

# Desenvolvimento de Aplicativo para Estudo de Propagação de Afundamentos de Tensão com Base na IEEE Std 1668-2017

Álvaro J. Melo Júnior\*. Francisco E. M. Silva\*\*. Luís L. P. Martins\*\*\*  
Tayná M. A. Gomes\*\*\*\*. Ruth P.S. Leão\*\*\*\*\*

*Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará - UFC*  
E-mails: \*alvaromelo@alu.ufc.br, \*\*eduardomendess@hotmail.com, \*\*\*laiglon@chesf.gov.br,  
\*\*\*\*taynam.ag@hotmail.com, \*\*\*\*\*rleao@dee.ufc.br

**Abstract:** This paper analyzes the influence of the type of transformer winding connections on the propagation of voltage sags caused by faults in the power system. Thus, we present the mathematical modeling of the types of voltage sags, based on the IEEE Standard 1668-2017. It is notable that, when propagating through three-phase transformers, voltage sags can have their characteristics changed. We present an educational application developed in the Matlab App Designer environment. This tool aims to assist the analysis of the propagation of voltage sags and allows better understanding of this power quality disturbance. Moreover, experimental tests were carried out in the laboratory in order to validate the mathematical modeling and the developed graphical user interface.

**Resumo:** Este artigo analisa a influência do tipo de conexão dos transformadores trifásicos na propagação dos afundamentos de tensão causados por curtos-circuitos no sistema elétrico. Neste sentido, o artigo apresenta a modelagem matemática dos tipos de afundamentos de tensão, baseada na norma IEEE 1668-2017. Verifica-se que, ao se propagarem através de transformadores trifásico, os afundamentos de tensão podem ter suas características alteradas. É apresentada uma ferramenta didática desenvolvida no *Matlab App Designer*, com o objetivo de auxiliar a análise da propagação dos afundamentos de tensão e permitir melhor compreensão desse distúrbio na qualidade da energia elétrica. Além disso, testes experimentais foram realizados em laboratório com o objetivo de validar a modelagem matemática e a interface gráfica desenvolvida.

**Keywords:** Power quality; Short-duration Voltage Variation; Voltage sags; IEEE Std 1668-2017; Matlab App Designer.

**Palavras-chaves:** Qualidade da energia elétrica; Variações de tensão de curta duração; Afundamentos de tensão; Norma IEEE 1668-2017; Matlab App Designer.

## 1. INTRODUÇÃO

As preocupações com a qualidade da energia elétrica (QEE) aumentam devido à crescente digitalização e automação dos processos produtivos, que possuem requisitos de qualidade de energia mais rigorosos. No entanto, mesmo nos sistemas elétricos de potência (SEP) modernos, interrupções, afundamentos de tensão, harmônicos etc., são distúrbios frequentes e que reduzem a qualidade da energia elétrica. Os afundamentos de tensão (AFT) estão entre os distúrbios de tensão de curta duração mais recorrentes e os que mais causam impactos econômicos às indústrias de alta tecnologia, podendo causar má operação, desligamento e falha de equipamentos (IEEE, 2017).

O setor hospitalar, de relevância a toda sociedade, pode ser bastante impactado por problemas de afundamento de tensão. Equipamentos de ressonância magnética ou tomografia computadorizada por raios X, que fornecem informações críticas no diagnóstico e tratamento de lesões e doenças, podem ser desligados, mesmo com afundamentos de tensão para 80%, com duração de poucos ciclos, vistos como de baixa

severidade. A falha de um ventilador pulmonar, bomba de perfusão ou desfibrilador automático pode ser fatal para um paciente (Prudenzi et al., 2019). Esses exemplos ilustram a importância da qualidade de energia elétrica.

Tendo em vista a importância do estudo dos afundamentos de tensão na QEE, e sua característica de propagação de uma parte a outra da rede elétrica, este artigo apresenta uma ferramenta de estudo da propagação de afundamentos de tensão através das conexões de transformadores. O aplicativo foi desenvolvido no *Matlab App Designer* que oferece recursos gráficos que facilitam e enriquecem a criação de ferramentas didáticas. Além disso, ensaios experimentais foram realizados para a validação do programa desenvolvido.

## 2. TIPOS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Afundamento de tensão é definido em várias normas e documentos regulatórios como variações de tensão de curta duração (VTCDD), com redução temporária na tensão eficaz abaixo de um limite especificado seguida de sua rápida recuperação.

No Brasil, ANEEL (2017), que trata sobre Qualidade da Energia Elétrica, define o afundamento de tensão como desvios na amplitude da tensão rms superior ou igual a 0,1 p.u. e inferior a 0,9 p.u. em relação à tensão de referência. Quanto a duração da variação, o afundamento de tensão pode ser classificado como momentâneo, se superior ou igual a um ciclo (60 Hz) e inferior a três segundos, ou temporário, se superior ou igual a três segundos e inferior a três minutos. A especificação da faixa de duração de um afundamento de tensão varia entre normas e códigos de rede. Nas normas IEEE (2009), EN (2010) e IEEE (2017), a duração de um afundamento de tensão é superior ou igual a ½ ciclo e inferior a um minuto.

