



ESTUDO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE DE ARCOS ELÉTRICOS EM PAINÉIS DE BAIXA TENSÃO

Luiz Gustavo Scarpatto Barcelos¹

Resumo: Nas instalações de painéis elétricos de baixa tensão em indústrias brasileiras, o estudo sobre energia incidente de arcos elétricos é pouco conhecido, entretanto, seus efeitos nocivos acarretam enormes prejuízos, tanto pessoal quanto material. Para a obtenção de uma instalação elétrica segura deve-se conhecer os efeitos destrutivos que os arcos provocam, bem como, as possíveis causas que originam este fenômeno. O método atual para dimensionar a energia incidente proveniente de arcos elétricos provém do IEEE Std 1584-2002, que por meio de diversos testes empíricos, estabelece um método de cálculo com o propósito de quantificar a energia propagada. Com o valor da energia incidente calculado, equipamentos de proteção e distâncias de segurança podem ser determinadas, com o propósito de garantir que os efeitos nocivos sejam minimizados ou extintos.

Palavras – chave: Energia incidente; arco elétrico; painéis elétricos.

1 INTRODUÇÃO

É inegável que o estudo da energia incidente em um arco elétrico é pouco difundido no Brasil, seus efeitos são geralmente catastróficos para o ser humano, devido ao seu alto poder de destruição, ocasionando graves queimaduras, podendo levar a óbito. O profissional do setor elétrico convive diretamente com a possibilidade de acidentes oriundos de arcos elétricos. Com o avanço da tecnologia dos dispositivos de proteção e da composição dos materiais para vestimentas de segurança, estes riscos podem ser amenizados.

Com a crescente preocupação de profissionais do setor elétrico, no que tange a melhoria das condições de trabalho, as normas regulamentadoras brasileiras e internacionais relativas ao assunto estão mais rígidas, no intuito de prevenir acidentes com o arco elétrico. Em painéis elétricos de baixa tensão não é diferente, presentes na maioria das indústrias e fábricas do mundo, normativas e procedimentos relacionados a proteção contra arco elétrico são primordiais para maximizar a segurança do local. Importa salientar, que apesar dos devidos cuidados muitas vezes o arco elétrico é inevitável, restando somente ao operador do painel e demais pessoas na zona de risco, a confiabilidade no dimensionamento de suas vestimentas de proteção.

Com os dados da instalação elétrica e o cálculo da energia incidente para o local onde será realizado o estudo, delimita-se uma aproximação precisa para os efeitos destrutivos

¹ Graduado em Engenharia Elétrica - SATC E-mail: luizgustavo_barcelos@hotmail.com



de um possível arco elétrico, provendo segurança adequada às pessoas que estiverem envolvidas no raio de destruição do arco. É necessário investir em treinamento para que os profissionais entendam a importância da utilização correta dos equipamentos de proteção, bem como, conheçam o cálculo da quantidade de energia incidente e os riscos envolvidos em seus locais de trabalho.

Este estudo tem por objetivo analisar os tipos construtivos dos painéis elétricos de baixa tensão comumente utilizados na área industrial do território brasileiro, a fim de calcular a corrente e a energia incidente de um possível arco elétrico, a distância de segurança e categorizar os equipamentos de proteção adequados.

2 FUNDAMENTAÇÃO E CÁLCULOS DA ENERGIA INCIDENTE

2.1 PAINÉIS ELÉTRICOS DE BAIXA TENSÃO

A energia elétrica ao ser disponibilizada pelas concessionárias para um consumidor industrial, comercial ou residencial, deve ser: manobrada, protegida, controlada, regulada e medida. Estes procedimentos são realizados com a utilização de equipamentos de controle, manobra, proteção e medição, entre outros, dependendo da instalação (COSTA, 2014).

De acordo com a norma ABNT NBR IEC 60439-1, o emprego de um ou mais dispositivos elétricos associados, caracteriza-se como um conjunto de manobra e controle, comumente chamado de painel ou quadro elétrico (ABNT, 2003).

Os painéis elétricos são na maioria estruturas metálicas, com a possibilidade de instalar diversos equipamentos em seu interior. Os tipos construtivos dos painéis podem ser classificados de acordo com a forma de instalação, sobrepor ou embutir, caso instalados em parede vertical, ou autossustentável, situados em piso horizontal.

Todos os modos de instalação visam primordialmente à segurança dos operadores e equipamentos em seu interior, mantendo também um fácil acesso para eventuais manutenções (ABNT, 2003).

Conforme os dispositivos instalados em seu interior, os tipos de cargas alimentadas e as funções de seus equipamentos, os principais painéis elétricos mais comercializados no Brasil, entre 2014 e 2015, apresentam um padrão na nomenclatura (COSTA, 2014; O SETOR ELÉTRICO, 2015):



- QGBT: Quadro Geral de Baixa Tensão;
- CCM: Centro de Controle de Motores;
- QD: Quadro de Distribuição;
- QCFP: Quadro Controle de Fator de Potência.

Estes modelos de nomenclatura podem variar de acordo com a região, técnico responsável, cultura da empresa, visto que não há uma normatização específica para os nomes. Os mesmos foram criados para facilitar o entendimento entre as características e funcionalidades dos painéis elétricos. Além disso, ressalta-se o nível de tensão nominal aplicado no painel, sendo de grande importância para a especificação correta de sua aplicação e de seus dispositivos instalados. Conforme módulo 1 do PRODIST da ANEEL, a classificação dos níveis de tensão é definida como (COSTA, 2014; ANEEL, 2012):

- 0 V até 1000 V: baixa tensão;
- 1000 V até 69.000 V: média tensão;
- 69.000 V até 230.000 V: alta tensão;
- 230.000 V até 525.000 V: extra alta tensão; e
- Valores acima de 525.000 V: ultra alta tensão.

Após as definições de tensão nominal, aplicação do painel, tipos de dispositivos instalados e cargas alimentadas, torna-se possível determinar o modelo do painel.

2.2 ARCO ELÉTRICO

Considerado um dos maiores riscos na área elétrica, o arco elétrico caracteriza-se pela condução de corrente elétrica por um meio anteriormente isolante, como exemplo o ar. O meio isolante tem suas características dielétricas rompidas, tornando-se um condutor de eletricidade (LAGRECA, 2015).

A condução da corrente elétrica durante o arco é realizada sob a forma de plasma, considerado o quarto estado da matéria, assemelhando-se muito com o efeito de uma descarga atmosférica, o qual possui uma grande capacidade de conduzir energia por um curto espaço de tempo (LAGRECA, 2015).



