Por Cláudio S. Mardegan e Giuseppe Parise*

Capítulo II

O arco elétrico

Generalidades

Antes de falar sobre arco elétrico, é de vital importância entender que as correntes de falta por arco podem ser:

- Monofásicas (fase-terra)
- Bifásicas (fase-fase)
- Trifásicas (fase-fase-fase)

Tendo em vista que as estatísticas de faltas nos apontam que as faltas mais comuns no sistema elétrico de potência se iniciam a partir de contatos à terra, vamos abordar também este tipo de falta.

Dessa forma, somente ter-se-á um entendimento "lato" do arco após o estudo das faltas à terra.

É importante frisar que o IEEE Std 1584 trata apenas do arco trifásico.

Origem das faltas à terra

As faltas à terra são originadas por:

(a) Redução da isolação devido a:

- ▸ Temperatura (mau contato, sobrecarga)
- ▸ Umidade
- ▸ Contaminação (Pó, sal, etc.)
- ▸ Animais
- ▸ Objetos estranhos
- ▸ Deterioração da isolação por idade ou ataque químico

(b) Danos físicos à isolação (devido a esforços/falhas mecânicas, perfurações da isolação)

- ▸ Esforços decorrentes a sobretensões de regime ou transitórias sobre a isolação
- ▸ Erros humanos (durante manutenções, comissionamentos ou instalações)

Características das faltas à terra

- ▸ A maior parte das faltas envolve a terra.
- ▸ A corrente de ajuste da proteção de terra é relativamente independente da corrente normal de carga e os valores dos ajustes da proteção de terra podem ser menores que os de fase.
- ▸ Devido ao fato de que as correntes de falta à terra não podem ser transferidas por transformadores delta-estrela ou delta-delta, a proteção de terra para cada nível de tensão é independente da proteção em outros níveis. Isto permite uma atuação mais rápida da proteção de terra.
- ▸ Faltas por arco à terra que não são prontamente detectadas e eliminadas podem ser extremamente destrutivas.

Valor das correntes de falta à terra

O valor da corrente de falta à terra franca é calculado pela equação:

$$Icc_{1\phi} = \frac{3.E}{Z_1 + Z_2 + Z_o + 3Z_G}$$

Em que:

$I_{CC1\phi}$ = Corrente de curto-circuito fase-terra franco

Z_1 = Impedância de sequência positiva

Z_2 = Impedância de sequência negativa

Z_1 = Impedância de sequência zero

Z_G = Impedância de aterramento do neutro das fontes (geradores e transformadores)

Lembramos que as faltas por arco podem chegar a 20% do valor da falta franca.

Pode-se demonstrar que, em sistemas solidamente aterrados, as correntes de curto-circuito fase-terra são da mesma ordem de grandeza das correntes de curto-circuito trifásico.

Constitui-se um erro gravíssimo deixar a proteção de terra por conta da proteção

de fase tomando-se como base esta consideração, visto que, na prática, a maior parte das faltas ocorre por arco (e o valor da corrente de falta irá variar de 20% a 100% da falta franca).

Comparação da energia (I2t) incidente para uma falta à terra franca e para uma falta através de arco

De acordo com Dunki-Jacobs, a energia no ponto de falta depende da impedância de falta, do quadrado da corrente de falta e do tempo de eliminação da falta (Z.I2.t). A figura seguinte mostra uma falta franca e uma falta por arco.

O entendimento da Figura 1 seguinte é fundamental para a compreensão da corrente de falta por arco.

Observando a Figura1 pode-se tirar as seguintes conclusões:

✓ A corrente de curto-circuito fase-terra franca (Figura 1(a)) é maior que a corrente de curto-circuito fase-terra por arco (Figura 1 (b)), pois não possui a resistência do arco.
✓ A impedância de falta à terra na falta franca é zero (Figura 1(a)).
✓ A impedância de falta à terra por arco é maior que zero (Figura 1(b)).