As principais características dos afundamentos de tensão são magnitude, duração, ponto na senoide da tensão em que inicia e termina o afundamento e a mudança do ângulo de fase durante o afundamento. Em um sistema trifásico, o menor valor rms da tensão dentre as 3 fases define a magnitude do afundamento de tensão. A duração tem início quando a tensão rms de pelo menos uma das fases ultrapassa o limiar e termina quando todos os valores rms de tensão retornam a valores acima do limiar do evento (IEC, 2016).

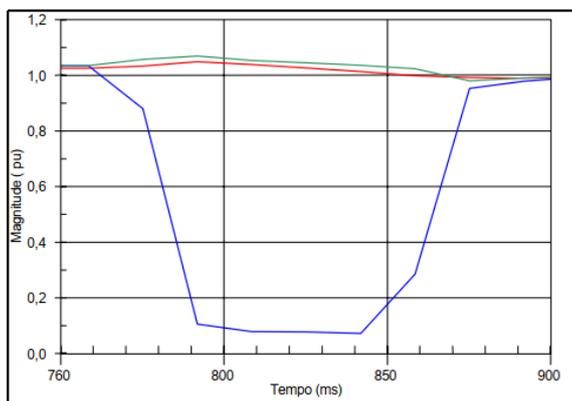


Fig. 1 Afundamento de tensão. Fonte: Oliveira et al., 2003.

A Fig. 1 ilustra o valor eficaz das tensões durante um afundamento de tensão registrado em um sistema real. O evento ocorreu em uma barra de 230 kV e foi provocado por um curto-circuito no sistema de 345 kV. Observa-se que o afundamento de tensão chegou ao patamar de 0,1 p.u. e duração da ordem de 100 ms (Oliveira et al., 2003).

Os afundamentos de tensão são decorrentes de aumentos de curta duração na corrente, devido a curtos-circuitos, partida de motores e aquecedores elétricos resistivos, ou energização de transformadores (IEEE, 2014).

Este trabalho está voltado ao estudo da influência do tipo de conexão de transformadores sobre as características dos afundamentos, causados por curto-circuito, os quais se propagam através da rede elétrica.

### 2.1 Classificação dos afundamentos de tensão

Os tipos de afundamentos de tensão geralmente são baseados nas tensões individuais (magnitude e ângulo) de cada uma das três fases durante o afundamento. São três os fatores que

afetam o tipo do afundamento de tensão nos terminais de um equipamento: tipo de falta, conexão dos enrolamentos do transformador e a conexão da carga (Bollen, 2000, cit. in IEEE, 2017). A combinação dos três fatores resulta em sete tipos de afundamentos (A-G), como ilustrado na Fig. 2.

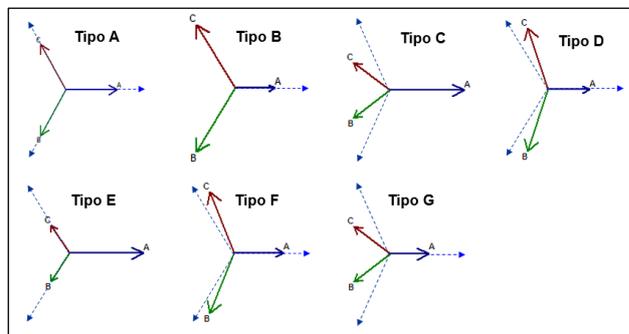


Fig. 2 Tipos de afundamentos de tensão. Fonte: Adaptado de Bollen, 2000.

A Fig. 2 apresenta o diagrama fasorial de cada tipo de afundamento de tensão, as linhas tracejadas representam os fasores de tensão antes do distúrbio e as linhas contínuas os fasores durante o afundamento de tensão. Observa-se que os afundamentos de tensão podem modificar não só a magnitude da tensão, mas também os ângulos entre os vetores. Segundo IEEE (2017), alguns equipamentos eletrônicos podem ser mais sensíveis aos afundamentos com deslocamento angular e, por isso, a norma recomenda que os testes de suportabilidade a afundamento de tensão de equipamentos eletrônicos sejam realizados utilizando diferentes tipos de afundamentos.

### 2.2 Tipos de Falhas

Com o objetivo de representar matematicamente cada um dos 7 tipos de afundamentos de tensão, faz-se necessário modelar cada tipo de curto-circuito. A maioria das faltas no SEP são do tipo fase-terra simples e, conseqüentemente, resultam em afundamentos de tensão desequilibrados (IEEE, 2017).

Para quantificar a magnitude de um afundamento de tensão, em sistemas radiais, causado por falta simétrica, o modelo do divisor de tensão (Bollen, 2000), ilustrado na Fig. 3, pode ser usado. Este é um método simplificado, mas pode ser um modelo útil para prever algumas das propriedades dos afundamentos.

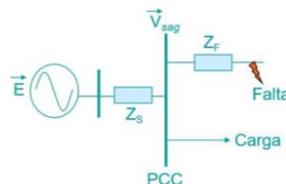


Fig. 3 Falta simétrica.

