



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 15 7523
Tópico: Qualidade da Energia e Educação

LABORATÓRIO VIRTUAL PARA ESTUDO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

R. P. S.
LEÃO*

C. R. SCHMIDLIN
JR.

G. S.
FERREIRA

L. C. J.
SILVEIRA

R. M. B.
MARQUES

A. B.
MOREIRA

UFC

RESUMO

O presente artigo apresenta uma ferramenta computacional desenvolvida com o objetivo de contribuir com o estudo dos afundamentos de tensão, e instrumentar o processo de capacitação acadêmica e profissional na área de qualidade de energia elétrica. A ferramenta é dotada de interface gráfica amigável que permite a medição e visualização da tensão mediante ocorrência de curto-circuito. A caracterização dos afundamentos de tensão considera a influência de fatores como o tipo de falta, o tipo de conexão da carga, e o tipo de conexão dos transformadores localizados entre a falta e a carga. A ferramenta computacional foi desenvolvida usando o software *LabView* por proporcionar facilidade no desenvolvimento de plataformas gráficas e manipulação de dados e equações, e adequada visualização numérica e gráfica de resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade de Energia Elétrica, Afundamento de Tensão, Labview.

1.0 INTRODUÇÃO

Afundamentos de tensão são reduções de curta duração na tensão eficaz causadas por grandes e súbitas variações na corrente provocadas por curtos-circuitos, entrada de grandes cargas, e partida de grandes motores. O interesse pelo estudo de afundamentos de tensão decorre do fato de tratar-se de um distúrbio sempre presente

nos sistemas elétricos, com maior ou menor frequência de ocorrência, no entanto de conseqüências que podem incorrer em vultosos prejuízos [1]. Sua caracterização é feita a partir da consideração de parâmetros, como: magnitude, duração, frequência de ocorrência, ângulo de fase, e desequilíbrio. A importância da caracterização do afundamento de tensão está na informação capaz de ser obtida de modo a definir a origem do afundamento e o efeito sobre a carga elétrica. Existem vários estudos e propostas visando a caracterização dos afundamentos de tensão [2,3,4].

Este artigo apresenta uma ferramenta computacional, denominada *SagView*, desenvolvida com o objetivo de contribuir com o estudo dos afundamentos de tensão em sistemas elétricos trifásicos, bem como instrumentar o processo de capacitação acadêmica e profissional na área de qualidade de energia elétrica. A ferramenta permite a medição e visualização da tensão remanescente nos terminais de uma carga resultante de faltas por curto-circuito. O *Sagview* foi desenvolvido em linguagem de programação gráfica conhecida como linguagem G.

A caracterização do afundamento está baseada no método adotado por M. Bollen [1] com obtenção de magnitude e ângulo de fase dos fasores de tensão. Para tal, faz-se uso da teoria de componentes simétricas [5] e consideram-se as influências de fatores como o tipo de falta, o tipo de conexão da carga e o tipo de conexão dos

transformadores intermediários, localizados entre a falta e a carga na determinação da tensão resultante na barra da carga.

Ao se propagarem pela rede, os afundamentos de tensão sofrem mudanças em suas características de magnitude e ângulo de fase. A ferramenta gráfica *SagView* modela a influência de faltas por curto-circuito, simétrico e assimétrico, sobre os afundamentos de tensão. Os curtos-circuitos são a causa principal e mais comum de afundamentos de tensão.

Os transformadores à montante do ponto monitorado são classificados em três grupos: transformadores que não alteram as tensões em pu entre primário e secundário, transformadores que apenas eliminam a componente de seqüência zero da tensão, e transformadores que provocam deslocamento angular entre as tensões de primário e secundário e eliminam a componente de seqüência zero da tensão. Os transformadores são considerados ideais. A conexão da carga, delta ou estrela, é também levada em consideração sobre a influência nas características do afundamento de tensão.

2.0 TIPOS DE FALTAS

Os tipos de curtos-circuitos em sistemas trifásicos podem ser do tipo: trifásicos, bifásicos, bifásicos-terra e monofásicos.