A pergunta que fica é: em qual situação a energia incidente é maior, onde a corrente de falta é maior ou onde a corrente de falta é menor?

A resposta é que, no caso da Figura 1 (a), embora a corrente de falta seja maior, a energia incidente é menor, pois Z.i2.t fica nula. No caso da Figura 1 (b), embora a corrente de falta à terra por arco seja menor, a energia incidente no ponto de falta é maior, pois o produto Z.i2.t fica maior.

Este é o principal motivo de se fazer o aterramento de serviço, pois estamos "jumpeando" a resistência de arco.

Comparação da energia (I^2T) dissipada durante uma falta à terra para vários tipos de aterramento

É importante tentar limitar o tamanho dos transformadores de distribuição, pois, de outra maneira, a energia incidente nos pontos de falta será gigantesca e, consequentemente, os estragos e os tempos de reparo e a recolocação do sistema em marcha novamente serão extremamente elevados.

O exemplo seguinte mostra o montante de energia (I2.t) para um transformador de 2000 kVA, com o neutro da estrela secundária (a), solidamente aterrado (b), aterrado por resistência de baixo (RBA) e (c) aterrado por resistência de alto valor (RAV).

Sendo um sistema de 480 V alimentado por um transformador de 2000 kVA e Z%=6.

(a) Sistema solidamente aterrado (SSA)

Como já demonstrado anteriormente, a ordem de grandeza da corrente de curto-circuito fase-terra é da mesma ordem da trifásica.

$I_{CC1\phi MÁX} = 1/0.06 \times I_{ns} = 16.67 \times 2405.6$

$I_{CC1\phi MÁX} = 40093\ A \sim 40000\ A$

Para t = 1 s, o valor do I^2t será:

$I^2t = (40000)^2 . 1 = 1\ 600\ 000\ 000\ A^2.s.$

(b) Sistema aterrado por resistor de 400 A (RBV)

(Aterramento por resistência de baixo valor)

$I_{CC1\phi MÁX} = 400\ A$

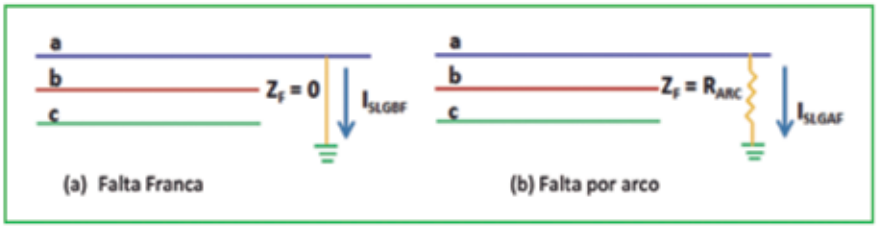

Figura 1 – Diferença de energia incidente em uma falta fase-terra franca e por arco.

Para t = 1 s, o valor do I2t será:
$I^2t = (400)^2 . 1 = 160\ 000\ A^2.s$.

(c) Sistema aterrado por resistor de 5 A (RAV)
(Aterramento por resistência de alto valor)

$I_{CC1ØMÁX} = 5A$

Para t = 1 s, o valor do I^2t será:
$I^2t = (5)^2 . 1 = 25\ A^2.s$.

(d) Comparação entre os três sistemas
SSA x RBV ➔ SSA 10 000 vezes mais energia
SSA x RAV ➔ SSA 64 000 000 vezes mais energia

NEC - Seção 230-95

O NEC, em sua seção 230-95, prescreve que todo sistema elétrico com mais de 150 V fase-terra e com correntes maiores que 1000 A devem possuir proteção específica de terra.

Esta proteção deve ser ajustada de forma que o pick up não seja superior a 1200 A e a temporização deve proteger o ponto 3000 A - 1 segundo. A Figura 2 ilustra o exposto.