$Z_S$  é a impedância da fonte vista pelo barramento (PCC) e  $Z_F$  é a impedância entre o PCC e o ponto da falta. A tensão no PCC pode ser descrita por:

$$\vec{V}_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \cdot \vec{E} \quad (1)$$

Se for assumido que a tensão pré-distúrbio é de  $1\angle 0^\circ$  p.u., (1) resulta em:

$$\vec{V}_{sag} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (2)$$

Pode-se observar que o afundamento é menos severo quanto maior a distância da carga ao ponto de falta ( $Z_F$  maior) (Bollen, 2000).

O curto-circuito é um tipo de falta assimétrica e, portanto, a teoria das componentes simétricas pode ser utilizada para o cálculo da tensão após a falta. A Fig. 4 apresenta o circuito equivalente de sequência simétrica para uma falta fase-terra, onde  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_0$  representam, respectivamente, as componentes de sequência positiva, negativa e zero da tensão no PCC. A impedância  $Z_{Si}$  representa a impedância da fonte,  $Z_{Fi}$  a impedância da falta, e o índice  $i = 1, 2$  e  $0$  correspondem às sequências positiva, negativa e zero, respectivamente.

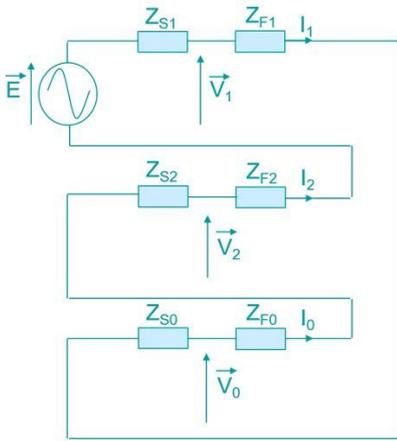


Fig. 4 Circuito equivalente para uma falta fase-terra.

Considerando a tensão pré-falta igual a  $1\angle 0^\circ$  p.u., as componentes de sequência da tensão no PCC podem ser descritas por (Bollen, 2000):

$$\vec{V}_1 = \frac{Z_{F1} + Z_{S2} + Z_{F2} + Z_{S0} + Z_{F0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (3)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4)$$

$$\vec{V}_0 = \frac{Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (5)$$

Se a carga ligada ao PCC for conectada em estrela, as tensões de linha-neutro durante a falta são expressas nas equações (6)-(8), sendo  $a = 1\angle 120^\circ$ :

$$\vec{V}_a = \vec{V}_0 + \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \quad (6)$$

$$\vec{V}_b = a^2 \cdot \vec{V}_1 + a \cdot \vec{V}_2 + \vec{V}_0 \quad (7)$$

$$\vec{V}_c = a \cdot \vec{V}_1 + a^2 \cdot \vec{V}_2 + \vec{V}_0 \quad (8)$$

Com as devidas substituições de (3)-(5) em (6)-(8), e sabendo que, em um sistema solidamente aterrado, as impedâncias de

sequência da fonte podem ser consideradas iguais (Bollen, 2000), logo:

$$\vec{V}_a = 1 - \frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + Z_{S1}} \quad (9)$$

$$\vec{V}_b = a^2 \quad (10)$$

$$\vec{V}_c = a \quad (11)$$

O diagrama fasorial resultante é apresentado na Fig. 5. Nota-se que esse diagrama representa o afundamento tipo B apresentado na Fig. 2.

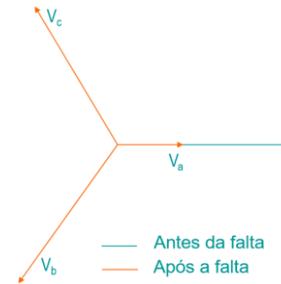


Fig. 5 Diagrama fasorial das tensões de fase no PCC em sistema solidamente aterrado.

As tensões de fase em p.u. em sistema solidamente aterrado como expressas em (9)-(11) podem ser reescritas por:

$$\vec{V}_a = h \quad (12)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (13)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (14)$$

Sendo  $h$  a magnitude, em p.u., da tensão após a falta. Para uma falta do tipo fase-terra e carga conectada em estrela, tem-se um afundamento do tipo B. Porém, se a carga estiver conectada em delta, as tensões de linha, em p.u., são:

$$\vec{V}_a = j \frac{\vec{V}_b - \vec{V}_c}{\sqrt{3}} = 1 \quad (15)$$

$$\vec{V}_b = j \frac{\vec{V}_c - \vec{V}_a}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{2} - j \left( \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{3}}{3} h \right) \quad (16)$$

$$\vec{V}_c = j \frac{\vec{V}_a - \vec{V}_b}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{2} + j \left( \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{3}}{3} h \right) \quad (17)$$

As equações acima foram multiplicadas por  $j$  com o objetivo de rotacionar os fasores em 90 graus, mantendo a mesma referência adotada na Fig. 2 para o afundamento de tipo C.

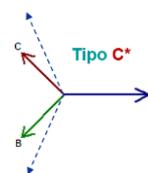


Fig. 6 Diagrama fasorial das tensões de linha no PCC em sistema solidamente aterrado.

A Fig. 6 apresenta o diagrama fasorial das tensões linha-linha de um afundamento de tensão gerado por uma falta do tipo fase-terra. Nota-se que esse diagrama se assemelha ao afundamento tipo C, mas ele é definido por Bollen (2000) como sendo tipo C\*. O asterisco indica que a magnitude e a fase do afundamento tipo C\* difere do tipo C, devido ao termo  $(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h)$ .