2.1 Faltas balanceadas

Os curtos-circuitos trifásicos, também chamados balanceados, provocam afundamentos de tensão que mantêm, mesmo durante a falta, o balanceamento das três fases do sistema.

No afundamento de tensão balanceado observa-se uma redução de igual magnitude para os fasores de tensão, sem alteração no ângulo de fase.

2.2 Faltas desbalanceadas

Os demais tipos de curtos-circuitos são assimétricos e causam afundamentos de tensão com desequilíbrio entre as fases, o que torna necessário o uso da teoria de componentes simétricas como ferramenta de análise.

3.0 CLASSIFICAÇÃO DAS FALTAS

Segundo M. Bollen [1] cada tipo de falta resulta em um tipo de afundamento de tensão.

TABELA I
TIPOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Tipo de Falta	Tipo de Afundamento
Falta trifásica	Tipo A: Carga Δ e Y

$V_a = I_a Z_f$ $V_b = I_b Z_f$ $V_c = I_c Z_f$	$V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}jh\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}jh\sqrt{3}$
Falta monofásica $I_b = 0$ $I_c = 0$ $V_a = I_a Z_f$	Tipo B: Carga Y $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
	Tipo C*: Carga Δ $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h\right)j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h\right)j\sqrt{3}$
Falta bifásica $I_a = 0$ $I_b = -I_c$ $V_{bc} = I_b Z_f$	Tipo C: Carga Y $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$
	Tipo D: Carga Δ $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
Falta bifásica-terra $I_a = 0$ $V_b = V_c$ $V_b = (I_b + I_c)Z_f$	Tipo E: Carga Y $V_a = 1$ $V_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$
	Tipo F: Carga Δ $V_a = h$ $V_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}h\right)j\sqrt{3}$ $V_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}h\right)j\sqrt{3}$

Desconsiderando, *a priori*, a existência de transformadores entre a falta e a carga, verifica-se que a tensão residual observada no barramento de carga depende tanto do tipo de falta como da conexão da carga como mostra a Tabela I. Na primeira coluna da Tabela I são apresentadas as relações para cada tipo de falta, em que Z_f representa a impedância de falta [5]. As tensões V_a , V_b e V_c na segunda coluna representam as tensões residuais, em pu, de fase, para as cargas em estrela, ou de linha, para as cargas em delta, cuja magnitude e abertura angular é definida por h , fator que varia entre zero e um ($0 \leq h \leq 1$).

As tensões de linha na Tabela I são obtidas a partir das tensões de fase, divididas por $\sqrt{3}$, multiplicadas pelo operador j e renomeadas, de modo que V_{bc} assume o eixo horizontal e passa a ser denominada de V_a , tornando-se a referência angular para os demais fasores V_b e V_c .

A falta trifásica resulta no mesmo tipo de afundamento de tensão, quer a carga esteja conectada em estrela ou em delta. Isto ocorre devido à consideração feita de rotação nos eixos das tensões de linha.

Observando a formulação matemática dos afundamentos tipo C e C* nota-se que são semelhantes, em que C* pode ser obtido a partir de C, simplesmente substituindo h por $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h$. Nos dois afundamentos, as fases V_b e V_c sofrem redução em magnitude, com o afundamento tipo C tornando-se mais severo que C* à medida que h tende a zero, o ângulo de abertura entre V_b e V_c diminui, e a fase V_a permanece inalterada. Isto significa que as características das tensões resultantes de uma falta monofásica sobre uma carga em delta e de uma falta bifásica sobre uma carga em estrela são semelhantes. Semelhantemente, os afundamentos tipo D e F apresentam a mesma disposição fasorial de redução nas três fases e maior abertura entre as fases V_a e V_b à medida que h tende a zero. Isto significa que faltas bifásicas e bifásicas-terra resultam em semelhantes tensões de linha.

O diagrama fasorial para cada tipo de afundamento pode ser observado na Figura 1, onde as linhas tracejadas e cheias indicam, respectivamente, as tensões pré-falta e durante a falta.

