



## XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

### **Influência das Conexões dos Transformadores de Potência na Propagação dos Afundamentos de Tensão pelo Sistema Elétrico**

<b>Willians Ribeiro Mendes</b>	<b>Milton Itsuo Samesima</b>	<b>Fabrcio Augusto M. Moura</b>
<b>Universidade Federal de Uberlândia - Núcleo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica</b>		
williansmendesene@hotmail.com	samesima@ufu.br	faugustomoura@yahoo.com.br

#### **Palavras-chave:**

Afundamentos de tensão  
Conexão de transformadores  
Qualidade da energia  
Propagação de afundamentos de tensão

#### **Resumo**

O objetivo deste artigo é verificar a influência dos tipos de conexões dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão em um sistema elétrico. Verifica-se que a influência pode ocorrer em afundamentos de tensão que possuam componentes de sequência zero ao se propagarem através de transformadores que possuem a característica de não permitirem o fluxo dessas componentes. Todavia, em alguns afundamentos a componente de sequência zero não está presente, originários de curtos-circuitos que não envolvem a terra, a influência neste caso é devido à defasagem imposta pelos transformadores de tipo 3. Com o intuito de se analisar o fenômeno acima citado foi modelado no ATP - Alternative Transient Program - um sistema elétrico e uma fonte geradora de afundamentos de tensão, com a qual é possível gerar qualquer tipo de afundamento através das variações da magnitude e ângulo de fase.

#### **1. Introdução**

As preocupações com afundamentos de tensão têm se intensificado ano após ano e vêm sendo debatidas pelas concessionárias e pelos consumidores devido ao uso intensivo de equipamentos eletrônicos sensíveis ao distúrbio. Para minimizar os custos, tanto para as concessionárias quanto para os consumidores, decorrentes dos afundamentos de tensão, se faz necessário então, prever e controlar as conseqüências provocadas por tal distúrbio.

As características dos afundamentos como magnitude, ângulo de fase e duração podem ser determinadas, entretanto, essas características nas barras de carga podem diferir daquelas do local de origem do curto circuito. Os afundamentos de tensão ao se propagarem pelo sistema elétrico terão suas características alteradas, não apenas devido à impedância entre a origem do evento e a carga, mas também do tipo de conexão dos transformadores através dos quais se propagam ao longo da rede. A tabela I exemplifica e ilustra esse conceito [6].

Nas análises e cálculos dos afundamentos de tensão, o tipo de conexão dos transformadores existentes entre o local da falta e a carga irá influenciar significativamente na magnitude e no ângulo de fase do afundamento.

**TABELA I**

Tipos de afundamentos no secundário do transformador							
Tipo de conexão	Afundamento de tensão no lado primário						
	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

C\* D\* - indica que a magnitude do afundamento não é igual a V, mas será igual  $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$ .

A influência das conexões dos enrolamentos dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão pode ser observada quando os afundamentos contêm componentes de sequência zero e as conexões do transformador bloqueiam o fluxo da referida seqüência. Em alguns afundamentos de tensão, as quantidades de componentes de seqüência zero não são envolvidas, pois esses têm origem em curtos circuitos que não envolvem a terra. Nesses casos, a influência pode ser esperada em consequência dos transformadores que introduzem defasamento no ângulo de fase. Finalmente, a influência pode ocorrer também devido a combinação desses dois tipos de transformadores respectivamente.

Assim, a propagação dos afundamentos de tensão através dos mais diferenciados tipos de conexões dos transformadores resultam em afundamentos com características completamente diferentes daqueles que os originaram.

Para realizar o presente estudo dos fenômenos citados acima foi tomado como base o sistema elétrico padrão de 14 barras, proposto pelo IEEE. Este sistema foi modelado no programa Alternative Transient Program – ATP, de maneira a mostrar o efeito da propagação do afundamento e da alteração da característica do ângulo de fase, sendo que os níveis de tensões aqui tratados originam na transmissão em 138KV até o consumidor em 380/220V.

Considerar-se-ão os afundamentos de tensão dentro de sua conceituação, ou seja, contemplando os afundamentos temporários e momentâneos, com duração entre 1 ciclo e 1 minuto e amplitude compreendida entre 0,1pu e 0,9pu da tensão de referência (nominal), utilizando a tensão remanescente para caracterizar a magnitude do distúrbio.

