Apoio
CLAMPER
MEGABARRE BRASIL

Capítulo V

Variações de tensão de curta duração - Parte I

*Por Gilson Paulillo, Mateus Teixeira, Ivandro Bacca e José Maria de Carvalho Filho**

Entre os fenômenos que contribuem para a perda de qualidade de um determinado suprimento elétrico, aqueles associados às variações dos valores RMS das tensões ocupam posição de destaque. Neste sentido, as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) têm mobilizado esforços de pesquisadores de todo o mundo na busca de soluções tanto para suas causas quanto para os efeitos sobre o sistema.

Estas variações podem ser designadas como instantâneas (0,5 a 30 ciclos), momentâneas (30 ciclos a 3 s) ou temporárias (3 s a 1 min). Variações de tensão de curta duração são causadas por condições de faltas, energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou a perda intermitente de conexões nos cabos do sistema. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar um decréscimo da tensão (afundamento) ou um aumento da tensão (elevação), ou ainda, a completa perda da tensão (interrupção). A condição de falta pode estar próxima ou longe do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto da tensão, durante a condição de falta é uma variação de curta duração até que os dispositivos de proteção operem para limpar a falta.

No Brasil, nos Procedimentos de Rede, elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), item Padrões de Desempenho da Rede Básica (Prodist), Submódulo 2.2, dentre os indicadores de avaliação da qualidade de energia elétrica, definem-se as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD), englobando os fenômenos de elevação de tensão, afundamento e interrupção.

De acordo com esses procedimentos, entende-se por Variação de Tensão de Curta Duração: "um desvio significativo da amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo."

A amplitude dos VTCDs é definida pelo valor extremo do valor eficaz (média quadrática) da tensão em relação à tensão de referência do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento.

Por sua vez, a duração dos VTCDs é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão, em relação à tensão de referência do sistema no ponto considerado, ultrapassa determinado limite e o instante em que a mesma variável volta a cruzar esse limite.

As variações de curta duração são classificadas em elevação de tensão, afundamento de tensão, e interrupção de curta duração. A seguir será detalhado cada um destes eventos.

Elevação momentânea de tensão

Elevação momentânea de tensão, também conhecida como Voltage Swell, são distúrbios que podem ser caracterizados por um aumento da tensão eficaz do sistema (aumento este entre 10% e 80% da tensão, na frequência da rede, com duração de meio ciclo a 1 min), ocorrendo frequentemente nas diferentes fases de um circuito

trifásico, quando da ocorrência de um curto-circuito. O termo sobretensão momentânea é empregado por vários autores como sinônimo para o termo “elevação de tensão”.

Como para o item anterior, elevações são usualmente associadas às condições de faltas no sistema, mas não são tão comuns como afundamentos de tensão.

As elevações são caracterizadas pela sua magnitude (valor eficaz) e duração. A severidade deste distúrbio durante uma condição de falta é uma função da localização da falta, impedância do sistema e do aterramento. Em um sistema não aterrado com impedância de sequência zero infinita, as tensões fase-terra das fases não aterradas serão 1,73 por unidade durante uma condição de falta envolvendo uma fase com conexão a terra. Próxima à subestação em um sistema aterrado, haverá um pequeno ou nenhum aumento nas fases não faltosas porque o transformador da subestação é usualmente conectado em delta-estrela, provendo um baixo caminho de impedância de sequência zero para a corrente de falta. Na Figura 1, está ilustrada uma elevação de tensão proveniente de uma falta monofásica.

A duração da elevação também está intimamente ligada aos ajustes dos dispositivos de proteção, à natureza da falta (permanente ou temporária) e à sua localização na rede elétrica. Em situações de elevações oriundas de saídas de grandes cargas ou energização de grandes bancos de capacitores, o tempo de duração das elevações depende do tempo de resposta dos dispositivos reguladores de tensão das unidades geradoras. Tem-se ainda o tempo de resposta dos transformadores de tap variável e da atuação dos dispositivos compensadores de reativos e síncronos em sistemas de potência e compensadores síncronos que porventura existam.

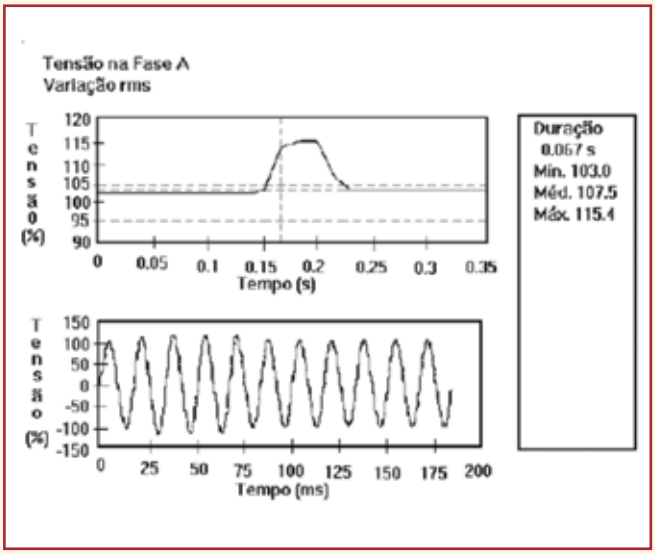


Figura 1 - Elevação de tensão devido a uma falta fase-terra.