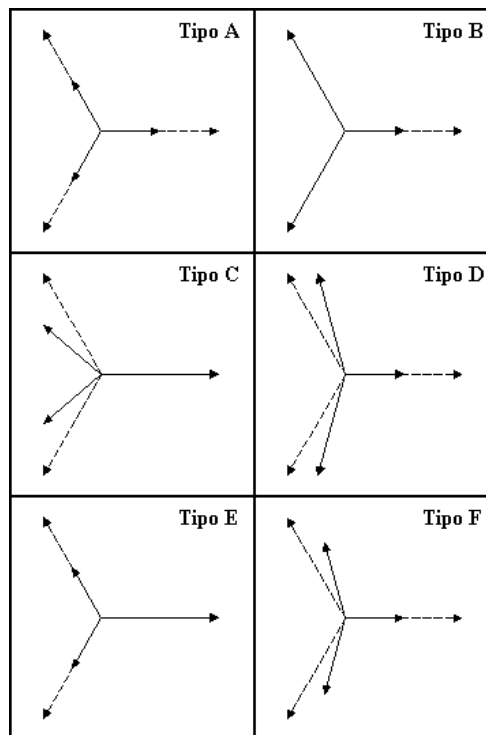


FIGURA 1

Diagramas fasoriais para os afundamentos de tensão.

4.0 INFLUÊNCIA DOS TRANSFORMADORES

A presença de transformadores localizados entre a falta e a carga pode influenciar nas características do afundamento de tensão visto pela carga [1,6].

Os transformadores trifásicos podem ser classificados em três grupos de acordo com a influência do tipo de conexão na propagação das tensões entre primário e secundário. A Tabela II apresenta o fenômeno físico relacionado a cada grupo de transformador e o efeito sobre a tensão de secundário.

TABELA II
Grupos de transformadores

Grupo	Fenômeno	Conseqüência	Conexão
1	Não filtra a componente de seqüência zero da tensão e nem introduz defasamento angular.	As tensões de primário e secundário em pu são iguais.	YNyn

2	Filtra a componente de seqüência zero da tensão e não introduz defasamento angular.	A tensão de secundário é igual à primária menos a componente de seqüência zero.	Yy Dd Dz
3	Além de filtrar a componente de seqüência zero da tensão, introduz defasamento angular entre as tensões primária e secundária.	Cada tensão secundária é igual à diferença entre duas tensões primárias.	Yd Dy Yz

Nos transformadores dos grupos 2 e 3 as tensões em pu no lado secundário são iguais às tensões em pu no lado primário menos a componente de seqüência zero.

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

O afundamento de tensão tipo A é simétrico e, por conseguinte V_0 é igual a zero. Os afundamentos de tensão tipo C*, D e F referem-se à tensão de linha e, portanto não existe componente de seqüência zero. O afundamento de tensão tipo C é originado por falta bifásica, onde não há presença de componente de seqüência zero. Para os afundamentos de tensão tipo B e E a componente de seqüência zero é dada por $V_0 = \frac{1}{3}(h-1)$ e $V_0 = \frac{1}{3}(1-h)$, respectivamente. O afundamento de tensão tipo B e tipo E ao ser refletido para o secundário de transformadores que filtram a componente de seqüência zero resulta em tensões como mostradas na Tabela III.

TABELA III
Tensão de Secundário sem Seqüência Zero

Primário	Secundário
Tipo B	Tipo D*
$V_a = h$	$V_a = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}h$
$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	$V_b = -\left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}h\right) - \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$	$V_c = -\left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}h\right) + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$
Tipo E	Tipo G

$$\begin{array}{l}
 V_a = 1 \\
 V_b = -\frac{1}{2}h - j\frac{1}{2}h\sqrt{3} \\
 V_c = -\frac{1}{2}h + j\frac{1}{2}h\sqrt{3}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}h \\
 V_b = -\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}h\right) - j\frac{1}{2}h\sqrt{3} \\
 V_c = -\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{6}h\right) + j\frac{1}{2}h\sqrt{3}
 \end{array}$$

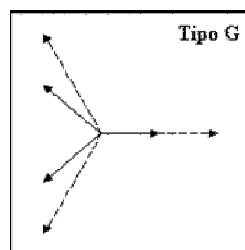
Como observado para C e C*, os afundamentos de tensão D e D* são similares bastando substituir em D o valor de h por $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h$.