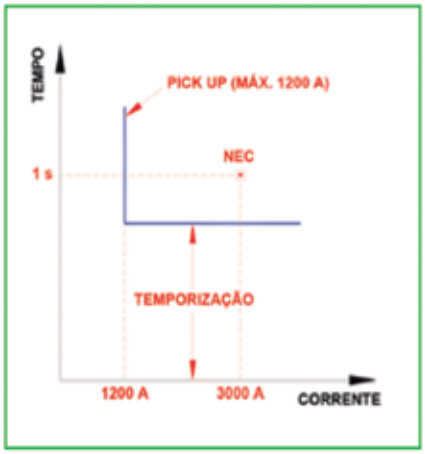

Figura 2 – O ponto NEC.

Definição do arco elétrico

O arco elétrico é uma descarga que pode surgir sempre que houver o rompimento (falha) do dielétrico (isolação) de um ponto energizado em relação à um terra (ou massa) ou entre dois pontos de potenciais diferentes. A interrupção de correntes também provoca arcos.

Gammon e Matthews [13] definem o arco como sendo uma descarga fluindo entre dois eletrodos através de um meio a gás ou vapor.

A referência [10] define o arco elétrico como sendo um fenômeno que ocorre quando se separam dois terminais de um circuito que conduz determinada corrente de carga, sobrecarga ou defeito. Pode ser definido também como um canal condutor, formado num meio fortemente ionizado, provocando um intenso brilho e elevando consideravelmente, a temperatura do meio em que se desenvolve.

Como pode ser observado, o arco elétrico está associado à transferência de calor oriunda de um curto-circuito através de arco. Cabe aqui lembrar que, durante o arco, pode ocorrer o quarto estado da matéria – o plasma – e também que mais de 80% dos acidentes elétricos resultam de arco elétrico e combustão de roupas inflamáveis.

A energia liberada durante um arco é extremamente elevada e a sua determinação é função da tensão nominal, da magnitude da corrente de falta e do tempo de eliminação da falta.

Para entender o arco, considere a Figura 4, em que os terminais do gap representam os condutores e o ar é o dielétrico.

Como pode ser observado na Figura 4, o arco, a cada semiciclo, tem uma ignição e um apagamento, e sua forma de onda não é mais senoidal, pulsa junto com a corrente (tem característica resistiva) e, consequentemente, a teoria fasorial não é aplicável, há grande dificuldade de se obter o valor das correntes de arco.

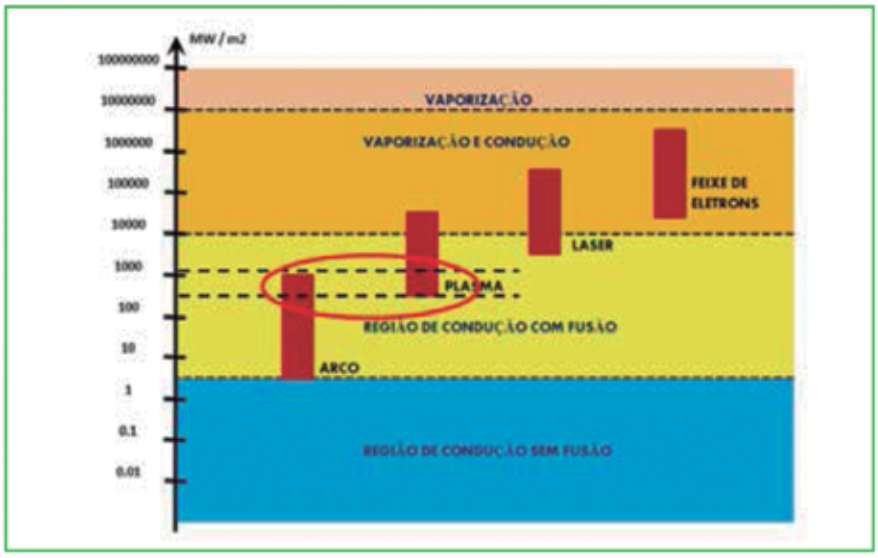

Figura 3 – O arco pode atingir o quarto estágio da matéria: o plasma.