De forma análoga, pode-se encontrar o modelo matemático referente a falta bifásica (fase-fase), a bifásica-terra (fase-fase-terra) e a trifásica e analisar quais tipos de afundamentos são gerados em cargas conectadas em delta ou estrela. A Tabela 1 apresenta o resultado dessa modelagem.

Tabela 1. Modelos matemáticos dos tipos de falta.

Falta monofásica em sistema solidamente aterrado	
Carga conectada em estrela $\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$	
Carga conectada em delta $\vec{V}_a = 1$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - j(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}h)\sqrt{3}$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + j(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}h)\sqrt{3}$	
Falta bifásica	
Carga conectada em estrela $\vec{V}_a = 1$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$	
Carga conectada em delta $\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2}j$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2}j$	
Falta bifásica-terra em sistema solidamente aterrado	
Carga conectada em estrela $\vec{V}_a = 1$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$	
Carga conectada em delta $\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2}h - j(\frac{1}{6}h + \frac{1}{3})\sqrt{3}$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2}h + j(\frac{1}{6}h + \frac{1}{3})\sqrt{3}$	
Falta trifásica	
$\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$	

### 3. INFLUÊNCIA DA CONEXÃO DOS TRANSFORMADORES NA PROPAGAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO

Comparando a Tabela 1 com a Fig. 2, pode-se verificar a ausência do afundamento tipo G na Tabela 1. Isso ocorre porque esse tipo de afundamento não pode ser observado por uma carga conectada ao ponto onde ocorre a falta, independente do seu tipo de conexão. Porém, se uma falta bifásica-terra se propaga através de um transformador do tipo estrela-estrela, não aterrado, a componente de sequência zero desse afundamento será filtrada e uma carga conectada ao secundário do transformador enxergará um AFT do tipo G. E por isso há a necessidade de analisar a influência da conexão dos enrolamentos dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão.

No estudo da propagação dos afundamentos de tensão, os transformadores trifásicos podem ser classificados em três grupos:

- *Tipo 1* – transformadores que não alteram os afundamentos de tensão, as tensões, em p.u., no primário são iguais as tensões, em p.u., no secundário do transformador. A única conexão que se enquadra nesse tipo é a estrela-estrela, com os dois enrolamentos aterrados (YNyn).

- *Tipo 2* – transformadores que filtram a componente de sequência zero, mas não introduzem deslocamento angular, são aqueles com conexões estrela-estrela (Yy), delta-delta (Dd) e o delta-ziguezague (Dz).

- *Tipo 3* – transformadores que introduzem deslocamento angular, são eles os de conexão Yd, Dy e Yz.

Nesse sentido, a Fig. 7 ilustra os três tipos de transformadores e seus respectivos circuitos equivalentes de sequência zero.

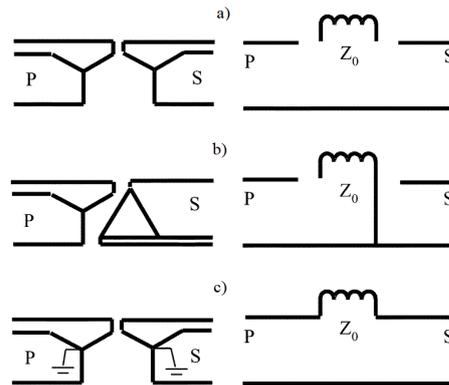


Fig. 7 Circuito equivalente de sequência zero dos tipos de transformadores; a) filtra a componente de sequência zero; b) introduz defasamento angular; c) não modifica o afundamento de tensão. Fonte: Milanovic, 2006.

Os tipos I, II e III de transformadores trifásicos podem ser descritos matematicamente por meio matrizes de transformação  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ , respectivamente:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$T_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Dessa forma, se um afundamento de tensão, causado por uma falta fase-terra, se propaga através de um transformador Dy (tipo 3), a tensão no secundário pode ser calculada por:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = j \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\bar{V}_a = 1 \quad (22)$$

$$\bar{V}_b = -\frac{1}{2} - j \left( \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{3}}{3} h \right) \quad (23)$$

$$\bar{V}_c = -\frac{1}{2} + j \left( \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{3}}{3} h \right) \quad (24)$$

Na equação (21), a multiplicação por  $j$  provoca uma rotação de  $90^\circ$  e mantém o fasor  $V_a$  na referência do diagrama fasorial, com o objetivo de manter a mesma referência da Fig.2.

Analisando as equações (22)-(24), observa-se que ao passar pelo transformador, o afundamento tipo B se transforma num afundamento tipo C\*, como ilustra a Fig. 8.

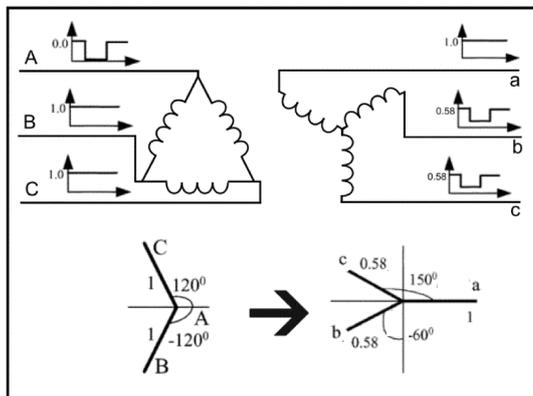


Fig. 8 Propagação de AFT causado por falta fase-terra através de transformador Dy. Fonte: Prudenzi et al., 2019.

