



Capítulo I

Estudos de arco elétrico – Cálculo de energia incidente

INTRODUÇÃO

Até 1950 todos os dispositivos de proteção de sobrecorrente eram do tipo disparador magnético, eliminando a falta instantaneamente (sem retardamento intencional). Quando o relé eletromecânico de disco de indução surgiu em meados dos anos de 1950, a eliminação da falta passou a ser temporizada (retardada). A seletividade passou a fazer parte do contexto dos engenheiros de proteção. Com o retardamento do tempo de eliminação de falta, as faltas começaram a aparecer como um grande problema, causando a destruição de muitos equipamentos tais como conjuntos de manobra, CCMs, quadros, painéis, etc. No final da década de 1980, Ralph Lee, o pai da energia incidente, publica um artigo mostrando que o risco de choque elétrico não é o único problema relacionado à proteção pessoal do profissional que lida com eletricidade e que as queimaduras por arco elétrico poderiam causar ferimentos ou mesmo a morte do profissional. Ralph Lee demonstrou que se uma pessoa fica sujeita a uma queimadura menor ou igual à de segundo grau, ele não morreria, e que, para nunca exceder a queimadura de segundo grau, a energia incidente no local onde o profissional atua

não deve exceder a 1.2 cal/cm². Atualmente, 1.2 cal/cm² é considerado o nível básico de exposição tolerável sem a utilização de vestimentas com categorias específicas para resistir à energia resultante de um arco elétrico.

Para calcular os níveis de exposição, equações que serão descritas neste artigo são suportadas por modelos matemáticos que são baseados em modelos estatísticos derivados de exaustivos testes realizados usando várias amostras a partir dos quais se chega ao equacionamento destas equações obtidas através de ajuste de curvas (curve fit).

A análise contida neste material utiliza tais modelos para determinar a distância limítrofe do arco, na qual uma queimadura de segundo grau não é atingida, ou seja, quando se utiliza uma vestimenta sem categoria (apenas uniforme de algodão) ou

quando um EPI limita a energia incidente adequadamente.

Utilizando-se a metodologia aqui explanada e aplicando-se a sistemas elétricos, placas (ou etiquetas) de advertência podem ser determinadas de modo a especificar a categoria da vestimenta, diminuir os danos aos equipamentos e ferimentos aos trabalhadores.

BREVE HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DOS ARCOS

Para um melhor entendimento do surgimento das faltas por arco, foram selecionados alguns marcos importantes para o conhecimento evolução das faltas por arco. Apresenta-se a linha do tempo (Figura 1), indicando estas datas que irão auxiliar a compreensão do fenômeno.

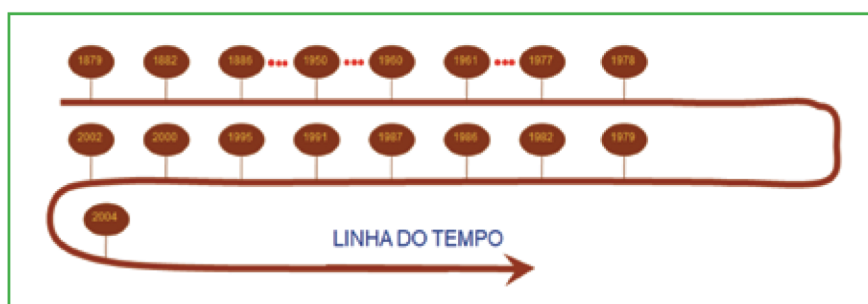


Figura 1 – Linha do tempo até chegar à publicação do IEEE Std 1584.

1879

Thomas Alva Edson aperfeiçoou a lâmpada e inventou geradores, comutadores, soquetes e fusíveis, tudo em corrente contínua (CC).

Thomas Alva Edson energizou a 1ª usina geradora em CC em Nova York, abastecendo 59 consumidores.

1882

George Westinghouse e Nicolau Tesla impulsionam a corrente alternada. São os primórdios dos sistemas em corrente alternado que ainda são monofásicos. Também, igualmente ao sistema em corrente contínua, são não aterrados.