## 2. Conexões dos transformadores

Os transformadores trifásicos podem ser classificados em três tipos quanto à propagação de afundamentos entre o primário e o secundário, ou seja: a) transformador YNyn quando solidamente aterrado em ambos os lados é o único que não modifica o tipo de afundamento; b) transformadores em que o tipo de afundamento sofre alteração entre o primário e secundário devido a remoção da tensão de sequência zero; c) transformadores cuja alteração provocada é devido ao defasamento angular entre o primário e secundário.

Neste sentido, a figura 1 ilustra os três tipos de transformadores e seus respectivos circuitos equivalentes de sequência zero.

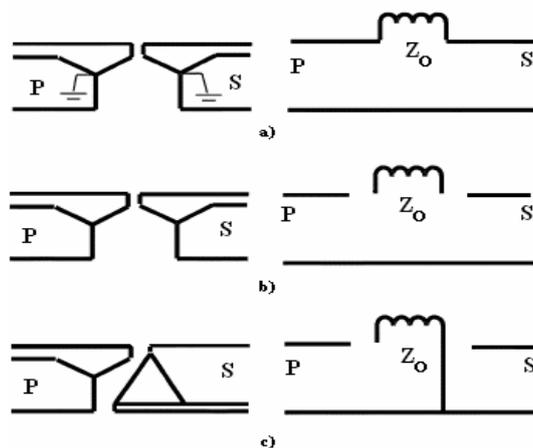


Fig. 1. Tipos básicos de transformadores quanto à propagação do afundamento; a) não modifica os afundamentos; b) remove a componente de sequência zero; c) provoca defasamento angular.

### *Efeito da propagação*

Nos transformadores que removem a tensão de sequência zero, a tensão no secundário é igual à tensão aplicada ao primário subtraída a tensão de sequência zero. Todos os transformadores que apresentam o circuito de sequência zero como um ramo aberto no primário e/ou no secundário remove a tensão de sequência zero (Yy, Dd, YNd, Dy e Yd).

Os afundamentos que possuem componentes de sequência zero são os de origem de curtos-circuitos fase-terra e fase-fase-terra, por exemplo, a figura 2, mostra um afundamento causado por um curto fase-terra, que ao fluir através de cada tipo de transformador sofre diferentes alterações, tanto em sua magnitude quanto em seu ângulo de fase.

E o que se percebe na figura 2 e na figura 3, é que os afundamentos ao passarem pelo transformador do tipo 1 – YNyn – resultam em afundamentos idênticos no secundário, pois esse tipo de transformador, como mostra a figura 1, permite a passagem de todas as componentes de sequência e não promove um defasamento angular.

A diferença é mais significativa quando o afundamento se propaga através dos transformadores do tipo 3, além de não permitir que as componentes de sequência se propaguem também acrescenta uma defasagem angular.

Uma característica importante, é no secundário dos transformadores do tipo 2, nunca se verá uma interrupção, advinda do primário. A figura 3 evidencia esta característica.

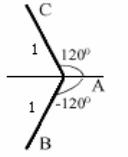
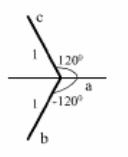
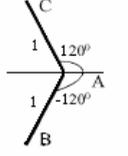
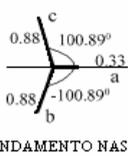
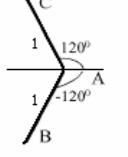
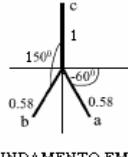
AFUNDAMENTO CAUSADO POR	TIPO DE CONEXÃO	PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO
 <p>CURTO FASE-TERRA</p>	<p>TIPO 1</p> <p><b>YNyn</b></p>	 <p>AFUNDAMENTO IDENTICO</p>
 <p>CURTO FASE-TERRA</p>	<p>TIPO 2</p> <p><b>Dd</b></p>	 <p>AFUNDAMENTO NAS TRÊS FASES</p>
 <p>CURTO FASE-TERRA</p>	<p>TIPO 3</p> <p><b>Dyn</b></p>	 <p>AFUNDAMENTO EM DUAS FASES</p>

Fig. 2. Propagação do afundamento de tensão através de cada tipo de transformador.

