



## Capítulo I

# À natureza e os riscos do arco elétrico

Por Alan Rômulo Silva Queiroz e Eduardo César Senger\*

A crescente preocupação com os aspectos relativos à segurança do trabalho, vinculada diretamente às normas de segurança e saúde cada vez mais restritivas, tem causado profundas mudanças na maneira como as instalações elétricas são projetadas, operadas e gerenciadas. Dessa forma, mensurar corretamente os riscos e prover soluções para mitigá-los tornou-se uma etapa fundamental para garantir a integridade das instalações e a segurança dos trabalhadores que interagem com ela.

Dentre os riscos oferecidos pela eletricidade, o arco elétrico destaca-se como um dos mais danosos aos trabalhadores. Em função da grande quantidade de energia liberada e das altas temperaturas geradas por esse fenômeno, os trabalhadores podem sofrer queimaduras graves com potencial, inclusive, para levá-los a óbito. Além disso, os efeitos do arco elétrico são ainda mais amplos, pois, na sua ocorrência, são gerados vapores metálicos tóxicos, projeção de metal

fundido, luz extremamente intensa e uma onda de pressão devido à expansão do ar.

Estatísticas do setor elétrico revelam que a ocorrência de acidentes com arco elétrico vem diminuindo nos últimos anos. Contudo, todos os anos ainda ocorrem uma quantidade significativa de acidentes envolvendo esse fenômeno.

A Fundação COGE (Fundação Comitê de Gestão Empresarial), entidade jurídica sem fins lucrativos, divulga anualmente o Relatório de Estatísticas de Acidentes no Setor Elétrico Brasileiro. O último relatório divulgado pela Fundação refere-se às estatísticas do ano de 2010. Dentre várias informações presentes nesse relatório, são apresentadas estatísticas sobre acidentados com arco elétrico (estudo iniciado em 2006).

A Figura 1, extraída do relatório de 2010, apresenta a quantidade de acidentados com arco elétrico todos os anos no Brasil, considerando apenas o setor elétrico.



Figura 1 – Número de acidentados com arco elétrico por ano (2010).

Considerando o vasto campo de aplicação da eletricidade, certamente, o número de acidentados com arco elétrico no país é ainda maior. A falta de informações sobre acidentados com arco elétrico em outros setores, como o industrial e comercial, não permite conhecer a totalidade dos acidentes causados por esse fenômeno. Contudo, a característica dos trabalhos realizados com eletricidade, principalmente em ambientes industriais, tais como frequentes manobras em disjuntores e gavetas, acarretam inúmeros acidentes envolvendo arco elétrico.

Este artigo aborda conceitos técnicos sobre a natureza dos arcos elétricos e os riscos inerentes a esse fenômeno, com o objetivo de propiciar conhecimentos mínimos para uma gestão eficiente dos riscos durante a execução das atividades laborais de operadores e eletricitistas.

### *A natureza do arco elétrico*

Um arco elétrico caracteriza-se pela passagem significativa de corrente elétrica por um material normalmente não condutivo, como o ar, movimentando-se a altas velocidades (aproximadamente 100 m/s).

As falhas que originam um arco elétrico estão associadas, em geral, a curtos-circuitos (entre fases e fase-terra), sendo que

a maioria dessas faltas é iniciada por meio de um curto-circuito fase-terra, evoluindo rapidamente para um curto-circuito trifásico. Os arcos elétricos produzem calor intenso, causam explosões, ondas de pressão, entre outros efeitos, representando riscos aos trabalhadores expostos a esse fenômeno.

O comportamento de um arco elétrico em um sistema trifásico é tido como caótico, pois envolve uma rápida e irregular mudança na geometria do arco devido à convecção, aos jatos de plasma e às forças eletromagnéticas.

Adicionalmente, a extinção do arco e a possibilidade de reignição, mudanças no trajeto do arco por conta das correntes transitórias de retorno e a reconexão do arco pelos barramentos e partes de plasma, além de outros efeitos, dificultam o modelamento matemático desse fenômeno.

Em função dessas características, o levantamento das propriedades exatas de um arco elétrico, como o valor da sua impedância, é algo extremamente complexo.