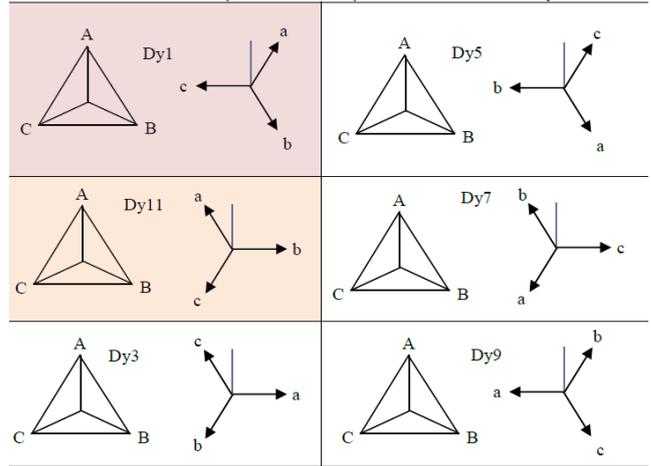
A Tabela 2 mostra o resultado da passagem de cada tipo de afundamento de tensão pelos três grupos de transformadores trifásicos.

Até aqui, por simplificação, não se considerou o fato de que transformadores trifásicos reais podem acrescentar deslocamento angular entre as tensões do primário e do secundário, de acordo com a conexão entre suas bobinas. Por exemplo, o grupo de transformadores Dy dispõe de 6 grupos fasoriais como mostrado na Tabela 3.

Tabela 2. Propagação de afundamentos de tensão por transformadores trifásicos. Fonte: Adaptado de Bollen (2000).

Tipo de Conexão do Trafo	Tipo do Afundamento de Tensão						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy, Dd, Dz	A	D*	C	D	G	F	G
Yd, Dy, Yz	A	C*	D	C	F	G	F

Tabela 3. Grupo de fasores para transformadores Dy.



Observa-se que as conexões Dy1 e Dy11 implicam em defasamento de  $30^\circ$  entre tensões de primário e secundário, no entanto para Dy1, a tensão de secundário é atrasada da tensão de primário, enquanto que em Dy11 a tensão de secundário é adiantada de  $30^\circ$  da tensão de primário.

Os grupos de transformadores Yy, Dd e Yd também dispõem de grupos fasoriais, e, por simplificação, a interface gráfica desenvolvida inclui apenas os seguintes tipos de transformadores:

- Tipo 1 – YNyn;
- Tipo 2 – Yy0 e Dd0;
- Tipo 3 – Yd1 e Dy1.

#### 4. CLASSIFICAÇÃO DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO PELA NORMA IEEE 1668-2017

A IEEE (2017) é um recente documento normativo sobre afundamentos de tensão e consiste em recomendações práticas para a realização de testes de suportabilidade a afundamentos de tensão em equipamentos elétricos e eletrônicos conectados a sistemas de baixa tensão. A norma recomenda que os testes de suportabilidade sejam realizados utilizando três tipos de afundamentos de tensão, denominados de tipo I, II e III e que equivalem aos afundamentos tipo D, C e A definidos por Bollen (2000). Porém, devido à dificuldade de produzir afundamentos com deslocamento angular em fontes de tensão CA, a norma recomenda mais dois tipos alternativos de afundamento, o tipo I.A1 e o tipo II.A2, que equivalem aos tipos B e E, respectivamente.

A Tabela 4 resume e compara as classificações dos afundamentos de tensão proposta por Bollen (2000) e por IEEE (2017).

Tabela 4. Tipos de afundamento em função do tipo de falha.

Classificação proposta por Bollen (2000)	Classificação proposta por IEEE (2017)	Diagrama Fasorial
<b>Tipo I</b> AFT que causa redução na magnitude de apenas uma das tensões linha-neutro.	<b>Tipo D</b> AFT causado por falta bifásica visto por carga conectada em delta.	
<b>Tipo I.A1</b> AFT alternativo ao tipo I.	<b>Tipo B</b> AFT causado por falta monofásica visto por carga conectada em estrela.	
<b>Tipo II</b> AFT que gera redução na magnitude de apenas uma das tensões linha-linha.	<b>Tipo C</b> AFT causado por falta bifásica visto por carga conectada em estrela.	
<b>Tipo II.A2</b> AFT alternativo ao tipo II.	<b>Tipo E</b> AFT causado por falta bifásica-terra visto por carga conectada em estrela.	
<b>Tipo III</b> AFT que gera redução na magnitude igual nas três tensões.	<b>Tipo A</b> AFT causado por falta trifásica.	

## 5. INTERFACE GRÁFICA

Uma interface gráfica foi desenvolvida na plataforma *Matlab App Designer* com o objetivo de obter uma ferramenta didática destinada ao estudo da propagação de afundamentos de tensão através de transformadores de potência.