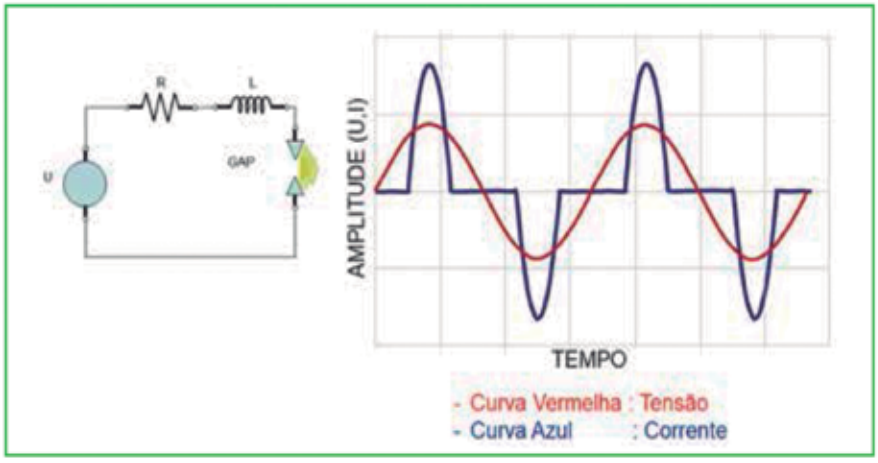

Figura 4 – Corrente de arco.

Principais características do arco elétrico

• Intermitentes / descontínuas ➔ Não senoidais;
• A teoria fasorial não é aplicável;
• No início e no fim do arco a temperatura chega a 4500 °C;
• Atinge elevadas temperaturas (10.000 °C a 20.000 °C– quatro vezes a temperatura superficial do Sol);
• Atinge o estado de plasma (4° estágio da matéria);
• Abaixo de 150V praticamente se auto extingue;
• Em média tensão a tensão de arco atinge de 500 V a 1000 V;
• Potência máxima instantânea pode chegar a 40 MW;
• Tem características resistivas;
• Caminham para a fonte;
• Procuram as pontas;
• Costumam danificar as gavetas superiores à gaveta em falta e toda coluna onde ocorreu a falta, principalmente a gaveta mais alta;
• A luminosidade do arco pode chegar a 2.000 vezes a luminosidade de um escritório;
• Arcos em uma mesma fase (terminais mal encaixados de disjuntores e gavetas extraíveis) não são identificados como falta para os relés de sobrecorrente. Para a proteção é necessário utilizar relé foto sensível;
• A energia do arco se propaga no meio de maneira tridimensional.

Principais efeitos do arco elétrico

Temperatura – Como mencionado, as temperaturas são elevadíssimas durante o arco e este efeito térmico provoca o derretimento e queima todos componentes próximos, pois nada na natureza fica no estado sólido nestas temperaturas.

Pressão – A rápida elevação da temperatura promove a expansão instantânea do ar e, consequentemente, um deslocamento de ar que atua como um impacto explosivo.

Vapores e gases contaminantes – Com o aquecimento da isolação e dos materiais instalados no local do ar, ocorre o desprendimento de vapores e gases prejudiciais à saúde que podem causar o envenenamento e levar inclusive à morte.

Projeção de resíduos – Durante os arcos devidos às elevadas temperaturas e à grande quantidade de ignições e apagamentos do arco, ocorrem a emissões de partículas sólidas, líquidas e gasosas, de forma irradiada como uma (bomba que explode), saindo radialmente.

Luminosidade – O efeito da luminosidade do arco pode causar a cegueira e, associada às elevadas temperaturas, causa o secamento do globo ocular.

Estampido – No momento em que a descarga parcial disrompe o dielétrico para consumar o arco, ocorre um estampido, que pode prejudicar temporariamente a audição.