Este fenômeno pode também estar associado à saída de grandes blocos de cargas ou à energização de grandes bancos de capacitores, porém, com uma incidência pequena se comparada com as sobretensões provenientes de faltas monofásicas nas redes de transmissão e distribuição.

A Figura 2 apresenta um sistema elétrico composto por uma concessionária, uma carga equivalente e um banco de capacitores. Neste sistema, o banco de capacitores é energizado 200 ms antes da conexão da carga ao barramento.

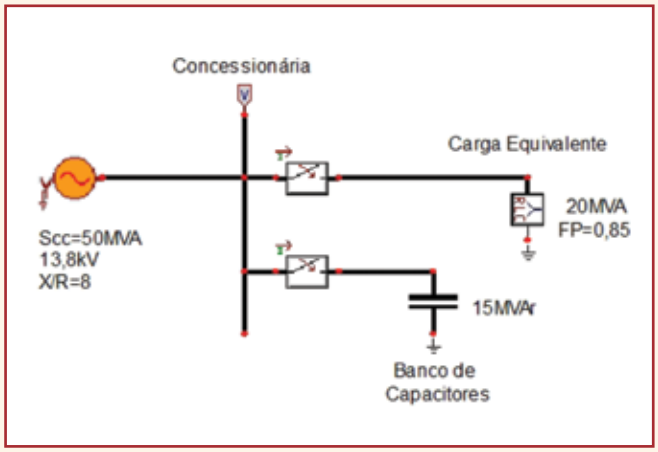


Figura 2 – Elevação de tensão devido à energização de um banco de capacitores.

Nas Figuras 3 e 4, estão mostradas, respectivamente, as formas de onda das tensões fase-fase medidas no barramento da concessionária e os valores eficazes dessas tensões.

Como consequência das elevações de curta duração em equipamentos, podem-se citar falhas dos componentes, dependendo da frequência de ocorrência do distúrbio. Dispositivos eletrônicos, incluindo ASDs (Adjustable Speed Drivers), computadores e controladores eletrônicos, podem apresentar falhas imediatas durante estas condições. Contudo, transformadores, cabos, barramentos, dispositivos de chaveamento, TPs, TCs e máquinas rotativas podem ter a vida útil reduzida. Um aumento de curta duração na tensão em alguns relés pode resultar em má operação enquanto outros podem não ser afetados. Uma elevação de tensão em um banco de capacitores pode, frequentemente, causar danos no equipamento. Aparelhos de iluminação podem ter um aumento da luminosidade durante uma elevação. Dispositivos de proteção contra surto como um circuito de fixação da amplitude (clamping circuit) podem ser destruídos quando submetidos a elevações que excedam suas taxas de MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage).

Dentro do exposto, a preocupação principal recai sobre os equipamentos eletrônicos, uma vez que estas elevações podem vir a danificar os componentes internos destes equipamentos, conduzindo-os à má operação ou, em casos extremos, à completa inutilização. Vale ressaltar mais uma vez que, a suportabilidade de um equipamento não depende apenas da magnitude da elevação, mas também do seu período de duração.

Afundamento momentâneo de tensão

Os afundamentos momentâneos de tensão, também conhecidos como Voltage Sag ou Voltage Dip, destacam-se como os mais significantes distúrbios da qualidade da energia que se manifestam nas redes elétricas. Tal destaque se justifica pelo fato de que os afundamentos de tensão, quer sejam de curta ou de longa duração, são os que mais notadamente se fazem presentes na operação dos complexos elétricos.

Um afundamento de tensão consiste numa redução no valor eficaz da tensão por um curto período de tempo, causada por curtos-circuitos, sobrecargas, energização de transformadores de grande porte ou partidas de grandes motores.