A interface dispõe de um diagrama unifilar composto por três barramentos e dois transformadores como ilustrado na Fig. 10.

Para um curto-circuito na barra I, é possível visualizar as tensões nos barramentos II e III para diferentes configurações. O usuário pode escolher os tipos dos transformadores (YNyn, Yy0, Dd0, Yd1 ou Dy1) e se a carga é conectada em estrela ou delta. Outro parâmetro a ser inserido pelo usuário é a severidade em magnitude do afundamento de tensão, que pode variar de 0 a 100%.

Como resultado, a interface apresenta o diagrama fasorial e a classificação do afundamento de tensão segundo IEEE (2017) e de acordo com o modelo proposto por Bollen (2000). O resultado apresenta o afundamento ao qual a carga seria exposta se ela estivesse conectada ao barramento I, II ou III.

A Fig. 10 apresenta os resultados obtidos para a configuração mostrada na Fig. 9. Observa-se que no barramento I tem-se um afundamento para 0,1 p.u. tipo B, que tem sua componente de sequência zero filtrada ao passar por um transformador Yy0 (transformador tipo II), resultando em um afundamento para

0,4 p.u. tipo D no barramento II. Em seguida, ao passar pelo transformador Dy1, ocorre um deslocamento angular, resultando em afundamento para 0,61 p.u. tipo C no barramento III.

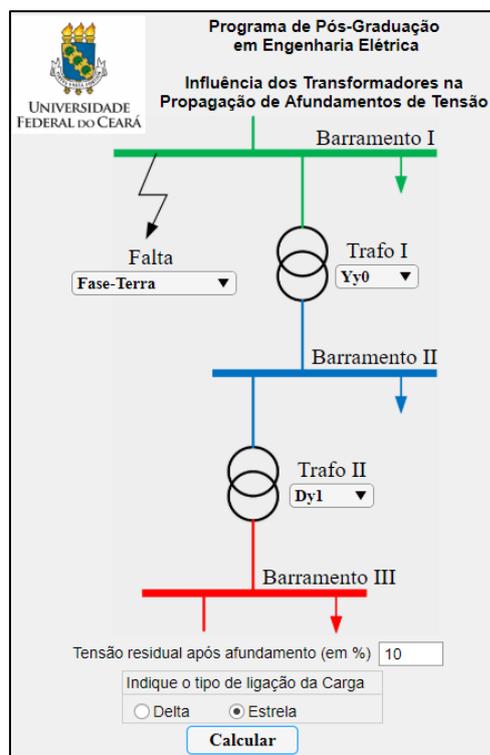


Fig. 9 Interface gráfica: parâmetros configuráveis.

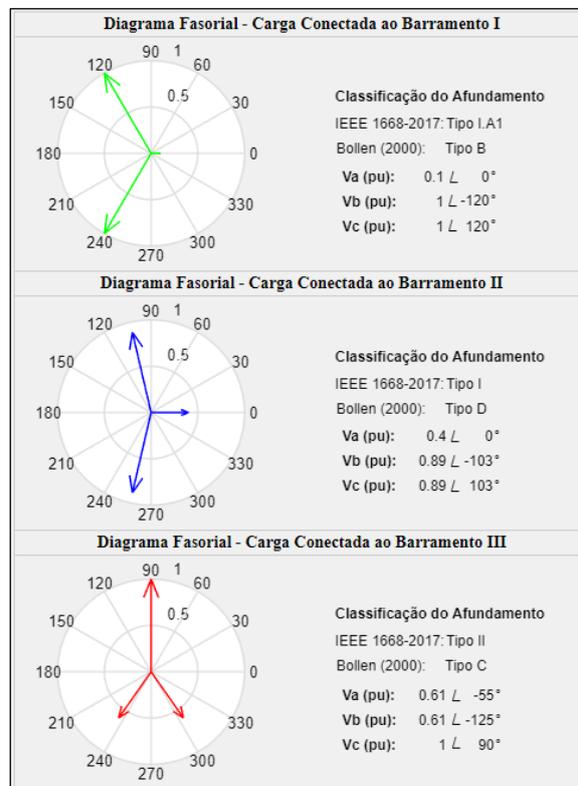


Fig. 10 Interface gráfica: resultado da propagação.

É interessante notar que mesmo sem considerar as impedâncias dos transformadores e da linha de transmissão, a

severidade do afundamento, em termos de magnitude, pode ser mitigada a depender do tipo de conexão dos transformadores. No entanto, verifica-se o aumento do deslocamento angular.

## 6. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de validar os resultados da análise teórica e da interface gráfica, foram realizados experimentos no laboratório do Grupo de Processamento e Controle de Energia (GPEC), na Universidade Federal do Ceará.

Os testes foram realizados utilizando um transformador de bancada, utilizado em aulas didáticas da disciplina Máquinas Elétricas. O transformador dispõe de quatro bobinas no primário e quatro bobinas no secundário, permitindo a conexão em diferentes configurações. Cada bobina pode ser submetida a uma corrente máxima de 3 A e uma tensão máxima de 220 V. Além do transformador, utilizou-se uma fonte CA, cargas resistivas e osciloscópios.