Principais riscos do arco elétrico

► ***Queimadura*** – Queimaduras fatais podem ocorrer até mesmo quando a pessoa estiver a vários metros do arco (mesmo a 3 metros de distância uma pessoa pode morrer queimada);
► ***Projeção de objetos*** – Pedaços derretidos de metal arremessados em alta velocidade;
► ***Deslocamento de ar*** – Ondas de pressão podem arremessar pessoas a distâncias consideráveis;
► ***Queima de roupa*** – Roupas podem pegar fogo mesmo se a pessoa estiver a vários metros de distância;
► ***Perda de audição*** – Pode ocorrer devido à explosão sonora: a onda de som pode ter uma magnitude de até 140 dB em uma distância de 60 cm do arco;
► ***Perda de visão*** – Devido às elevadas temperaturas atingidas durante o arco, pode haver o secamento da retina;
► ***Intoxicação*** – Com a elevada temperatura atingida, gases tóxicos são expelidos durante o arco e podem levar as pessoas nas circunvizinhanças à morte.

Principais causas do arco elétrico

Entre as principais causas das faltas por arco podem ser citadas:

► Mau contato;
► Sobrecarga;
► Umidade;
► Contaminação (pó, sal, impurezas, etc.);
► Animais;
► Deterioração da isolação por idade;
► Deterioração da isolação por ataque químico;
► Objetos estranhos;
► Aproximação /queda de objetos;
► Mal encaixe de gavetas / disjuntores;
► Sobretensões de regime ou transitórias;
► Erros humanos (contatos acidentais);
► Perfuração da isolação;
► Abertura de disjuntores sem o meio de extinção (Vácuo / Gás SF6 / Óleo);
► Utilização inadequada de equipamentos (tais como multímetros);
► Procedimentos inadequados;
► Defeitos de fabricação;
► Problemas ocorridos no transporte do equipamento antes da montagem;
► Problemas ocorridos durante as montagens.

Estatísticas de acidentes por arco

Distribuição das lesões por queimaduras provocadas por arco no corpo

O paper da referência [05] cita um relatório de pesquisa sobre investigação de acidentes elétricos realizado na Alemanha em 1998 pela ISSA (International Social Security Association), em 61 casos, apresentou uma estatística conforme indicado na Figura 5.