O plasma é admitido como um meio contínuo em um campo eletromagnético, uma mistura de íons e elétrons de alta capacidade de energia cinética, assumindo assim, uma característica de bom condutor de eletricidade. Essa situação alavanca o principal risco sobre os arcos elétricos, devido ao seu enorme potencial energético, uma imensa quantidade de calor é emitida, dependendo da situação, a temperatura pode alcançar 20.000° K, o que equivale a quatro vezes a temperatura ambiente na superfície do sol. Nenhum material encontrado até hoje suportará este fenômeno sem que ocorram danos irreparáveis (LAGRECA, 2015; FELIPINI, 2009; BROWN, 2015).

Em painéis elétricos de baixa tensão, uma das principais fontes de arco é o curto-circuito entre fases ou entre fase-terra de seus condutores de energia. Para estes, é comum a utilização de barras de cobre, devido à alta condutibilidade e valor comercial. Com a alta temperatura desprendida durante o arco, o cobre sofrerá sublimação, deixando de ser um material no estado sólido para tornar-se gasoso. Porém, ao tornar-se vapor, o cobre sofre uma expansão em seu tamanho de aproximadamente 67.000 vezes, acarretando em ondas de pressão extremamente destrutivas. Este efeito é ilustrado na Figura 1 (QUEIROZ; SENGER, 2012).

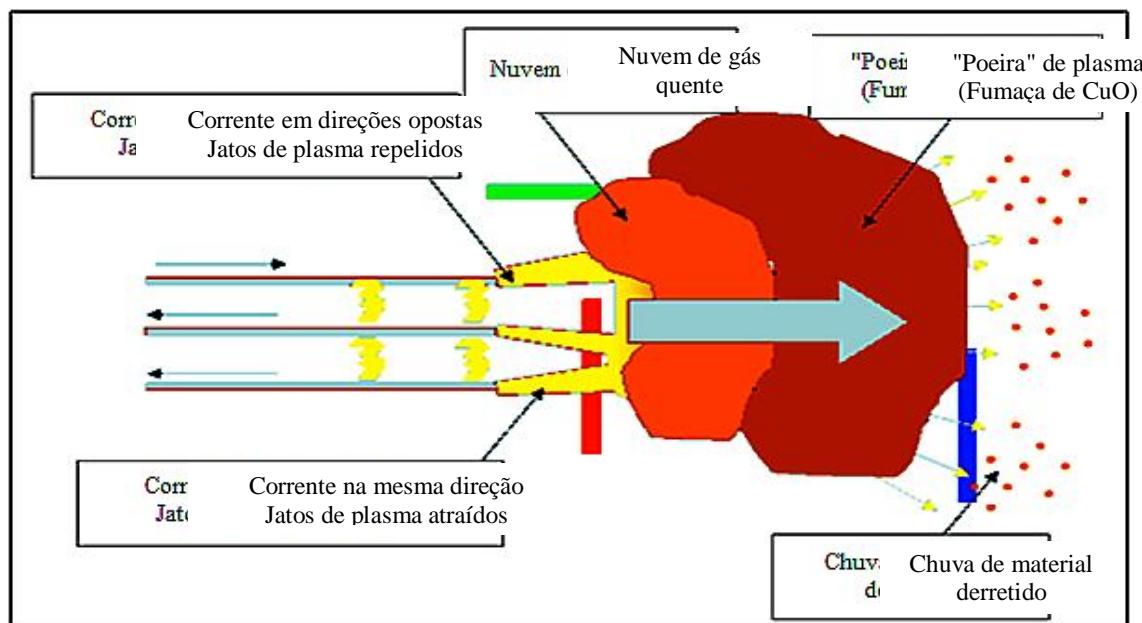


Figura 1: Efeito de Um Arco Elétrico em Condutores de Barras de Cobre.
Fonte: National Fire Protection Association (2012).

Conforme a Fig. 1, em consequência das altas temperaturas e fortes ondas de pressão, grandes explosões são geradas, acarretando na perda material de equipamentos



instalados próximos da origem do arco. Estilhaços e materiais ferrosos derretidos são impulsionados a uma velocidade de até 1.200 km/h para todos os lados, podendo provocar sérias lesões às pessoas que estiverem dentro do raio de alcance destes objetos (PFEIFFER ENGINEERING CO, 2015).

Lesões severas na retina ocular dos operadores em virtude da alta luminosidade emitida são uma das consequências do arco elétrico, que proporciona radiações ultravioletas em seu espectro de frequência (PFEIFFER ENGINEERING CO, 2015).

Perdas auditivas podem ser computadas como efeito do arco, tendo em vista que o efeito acústico emitido pode exceder os 160 dB, o que ultrapassa o valor limiar suportável à audição humana que é de 130 dB (PFEIFFER ENGINEERING CO, 2015; GREVEN; FAGUNDES; EINSFELDT, 2006).

A maior parte dos sinistros envolvendo arcos elétricos em painéis de baixa tensão são de origens accidentais, tais como: toque em condutor energizado, queda de ferramentas não isoladas em condutores, peças metálicas encostando em condutores energizados. Do mesmo modo, causas não fortuitas ocorrem com o excesso de poeira, impurezas, corrosão e condensação nos metais utilizados como condutores (PFEIFFER ENGINEERING CO, 2015).

De acordo com a Fundação COGE², a qual estabelece relatórios anuais sobre sinistros no setor elétrico brasileiro, acidentes envolvendo arcos elétricos são constantes. A Figura 2 demonstra em gráfico a quantidade de acidentes por ano ocorridos entre 2000 e 2013 (COMITÊ DE GESTÃO EMPRESARIAL, 2013).

² Dados disponíveis em <<http://www.relatorio.funcoge.com.br/2013/indexpt.html>>. Acesso em: 09 ago. 2015