Como previsto pela norma IEEE (2017), a fonte não possui uma função que gere deslocamento angular, logo só foi possível gerar os afundamentos de tensão do tipo I.A1 (tipo B), II.A2 (tipo E) e III (tipo A).

Foram realizados testes com a fonte configurada para gerar os afundamentos de tensão no primário do transformador e um osciloscópio capturando as ondas de tensão fase-neutro na carga. As bobinas do transformador trifásico foram conectadas em Yy, Dd, Yd e Dy para cada tipo de afundamento de tensão. A Fig. 11 ilustra o esquema de conexão para os testes utilizando o transformador Yy.

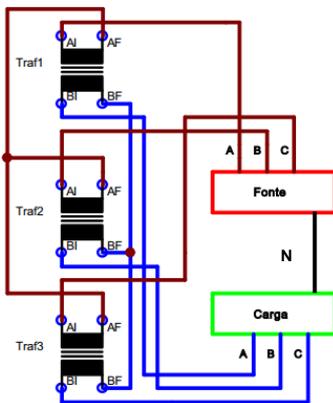


Fig. 11 Circuito experimental para teste utilizando transformador Yy.

Configurou-se a fonte CA com o objetivo de gerar tensões de fase com valor eficaz igual a 120 V e após alguns segundos gerar um afundamento de tensão com magnitude igual a 10% durante 1 minuto, tempo suficiente para capturar as tensões na carga após o regime transitório. A carga foi formada por três resistências de 100 Ω conectadas em estrela.

## 7. RESULTADOS

A Tabela 5 apresenta a comparação dos resultados experimentais com os de simulação para os afundamentos de tensão do tipo B e E ao se propagar pelo transformador Yy.

Tabela 5. Resultados para afundamentos de tensão do tipo B e E ao se propagar por transformador Yy e Dy.

AFT Tipo B - Transformador Yy			
Tensões de Fase	Primário	Secundário	
		Simulação	Experimental
$\vec{V}_a$	$0,1 \angle 0^\circ$	$0,4 \angle 0^\circ$	$0,41 \angle 0^\circ$
$\vec{V}_b$	$1 \angle -120^\circ$	$0,89 \angle -103^\circ$	$0,91 \angle -103^\circ$
$\vec{V}_c$	$1 \angle 120^\circ$	$0,89 \angle 103^\circ$	$0,89 \angle 101^\circ$
Tipo de AFT	Tipo B	Tipo D	Tipo D
AFT Tipo E - Transformador Yy			
Tensões de Fase	Primário	Secundário	
		Simulação	Experimental
$\vec{V}_a$	$1 \angle 0^\circ$	$0,7 \angle 0^\circ$	$0,71 \angle 0^\circ$
$\vec{V}_b$	$0,1 \angle -120^\circ$	$0,36 \angle -166^\circ$	$0,37 \angle -168^\circ$
$\vec{V}_c$	$0,1 \angle 120^\circ$	$0,36 \angle 166^\circ$	$0,36 \angle 168^\circ$
Tipo de AFT	Tipo E	Tipo G	Tipo G
AFT Tipo B - Transformador Dy			
Tensões de Fase	Primário	Secundário	
		Simulação	Experimental
$\vec{V}_a$	$0,1 \angle 0^\circ$	$0,61 \angle -55^\circ$	$0,61 \angle -56^\circ$
$\vec{V}_b$	$1 \angle -120^\circ$	$0,61 \angle -125^\circ$	$0,61 \angle -126^\circ$
$\vec{V}_c$	$1 \angle 120^\circ$	$1 \angle 90^\circ$	$1,03 \angle 90^\circ$
Tipo de AFT	Tipo B	Tipo C	Tipo C
AFT Tipo E - Transformador Dy			
Tensões de Fase	Primário	Secundário	
		Simulação	Experimental
$\vec{V}_a$	$1 \angle 0^\circ$	$0,61 \angle -5^\circ$	$0,64 \angle -2^\circ$
$\vec{V}_b$	$0,1 \angle -120^\circ$	$0,61 \angle -175^\circ$	$0,60 \angle -172^\circ$
$\vec{V}_c$	$0,1 \angle 120^\circ$	$0,1 \angle 90^\circ$	$0,15 \angle 90^\circ$
Tipo de AFT	Tipo E	Tipo F	Tipo F

As colunas 3 e 4 apresentam a magnitude (em p.u.) e ângulo das tensões de fase na carga durante o afundamento de tensão. Observou-se que o erro relativo entre os resultados experimentais e de simulação são menores que 2%, podendo concluir que os modelos matemáticos utilizados no desenvolvimento da interface gráfica foram validados pelos testes em laboratório.

Os primeiros resultados da Tabela 5 apresentam o teste de configuração semelhante ao da Fig. 9, um afundamento de tensão do tipo B (falta fase-terra), com magnitude de 0,1 p.u. e propagando-se através de um transformador conectado em Yy. A Fig. 12 apresenta a imagem do osciloscópio durante o afundamento. A onda de tensão na carga capturada pelo canal 2 (CH2 - azul) tem valor eficaz igual 49,2 V (0,41 p.u.).