O interesse no estudo deste fenômeno reside principalmente nos problemas que podem causar em vários tipos de equipamentos, tais como: ASDs, CLPs, computadores, etc., cargas estas bastante sensíveis a estas variações de tensão. Alguns componentes falham quando a tensão decresce para um valor abaixo de 85% por um ou dois ciclos, com eventual

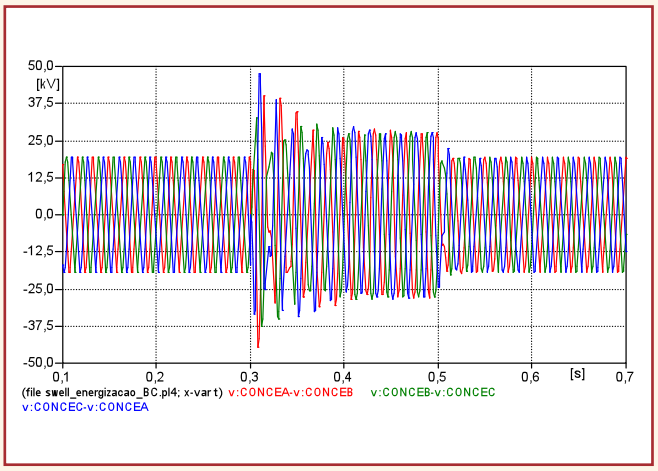


Figura 3 – Oscilogramas das tensões fase-fase no barramento da concessionária.

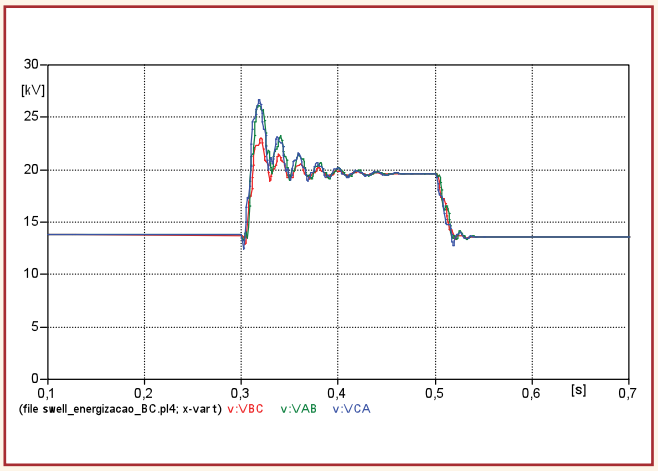


Figura 4 – Tensões fase-fase eficazes no barramento da concessionária.

comprometimento do processo produtivo.

Um parâmetro relevante para determinar os impactos dos afundamentos em um subsistema é a frequência de ocorrência, que corresponde à quantidade de vezes que cada combinação dos parâmetros de duração e amplitude ocorrem em determinado período de tempo ao longo do qual um barramento tenha sido monitorado (três meses, um ano, etc.).

A Figura 5 registra a alteração da forma de onda de tensão na ocorrência de um afundamento de tensão.

A magnitude pode ser definida como o menor valor da tensão RMS e a duração reflete o tempo em que a magnitude da tensão está abaixo de 90% da tensão eficaz nominal.

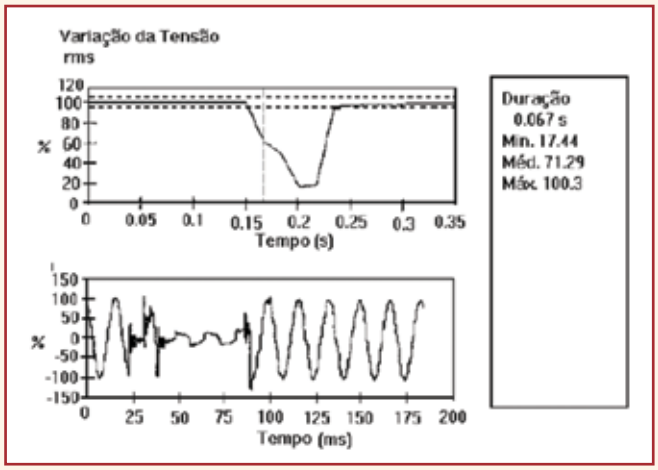


Figura 5 – Afundamento de tensão ocorrido num sistema elétrico.

A ocorrência de eventos sequenciais, denominados multiestágios, é bastante comum devido à atuação dos religadores do sistema elétrico e, neste caso, um exemplo da forma de onda correspondente é mostrado na Figura 6.

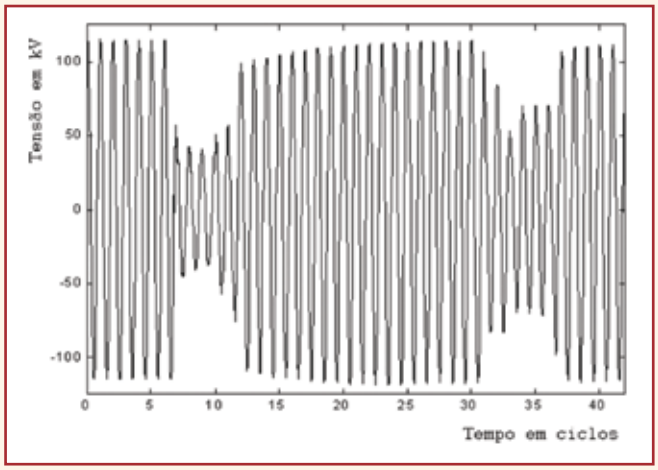


Figura 6 – Forma de onda da tensão em afundamentos sequenciais.