A Tabela IV sumariza o tipo de afundamento visto no secundário dos transformadores dos grupos 1, 2 e 3.

TABELA IV
Tipo de afundamento de tensão no secundário.

Grupo de Trafo	Afundamento de tensão no lado do primário						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
1	A	B	C	D	E	F	G
2	A	D*	C	D	G	F	G
3	A	C*	D	C	F	G	F

Pela análise da Tabela IV pode-se verificar a presença de um novo tipo de afundamento denominado de tipo G, resultado da aplicação de afundamentos de tensão dos tipos E e F ao primário de transformadores dos grupos 2 e 3, respectivamente. Sua formulação matemática e diagrama fasorial são mostrados na Figura 2.



$$\begin{array}{l}
 V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V \\
 V_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \\
 V_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}
 \end{array}$$

FIGURA 2

Diagrama fasorial e equação para a falta do tipo G.

A Tabela V sumariza o tipo de afundamento de tensão levando em consideração ao tipo de falta, o tipo de conexão do transformador e o tipo de conexão da carga.

TABELA V
Tipo de afundamento de tensão versus tipo de conexão do transformador e tipo de carga.

Tipo de Carga	Tipo de Transformador	Monofásica			Bifásica			Bifásica-terra			Trifásica		
		YNyn	Yd, Dy,Dz	Yd, Dy,Yz	YNyn	Yd, Dy,Dz	Yd, Dy,Yz	YNyn	Yd, Dy,Dz	Yd, Dy,Yz	YNyn	Yd,Dy, Dz	Yd,Dy, Yz
Tipo de Carga	Delta	C*	C*	D*	D	D	C	F	F	G	A	A	A
	Estrela	B	D*	C*	C	C	D	E	G	F	A	A	A

5.0 FERRAMENTA SAGVIEW

A linguagem G, empregada pelo LabView da National Instruments, é um novo paradigma de linguagem de programação gráfica ou visual. A programação em linguagem G é similar à conhecida associação em diagramas de blocos, o que a torna extremamente

intuitiva e de fácil aprendizagem. Invés de escrever programas, a linguagem G permite a construção de diagramas de blocos sem a preocupação com a sintaxe encontrada na programação convencional.

A linguagem G utiliza uma programação em duas janelas, que são: painel frontal - janela vista pelo usuário, ou seja, é a tela de apresentação do programa, e diagrama de blocos - ambiente de programação propriamente dito, onde cada objeto nessa janela tem uma ligação direta com um instrumento virtual do painel frontal.

Na Figura 3 pode-se observar o fluxograma do software implementado *SagView*, onde são destacadas três áreas: entrada, processo e saída.

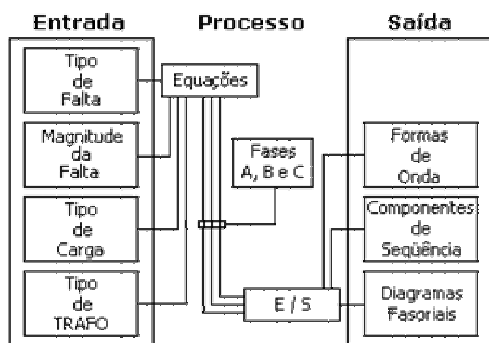


FIGURA 3
Fluxograma do programa *SagView*.