A Figura 2 demonstra a natureza direcional de um arco elétrico, porém não ilustra o comportamento caótico citado anteriormente. Observa-se que a corrente alternada das três fases cria forças magnéticas sucessivas de atração e repulsão, movimentando de forma intensa os jatos de plasma, que, por sua vez, alimentam uma nuvem de plasma.

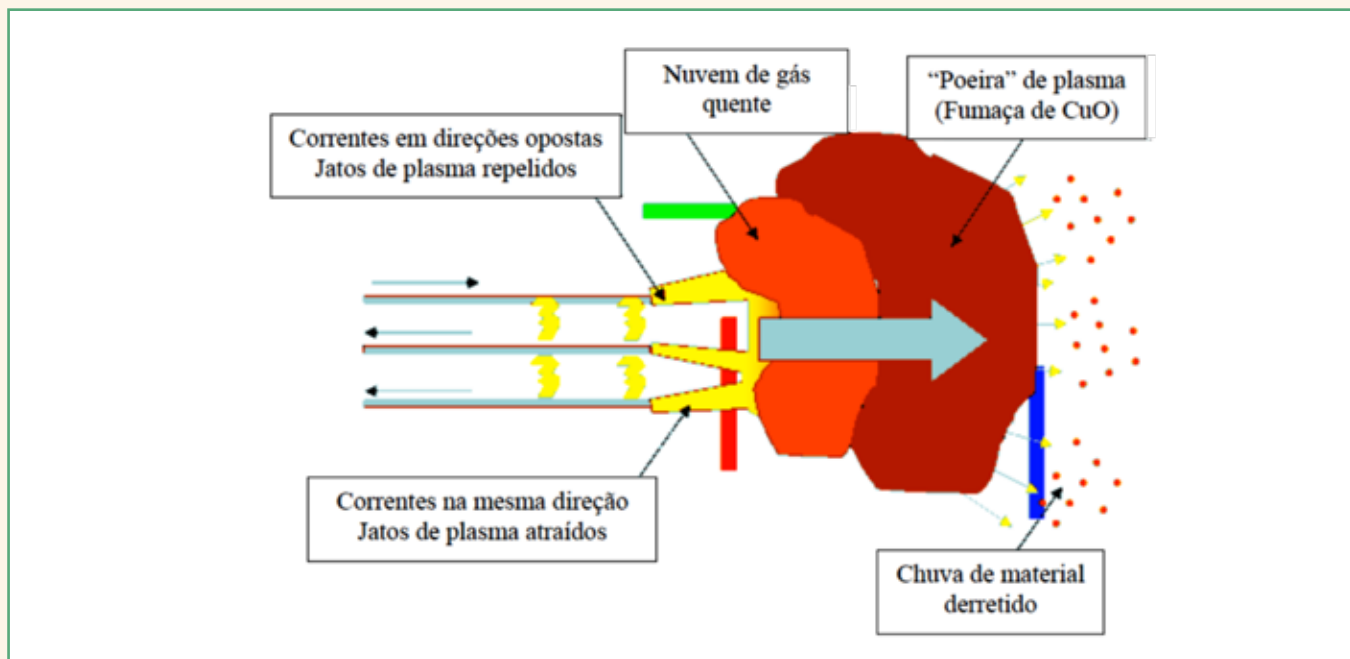


Figura 2 – A natureza direcional de um arco elétrico sem o comportamento caótico.

Essa nuvem é conduzida para fora, longe das pontas, criando uma “poeira de plasma”. Como as moléculas altamente energizadas do plasma esfriam, elas terminam se recombinando em vários outros materiais. Esse fluxo de material inclui também partes derretidas dos barramentos.

Após o seu início, o arco elétrico é um fluxo de corrente constituído pelo vapor dos materiais que estão sendo consumidos. Este vapor possui uma resistência consideravelmente maior do que o metal contínuo, provocando uma queda de tensão entre 30 e 40 V/cm, milhares de vezes maiores em relação a um condutor sólido.