Como já mencionado, os principais parâmetros que caracterizam um afundamento de tensão são a amplitude e a duração. No entanto, outros parâmetros também estão sendo propostos para melhor caracterizar os fenômenos aqui enfocados. Dentre eles, destacam-se a evolução da forma de onda, o ponto de início e término do afundamento na onda e a variação súbita do defasamento angular (phase angle jumps).

Em afundamentos trifásicos, as três tensões de fase poderão ter e, na maioria dos casos, têm magnitude e duração diferentes para cada uma das fases. Algumas propostas têm sido formuladas para caracterizar esses parâmetros nesses afundamentos. A mais comumente aceita considera a magnitude e a duração da fase mais afetada como referência para caracterizar o fenômeno trifásico.

Conhecendo-se a magnitude e a duração de um voltage sag, este pode ser apresentado em um ponto no plano: magnitude versus duração. Um exemplo dessa plotagem é mostrado na Figura 7, onde os números referem-se a voltage sags provenientes de:

1. Faltas em sistema de transmissão;
2. Faltas em sistemas de distribuição remotos;
3. Faltas em sistemas de distribuição local;
4. Partida de grandes motores;
5. Interrupções curtas;
6. Fusíveis.

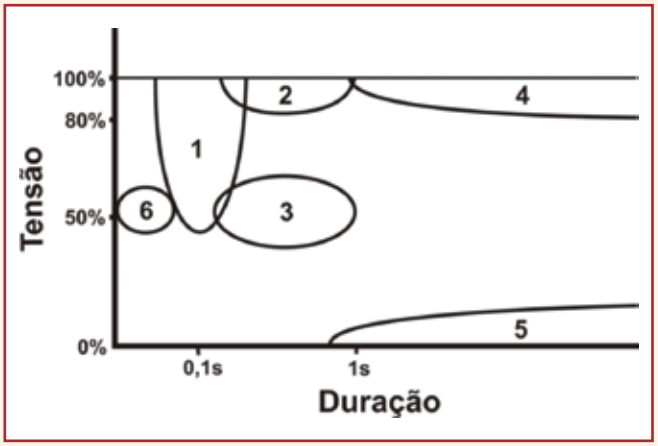


Figura 7 – Sags de diferentes origens nas plotagens de magnitude versus duração

Os afundamentos de tensão nos sistemas elétricos, de um modo geral, podem ser oriundos de várias causas, entre elas pode-se destacar: partidas de grandes motores e ocorrência de curtos-circuitos.

Partida de grandes motores

Durante a partida, os motores absorvem do sistema elétrico correntes da ordem de cinco a oito vezes a corrente nominal. A circulação dessa alta corrente de partida pela impedância do sistema, sobretudo em redes de baixo nível de curto-circuito, poderá resultar em afundamentos de tensão bastante severos.

A Figura 8 ilustra um sistema elétrico para análise da partida de um grande motor.

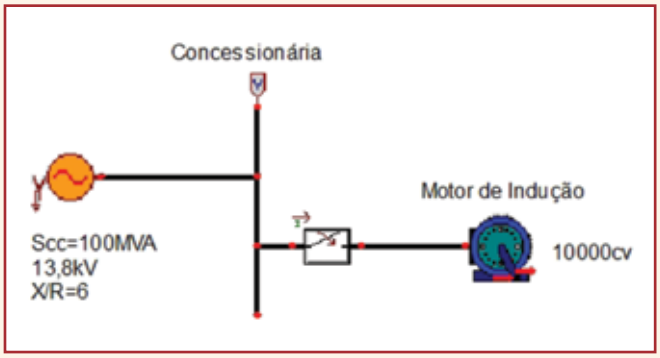


Figura 8 – Partida de um grande motor.

Nas Figuras 9 e 10, estão ilustradas, respectivamente, as formas de onda da tensão fase-fase e os seus valores eficazes o afundamento de tensão no barramento da concessionária. Como pode ser verificado, houve um afundamento para aproximadamente 65% da tensão nominal do barramento.

Deve-se ressaltar, no entanto, que, em geral, os consumidores industriais adotam medidas para reduzir a tensão na partida dos motores, de forma a minimizar os impactos das altas correntes. Isso torna os efeitos das partidas de motores menos relevantes quando comparada com a ocorrência de curtos-circuitos no sistema. Verifica-se ainda, na figura mostrada, que os afundamentos causados por partidas de motores têm restauração gradual.