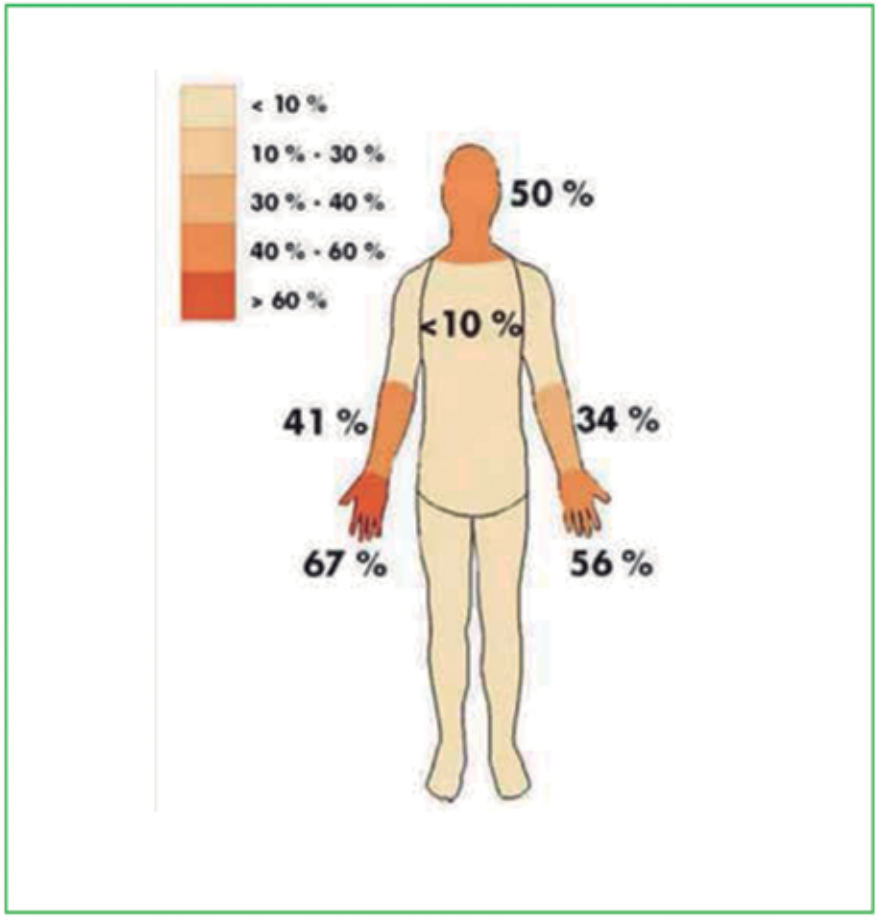

Figura 5 – Distribuição das queimaduras no corpo.

O motivo de se colocar a Figura 5 é alertar os profissionais de eletricidade e segurança, pois, a maior parte das pessoas pensa que apenas a calça e a camisa específica para resistir ao arco são suficientes. Observando a Figura 5 fica claro que outras partes do corpo também devem ser protegidas.

Estatísticas de acidentes por arco

As estatísticas de acidentes por arco apontam que:

- 25% dos acidentes ocorrem sem a presença do operador;
- 10% dos acidentes ocorrem com a presença do operador e a porta do painel fechada;
- 65% dos acidentes ocorrem em manutenções.

Importância do tempo na eliminação do arco

As estatísticas de acidentes por arco apontam que quando o arco é eliminado em:

- Até 35 ms ➔ Danos às pessoas / equipamentos irrelevantes;
- Até 100 ms ➔ Sem danos sérios / pequenos reparos;
- Até 500 ms ➔ Ferimentos sérios às pessoas e danos aos equipamentos.

Cálculo do valor da corrente de arco

Como a teoria fasorial não é aplicável no cálculo do arco, o valor da corrente de arco não pode ser calculada com precisão.

O IEEE realizou pesquisas e, na década de 1970, publicou os seguintes fatores a serem aplicados aos valores das faltas francas em sistema de BT, para o cálculo da corrente de arco, Tabela 1.

Com a publicação do IEEE Std 1584 [01], as correntes de falta por arco trifásico deixaram de ser calculadas aplicando-se fatores, utiliza-se a equação desta referida norma. Na do arco bifásico pode ser utilizada a relação entre a trifásica e bifásica da tabela aplicada sobre o valor da corrente do arco trifásico do IEEE Std 1584. Em baixa tensão, o valor da corrente de falta por arco trifásico é da ordem de 50% do valor da falta franca.

Existem literaturas que indicam valores de falta por arco tão baixos quanto 20% do valor da falta franca. Os valores das correntes de arco variam com a metodologia adotada.

Arco elétrico e as perdas

O arco elétrico está sempre associado a perdas:

1 - Danos pessoais
- Vidas humanas
- Queimaduras
- Perda de membros

2 - Danos materiais
- Equipamentos
- Estruturas e salas

3 - Perdas
- Mão de obra para manutenção
- Perda de produção
- Aumento de seguro patrimonial

"Prevenir é muito mais barato que corrigir!"

Escalamento (evolução) das faltas por arco monofásicas

Não é incomum a evolução das faltas por arcos monofásicos para arcos bifásicos e trifásicos. Quando isto ocorre a destruição é mais severa.

Sistemas de baixa tensão

Uma vez que os barramentos de baixa são, normalmente, nus (não isolados), a possibilidade de haver o escalamento/evolução para um arco bifásico ou trifásico é potencial.