Na área de entrada são coletados os dados necessários para a simulação. No painel frontal, o usuário seleciona o tipo de falta (trifásica, bifásica, bifásica-terra, ou monofásica), o tipo de conexão do transformador (YNyn, Yy, Dd, Dz, Yd, Dy ou Yz) e o tipo de conexão da carga (Δ ou Y), além do valor de h. Os dados de entrada são enviados à área de processo. O resultado do

processamento, por sua vez, é enviado à área de saída do programa. Os principais dados mostrados são os diagramas fasoriais das tensões nos lados primário e secundário do transformador e os respectivos valores de magnitude e ângulo de fase para cada fasor. Na Figura 4 é mostrada a janela principal do programa onde está representada uma falta trifásica, tipo A, com $h=0,5$, através de transformador Dy com carga em delta.

O *SagView* mostra ainda as formas de onda e as componentes de seqüência das tensões de primário e secundário do transformador. Para facilitar a visualização de todos os dados, as formas de onda e as componentes de seqüências são mostrados em janelas secundárias mostradas nas Figuras 5 e 6.

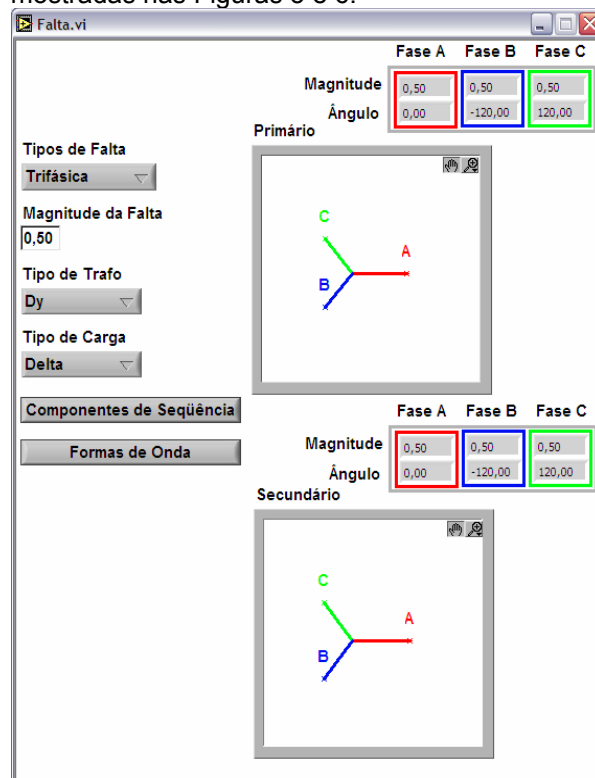


FIGURA 4
Janela principal do *SagView* com os dados de entrada e diagramas fasoriais das tensões no primário e secundário do transformador.

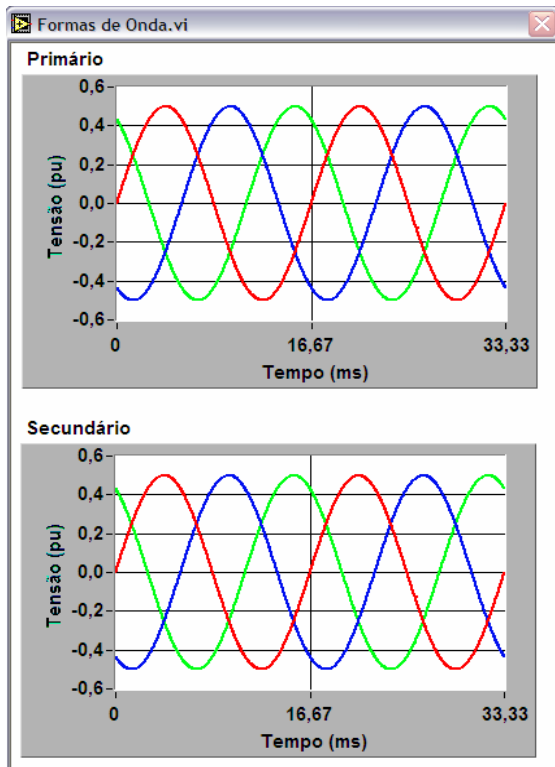


FIGURA 5

Janela secundária do SagView com as formas de onda de tensão de primário e de secundário.