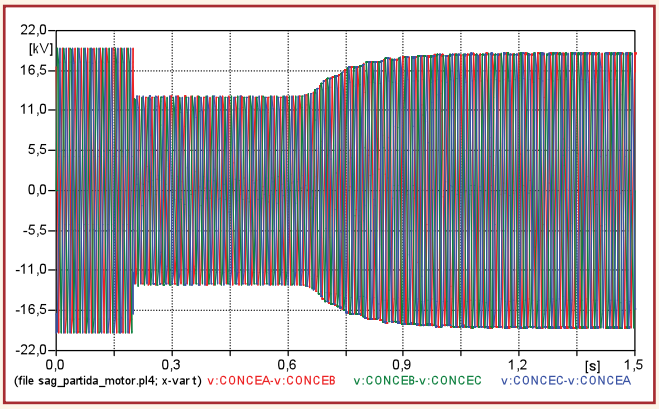


Figura 9 – Oscilogramas das tensões fase-fase no barramento da concessionária.

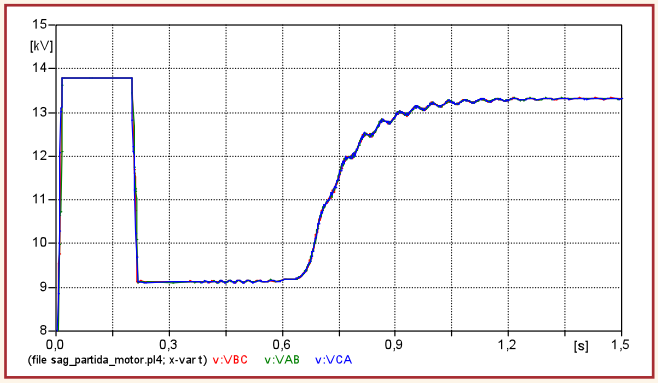


Figura 10 – Tensões fase-fase eficazes no barramento da concessionária.

Faltas elétricas

As faltas no sistema elétrico consistem, normalmente, nas principais causas dos afundamentos temporários de tensão, sobretudo as originadas no sistema da concessionária, devido à existência de milhares de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e distribuição, sujeitas a vários tipos de fenômenos naturais.

Curtos-circuitos também ocorrem em subestações terminais de linha e nos sistemas industriais, porém, com menor taxa de ocorrência. Geralmente, nos sistemas industriais, a distribuição primária e secundária é feita por cabos isolados, que possuem uma menor taxa de falta quando comparados às linhas aéreas.

As faltas nas linhas aéreas são quase que exclusivamente devido a descargas atmosféricas, porém, queimadas, vendavais, contatos acidentais, falhas nos isoladores, acidentes, também são causadores de curtos-circuitos.

As faltas podem ser de natureza temporária ou permanente. As temporárias são, em sua grande maioria, devido à ocorrência de descargas atmosféricas, temporais e ventanias, que, em geral, não provocam danos permanentes ao sistema de isolação. O sistema pode ser prontamente restabelecido pelos religamentos automáticos. As faltas permanentes são causadas por danos físicos em algum elemento de isolação do sistema, sendo necessária a intervenção da equipe de manutenção.

Na ocorrência de um curto circuito, o afundamento de tensão tem a duração do tempo de permanência da falta, ou seja, desde o instante inicial do defeito, até a completa eliminação do mesmo.

As faltas no sistema elétrico podem ser: trifásicas, bifásicas, bifásicas à terra e monofásicas. As faltas trifásicas são simétricas e geram, portanto, afundamentos de tensão também simétricos. Embora produzam afundamentos mais severos, ocorrem com menor frequência.

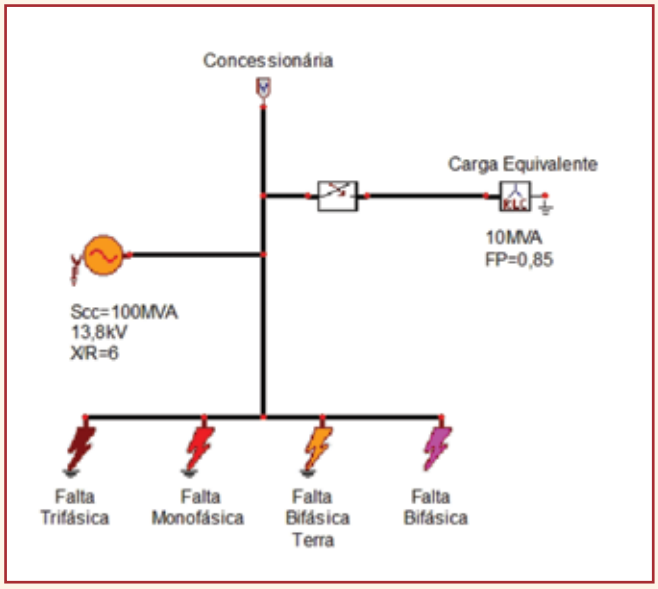


Figura 11 – Afundamentos de tensão devido a faltas elétricas.