Sistemas de média tensão de 2.4 kV a 7.2 kV

Quando os barramentos nestas tensões são isolados, a possibilidade de haver o escalamento/evolução para um arco bi ou trifásico é remota. Nos incidentes registrados, normalmente, os barramentos são nus.

Sistemas de 13.8 kV até 34.5 kV

Os barramentos nestas tensões são, normalmente, isolados e, assim, a possibilidade de haver o escalamento/evolução para um arco bi ou trifásico é remota.

Definições e terminologia

a) Hazard – O perigo de ser ferido ou molestado.

b) Hazard Risk – Risco de ser ferido ou molestado.

Diferença entre Hazard e Risk

O Hazard refere-se ao potencial de ser ferido a partir de um condutor energizado (onde a energia liberada pelo sistema é o pior caso). Risco é a combinação da probabilidade de ocorrência de um ferimento e a severidade desse ferimento resultante de um Hazard.

a) Arc Flash Hazard (Def NFPA) – Condição de perigo associada com a possível liberação de energia causada por um arco elétrico;

b) EPI – Equipamento de Proteção Individual;

c) EPC – Equipamento de Proteção Coletiva;

Tabela 1 – Fatores para determinação da corrente por arco IEEE Std 141 (Rede Book)

Arco	V [V]	Tensão	Fator
Monofásico	277	Fase-Neutro	0.38
Bifásico	480	Fase-Fase	0.74
Trifásico	480	Fase-Fase	0.89

d) FR – Flame Retardant – Retardante a Chama;

e) ATPV – Arc Thermal Performance Value – Valor de Peformance Térmica ao Arco;

f) EBT – Breakopen Probability;

g) Ei – Energia Incidente;

h) Suit hood – Balaclava;

i) Hard hat – Capacete;

j) Face shield – Protetor facial;

k) Safety glasses – Óculos de segurança;

l) Safety goggles – Óculos de segurança;

m) Leather gloves – Luvas de couro;

n) Leather footwear – Bota de couro;

o) Hearing protection – Protetor auricular;

p) Jacket – Jaqueta;

q) Parka – Casaco com capuz largo e impermeável;

r) Rainwear – Capa de chuva;

s) AR – As required;

t) AN – As needed;

u) SR – Necessária a escolha;

v) FR – Flame retardante (retardante à chama);

w) HOA – Horizontally in Open Air. Terminologia a ser utilizada na nova IEEE 1584 para designar barramentos horizontais fora de invólucros (painéis);

x) VOA – Vertically in Open Air. Terminologia a ser utilizada na nova IEEE 1584 para designar barramentos verticais fora de invólucros (painéis);

y) HCB – Horizontally in Closed Box. Terminologia a ser utilizada na nova IEEE 1584 para designar barramentos horizontais dentro de invólucros (painéis);

z) VCBB – Vertically in Closed Box at the Bottom. Terminologia a ser utilizada na nova IEEE 1584 para designar barramentos verticais dentro de invólucros (painéis) terminando na parte inferior;

aa) VCB – Vertically in Closed Box. Terminologia a ser utilizada na nova IEEE 1584 para designar barramentos verticais dentro de invólucros (painéis) terminando no meio do painel.

CLÁUDIO S. MARDEGAN é engenheiro especialista formado pela Unifei, especialista em proteção de sistemas elétricos industriais e qualidade de energia. É membro sênior do IEEE e chairman do Capítulo 6 do Buff Book, atual 3004 series (3004.6) sobre Ground Falut Protection. É chair ainda do Capítulo 13 – Protection Coordination e vice-chair de Surge Protection do IEEE. É diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda.

GIUSEPPE PARISE é engenheiro eletricista e, desde 1973, trabalha no Departamento de Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Sapienza em Roma, onde é Professor Pleno de Sistemas Elétricos de Potência. Tem mais de 320 artigos publicados e é autor de duas patentes e três prêmios de artigos do IEEE/IAS PSD. É membro ativo do IEEE Industry Applications Society (past Member at Large of Executive Board).

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br