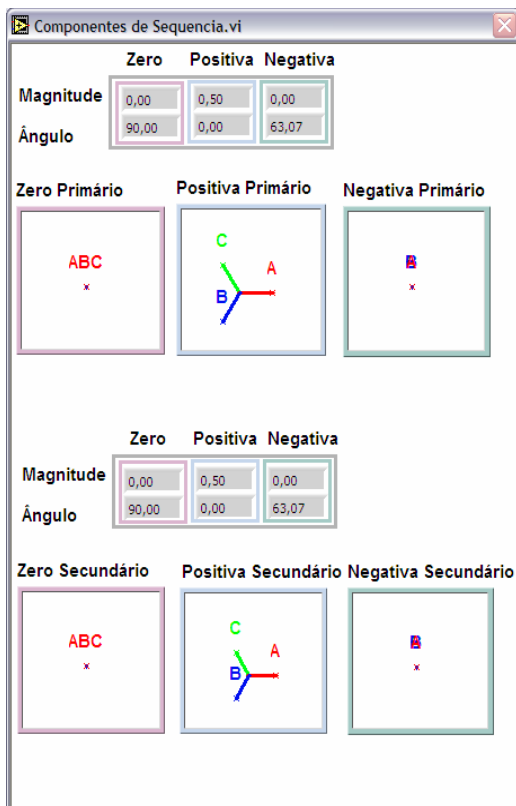


FIGURA 6

Janela secundária do SagView com as componentes de seqüência do primário e do secundário.

6.0 AFUNDAMENTO DE TENSÃO POR FALTAS ASSIMÉTRICAS

Exemplos de faltas assimétricas serão apresentadas de modo a demonstrar a utilidade do programa *SagView*.

Para uma falta bifásica-terra, tipo E, $h=0,5$, à montante de um transformador Yy e com carga em estrela tem-se como resposta os fasores apresentados nas Figuras 7, 8 e 9. A Figura 7 mostra o diagrama fasorial das tensões de fase no primário e secundário do transformador Yy. Enquanto a tensão de primário representa um afundamento do tipo E, a tensão de secundário apresenta um afundamento tipo G, isto é, tensões de fase de primário menos a componente de seqüência zero ($V_0=1/3(1-h)$). A carga, conectada em Y, tem em seus terminais a tensão de fase de secundário mostrada na Figura 7. As componentes de seqüências mostradas na Figura 9 atestam a ausência de seqüência zero nas tensões de secundário do transformador.

Se ao invés do transformador Yy for aplicada uma falta tipo E à montante de um transformador Y- Δ que alimenta uma carga em Y, as tensões de secundário sofrerão deslocamento angular em relação às tensões de primário tendo ao mesmo tempo a componente de seqüência zero filtrada. Assim, a tensão nos terminais da carga representa um afundamento tipo F. A componente de seqüência zero não está presente na tensão de secundário na Figura 10.

Quando a conexão da carga é mudada para Δ mantendo-se a falta bifásica e a conexão do transformador Y- Δ ocorre alteração nos fasores de entrada e de saída.

A Figura 11 representa a condição de uma falta tipo F que sofreu deslocamento angular ao passar por um transformador defasador.