As faltas bifásicas, bifásicas à terra e, particularmente as fase-terra, apresentam maiores taxas de ocorrência e geram afundamentos de tensão menos severos, porém desequilibrados e assimétricos.

Na Figura 1.11, está representado um sistema composto por uma concessionária e por uma carga equivalente. Neste sistema serão aplicados os quatro tipos de faltas, descritos anteriormente.

Nas Figuras 12 a 15, estão representadas, respectivamente, as formas de onda das tensões fase-fase no barramento da concessionária devido a uma falta trifásica, monofásica, bifásica a terra e bifásica.

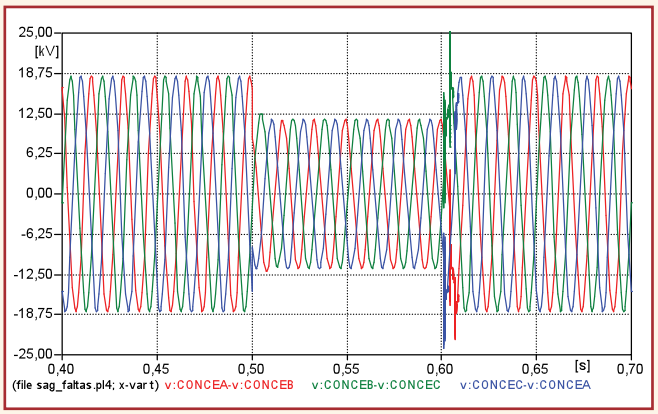


Figura 12 – Tensões fase-fase no barramento da concessionária para uma falta trifásica.

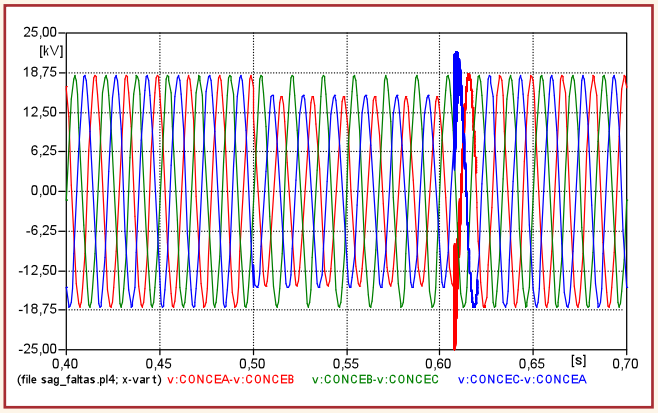


Figura 13 – Tensões fase-fase no barramento da concessionária para uma falta monofásica.

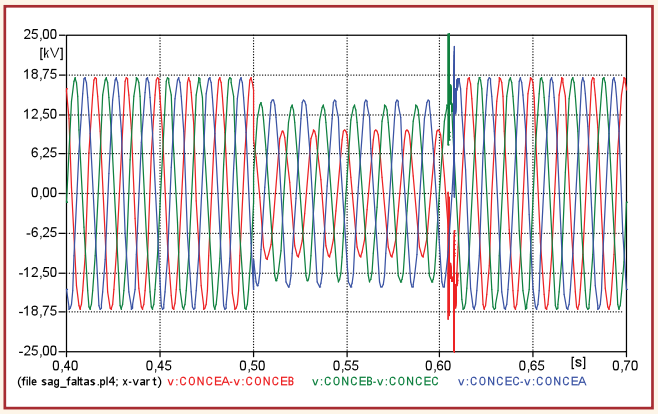


Figura 14 – Tensões fase-fase no barramento da concessionária para uma falta bifásica a terra.

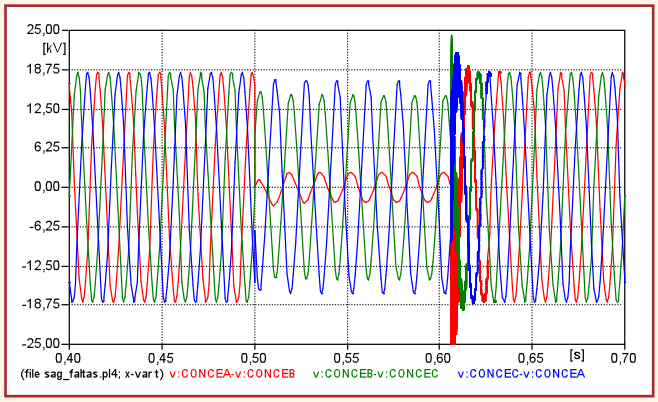


Figura 15 – Tensões fase-fase no barramento da concessionária para uma falta bifásica.