Com o aumento do interesse em se ter energia elétrica, o consumo de potência cresce e os sistemas passam a ser trifásicos por questões econômicas, visto que se consegue transportar mais corrente gastando-se menos cobre.

Como os sistemas eram não aterrados, começaram a surgir as sobretensões

transitórias, as quais podem chegar de 5 a 8 x V_n , queimando equipamentos. Surgiu, então, uma nova corrente que defendeu a bandeira de que os sistemas solidamente aterrados eram melhores.

O aterramento dos sistemas evoluiu para sistemas aterrados.

1950

Antes de 1950, o foco era apenas na proteção, até mesmo porque não haviam relés temporizados. Os primeiros sistemas não eram aterrados e as cargas eram de baixa potência e, assim, as tensões de transmissão e distribuição não eram elevadas.

Com o aumento da potência das cargas, foi necessário elevar a tensão para transmitir a energia elétrica (cada vez para lugares mais distantes) e rebaixar nos pontos de consumo. Os transformadores de distribuição foram aumentando de tamanho.

Somente nos meados da década de 1950 é que se começou a pensar e executar a seletividade, ou seja, na ocorrência de um

curto-circuito, procurar desligar apenas o dispositivo de proteção imediatamente à montante da falta.

Com o aumento contínuo da potência dos transformadores e da tensão secundária dos transformadores, começaram a surgir as faltas por arco em baixa tensão, as quais mostraram-se altamente destrutivas.

1960

As faltas por arco começam a incomodar. Kaufmann, R. H. and Page, J. C. escrevem o artigo "Arcing fault protection for low-voltage power distribution systems—nature of the problem," AIEE Transactions Power Apparatus Systems, vol. 79, pp. 169–167, June 1960.

1961

1ª Edição da norma IEEE Std 80 "IEEE Guide for Safety in AC Substations Grounding". Este Guia possui contribuições valiosas de Dalziel (corrente de choque) e Sverack (Tensões de passo e toque). Os danos

devidos às faltas por arco vão se tornando mais frequentes.

O IEEE Std 141 (RED BOOK) publica fatores de multiplicação para cálculo do valor mínimo provável da falta por arco.

1977

Stanback, H. I. publica artigo “Predicting damage from 277-V single phase to ground arcing faults,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-13, no. 4, July/Aug. 1977.

As companhias de seguro americanas estavam pagando elevados valores para repor os painéis de baixa tensão.

1978

Assim, em 1978, o NEC incluiu a seção o 230-95, que falava de faltas através de arco em baixa tensão, inserindo a necessidade de proteções específicas de terra em todos os sistemas com mais de 1000 A e com tensão fase-terra acima de 150 V. Adicionalmente, prescreveu o ajuste máximo a ser implementado nesta proteção. Veja Figura 2.

1979

Primeira edição da norma NFPA-70E (National Fire Protection Association) - “Standard for Electrical Safety Requirements for Employee Workplaces” - Normas e requisitos de segurança elétrica para os locais

de trabalho.

1982

Ralph Lee publica o artigo “The other electrical hazard: electrical arc blast burns”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 1A-18. no. 3, p. 246, May/June 1982, chamando a atenção da comunidade de eletricidade para outro risco de ferimento em eletricidade, o arco elétrico.

1986

Dunki-Jacobs, J. R. apresenta o artigo “The escalating arcing ground-fault phenomenon”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, no. 6, Nov./Dec. 1986. Este paper mostra que uma falta monofásica pode evoluir para trifásica em poucos ciclos (2 a 3 ciclos) devido à ionização promovida pelo arco no ponto em que o mesmo ocorre.

1987

Ralph Lee and Dunki-Jacobs, J. R. apresentam o artigo “Pressures developed by arcs,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol 1A-23, pp. 760-764, 1987. Neste artigo, Ralph Lee junto com Dunki-Jacobs, um dos maiores estudiosos de arco, mostram que a pressão sobe muito rapidamente dentro de invólucros fechados, ficando difícil de conter o arco.