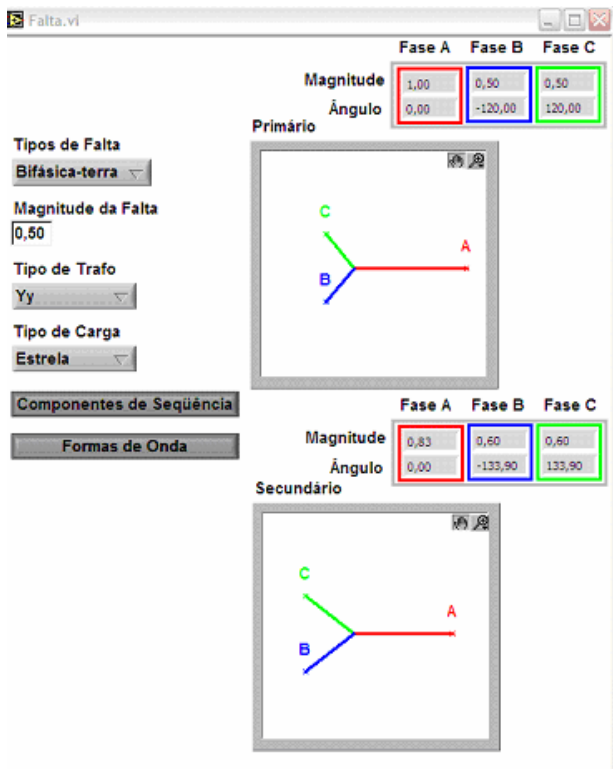


FIGURA 7 Diagrama fasorial para falta tipo E, transformador Yy e carga conectada em Y.

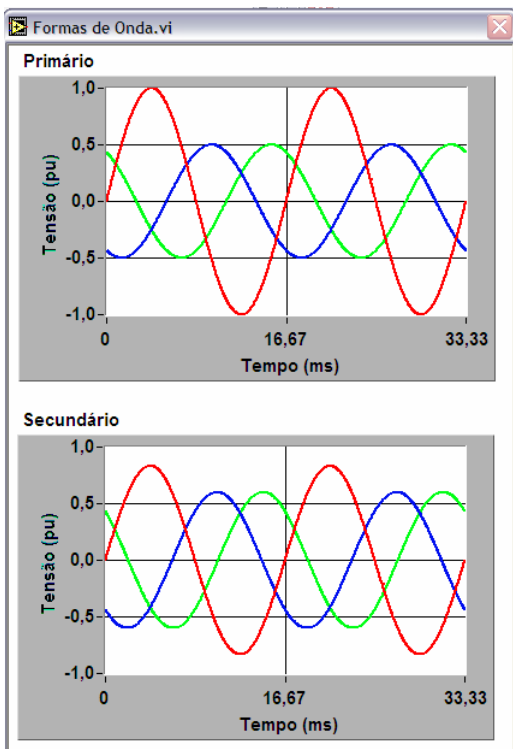


FIGURA 8 Formas de onda de tensões para falta tipo E, h=0,5.

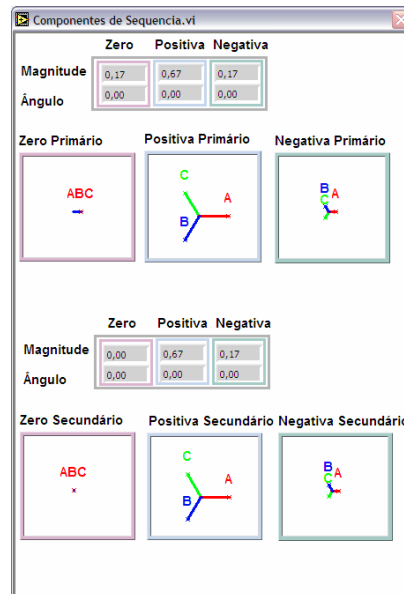


FIGURA 9 Componentes de seqüência das tensões de primário e secundário.