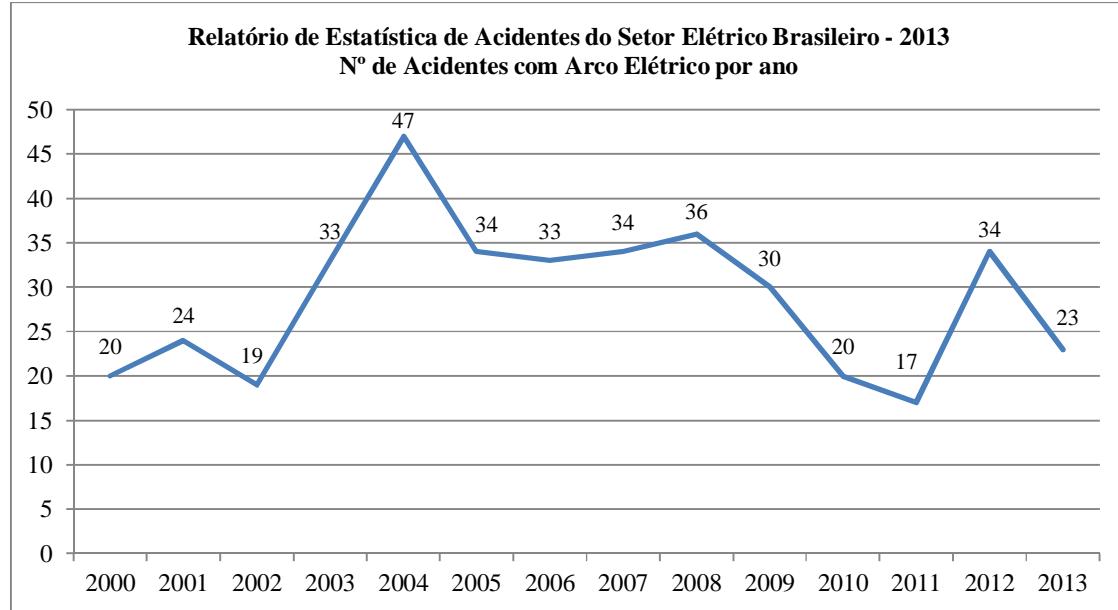


Figura 2: Número de Acidentes por Ano do Setor Elétrico Envolvendo Arco Elétrico.
Fonte: Comitê De Gestão Empresarial (2013).

Da mesma forma, observam-se na Figura 3, acidentes devido a arcos elétricos computados por área do setor elétrico (COMITÊ DE GESTÃO EMPRESARIAL, 2013).

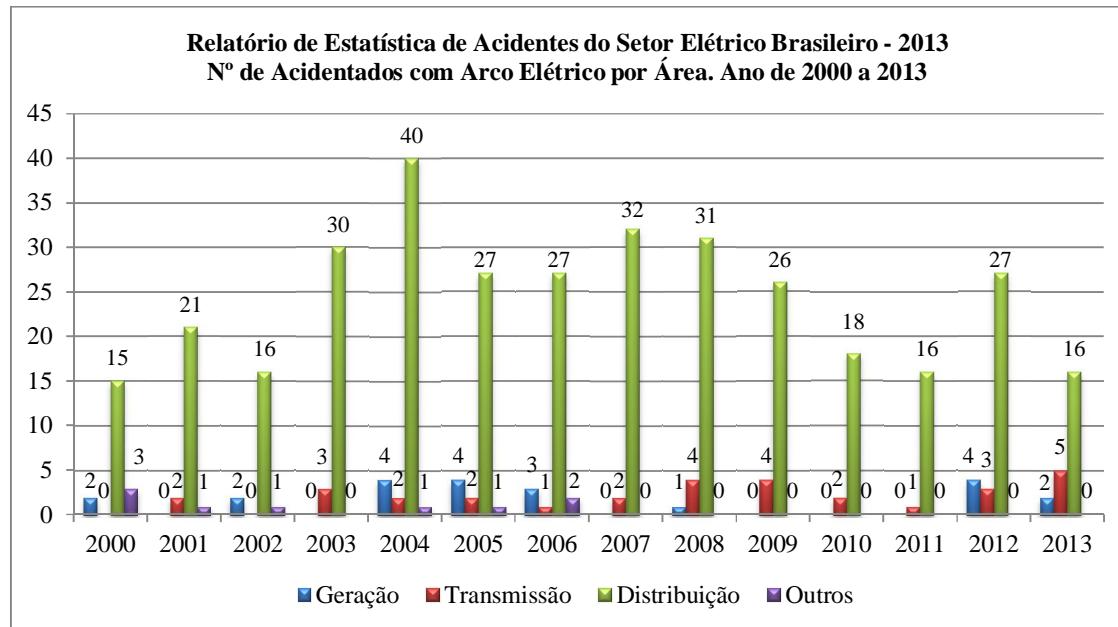


Figura 3: Número de Acidentes por Área do Setor Elétrico Envolvendo Arco Elétrico
Fonte: Comitê De Gestão Empresarial (2013).



Os acidentes podem ser categorizados pelo nível de tensão na origem do arco elétrico, as estatísticas segundo esta classificação podem ser avaliadas na Figura 4 (COMITÊ DE GESTÃO EMPRESARIAL, 2013).

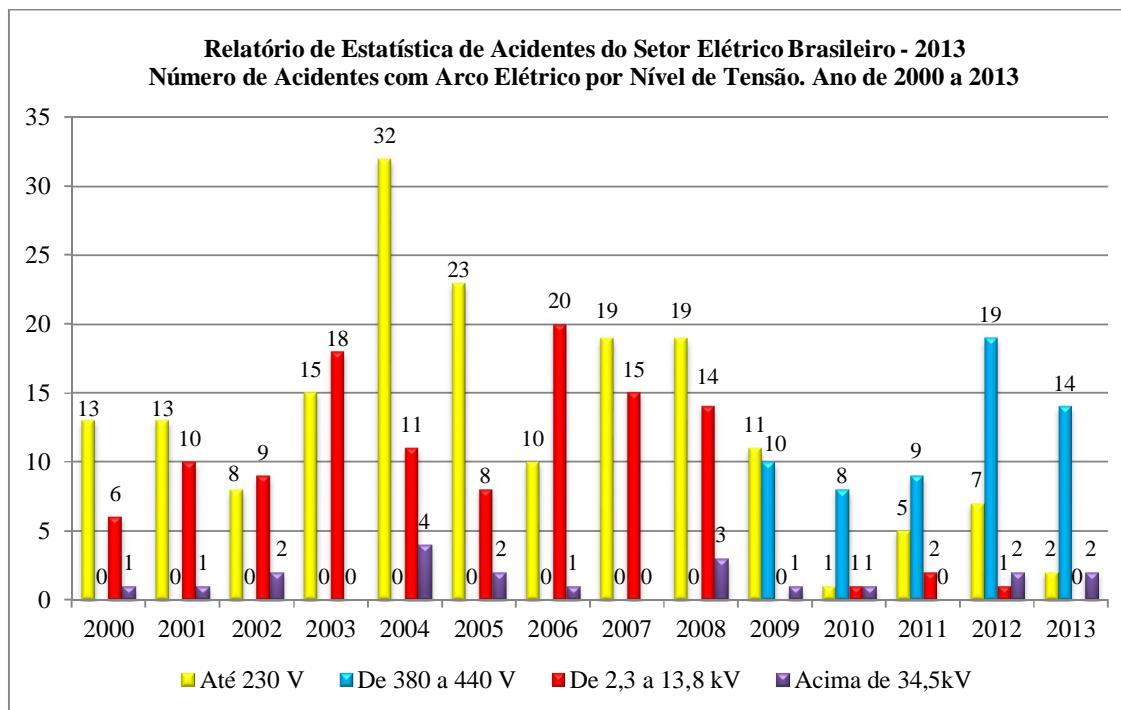


Figura 4: Número de Acidentes por Nível de Tensão Envolvendo Arco Elétrico

Fonte: Comitê De Gestão Empresarial (2013).