1991

OSHA (Occupational Safety and Health Administration) inclui práticas seguras em eletricidade e, além do choque elétrico, adiciona o risco do arco elétrico.

1995

Na quinta edição da norma NFPA-70E é incluído, pela primeira vez, o conceito de limites de aproximação e arco.

2000

Na sexta edição da norma NFPA-70E inclui-se o conceito de zona limite para proteção de arco e os EPs (roupas e luvas).

2002

Publicação da norma IEEE Std 1584 - IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations. Este foi o grande marco. Esta norma foi de grande valor, pois os métodos de cálculo de energia incidente propostos por Ralph Lee conduziam em valores de energia incidente muito alta e, conseqüentemente, vestimentas de proteção extremamente desconfortáveis que impõem grande limitação ao trabalhador. Utilizando-se de métodos estatísticos devido à característica instável do arco, e após a definição das principais grandezas de influência na corrente de arco e na energia do arco, as equações para a determinação destas grandezas foram obtidas a partir dessas amostras através de ajuste de curva (curve fit).

2004

Na sétima edição da norma NFPA-70E, o método de cálculo do IEEE Std 1584 é aceito e incluso.

Atualmente, a norma IEEE Std 1584 encontra-se em revisão pelos working groups e a mesma irá para votação (balloting) dentro do IEEE.

RALPH LEE - O PAI

Embora tenham existido muitos pesquisadores que empreenderam horas de estudo e pesquisa em faltas à terra, por arco,

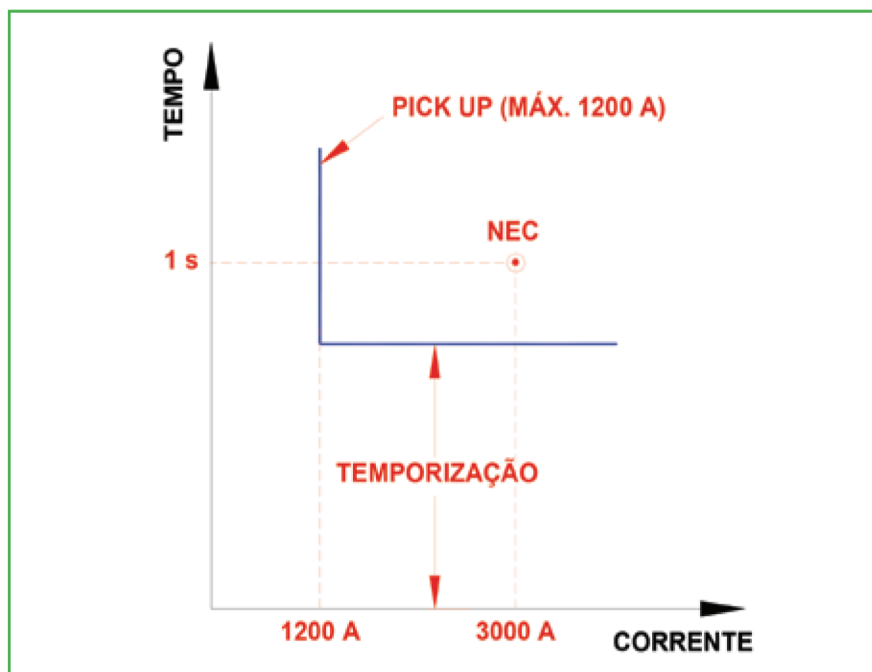


Figura 2 – Ponto NEC.

influência da corrente elétrica no corpo humano, Dunki-Jacobs, figura ímpar, não poderia ser esquecida neste hall da fama. Até porque, em 1987, ele publicou o artigo (relacionado abaixo) no IEEE Transactions on Industry Applications em parceria com Ralph Lee. No entanto, Ralph Lee é considerado o pai dos estudos de arc flash no sentido de proteger o ser humano de queimaduras e direcionou seu estudo nesse sentido.

Nos primórdios da proteção, o foco era sempre voltado para o sistema elétrico, mas com o passar do tempo, o foco passou também para o ser humano.