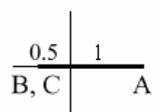
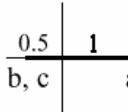
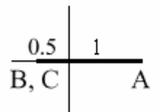
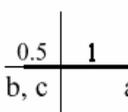
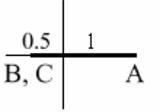
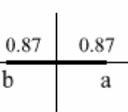
AFUNDAMENTO CAUSADO POR	TIPO DE CONEXÃO	PROPAGAÇÃO DO AFUNDAMENTO
 <p>CURTO FASE-FASE</p>	<p>TIPO 1</p> <p><b>YNyn</b></p>	 <p>AFUNDAMENTO IDENTICO</p>
 <p>CURTO FASE-FASE</p>	<p>TIPO 2</p> <p><b>Dd</b></p>	 <p>AFUNDAMENTO IDENTICO</p>
 <p>CURTO FASE-FASE</p>	<p>TIPO 3</p> <p><b>Dyn</b></p>	 <p>AFUNDAMENTO EM DUAS FASES E INTERRUPTÃO EM UMA FASE</p>

Fig. 3. Característica dos transformadores do tipo 2, de não propagação de interrupções.

### 3. Casos estudados

Para elevar a relevância deste trabalho sobre a influência das conexões dos transformadores nas propagações dos afundamentos, será apresentando alguns resultados dos estudos que foram realizados em um sistema padrão de 14 barras do IEEE.

#### Modelagem

Com o intuito de analisar o fenômeno acima citado foi modelado no ATP – Alternative

Transient Program – através das formulações matemáticas extraídas das teorias curto-circuitos trifásicos, um gerador de afundamentos de tensão. Capaz de reproduzir qualquer tipo de afundamento com qualquer magnitude e com qualquer salto do ângulo de fase – phase angle jump – e com o tempo de duração que se desejar.

O desenvolvimento desta fonte teve como base os sete tipos de afundamentos como mostra a tabela II. Um maior detalhamento deste desenvolvimento pode ser encontrado na referência [6].

TABELA II  
Representação matemática para cada tipo de afundamento de tensão

Tipo A	Tipo B
$V_a = hV$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo C	Tipo D
$V_a = V$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
$V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$
Tipo E	Tipo F
$V_a = V$	$V_a = hV$
$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_b = -\frac{1}{2}hV - j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)V$
$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	$V_c = -\frac{1}{2}hV + j\frac{1}{\sqrt{12}}(2+h)V$
Tipo G	
$V_a = \frac{1}{3}(2+h)V$	
$V_b = -\frac{1}{6}(2+h)V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	
$V_c = -\frac{1}{6}(2+h)V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV$	

O propósito dessa modelagem é de facilitar o entendimento sobre o distúrbio da propagação do afundamento, sem a preocupação dos cálculos com curto-circuito, nem quanto à localização do curto nem a análise das impedâncias do sistema. Tendo em vista a complexidade do sistema escolhido.

### Sistema Simulado

Para a realização do presente estudo dos fenômenos citados acima é tomado como base o sistema elétrico padrão de 14 barras, proposto pelo IEEE. Este sistema é alimentado por 2 geradores síncronos (barras 1 e 2) e possui 3 compensadores síncronos estáticos, usados exclusivamente para suprir reativos ao sistema (barras 3, 6 e 8). A este sistema estão ligadas



### Área de vulnerabilidade

A incompatibilidade da sensibilidade dos equipamentos frente ao distúrbio de afundamento pode resultar em perdas significativas para a indústria. Com o intuito de se minimizar tais custos, a concessionária pode utilizar do conceito de área de vulnerabilidade para identificar barramentos críticos ou barramentos suscetíveis a afundamentos severos, e com isso tomar medidas preventivas.

Para a identificação dessa área de vulnerabilidade no sistema da figura 4, adotou-se o afundamento mais crítico, ou seja, mais severo; para evidenciar ainda mais tal conceito.

Após simulação descobriu-se, como era de se esperar, que o barramento crítico nesse caso, é aquele que está mais próximo do consumidor. Como é observado na figura 5.