Os gráficos das Figuras 2, 3 e 4 demonstram o comportamento do cenário elétrico brasileiro com relação a acidentes envolvendo arcos elétricos. Dentre os diversos perigos acarretados por um arco elétrico, destaca-se a energia incidente propagada pelo mesmo, um efeito devastador para as instalações e pessoas envolvidas (QUEIROZ; SENGER, 2012; NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2012).

2.3 ENERGIA INCIDENTE PROVENIENTE DE ARCOS ELÉTRICOS

A energia incidente em calorias por centímetro quadrado (cal/cm^2) é calculada em uma superfície a uma determinada distância, por intermédio da quantidade de energia emitida no arco elétrico. Este cálculo proporciona um correto dimensionamento de vestimentas de proteção ao operador que estiver no local do incidente. Diversos fatores são levados em consideração ao calcular essa energia, tais como: características de instalação, dispositivos de



proteção, dimensionamento de condutores, tempo de extinção do arco, entre outros (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2012).

Na atualidade, o método de cálculo mais preciso dessa energia para dimensionamento em painéis elétricos de baixa tensão, é apresentado pelo IEEE Std 1584-2002, o qual estabelece as etapas e fórmulas a serem seguidas, de modo a quantificar este valor de energia em cal/cm² (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2012).

2.3.1 Cálculo de energia incidente

Este cálculo foi desenvolvido a partir de um método empírico, obtido por meio de intensivos testes e análises estatísticas e que reproduz com precisão aceitável a ação de um arco elétrico em uma instalação em campo (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Como início, respeitando-se as limitações deste método, os dados para os cálculos devem estar em concordância com os informados na norma, os quais são (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002):

- Tensão de operação de 208 V a 15.000 V;
- Frequência de 50 Hz a 60 Hz;
- Configuração do sistema trifásico;
- Corrente de curto-circuito de 700 A a 106.000 A; e
- Distância entre condutores de 13 mm a 152 mm.

Garantindo que os dados estejam de acordo com os limites de aceitação, o próximo passo é calcular a corrente de curto-circuito (Ibf) no ponto onde se deseja encontrar o valor de energia incidente. Através do estudo da instalação elétrica do ambiente, dados como a fonte de energia da concessionária, geradores, transformadores, sistemas de distribuição, painéis elétricos, motores instalados e Centro de Comando de Motores (CCM), que influenciam diretamente no cálculo da corrente de curto-circuito, devem ser levados em consideração (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Com o devido valor de Ibf obtido, determina-se a corrente do arco elétrico (Ia) através de (1) (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002):



$$\log(I_a) = K + 0,662 \cdot \log(I_{bf}) + 0,0966 \cdot V + 0,000526 \cdot G + 0,5588 \cdot V \cdot (\log(I_{bf})) - 0,00304 \cdot G \cdot (\log(I_{bf})) \quad (1)$$

Onde:

I_a [kA]: Corrente do arco elétrico;

K : Constante unidimensional, utiliza-se o valor de - 0,153 para instalações ao ar livre e - 0,097 em painéis elétricos;

I_{bf} [kA]: Corrente de curto-círcuito presumida no ponto em questão;

V [kV]: Tensão de operação do sistema; e

G [mm]: Distância de espaçamento entre os condutores.

O valor de G é classificado por categorias do local e tensão onde os condutores estão instalados. A Tabela 1 apresenta valores de G , entretanto, com o propósito de fidelizar o cálculo teórico com a realidade, necessita-se verificar esta distância em campo a fim de confrontar com o valor médio estipulado, haja vista os diversos tipos construtivos existentes de painéis elétricos [15].

Tabela 1: Espaçamento Entre Condutores por Fator x de Distância.

Tensão do sistema (kV)	Tipo de equipamento	Distância média de espaçamento entre condutores "G" (mm)	Fator x de distância
0,208 a 1	Ambiente ao ar livre	10 a 40	2,000
	Painéis elétricos de distribuição	32	1,473
	CCM e painéis de comando	25	1,641
	Cabos	13	2,000
1 a 5	Ambiente ao ar livre	13 a 102	2,000
	Painéis elétricos de distribuição	102	0,973
	Cabos	13	2,000
5 a 15	Ambiente ao ar livre	13 a 153	2,000
	Painéis elétricos de distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Fonte: Institute Of Electrical And Electronics Engineers (2002).

Para a próxima etapa do cálculo, necessita-se conhecer o tipo utilizado de dispositivo de proteção contra o arco elétrico, com o propósito de identificar o tempo de interrupção desse equipamento. Este valor é essencial, pois será o tempo de duração do arco (QUEIROZ; SENGER, 2012).

De acordo com o IEEE Std 1584-2002, alguns dispositivos possuem valores de tempo de interrupção conforme Tabela 2. Os dispositivos que não se enquadram nesta tabela,



devem ter seus tempos informados pelo fabricante (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002).

Tabela 2: Tempo de Interrupção de Disjuntores de Potência.

<i>Tipos de disjuntores</i>	<i>Tempo de interrupção em ciclos na frequência de 60 Hz</i>	<i>Tempo de interrupção em segundos</i>
Disjuntores de baixa tensão, caixa moldada com relé de <i>trip</i> integrado. Tensão de 0 a 1.000 V	1,5	0,025
Disjuntores de baixa tensão, caixa aberta com relé de <i>trip</i> integrado ou externo. Tensão de 0 a 1.000 V	3,0	0,050
Disjuntores de média tensão. Tensão de 1.000 a 35.000 kV	5,0	0,080
Disjuntores de alta tensão. Tensão acima de 35.000 kV	8,0	0,130

Fonte: Institute Of Electrical And Electronics Engineers (2002).

Ressalva-se da Tab. 2, que os valores do tempo de interrupção podem modificar conforme o fabricante do equipamento, por isso, as curvas de disparo dos dispositivos de proteção devem ser verificadas com a finalidade de especificar o tempo de interrupção com a maior exatidão possível (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002).

A distância típica de trabalho para a próxima etapa do cálculo está demonstrada na Tabela 3. Estes valores representam o espaçamento entre a parte frontal do equipamento e o corpo ou a cabeça do operador, as mãos e os braços não entram no valor dessa distância, visto que, os maiores perigos com relação a danos nocivos nas pessoas são relacionados ao tronco e à cabeça (QUEIROZ; SENGER, 2012).