Entre outros artigos, ele publicou:

- Ralph Lee, "The other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-18, No. 3, May/June 1982

- Lee, R. and Dunki-Jacobs, J. R., "Pressures developed by arcs," IEEE Transactions on Industry Applications, vol 1A-23, pp. 760-764, 1987

NFPA-70E

A norma NFPA-70E é a norma americana que trata da segurança dos trabalhadores, intitulada "Standard for Electrical Safety in Workplaces". A estrutura desta é mostrada na

Figura 3.

Capítulo 1 – Segurança relativa aos locais de trabalho

Artigo 90 – Introdução;

Artigo 100 – Definições;

Artigo 105 – Aplicações de segurança relativas às práticas de serviço;

Artigo 110 – Requisitos gerais para segurança relativos às práticas de serviço;

Artigo 120 – Estabelecimento das condições de trabalho eletricamente seguras;

Artigo 130 – Riscos elétricos envolvendo o trabalho.

Capítulo 2 – Segurança relativa aos requisitos de manutenção

Artigo 200 – Introdução;

Artigo 205 – Requisitos gerais de manutenção;

Artigo 210 – Subestações, centros de distribuição de carga, quadros, painéis, CCMs e seccionadoras;

Artigo 215 – Premissas de fiação;

Artigo 220 – Equipamentos de controle;

Artigo 225 – Fusíveis e disjuntores;

Artigo 230 – Equipamentos rotativos;

Artigo 235 – Áreas classificadas;

Artigo 240 – Baterias de salas de baterias;

Artigo 245 – Equipamentos e ferramentas elétricas portáteis;

Artigo 250 – Segurança pessoal e equipamentos

de proteção.

Capítulo 3 – Requisitos de segurança para equipamentos especiais

Artigo 300 – Introdução;

Artigo 310 – Segurança relativa a práticas de serviço em células eletrolíticas;

Artigo 320 – Requisitos de segurança relativos a baterias e salas de bateria;

Artigo 330 – Segurança relativa a práticas de serviço para uso de lasers;

Artigo 340 – Segurança relativa a práticas de serviço para equipamentos eletrônicos e potência;

Artigo 350 – Segurança relativa a requisitos para laboratórios de pesquisa e desenvolvimento.

Anexos

Anexo A – Publicações referenciadas;

Anexo B – Informações de referência;

Anexo C – Limites de aproximação;

Anexo D – Métodos de cálculo da fronteira de arc flash e da energia incidente;

Anexo E – Programa de segurança elétrica;

Anexo F – Análise de risco, estimativa do risco e procedimentos de avaliação de risco;

Anexo G – Procedimentos de Lockout / Tagout – Exemplo;

Anexo H – Guia para escolha da roupa de proteção e outros EPIs;

Anexo I – Etapas resumidas do trabalho e checklist do planejamento;

Anexo J – Permissão de trabalho a quente;

Anexo K – Categorias gerais de riscos elétricos;

Anexo L – Aplicações típicas de segurança nas zonas de trabalho em linhas de células;

Anexo M – Camadas de proteção das roupas e especificação total do sistema de arco;

Anexo N – Exemplo de procedimentos e políticas industriais para serviços nas proximidades de linhas aéreas e equipamentos;

Anexo O – Requisitos de projeto relativos à segurança;

Anexo P – Alinhamento da implementação desta norma com as normas de gerenciamento, segurança e saúde ocupacional;

Anexo Q – Performance humana e segurança elétrica nos locais de trabalho.