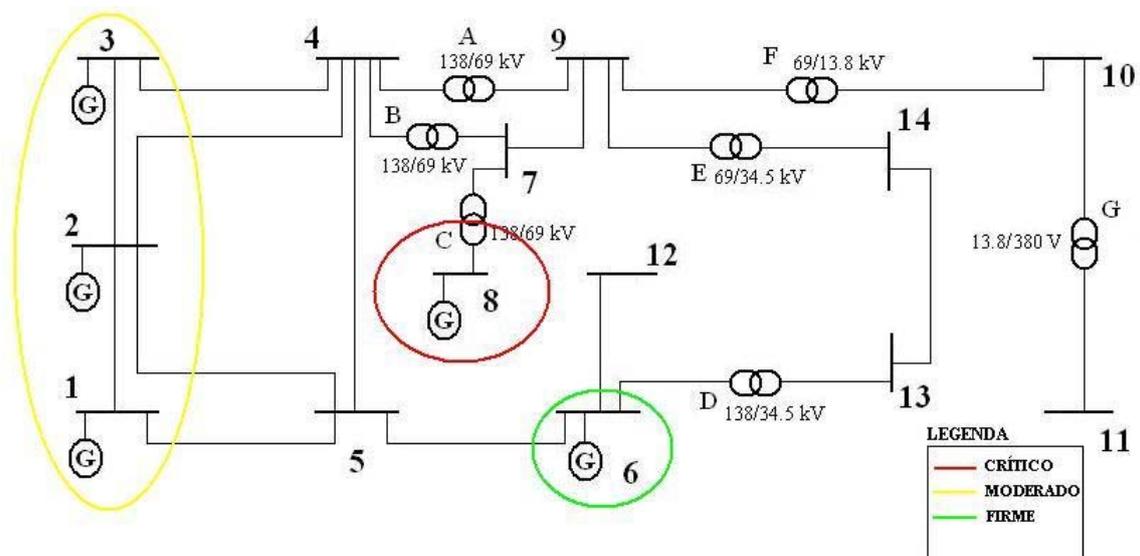


Fig. 5. Área de vulnerabilidade.

O conceito de área de vulnerabilidade indica a região do sistema, ou melhor, qual a localização mais provável que um curto-circuito poderá provocar um afundamento de tensão cuja severidade é suficiente para ultrapassar o limite de sensibilidade do equipamento. Não é possível dizer qual é o limite dos equipamentos desse sistema, mas com esta simulação é possível antecipar qual barramento, nesse caso a barra 8, que provocará no consumidor um afundamento mais severo que a dos outros barramentos.

Um afundamento de proporções severas, nesse caso o do tipo A com magnitude de 15% lembrando que significa tensão remanescente, aplicado na barra 8 irá provocar um afundamento na ordem de 66% no barramento de 380V, em quanto que o mesmo afundamento aplicado na barra 6 ocasionara um afundamento em torno de 87% na mesma barra de 380V.

### Influência da corrente de carga

Já se pode dizer que nenhuma, o conceito base para cálculos de curto-circuitos não leva em consideração as correntes que fluem pelo sistema. Veja os dados obtidos nas simulações, contidas na tabela IV e V.

TABELA IV  
Afundamento do tipo B aplicado na barra 8

TIPO B 15% 30 CICLOS		
COM CARGA		
BARRA 8	TENSÃO [pu]	ÂNGULO
A	0,15	0°
B	1	-120°
C	1	120°
BARRA 9		
A	0,77	0°
B	0,95	-115°
C	0,95	115°
BARRA 10		
A	0,84	-128°
B	0,84	128°
C	1	0°
BARRA 11		
A	0,95	115°
B	0,77	0°
C	0,95	-116°

TABELA V  
Afundamento do tipo B aplicado na barra 8

TIPO B 15% 30 CICLOS		
COM 10 % de CARGA		
BARRA 8	TENSÃO [pu]	ÂNGULO
A	0,15	0°
B	1	-120°
C	1	120°
BARRA 9		
A	0,77	0°
B	0,95	-115°
C	0,95	115°
BARRA 10		
A	0,84	-128°
B	0,84	126°
C	1	0°
BARRA 11		
A	0,95	117°
B	0,77	0°
C	0,95	-116°

É possível identificar nas tabelas acima, que o mesmo afundamento aplicado na barra 8 que é o barramento mais crítico, que a influência da corrente do sistema é insignificante. O mesmo afundamento levou até o consumidor um afundamento em torno de 77%.