Tabela 3: Distância Típica de Trabalho por Equipamento

<i>Tipos de equipamentos</i>	<i>Distância típica de trabalho (mm)</i>
Painéis elétricos de 15 kV	910
Painéis elétricos de 5 kV	910
Painéis elétricos de baixa tensão	610
CCMs e Painéis de comando	455
Cabos	455
Outros	Determinar no local de instalação

Fonte: Institute Of Electrical And Electronics Engineers (2002).



Conforme determina a IEEE Std 1584-2002, após a conclusão dos passos anteriores, a energia incidente normalizada (En) pode ser calculada. Ela é determinada por valores padrões, tais como: tempo de duração do arco elétrico de 0,2 segundos e distância de trabalho de 610 mm. Em (2) demonstra-se o cálculo necessário para que a energia incidente normalizada seja determinada (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002).

$$\log(En) = K1 + K2 + 1,081 \cdot \log(Ia) + 0,0011 \cdot G \quad (2)$$

Onde:

En [J/cm²]: Energia incidente normalizada;

K1: Constante de cálculo unidimensional determina-se o valor de - 0,792 para instalações a céu aberto e - 0,555 para painéis elétricos;

K2: Constante de cálculo unidimensional, determina-se o valor de 0 para instalações aterradas por alta impedância ou sem ligações a terra e - 0,113 para sistemas aterrados; e

G [mm]: Distância de espaçamento entre os condutores.

Determinado o valor da En, calcula-se a energia incidente do ponto em questão, com os dados reais do sistema e da instalação, por meio de (3) (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002).

$$E = 4,184 \cdot Cf \cdot En \cdot (t / 0,2) \cdot ((610^x) / (D^x)) \quad (3)$$

Onde:

E [J/cm²]: Energia incidente;

Cf: Constante de cálculo unidimensional, define-se o valor de 1 para sistemas acima de 1 kV e 1,5 para até 1 kV;

En [J/cm²]: Energia incidente normalizada;

t [s]: Tempo de duração do arco;

D [mm]: Distância típica de trabalho; e

x: Constante de cálculo, fator x de distância, conforme Tab. 1.



Em conformidade com a norma americana NFPA 70E 2012, os valores obtidos de energia incidente para dimensionamento de EPIs e distâncias de segurança são calculados em cal/cm², para adequar o valor anteriormente encontrado em J/cm² utiliza-se a (4) (QUEIROZ; SENGER, 2012).

$$E = Cf \cdot En \cdot (t / 0,2) \cdot ((610^x) / (D^x)) \quad (4)$$

2.3.2 Cálculo da distância de segurança

Designa-se distância de segurança para o espaçamento entre o ponto inicial do arco até onde os efeitos são nocivos às pessoas que não estiverem com vestimentas adequadas. O valor da distância de segurança é medido por meio da energia incidente, determinado pela norma NFPA 70E 2012. O valor de 1,2 cal/cm² (Eb) é o limite para queimaduras de segundo grau em pessoas não protegidas por EPIs. O ponto final da distância de segurança é definido pela diferença da energia incidente desprendida na origem do arco, a qual é intensamente elevada, até o valor de segurança de 1,2 cal/cm² (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2012; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002).

A (5) determina o valor da distância de segurança (Db) descrito pela IEEE Std 1584-2002, levando em consideração os valores e dados utilizados para determinar a energia incidente (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2002).

$$Db = (4,184 \cdot Cf \cdot En \cdot (t / 0,2) \cdot ((610^x) / Eb))^{1/x} \quad (5)$$

Onde:

Db [mm]: Distância de segurança;

Cf: Constante de cálculo unidimensional, define-se o valor de 1 para sistemas acima de 1 kV e 1,5 para até 1 kV;

En [J/cm²]: Energia incidente normalizada;

Eb [J/cm²]: Valor mínimo de energia incidente nocivo ao ser humano;

t [s]: Tempo de duração do arco; e

x: Constante de cálculo, fator x de distância, conforme Tab. 1.



2.4 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO CONTRA ARCOS ELÉTRICOS

Com a evolução constante da tecnologia, dispositivos de proteção contra o arco elétrico estão cada vez mais eficientes, contudo, em algumas situações, somente a vestimenta de proteção do operador pode garantir sua segurança.

A norma brasileira NR 6 - Equipamento de Proteção Individual - EPI de 2015 não cita diretamente as exigências das vestimentas contra o arco elétrico, porém, determina a obrigatoriedade de proteção dos operadores contra acidentes de agentes térmicos (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2015).

Conforme manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino, lançado pelo Ministério do Trabalho e Emprego MTE, determina-se - por meio da NFPA 70E - as especificações dos EPIs necessários, fundamentado ao valor definido de energia incidente em cal/cm² do local da instalação (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2015).

Cada equipamento possui um ATPV (Valor de Proteção Térmica do Arco) em cal/cm², este deve ser no mínimo igual ao valor mensurado no cálculo da energia incidente da instalação. Conforme o valor da energia, a NFPA 70 E determina o risco do ambiente em categorias, de acordo com a Tabela 4 (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2012; MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2015).

Tabela 4: Categoria de Risco para Valores de Energia Incidente.

Risco	Energia Incidente [cal/cm ²]	Categoria de risco	ATPV mínimo requerido [cal/cm ²]
Mínimo	0 a 1,1	0	Não exigido
Leve	1,2 a 4,0	1	4,0
Moderado	4,1 a 8,0	2	8,0
Elevado	8,1 a 25,0	3	25,0
Elevadíssimo	25,1 a 40,0	4	40,0
Não recomendável	Acima de 40	Sem categoria	Não aplicável

Fonte: Adaptado de Institute Of Electrical And Electronics Engineers (2002).

Em ocasião em que há valores acima do limite permitido, sugere-se que o cálculo seja refeito e melhorias nas instalações sejam executadas, a fim de diminuir o valor da energia incidente, adequando-se a indicação de ATPV mínimo necessário (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2012).



3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

3.1 ÁREA DO ESTUDO

O universo do estudo realiza-se por meio de um departamento de uma organização com âmbito nacional, responsável por projetar e produzir painéis elétricos.

3.2 COLETA DE DADOS

Os dados e características dos painéis elétricos e suas instalações, necessários para o desenvolvimento do cálculo de energia incidente empregados neste estudo, foram obtidos em campo. A obtenção desses dados realizou-se por meio de *softwares*, ferramentas e equipamentos calibrados e certificados.

Para fidelizar este trabalho com a realidade das instalações elétricas brasileiras, foram obtidos dados de oito painéis elétricos típicos mais comercializados no Brasil durante os anos de 2014 e 2015, pela organização delimitada para o estudo. Etapas metodológicas foram determinadas para modelar e quantificar os dados de cálculo (Tabela 5).

Tabela 5: Dados Coletados dos Painéis Utilizados no Cálculo de Energia Incidente.