Classificação dos afundamentos de tensão

Neste item, será analisada a influência das formas de conexão das cargas trifásicas (estrela ou triângulo), bem como dos diversos tipos de ligação dos transformadores, normalmente presentes entre o ponto onde ocorre a falta e os terminais dos equipamentos, na ocorrência de faltas equilibradas e desequilibradas.

Para tanto, será apresentada, na Tabela 1, uma classificação dos afundamentos de tensão de acordo com o tipo de falta e conexão da carga. Essa classificação é baseada nas proposições estabelecidas por Math H. J. Bollen.

Tabela 1 – Classificação dos afundamentos de tensão

Tipo de falta	conexão de carga	Tipo de afundamento
Equilibrada trifásica	Estrela	Estrela
	Triângulo	Triângulo
Monofásica	Estrela	Estrela
	Triângulo	Triângulo
Bifásicas	Estrela	Estrela
	Triângulo	Triângulo
Bifásicas à terra	Estrela	Estrela
	Triângulo	Triângulo

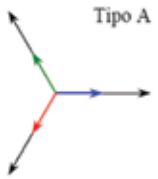
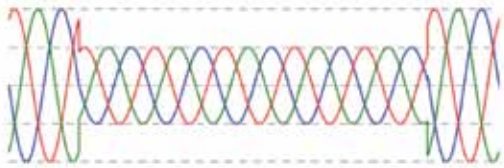
Após tais observações, pode-se concluir que seis tipos de afundamentos de tensão, classificados como tipos A, B, C, D, E e F, resultam da associação entre os diferentes tipos de faltas (trifásica, bifásica, bifásica à terra e monofásica) e as duas formas tradicionais de se conectar uma carga trifásica, bem como, conforme se verá adiante, do tipo de conexão dos transformadores. Além dos seis tipos de afundamentos, descritos acima, existe mais um, denominado de tipo G, como será visto a seguir.

Para uma melhor compreensão dos tipos de afundamentos descritos, a seguir serão abordadas de forma resumida as principais características desses afundamentos.

- ***Voltage Sag Tipo A***

Na Tabela 2, são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para este tipo de afundamento.

Tabela 2 – Principais características do Voltage Sag do tipo A

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = h \times V$ $V_b = -\frac{1}{2} \times h \times V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$ $V_c = -\frac{1}{2} \times h \times V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos\left(\omega \times t - \frac{2\pi}{3}\right)$ $V_c = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos\left(\omega \times t + \frac{2\pi}{3}\right)$

Em que:

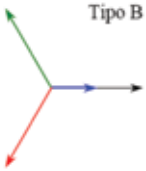
h - Magnitude do afundamento de tensão;

V - Magnitude da tensão nominal do sistema;

• ***Voltage Sag Tipo B***

Na Tabela 3 são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para o afundamento do tipo B.

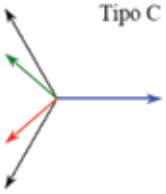
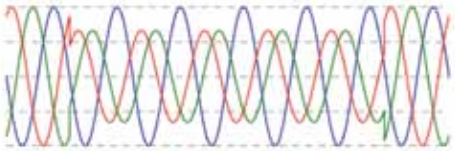
Tabela 3 - Principais características do Voltage Sag do tipo B

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = h \times V$ $V_b = -\frac{1}{2} \times V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \times V$ $V_c = -\frac{1}{2} \times V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times V \times \cos\left(\omega \times t - \frac{2\pi}{3}\right)$ $V_c = \sqrt{2} \times V \times \cos\left(\omega \times t + \frac{2\pi}{3}\right)$

• ***Voltage Sag Tipo C***

Na Tabela 4 são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para o afundamento do tipo C.

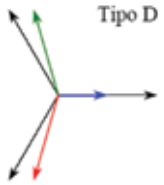
Tabela 4 - Principais características do Voltage Sag do tipo C

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2} \times V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$ $V_c = -\frac{1}{2} \times V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{1+3 \times h^2}}{2} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi + \beta)$ $V_c = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{1+3 \times h^2}}{2} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}\left(\sqrt{3} \times h\right)$

• ***Voltage Sag Tipo D***

Na Tabela 5 são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para o afundamento do tipo D.

