões com relação aos seus valores nominais, considerando-se as amplitudes constantes, podem gerar Fatores K da ordem de 0.6% quando se tem somente uma fase com o valor do ângulo diferente ao nominal. Para duas fases variando simultaneamente sob as mesmas condições supramencionadas têm-se valores do Fator K de aproximadamente 1%.
- 7) Variação dos ângulos das tensões de até 1° com relação ao valor nominal, considerando-se as amplitudes constantes culminam em pequenas diferenças entre os valores da componente de seqüência positiva e a tensão nominal. Na verdade, tal diferença se dá, em geral, na

quarta casa decimal, o que acarreta erros da ordem de 10^{-3} %.

- 8) Para determinadas condições de desequilíbrio o valor médio das amplitudes das tensões de fase em relação à tensão nominal não exhibe valores próximos ao módulo da componente de seqüência positiva. Tais discrepâncias, em alguns casos, justificam as diferenças entre o Fator K e o módulo da componente negativa.
- 9) Para situações onde a componente de seqüência positiva é praticamente igual à tensão nominal (variação dos ângulos com as amplitudes das tensões constantes em seus valores nominais), a componente de seqüência negativa torna-se próxima ao Fator K.
- 10) É possível determinar um conjunto de diferentes combinações de tensões que culminam em Fatores K idênticos em módulos. Na verdade, tratam-se de lugares geométricos onde se tem módulos do Fator K semelhantes, para distintos valores das tensões.

E, finalmente, é preciso mencionar que, dentre as várias possibilidades de aplicação dos resultados aqui encontrados, podemos enfatizar duas condições de análises que devem ser avaliadas antes de se generalizar conclusões: esse estudo é útil para cada instante da medição em separado, ou ainda para situações nas quais se tem avaliado certa quantidade de dados, por exemplo, sete dias consecutivos. Neste caso, antes de se efetuar a avaliação a partir dos gráficos expostos, é importante identificar os indicadores representativos do conjunto amostral em estudo.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma investigação pormenorizada do comportamento do Fator K Complexo e das componentes de seqüência ante as variações das amplitudes e dos ângulos das tensões. Devido à inviabilidade de se efetuar um estudo conjunto no qual se tem cinco grandezas variando simultaneamente, foi preciso estabelecer algumas restrições com relação às condições de desequilíbrio analisadas.

Dada a sua importância, enfatizou-se os aspectos fundamentais empregados na aplicabilidade do ângulo do Fator K Complexo nas análises de desequilíbrio, além da observação da existência de valores semelhantes de Fator K para valores de tensão diferentes. Demonstrou-se ainda a existência de valores semelhantes de Fator K para condições de desequilíbrio diversas.

Conforme observado, o módulo do Fator K e a componente negativa são mais sensíveis a alterações nos ângulos das tensões que nas amplitudes. Os ângulos do Fator K não nos trazem informações úteis quando se sabe que o sistema tem uma variação acentuada dos ângulos e das amplitudes das tensões, simultaneamente.

Para se conhecer melhor o comportamento do desequilíbrio é recomendável, inicialmente, uma avaliação da variação dos ângulos das tensões. Assim sendo, recomenda-se a execução de um estudo que avalie as faixas de variação dos ângulos e das amplitudes das tensões oriundas de medições reais no sistema elétrico de potência.

Para determinadas condições de desequilíbrio o valor médio das amplitudes das tensões de fase em relação à tensão nominal não exhibe valores próximos ao módulo da componente de seqüência positiva. Tais discrepâncias, em alguns casos, justificam as diferenças entre o Fator K e o módulo da componente negativa. Contudo, quando em algumas condições de desequilíbrio a componente de seqüência positiva é praticamente igual à tensão nominal (variação dos ângulos com as amplitudes das tensões constantes em seus valores nominais), a componente de seqüência negativa torna-se muito próxima ao Fator K.

REFERÊNCIAS

- [1] Lee, C.Y. "Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor". *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 14, No. 2, June 1999.
- [2] Wang, Y.J. "Analysis of Effects of Three-Phase Voltage Unbalance on Induction Motors with Emphasis on the Angle of the Complex Voltage Unbalance Factor". *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 16, No. 3, September 2001.
- [3] Siddique, A.; Yadava, G. S.; Singh, B. "Effects of Voltage Unbalance on Induction Motors". Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 19-22 September 2004, Indianapolis, USA.
- [4] Pillay, P.; Manyage, M. "Definitions of Voltage Unbalance". *IEEE Power Engineering Review*, May 2001.
- [5] Bollen, M. H. J. "Definitions of Voltage Unbalance". *IEEE Power Engineering Review*, November 2002.
- [6] de Oliveira, M. A.; Ferreira Filho, A. L.; da Silva Pinto, M. G. "Comparative Analysis Among Indexes Related to Quantifying Voltage Imbalance". International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1 a 5 de Outubro de 2006, Cascais, Portugal.

VI. BIOGRAFIAS

Marcus Vinícius Chafim Costa possui graduação em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília (2006). Atualmente é discente do curso de mestrado acadêmico em Engenharia Elétrica na área de Processamento de Sinais e Qualidade de Energia. Seus interesses são em Processamento Digital de Sinais, Compressão de Sinais e Imagens e Qualidade da Energia.

Anésio de Leles Ferreira Filho possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1993) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1997). Atualmente é Professor Assistente 2 da Universidade de Brasília. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência., atuando principalmente nos seguintes temas: Qualidade da Energia e Distribuição.

Francisco Assis de Oliveira Nascimento possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Brasília (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1985) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1988). Atualmente é Professor Adjunto da Universidade de Brasília. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Processamento Digital de Sinais, atuando principalmente nos seguintes temas: Processamento Digital de Sinais, Codificação de Imagem, Compressão de Dados, Comunicação Digital, Algoritmos Rápidos e Processadores de Sinais.