VARIÁVEIS DE CÁLCULO	PAINÉIS ELÉTRICOS TÍPICOS							
	QGBT TIPO 1	QGBT TIPO 2	CCM TIPO 1	CCM TIPO 2	QD TIPO 1	QD TIPO 2	QCFP TIPO 1	QCFP TIPO 2
V [kV]	0,44	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380	0,380
f [Hz]	60	60	60	60	60	60	60	60
Sistema	Trifásico	Trifásico	Trifásico	Trifásico	Trifásico	Trifásico	Trifásico	Trifásico
Ibf [kA]	65	50	50	25	15	5	50	25
G [mm]	25	20	15	20	15	10	15	20
K	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097	-0,097
K1	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555	-0,555
K2	0	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113	-0,113
Cf	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
D [mm]	455	455	455	455	455	455	455	455
x	1,641	1,641	1,641	1,641	1,641	1,641	1,641	1,641
t [s]	0,03	0,049	0,025	0,022	0,01	0,01	0,025	0,022

Fonte: O autor (2015).



3.3 PLANO DE ANÁLISE DOS DADOS

Por demandar uma série de cálculos para cada tipo de painel elétrico utilizou-se planilhas eletrônicas em *Excel* para calcular os resultados desejados, visto que, caso fossem realizadas manualmente o tempo demandado seria muito maior.

Com o intuito de alertar as pessoas sobre os riscos, um modelo de adesivo informando o perigo eminente é elaborado, conforme demonstrado pela Figura 5.



Figura 5: Modelo de Adesivo Informativo Sobre o Perigo do Arco Elétrico.
Fonte: O autor (2015).

Percebe-se na Figura 5, que as informações necessárias de segurança para os operários e transeuntes, estão em destaque, salientando o perigo do local. Ressalva-se que os adesivos devem ser fixados em locais adequados, deixando-os visíveis e em tamanho que facilite ao máximo a leitura e a compreensão dos dados.



4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DOS PAINÉIS SELECIONADOS PARA OS CÁLCULOS

Com o auxílio da planilha eletrônica de cálculo, os valores dos resultados obtidos de todos os painéis elétricos selecionados foram tabulados e comparados. Com o intuito de estabelecer uma ordem do maior ao menor risco de efeitos nocivos às pessoas e respectivas instalações.

A Tabela 6 demonstra os resultados obtidos de energia incidente, distâncias de segurança e EPIs apropriados.

Tabela 6: Resultados Gerais dos Cálculos de Energia Incidente.

PAINÉIS TÍPICOS	RESULTADOS		
	Energia Incidente E	Distância de Segurança DB [m]	ATPV Mínimo [cal/cm ²]
QGBT-1	4,16	2,32	ATPV 8
			Risco - 2
QGBT-2	3,4	2,06	ATPV 4
			Risco - 1
CCM-1	1,98	1,48	ATPV 4
			Risco - 1
QCFP-1	1,98	1,48	ATPV 4
			Risco - 1
CCM-2	0,91	0,92	Não exigido
QCFP-2	0,91	0,92	Não exigido
QD-1	0,27	0,44	Não exigido
QD-2	0,11	0,25	Não exigido

Fonte: O autor (2015).

4.2 ÁNALISE GRÁFICA DOS RESULTADOS

Com o término dos cálculos necessários, relações entre os resultados podem ser definidas. Variáveis fundamentais para o método de cálculo possuem grande influência no valor final de energia incidente.

Portanto, para demonstrar a ligação do tempo de interrupção (t) com o valor da energia incidente (E), utilizou-se como referência, o modelo do painel típico QGBT-1 com interrupção de 0,03 segundos. Como teste, o tempo (t) foi acrescido de forma gradativa,

observou-se então, uma progressão do valor da energia incidente, conforme ilustrado pela Figura 6.

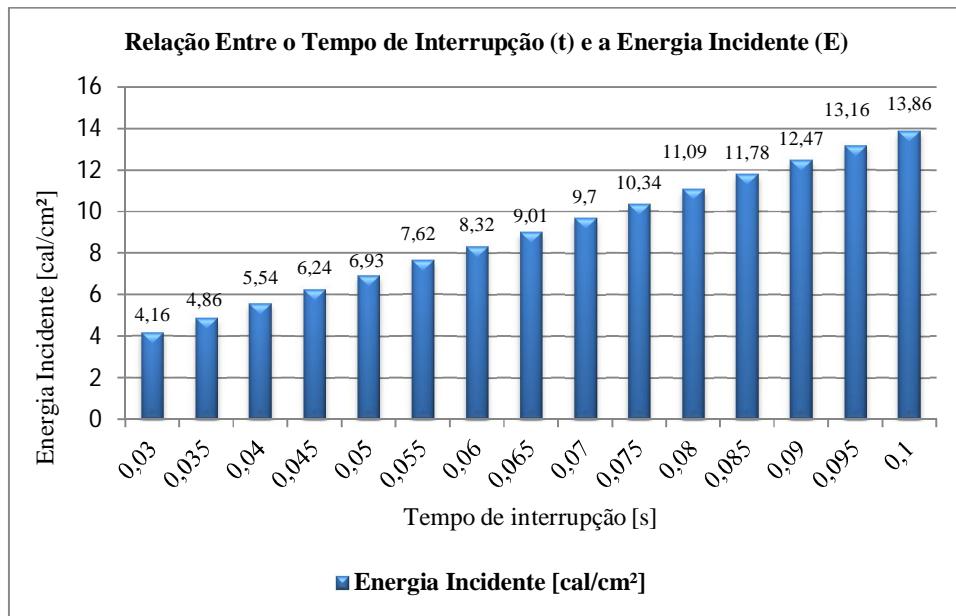


Figura 6: Comparação dos Valores de Tempo de Interrupção por Energia Incidente.

Fonte: O autor (2015).

Como se pode observar na Figura 6, o valor do tempo t é diretamente proporcional ao resultado da energia incidente. Percebe-se também, que as pequenas diferenças entre os tempos do teste, em torno de milissegundos, ocasionam aumento considerável da energia incidente.

Utilizando ainda como base o painel QGBT-1 para demonstração dos efeitos das variáveis de cálculo no resultado final, o valor da corrente de curto-circuito presumida (I_{bf}) afeta diretamente no resultado da energia (E). Conforme ilustrado pela Figura 7, mantendo os dados e características originais, diminui-se somente o valor de I_{bf} para a obtenção dos respectivos valores de E em cal/cm^2 .