Além da determinação das classes de vestimentas e distâncias com risco de arco,

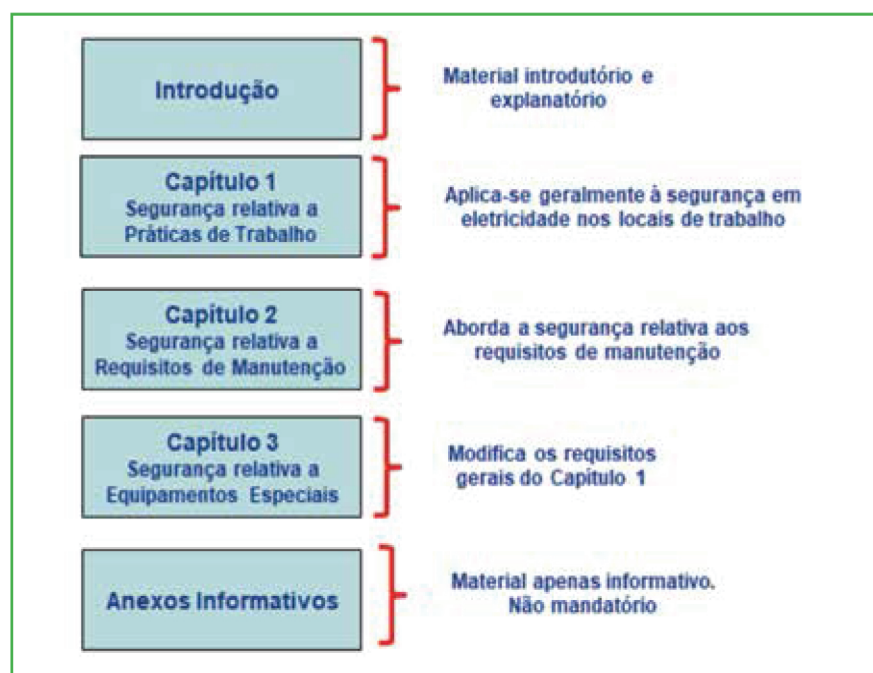


Figura 3 – Estrutura da norma NFPA-70E.

a NFPA 70E também define distâncias mínimas a serem respeitadas, levando-se em consideração a tensão nominal do equipamento analisado, ou seja, o risco de choque elétrico. A Figura 4 mostra a alteração que houve de 2012 para 2018 na questão de choque elétrico. Foi eliminada a zona de aproximação proibida, ou seja, a partir de 2012, esta norma também possui duas zonas como na norma regulamentadora NR 10.

Outra abordagem interessante neste quesito é ela possuir distâncias de segurança, tanto para corrente alternada (tabela 130.4(D) (a)), como para corrente contínua (tabela 130.4(D)(b)). Além disso, também as distâncias variam se os condutores são móveis ou fixos. E não temos isso na NR 10.

ESTRUTURA DA NR 10

- 10.1 - Objetivo e campo de aplicação;
- 10.2 - Medidas de controle;
- 10.3 - Segurança em projetos;
- 10.4 - Segurança em montagem, operação e manutenção;
- 10.5 - Segurança em instalações elétricas desenergizadas;
- 10.6 - Segurança em instalações elétricas energizadas;
- 10.7 - Trabalhos envolvendo alta tensão;
- 10.8 - Habilitação, qualificação, capacitação e autorização dos trabalhadores;
- 10.9 - Proteção contra incêndio e explosão;
- 10.10 - Sinalização de segurança;
- 10.11 - Procedimentos de trabalho;

- 10.12 - Situação de emergência;
- 10.13 - Responsabilidades;
- 10.14 - Disposições finais.

Anexo - Distanciamentos de Segurança

Nota: NR 10 trata apenas de distância de choque e não de arco.

A única coisa que a NR 10 nos fala em termos de arco é que devem ser providas vestimentas adequadas para a proteção de trabalhadores.

Esta afirmação, em termos de arco, é, no mínimo, inconsequente, pois, pode-se facilmente verificar que acima de 40 cal/cm² não existe vestimenta adequada.

Outra grande diferença entre a NFPA-70E e a NR 10 é que na NFPA-70E existe a possibilidade de se ter uma fatalidade, pois se todos cumpriram os requisitos descritos e exigidos e, mesmo assim, ocorre um acidente, diz-se que houve uma fatalidade. Na NR 10, se ocorre um acidente, tem que chegar a um culpado. Em termos de arco, muitas informações são obtidas de forma empírica e também de forma estatística, e assim, existe a possibilidade de haver uma fatalidade. Essas informações aqui passadas são extremamente importantes do ponto de vista jurídico.