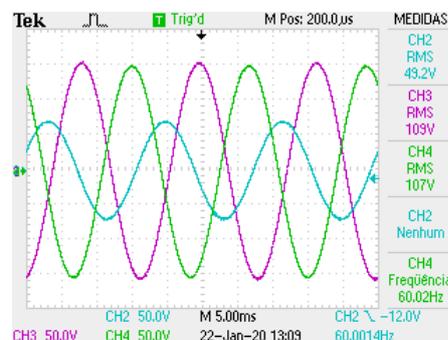


Fig. 12 Formas de onda das tensões na carga para afundamento de tensão tipo B.

O resultado apresentado na Fig. 12 não evidencia o deslocamento de fase, já que neste caso o deslocamento é de apenas 17°. No entanto, para um afundamento do tipo E (falta bifásica-terra), de magnitude 0,1 p.u., passando pelo mesmo transformador Yy, tem-se um deslocamento angular igual a 46°, assim, é possível notar o deslocamento resultante, como ilustra a Fig. 13.

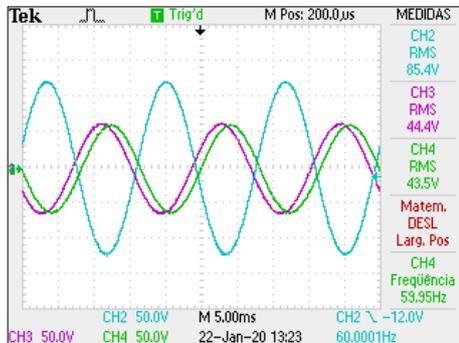


Fig. 13 Formas de onda das tensões na carga para afundamento de tensão tipo E.

## 8. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise teórica e experimental sobre a propagação dos afundamentos de tensão pela rede elétrica.

O afundamento de tensão visto pela carga depende do tipo de falta que causou o afundamento, do tipo de conexão dos transformadores existentes entre a carga e o ponto de ocorrência da falta e de como a carga está conectada à rede. Apesar do estudo não levar em consideração as impedâncias do sistema, observou-se tal dependência na modelagem dos tipos de faltas pelo método do divisor de tensão. Além disso, o tipo de aterramento do sistema no ponto de falta pode ser determinante para a severidade do afundamento.

A partir da modelagem matemática, foi desenvolvida uma interface gráfica no *Matlab App Designer* que permitiu a análise da propagação dos afundamentos de tensão através de transformadores trifásicos. O aplicativo desenvolvido pode se tornar uma ferramenta didática que irá auxiliar outros alunos no estudo sobre afundamentos de tensão em disciplinas da graduação ou pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Com base nos resultados obtidos, tanto da abordagem teórica como por meio das simulações e dos testes em laboratório, observa-se a influência das conexões dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão.

Essa influência pode ser notada quando os afundamentos de tensão possuem componentes de sequência zero e se propagam através de transformadores que filtram essas componentes (transformadores do tipo II), como também pelos transformadores do tipo III que além de filtrar a componente de sequência zero, impõem deslocamentos angulares aos afundamentos de tensão.

Analisando a Tabela 5, observa-se que os transformadores do tipo III mitigam os afundamentos severos do tipo B, causados por faltas fase-terra, com maior intensidade do que os transformadores do tipo II. Porém, o contrário ocorre no caso

de afundamentos do tipo E, causados por falta bifásica-terra. Se as faltas fase-terra são mais frequentes que as bifásica-terra em determinado sistema, a concessionária pode optar por transformadores Yd ou Dy visando minimizar a severidade dos afundamentos tensão.

Logo, estes resultados mostram a importância da avaliação das conexões dos transformadores utilizados nos sistemas de transmissão e distribuição.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).

## REFERÊNCIAS

- Alipoor, J., Doroudi, A. e Ghaseminezhad, M. (2012). Detection of the critical duration of different types of voltage sags for synchronous machine torque oscillation. *Energy and Power Engineering*, Vol. 4 No. 3, 2012, pp. 117-124.
- ANEEL (2017). Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST, Módulo 8. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.
- Bollen, M.H.J. (2000). *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press Series on Power Engineering. Piscataway, NJ, IEEE Press, 2000.
- EN (2010). Standard EN 50160 – Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.
- IEC (2016). Internacional Standard IEC 61.000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods, 2016.
- IEEE (2009). Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Std 1159-2009, vol., no., pp.1-94, 2009.
- IEEE (2014). Guide for Voltage Sag Indices. IEEE Std 1564-2014, vol., no., pp.1-59, 2014.
- IEEE (2017). Recommended Practice for Voltage Sag and Short Interruption Ride-Through Testing for End-Use Electrical Equipment Rated Less than 1000 V. IEEE Std 1668-2017 (Revision of IEEE Std 1668-2014) , vol., no., pp.1-85, 2017.
- Milanovic, J.V. e Aung, M.T. (2006). The influence of transformer winding connections on the propagation of voltage sags. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 262-269, Jan. 2006.
- Oliveira, T., Filho, J., Abreu, J. e Leborgne, R. (2003). Análise da Influência da Conexão de Transformadores  $\Delta/Y$  aterrado na Propagação de Afundamentos de Tensão. V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Aracaju, Brasil, 2003.
- Prudenzi, A., Fioravanti, A., Petriconi, L. e Caracciolo, V. (2019). Power Quality problems in hospital: a case study. *IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 2019, pp. 1-6.