#### **Influência das fontes de alimentação**

Este caso exemplifica bem o quanto é significativa a influência de um sistema interligado, com varias linhas de transmissão alimentando o sistema. No caso avaliado o sistema usado foi

modificado com o intuito de apresentar esta relevância que apresenta o sistema interligado a outras fontes de alimentação.

O que se tem então é uma comparação entre o comportamento desse sistema perante a um afundamento severo na barra 1 com todas as linhas de transmissão alimentadas em 138 KV e o mesmo afundamento, como citado na tabela III, sem a alimentação de 138 KV. Observe a tabela VI, podendo-se fazer a comparação juntamente com a tabela VII.

TABELA VI  
Afundamento do tipo A aplicado na barra 1 sem as linhas de transmissão

TIPO A 15% 30 CICLOS		
COM CARGA		
BARRA 1	TENSÃO [pu]	ÂNGULO
A	0,15	0°
B	0,15	-120°
C	0,15	120°
BARRA 9		
A	0,15	0°
B	0,15	-121°
C	0,15	121°
BARRA 10		
A	0,15	-120°
B	0,15	121°
C	0,15	0°
BARRA 11		
A	0,15	120°
B	0,15	0°
C	0,15	-121°

TABELA VII  
Afundamento do tipo A aplicado na barra 1

TIPO A 15% 30 CICLOS		
COM CARGA		
BARRA 1	TENSÃO [pu]	ÂNGULO
A	0,15	0°
B	0,15	-120°
C	0,15	120°
BARRA 9		
A	0,82	0°
B	0,82	-121°
C	0,82	120°
BARRA 10		
A	0,82	-121°
B	0,82	119°
C	0,82	0°
BARRA 11		
A	0,82	120°
B	0,82	0°
C	0,82	-119°

Um sistema interligado com seus inúmeros geradores, transformadores e impedâncias de linha contribuem para uma minimização da severidade do distúrbio, maior a impedância do sistema mais robusto frente aos afundamentos o sistema também será. Nesse método, considera-se um afundamento trifásico (por ser o mais crítico) e equilibrado (para simplificação dos cálculos). Para tanto, utiliza-se o circuito divisor de tensão. Que descrito com mais detalhes na referência [6].

### Influência dos transformadores

A tensão é uma quantidade complexa (um fasor) que tem o módulo e ângulo. Uma mudança no sistema, como um curto-circuito, causa uma mudança na tensão. Esta mudança não é limitada ao valor do fasor, mas inclui uma mudança na fase também.

A origem de saltos do ângulo de fase durante faltas são devido à diferença na relação de X/R entre a fonte e o sistema. Uma segunda causa do salto do ângulo de fase é a transformação dos afundamentos para níveis de baixa tensão.

O sistema foi propositalmente configurado para que o afundamento propagasse através de uma configuração de três transformadores, onde o transformador C tem a conexão Dd, o transformador F é um Dy assim como o G. Observe a tabela VIII.

Conforme dito, foi aplicado na barra 8, o mais crítico, um afundamento de 15% do tipo C; veja que ao aplicar esse nível de afundamento na equação matemática da tabela II as fases b e c sofrem uma queda de tensão para 51% e com um salto de ângulo de fase de 45°, como ilustrado na figura 3 tal afundamento por não possuir componentes de sequência zero assim sendo, não sofre influência do transformador C – Dd – que é do tipo 2, o afundamento fica submetido apenas a influência do sistema interligado, ou seja, passa de um afundamento de 15% para um afundamento em torno de 65%, mais uma vez pode se confirma tal magnitude aplicando-a nas equações matemáticas da tabela II.

TABELA VIII  
Afundamento do tipo C aplicado na barra 8

TIPO C 15% 30 CICLOS		
COM CARGA		
BARRA 8	TENSÃO [pu]	ÂNGULO
A	1	0°
B	0,51	-165°
C	0,51	165°
BARRA 9		
A	1	0°
B	0,76	-130°
C	0,76	132°
BARRA 10		
A	0,93	-112°
B	0,93	113°
C	0,66	0°
BARRA 11		
A	0,76	132°
B	1	0°
C	0,76	-133°

Esse é apenas o primeiro transformador, agora propagando através dos transformadores F e G ambos são Dy fica evidenciada a forte influência desse tipo de transformador. O afundamento que originalmente era tipo C com magnitude de 15% chega ao secundário do transformador F como um afundamento do tipo D com magnitude de 65%, tal regeneração devido ao sistema. E ao passar mais uma vez por um transformador do tipo 3 – Dy – este volta ao tipo C de magnitude de 65%.