Comparação das distâncias de choque entre as normas NR 10 e a NFPA-70E

Apresenta-se na Tabela 1 as distâncias de

choque para condutores fixos, tanto para a norma NR 10 como para a NFPA-70E.

Como pode ser observado, apenas nos textos destacados a norma NFPA-70E é menor. Nas demais ela sempre mais conservativa.

O estudo de curto-circuito, seletividade e de arc flash são obrigatórios pela NR 10?

O estudo de arc flash (energia incidente) é obrigatório pela NR 10, visto que se devem prover vestimentas adequadas e não se podem prover vestimentas adequadas se não forem realizados os estudos de arc flash (energia incidente).

Para realizar o estudo de energia incidente, é necessário calcular a corrente de arco e para calcular a corrente de arco é necessário calcular a corrente de falta franca (bolted fault) e assim, é obrigatório realizar o estudo de curto-circuito.

Para o cálculo da energia incidente, é necessário ter o tempo da proteção e para se ter o tempo da proteção é necessário ter o estudo de seletividade.

Pelo exposto acima subliminarmente, é obrigatória a realização dos estudos de curto-circuito, seletividade e arc flash (energia incidente).

Evolução da seletividade com o tempo

O objetivo de um estudo de seletividade

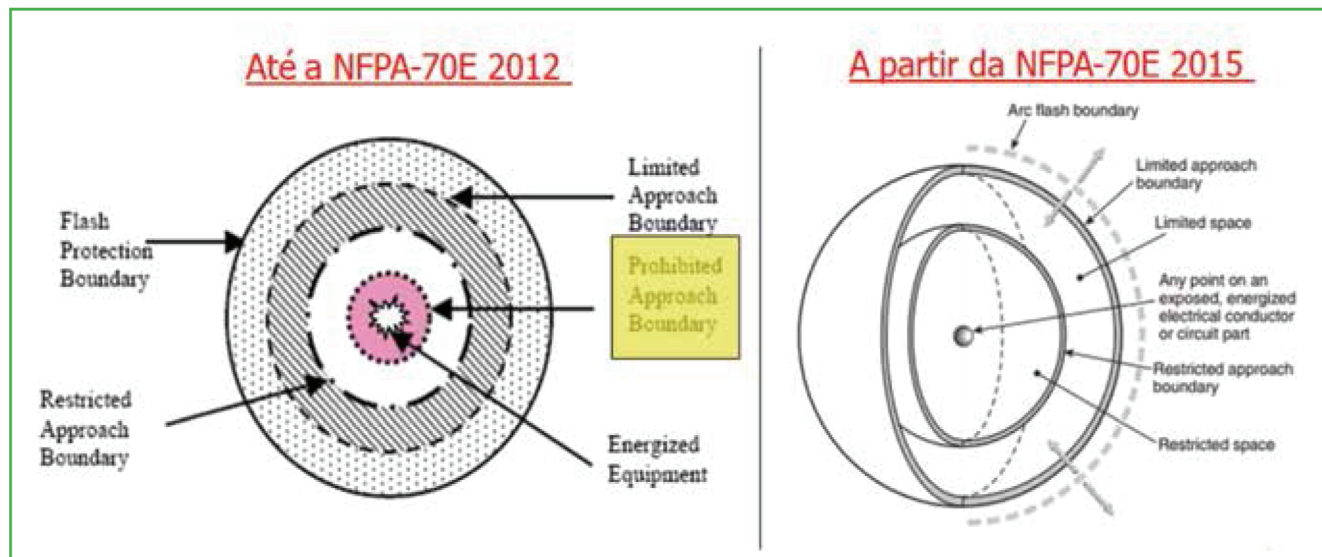


Figura 4 – Zonas de choque segundo a NFPA-70E.