Em circuitos de baixa tensão, o arco, com queda de tensão entre 30 e 40 V/cm, consome uma parcela substancial da tensão disponível, deixando somente a diferença entre a tensão da fonte e a tensão do arco para forçar a corrente de falta pela impedância total do sistema. Este é o motivo para a “estabilização” da corrente do arco em circuitos de 277/480 volts quando o comprimento do arco é da ordem de 10 cm.

Para tensões mais elevadas, o comprimento do arco pode ser substancialmente maior, em torno de 2,5 cm para cada 100 V da fonte, antes que a impedância do sistema comece a regular ou limitar a corrente de falta. Isso implica comprimentos de arcos maiores em sistemas de alta tensão, podendo fazer outros equipamentos ou circuitos elétricos serem atingidos e provocarem novos curtos-circuitos.

O trajeto percorrido pelo arco a partir do seu início é substancialmente resistivo. Essa característica confere ao arco elétrico um fator de potência unitário.

### Os riscos do arco elétrico

Por liberar uma grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo, o arco elétrico passou a fazer parte do grupo dos principais riscos envolvendo eletricidade, juntamente com o choque elétrico. Os efeitos causados pelo arco podem acarretar em perdas materiais, pois

sua ocorrência pode causar a destruição total de painéis elétricos e impactar a receita de uma empresa por problemas de lucro cessante, mas também pode levar trabalhadores a óbito, visto que toda a energia liberada pelo arco pode provocar queimaduras letais, conforme constatou Ralph Lee, com o artigo “The other electrical hazard: electric arc blast burns”.

A alta temperatura que pode envolver um arco elétrico é a principal causa de preocupação com esse fenômeno. No ponto de origem do arco, a temperatura pode atingir aproximadamente 20.000 °C, o que equivale a quatro vezes a temperatura de superfície do sol. Nenhum material conhecido na Terra é capaz de suportar essa temperatura sem que ocorra o seu derretimento e vaporização. Entretanto, além da alta temperatura, um arco elétrico apresenta outros riscos, como os vapores metálicos tóxicos, projeção de metal fundido, luz extremamente intensa e uma significativa onda de pressão.

A onda de pressão é provocada pela alta temperatura do arco, que causa uma explosiva expansão do ar circunvizinho e dos metais existentes no trajeto do arco. O cobre, por exemplo, sofre uma expansão em torno de 67.000 vezes quando muda do estado sólido para vapor. As altas pressões geradas podem facilmente exceder centenas ou mesmo milhares de kgf/m<sup>2</sup>, rompendo os tímpanos e causando danos aos pulmões dos trabalhadores. Os efeitos destrutivos dessas ondas de pressão, criadas pelo aquecimento e expansão térmica do ar e vaporização dos condutores metálicos, são conhecidos como “efeitos termoacústicos”. Os sons associados a essas pressões podem exceder 160 decibéis.

Finalmente, o material sólido e o metal derretido são expelidos para longe do arco em velocidades que excedem 1.200 km/h, o suficiente para que as partículas penetrem completamente no corpo humano.

Com relação à luz emitida, o espectro de frequências do arco inclui uma grande proporção de radiação na zona dos raios ultravioletas,

podendo causar danos à retina ocular de um ser humano.

A junção de todos esses efeitos ocorridos durante um arco elétrico apresenta, entre outros, os seguintes riscos para os seres humanos:

- Queimaduras;
- Traumatismos cranianos;
- Esmagamento dos pulmões;
- Perda de membro;
- Surdez;
- Ferimentos resultantes de estilhaços;
- Fraturas ósseas;
- Cegueira;
- Cataratas;
- Morte.

Embora o arco elétrico possua diversos riscos, aqueles associados à fonte de calor com potencial para causar queimaduras de terceiro grau são os mais perigosos e que originam a maior parte dos óbitos. Esses efeitos são graves no corpo humano porque as células da pele morrem mais rapidamente de acordo com intensidade da temperatura incidente nela.

Com a temperatura da pele próxima de 44 °C, o mecanismo de equilíbrio da temperatura corpórea começa a sofrer avaria em torno de 6 horas, podendo causar danos às células se o tempo de exposição a essa temperatura superar essas 6 horas.