Esta próxima análise servirá para comparação a tabela IX demonstrará a pouca influência dos transformadores exerce sobre os distúrbios quando estes são brandos. Tendo em vista que a maior parcela dos distúrbios, registrados, esta em torno dos 90% de magnitude.

**TABELA IX**  
Afundamento do tipo C aplicado na barra 8 com magnitude de 90%

TIPO C 90% 30 CICLOS		
COM CARGA		
BARRA 8	TENSÃO [pu]	ÂNGULO
A	1	0°
B	0,93	-123°
C	0,93	123°
BARRA 9		
A	1	0°
B	0,97	-122°
C	0,97	122°
BARRA 10		
A	0,99	-120°
B	0,99	120°
C	0,96	0°
BARRA 11		
A	0,97	122°
B	1	0°
C	0,97	-123°

Veja que a forte influência deste transformador se reduz drasticamente, frente ao que antes existia. Provando que o grau de influência dos transformadores esta ligada também à magnitude do evento.

### 3. Conclusões

Este trabalho apresentou resultados de análises sobre a influência das conexões dos transformadores na propagação dos afundamentos de tensão pela rede elétrica.

Com base nos resultados obtidos tanto da abordagem teórica como das simulações computacionais, fica evidente a forte influência dos tipos de conexões dos transformadores na propagação ao longo da rede.

Esta influência pode ser observada quando os afundamentos de tensão possuem componentes de sequência zero e os transformadores não permitem o fluxo dessas componentes. Todavia, em alguns afundamentos a componente de sequência zero não está

presente, originários de curtos-circuitos que não envolvem a terra, a influência neste caso é devido à defasagem imposta pelos transformadores de tipo 3.

A conexão tipo Dy do transformador tem uma forte influência se comparado a outros tipos de conexões, ou seja, o Dy – tipo 3 – é capaz de minimizar os afundamentos severos. As simulações mostram que a conexão Dd – tipo 2 – é capaz de minimizar o número de interrupções momentâneas.

A topologia do sistema também exerce uma grande influência sobre a propagação do afundamento, podendo-se notar que quanto mais forte for a conexão com outros sistemas, maior é a área afetada pelo distúrbio.

Nem sempre os transformadores interferem com a propagação do evento em si, casos mostrados aqui com a aplicação de distúrbios mais brandos com magnitudes por volta dos 90%, mostraram que o transformador não causa qualquer alteração significativa, quando se comparado com afundamentos com alto nível de severidade.

Estes resultados mostram a importância da avaliação das conexões dos transformadores utilizados entre a concessionária e o consumidor final e como o fenômeno se propaga pela rede. As características dos afundamentos de tensão nos terminais da carga variam de acordo com o tipo de conexão do transformador, tipo de conexão da própria carga e das impedâncias envolvidas no curto circuito desde o ponto de acoplamento comum até a carga sob avaliação.

#### **4. Referências bibliográficas e/ou bibliografia**

Periódicos:

- [1] J M. T. Aung, J. V. Milanovic, “The Influence of Transformer Winding Connections on the Propagation of Voltage Sags”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, no. 1, pp. 262-269, January 2006.
- [2] M. T. Aung, J. V. Milanovic, and C. P. Gupta, “Propagation of asymmetrical sags and the influence of boundary crossing lines on voltage sag prediction”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1819-1827, October 2004.
- [3] J. V. Milanovic, R. Gnativ, K. W. M. Chow, “The Influence of Loading Conditions and Network Topology on Voltage Sags”, Department of Electrical Engineering & Electronics, UMIST, Manchester, UK, 2000.
- [4] S. Z. Djokic, J. V. Milanovic, D. J. Chapman, M. F. McGranaghan, “Shortfalls of Existing Methods for Classification and Presentation of Voltage Reduction Events”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1640-1649, April 2005.
- [5] A. J. Conejo, F. D. Galiana, I. Kockar, “Z-Bus Loss Allocation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, no. 1, pp. 105-110, February 2001.

Livros:

- [6] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press Series on Power Engineering. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2000.  
R.C.Dugan, M.F. McGranaghan, S. Santoso, H.W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, second edition, McGraw-Hill, 2004, Chapter 3.