TABELA 1 – COMPARAÇÃO ENTRE AS DISTÂNCIAS DE CHOQUE DA NORMA NR 10 E DA NFPA-70E

Faixa de tensão nominal da instalação elétrica em kV	NR-10 / NFPA-70E	Rs - Raio de delimitação entre zona de risco e controlada em metros	Rc - Raio de delimitação entre zona controlada e livre em metros	Região de Aproximação Restrita (m)	Região de Aproximação Limitada - Condutor Móvel (m)	Região de Aproximação Limitada - Condutor Fixo (m)
<0.05	NFPA-70E			Not specified	Not specified	Not specified
> 0.05 - < 0.15	NFPA-70E			Avoid contact	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 6 in.)
> 0.151 - < 0.75	NFPA-70E			0.3 m (1 ft 0 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.0 m (3 ft 6 in.)
<1	NR-10	0.20	0.70			
≥1 e <3	NR-10	0.22	1.22			
≥3 e <6	NR-10	0.25	1.25			
≥6 e <10	NR-10	0.35	1.35			
≥10 e <15	NR-10	0.38	1.38			
0.751 - 15	NFPA-70E			0.7 m (2 ft 2 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.5 m (5 ft 0 in.)
≥15 e <20	NR-10	0.40	1.40			
≥20 e <30	NR-10	0.56	1.56			
≥30 e <36	NR-10	0.58	1.58			
15.1-36	NFPA-70E			0.8 m (2 ft 9 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	1.8 m (6 ft 0 in.)
≥36 e <45	NR-10	0.63	1.63			
36.1-46	NFPA-70E			0.8 m (2 ft 9 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)
≥45 e <60	NR-10	0.83	1.83			
≥60 e <70	NR-10	0.90	1.90			
46.1-72.5	NFPA-70E			1.0 m (3 ft 3 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)
≥70 e <110	NR-10	1.00	2.00			
72.6-121	NFPA-70E			1.0 m (3 ft 4 in.)	3.3 m (10 ft 8 in.)	2.5 m (8 ft 0 in.)
≥110 e <132	NR-10	1.10	3.10			
≥132 e <150	NR-10	1.20	3.20			
138-145	NFPA-70E			1.2 m (3 ft 10 in.)	3.4 m (11 ft 0 in.)	3.0 m (10 ft 0 in.)
≥150 e <220	NR-10	1.60	3.60			
161-169	NFPA-70E			1.3 m (4 ft 3 in.)	3.6 m (11 ft 8 in.)	3.6 m (11 ft 8 in.)
≥220 e <275	NR-10	1.80	3.80			
230-242	NFPA-70E			1.7 m (5 ft 8 in.)	4 m (13 ft 0 in.)	4 m (13 ft 0 in.)
≥275 e <380	NR-10	2.50	4.50			
345-362	NFPA-70E			2.8 m (9 ft 2 in.)	4.7 m (15 ft 4 in.)	4.7 m (15 ft 4 in.)
≥380 e <480	NR-10	3.20	5.20			
500-550	NFPA-70E			3.6 m (11 ft 10 in.)	5.8 m (19 ft 0 in.)	5.8 m (19 ft 0 in.)
≥480 e <700	NR-10	5.20	7.20			
765-800	NFPA-70E			4.9 m (15 ft 11 in.)	7.2 m (23 ft 9 in.)	7.2 m (23 ft 9 in.)

era, entre outros, os seguintes:

- Proteção dos equipamentos elétricos
- Proteção do sistema
- Proteção do processo
- Desligar a menor porção do sistema na ocorrência de uma falta.

Atualmente, acrescentou-se um item a mais: a proteção das pessoas.

Por esse motivo, hoje se deve elaborar o estudo de curto-circuito, seletividade e arc flash de forma integrada, pois um estudo afeta o outro.

Com a evolução da tecnologia aplicada aos dispositivos de proteção e o aumento dos casos de acidentes por arco, a filosofia de proteção foi mudando de foco com o tempo.

A Figura 5 traz a evolução dos estudos de seletividade com tempo.



Figura 5 – Evolução dos estudos de seletividade com o tempo.

*CLÁUDIO SÉRGIO MARDEGAN é engenheiro eletricista 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 Fault Protection. É diretor da Engenpower.

GIUSEPPE PARISE é engenheiro eletrotécnico, professor da Universidade de Roma e membro do IEEE.

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@atitueditorial.com.br