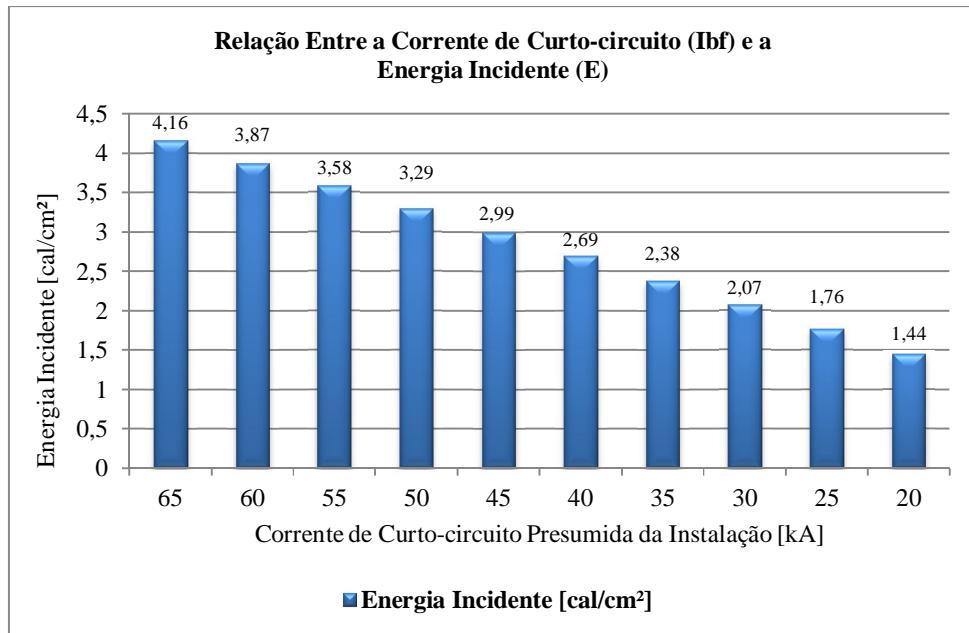


Figura 7: Comparação dos Valores de Corrente de Curto-circuito por Energia Incidente.
Fonte: O autor (2015).

Nota-se na Figura 7, que o comportamento de Ibf também possui a característica de ser diretamente proporcional ao valor da energia incidente, quanto maior o valor da corrente de curto-circuito, maior será o resultado da energia E.

Outra variável essencial para validação do método de cálculo e do resultado final é a distância entre os condutores (G). Este valor é mensurado por meio de equipamento de medição devidamente calibrado, haja vista que, é uma variável de grande importância para calcular de modo preciso a energia incidente (E). A Figura 8 ilustra o comportamento da distância G em relação a E.

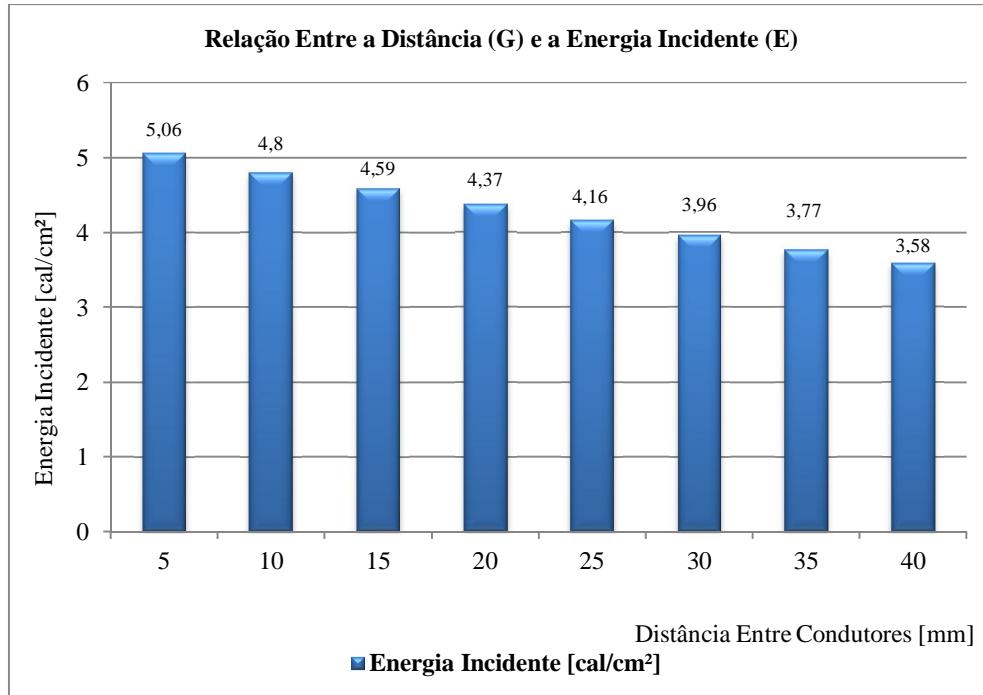


Figura 8: Comparação dos Valores da Distância Entre Condutores por Energia Incidente.
Fonte: O autor (2015).

Veja-se pelo gráfico da Figura 8, que a distância entre os condutores (G) é inversamente proporcional ao valor final da energia incidente (E). Torna-se uma opção viável para diminuir a quantidade de energia propagada em um arco elétrico, contudo, esta informação deve ser dimensionada antes da produção do painel elétrico, pois conforme já informado, implica em alterações no modo construtivo.

Em consequência das interações de todas as variáveis no resultado final, um gráfico comparativo das energias incidentes (E) com os respectivos painéis elétricos selecionados para o cálculo pode ser delineado. A Figura 9 classifica os painéis com suas respectivas energias (E).