Entre 44 °C e 51 °C, a taxa de destruição das células duplica para cada acréscimo de 1 °C na temperatura da pele. Acima de 51 °C, a taxa de destruição é extremamente rápida. Já uma temperatura de 70 °C causa a destruição total das células em um período de tempo de um segundo. Qualquer temperatura da pele superior a 96 °C que permanecer por mais de 0,1 segundo causará queimaduras incuráveis.

A Figura 3 demonstra a relação entre o tempo para a morte das células (queimaduras não curáveis) e a temperatura da pele. A linha inferior ilustra a mesma relação, porém considerando as queimaduras curáveis.

Além do problema da elevação da temperatura da pele, um arco elétrico pode causar a ignição das vestimentas de um trabalhador, aumentando substancialmente o risco de queimaduras. Por conta disso, vestimentas para proteção contra agentes térmicos são utilizadas nas atividades sujeitas a riscos de arco elétrico (elevada energia incidente). Em geral, essas atividades consistem em:

- Trabalho em circuitos de potência energizados com tensão superior a 120 V;
- Inserção e remoção de gavetas, contadores e disjuntores com a porta do painel aberta;
- Operação de contadores, disjuntores, chaves seccionadoras, gavetas e chaves-fusíveis com a porta do painel aberta;
- Trabalho com circuito energizado para pesquisa de defeitos, inclusive durante a execução de medições, como por exemplo, utilizando um multímetro;
- Instalação do conjunto de aterramento temporário após o teste de tensão;
- Remoção de coberturas aparafusadas que exponham partes energizadas;
- Operação da manopla da chave comutadora do transformador de corrente que alimenta os amperímetros;
- Abertura de coberturas com dobradiças que exponham barramentos ou partes energizadas;
- Abertura de compartimentos de transformadores de tensão;
- Atividades de termografia com a porta do painel aberta.