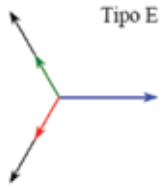
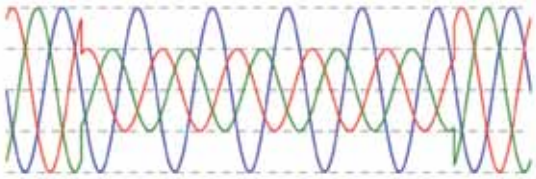
Tabela 5 - Principais características do Voltage Sag do tipo D

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = h \times V$ $V_b = -\frac{1}{2} \times h \times V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \times V$ $V_c = -\frac{1}{2} \times h \times V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{3+h^2}}{2} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi + \beta)$ $V_c = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{3+h^2}}{2} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}(\sqrt{3}/h)$

- ***Voltage Sag Tipo E***

Na Tabela 6 são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para o afundamento do tipo E.

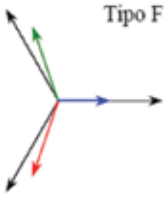
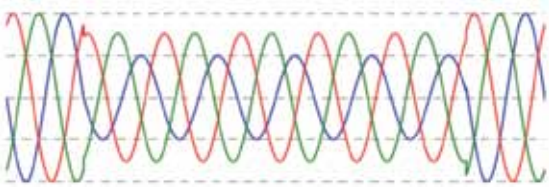
Tabela 6 - Principais características do Voltage Sag do tipo E

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = V$ $V_b = -\frac{1}{2} \times h \times V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$ $V_c = -\frac{1}{2} \times h \times V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos\left(\omega \times t - \frac{2\pi}{3}\right)$ $V_c = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos\left(\omega \times t + \frac{2\pi}{3}\right)$

- ***Voltage Sag Tipo F***

Na Tabela 7 são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para o afundamento do tipo F.

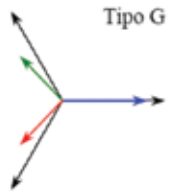
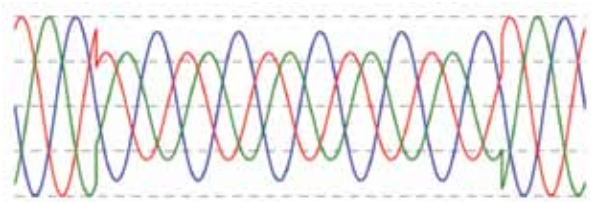
Tabela 7 - Principais características do Voltage Sag do tipo F

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = h \times V$ $V_b = -\frac{1}{2} \times h \times V - j\frac{2+h}{\sqrt{12}} \times V$ $V_c = -\frac{1}{2} \times h \times V + j\frac{2+h}{\sqrt{12}} \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times h \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{h^2+h+1}{3}} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi + \beta)$ $V_c = \sqrt{2} \times \sqrt{\frac{h^2+h+1}{3}} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}\left((2+h)/\left(\sqrt{3} \times h\right)\right)$

- ***Voltage Sag Tipo G***

Na Tabela 8 são apresentados os diagramas e as equações no domínio da fase e do tempo para o afundamento do tipo G.

Tabela 8 - Principais características do Voltage Sag do tipo G

REPRESENTAÇÃO FASORIAL	REPRESENTAÇÃO TEMPORAL
	
$V_a = \frac{2+h}{3} \times V$ $V_b = -\frac{2+h}{6} \times V - j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$ $V_c = -\frac{2+h}{6} \times V + j\frac{\sqrt{3}}{2} \times h \times V$	$V_a = \sqrt{2} \times \frac{2+h}{3} \times V \times \cos(\omega \times t)$ $V_b = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{7 \times h^2 + h + 1}}{3} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi + \beta)$ $V_c = \sqrt{2} \times \frac{\sqrt{7 \times h^2 + h + 1}}{3} \times V \times \cos(\omega \times t + \pi - \beta)$ $\beta = \tan^{-1}\left(\left(3 \times \sqrt{3} \times h\right) / (2+h)\right)$

*GILSON PAULILO é engenheiro eletricista, com mestrado e doutorado em qualidade de energia elétrica pela universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Sua atuação é voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.

MATEUS DUARTE TEIXEIRA é engenheiro eletricista e mestre em sistemas de potência - qualidade de energia elétrica. Atua há mais de dez anos em projetos de tecnologia aplicada ao setor elétrico nas áreas de qualidade da energia, geração distribuída, eficiência energética e proteção de sistemas elétricos para empresas do setor.

IVANDRO BACCA é engenheiro eletricista e mestre pela Universidade Fé engenheiro eletricista e mestre pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) em Qualidade da Energia. É engenheiro da Copel Distribuição com atuação na área de manutenção de equipamentos eletromecânicos.

JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO é engenheiro eletricista pela UFMG, com mestrado e doutorado pela Unifei. Atualmente, é professor da Unifei e membro do Grupo de Estudos em Qualidade da Energia (GQEE), com atuação em Qualidade e Proteção de Sistemas Elétricos.

Continua na próxima edição
Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br