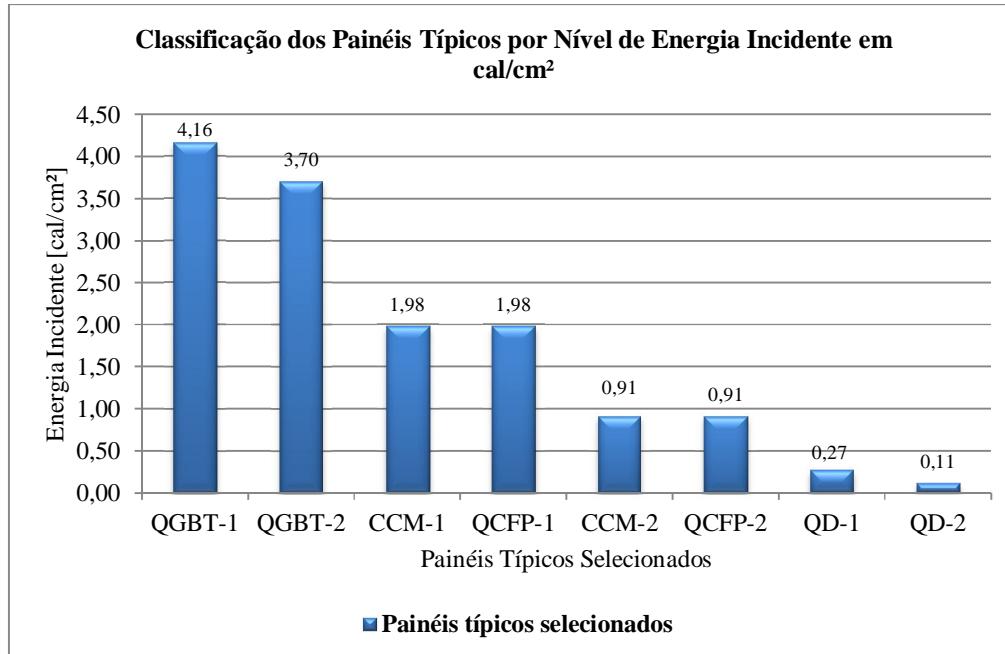


Figura 9: Classificação dos Painéis Selecionados por Energia Incidente.
Fonte: O autor (2015).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pela observação dos aspectos analisados no presente estudo, pesquisas contínuas sobre arcos elétricos em painéis de baixa tensão tornam-se vitais para maximizar a segurança dos trabalhadores, tanto os diretamente ligados ao setor elétrico, quanto os demais funcionários. Em suma, obter o máximo de informações sobre os equipamentos de proteção, as características dos dispositivos de interrupção de arco e os dados construtivos próprios das instalações elétricas do local, conforme o método de cálculo proposto pelo IEEE Std 1584-2002, que são essenciais para legitimar o resultado final da energia incidente.

Deste modo, pode-se afirmar que após a coleta dos dados, os resultados de energia incidente dos painéis elétricos típicos foram validados. De fato, os dados necessários foram levantados com a maior precisão possível, por meio de equipamentos e *softwares* adequados. A criação e utilização de planilha eletrônica em *Excel* ofereceu maior praticidade e agilidade no auxílio dos cálculos.

Definitivamente, o uso de EPIs para trabalhadores do setor elétrico é primordial. Sendo que as zonas de risco e o potencial energético podem ser determinados e calculados, categorizando o nível de proteção da instalação. Os equipamentos de proteção devem ser fornecidos aos trabalhadores com o propósito de amenizar os riscos de lesões. Leva-se em



consideração que o investimento realizado para a aquisição de vestimentas contra o arco elétrico, não se compara ao preço da vida de um trabalhador ou usuário do setor elétrico.

O estudo foi embasado em oito tipos de painéis elétricos de baixa tensão, sendo estes os mais comercializados em todo o território nacional entre 2014 e 2015. Seu conteúdo apresenta-se como referência futura para a determinação dos riscos do arco elétrico em diversos tipos de instalações, observando-se sempre as limitações impostas para o cálculo.

A presente pesquisa foi de grande importância ao acadêmico, pois veio corroborar a importância da apreensão dos conceitos e fundamentos da engenharia elétrica, no sentido de contribuir na identificação e avaliação de potenciais riscos e na posterior tomada de medidas preventivas. Como o tema é pouco explicitado nas matérias do curso de graduação, sua apropriação agregou novos conhecimentos, colaborando para o crescimento estudantil e tornando possível sua aplicabilidade na vida profissional.

Como sugestão para trabalhos futuros, ressalva-se pesquisas e estudos com painéis elétricos de diversas organizações, coletando dados construtivos característicos dos mesmos. A implantação de um método de cálculo para instalações de média e alta tensão, porque o IEEE Std 1584-2002 limita a tensão em 15.000 V.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.** Módulo 1, seção 1.0, rev. 6, f. 61, dez. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Conjuntos de manobra e controle de baixa tensão, NBR IEC 60439-1.** f. 76, 2003.

BROWN, B. **Arc Flash Hazard Considerations.** 2010. 8 f. Schneider-Electric. v. 12, jul/ago. 2000. Disponível em: <http://static.schneider-electric.us/assets/consultingengineer/appguidedocs/section11_0307.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2015.

COMITÊ DE GESTÃO EMPRESARIAL - COGE. **Relatórios de Estatísticas do Setor Elétrico.** v. 1, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.relatorio.funcoge.com.br/2013/indexpt.html>>. Acesso em: 09 ago. 2015.

COSTA, L.F. **Introdução ao uso de painéis elétricos.** O setor elétrico. 96. ed. p. 30-39, jan. 2014.



FELIPINI, C. L. **Introdução à modelagem física e matemática do escoamento em tochas plasma térmico**. 2009. Universidade São Judas Tadeu. São Paulo. v. 47, p. 363-367.

GREVEN, H.A.; FAGUNDES, H.A.V.; EINSFELDT, A.A. **ABC do Conforto Acústico**. WORD Comunicação. v. 2, f. 41, jun. 2006.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE. **IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations**: IEEE Std 1584-2002. 2002, f. 121.

LAGRECA, O. **Estudo da viabilidade da utilização da técnica de ultrassom para a detecção da ocorrência de arco elétrico**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://dippg.cefetrj.br/index.php?option=com_docman&task=search_result&Itemid=23>. Acesso em: 02 ago. 2015.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. **Manual de orientação para especificação das vestimentas de proteção contra os efeitos térmicos do arco elétrico e do fogo repentino**. 2015. f. 14. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/data/files/8A7C816A31F92E6501321734945907BD/manual_vestimentas.pdf>. Acesso em: 16 ago. 2015.

(____). **Norma Regulamentadora NR 6: Equipamento de Proteção Individual - EPI**. 2015, f. 8. Disponível em: <<http://www.mte.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR6.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION - NFPA. **Standard for Electrical Safety in the Workplace**: NFPA 70E. 2012, f. 109.

O SETOR ELÉTRICO. **Quadros, painéis e montadores**. ed.111, p. 94-112, abr. 2015.

PFEIFFER ENGINEERING CO. **Arc Flash: Do You Understand the Dangers?**. 2008. Louisville. f. 20. Disponível em: <www.pfeiffereng.com/Arc_Flash_Article.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2015.

QUEIROZ, A.R.S.; SENGER, E.C. **A Natureza e os riscos do arco elétrico**. O Setor Elétrico. ed. 72, p. 46-51, mar. 2012.

(____). **A NFPA 70E e os métodos para cálculo de energia incidente**. O Setor Elétrico. ed. 75, p. 36-40, mai. 2012.

(____). **A IEEE 1584 e os métodos de cálculo de energia incidente**. O setor elétrico. ed. 76, p. 34-39, mai. 2012.

VR PAINÉIS. **Banco Automático de Capacitores**. São Paulo, 2015. Disponível em: <<http://www.vrpaineis.com.br/index.php/banco-automatico-de-capacitores>>. Acesso em: 10 out. 2015.