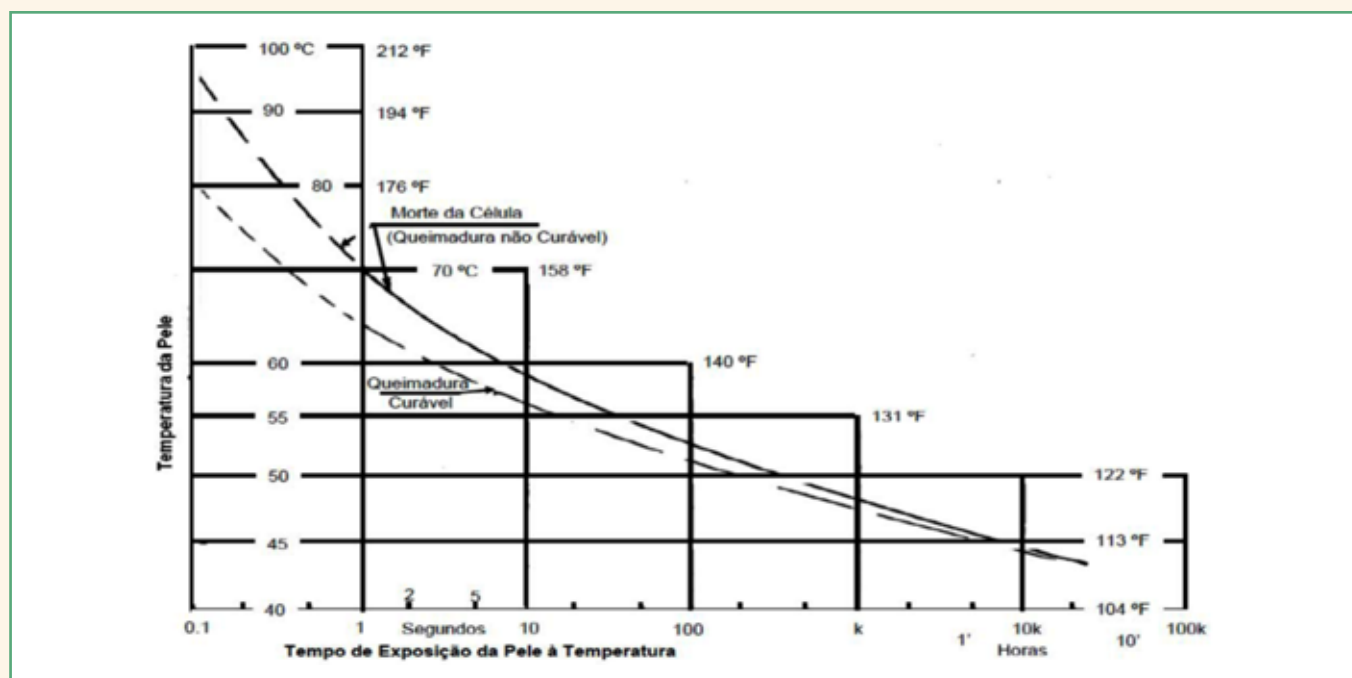


Figura 3 – Relação tempo-temperatura, tolerância do tecido humano.

Características específicas e formas de dimensionar os EPIs para atividades com risco de arcos elétricos serão abordados nos próximos artigos.

### Referências

- DOUGHTY, R. L. et al. *Minimizing burn injury: electric-arc hazard assessment and personnel protection*. IEEE Industry Applications Magazine, 2002.
- FLOYD, H.L. et al. *Arc flash hazards and electrical safety program implementation*. “Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference”, 2005.
- FUNCOGE – Fundação COGE. “Relatório de estatística de acidentes do setor elétrico brasileiro”, 2010. Disponível em: <<http://www.funcoge.org.br>>. Acesso em: 07 jan. 2012.
- IEEE. *Requirements for qualification of high power testing services: IEEE/NFPA arc flash phenomena*. Disponível em: <<http://standards.ieee.org/about/arflash/hpts.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2012.
- KUMPULAINEN, L.; DAHL, S.; MA, J. *Mitigation of arc-flash hazards and reduction of costs by selective arc-flash protection*. In: “China International Conference on Electricity Distribution” – CITED, IEEE, 2008.
- LANG, M.; NEAL, T. “Arc flash basics: testing update”. Disponível em: <[http://us.ferrazhawmut.com/resources/media/articles/icefa2007\\_paper\\_FINAL\\_I1.pdf](http://us.ferrazhawmut.com/resources/media/articles/icefa2007_paper_FINAL_I1.pdf)>. Acesso em: 07 jan. 2012.
- LEE, R. H. *The other electrical hazard: electric arc blast burns*. “IEEE Transactions on Industry Applications”, v. IA-18, p. 246-251, May/June 1982.
- LOURO, M. F. “O sistema de proteções na perspectiva de segurança de pessoas em redes de MT”. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e Computadores). Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- MOHLA, D. C. et al. *Mitigation electric shock and arc flash energy – a total*

*system approach for personnel and equipment protection*. In: “Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference”, PCIC, 2010.

- QUEIROZ, A. R. S. “Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico”. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2011.
- ROCHA, G. et al. *Deteção de arco voltaico em painéis de média e baixa tensão*. In: III PCIC BR – “Petroleum and Chemical Industry Committee” – IEEE, 2010.
- WACTOR, M. et al. *Modeling the pressure wave associated with arc fault*. In: “Conference Papers of the 47th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference”, USA, 333-341, 2000.
- WILSON, W.R. *High current arc erosion of electric contact materials*. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers - Part III: Power Apparatus and Systems, v. 74, 1955.

---

\* **Alan Rômulo Silva Queiroz é engenheiro eletricista graduado pela Universidade Santa Cecília (Santos, SP), mestre em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e membro do IEEE-IAS.**

**Eduardo César Senger é engenheiro eletricista e doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. É professor livre-docente na área de Proteção de Sistemas Elétricos pela Universidade de São Paulo e coordenador do Laboratório de Pesquisa em Proteção de Sistemas Elétricos – Lprot.**

**Continua na próxima edição**  
**Confira todos os artigos deste fascículo em [www.oseletrico.com.br](http://www.oseletrico.com.br)**  
**Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)**