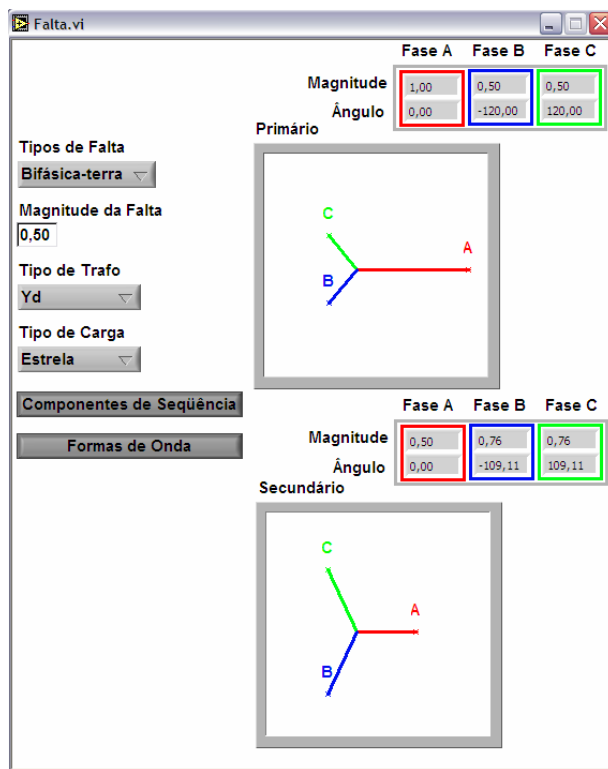


FIGURA 10 Diagrama fasorial de falta tipo E através de transformador Yd alimentando carga em Y.

7.0 CONCLUSÃO

Baseado no método proposto por M. Bollen [1], o qual considera a influência de fatores como o tipo de falta, o tipo de conexão da carga, e o tipo de conexão dos transformadores intermediários

localizados entre a falta e a carga sobre a tensão vista pela carga foi desenvolvido um programa capaz de mostrar numérica e graficamente as tensões no primário e secundário do transformador.

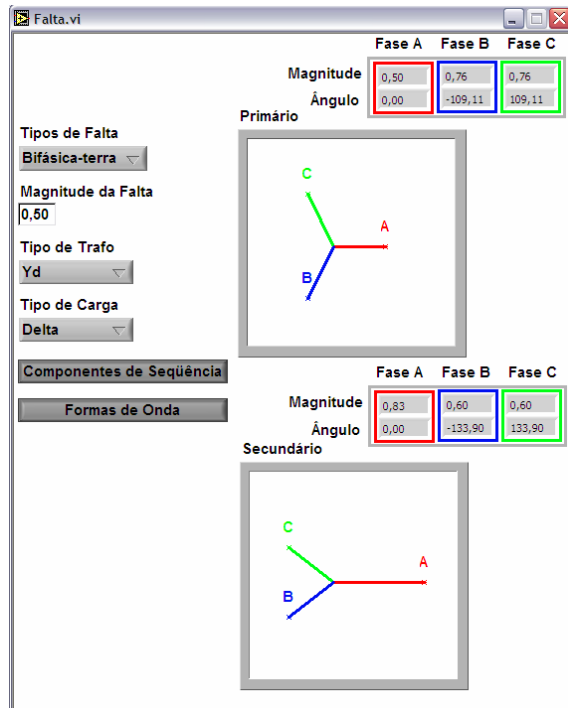


FIGURA 11

Diagrama fasorial de falta tipo E através de transformador Yd alimentando carga em Y.

O programa *Sagview* apresenta o módulo e ângulo de fase das tensões, o diagrama fasorial, as formas de onda, e as componentes de seqüências em módulo, ângulo e disposição

fasorial. O *SagView* é uma ferramenta de suporte para o treinamento de profissionais interessados na compreensão de distúrbio de afundamento de tensão.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems – Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press Series on Power Engineering, 2.000, ISBN 0-7803-4713-7, IEEE Order Number PC5764, pp. 139-198.
- [2] IEC 61000-4-30 (2003-2) Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.
- [3] Power Quality Indices and Objectives – Final Draft WG Report for Approval. Joint Working Group Cigré C4.07. January 2004.
- [4] Magnus Öhrström and Lennart Söder. A comparison of two methods used for voltage dip characterization, IEEE Power Tech Conference. 2003. Bologna, Italy.
- [5] E. J. Borba, Introdução a Sistemas Elétricos de Potência – Componentes Simétricas, Edgard Blücher, São Paulo, 1973.
- [6] T. C. de Oliveira, J. M. de C. Filho, J. P. G. de Abreu e R. C. Leborgne, “Análise da Influência da Conexão de Transformadores Δ/Y aterrado na Propagação de Afundamentos de Tensão”, apresentado no V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Aracaju, Brasil, 2003.