

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**DJALMA GAMIS DE OLIVEIRA  
GUILHERME RAMALHO GAMIS DE OLIVEIRA**

**LIMITES DA ENERGIA INCIDENTE DE ARCO ELÉTRICO GERADA POR CURTO  
CIRCUITO**

**VOLTA REDONDA  
2017**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**LIMITES DA ENERGIA INCIDENTE DE ARCO ELÉTRICO GERADA  
POR CURTO CIRCUITO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Alunos:

Djalma Gamis de Oliveira

Guilherme Ramalho Gamis de Oliveira

Orientador: Prof. MSc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

**VOLTA REDONDA  
2017**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Djalma Gamis de Oliveira  
Guilherme Ramalho Gamis de Oliveira

Título da monografia:

Limites da energia incidente de arco elétrico gerada por curto circuito

Orientador:

Prof. MSc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

Banca Examinadora:

---

---

---

*“Uma mente que se abre a uma nova ideia jamais  
volta ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

## **AGRADECIMENTOS**

Acima de tudo a Deus, por ter nos guiado, dado nos força e saúde para chegarmos até aqui.

Eu Guilherme, agradeço em especial a minha mãe Viviane, por toda a paciência e ensinamentos sobre a “escola da vida”. Ao meu Pai Djalma, que além dos ensinamentos e experiências diariamente compartilhados, também compartilhamos do mesmo sonho e de sua realização em conjunto. Ao meu padrasto Guilherme, por ser uma verdadeira “enciclopédia ambulante”. Por fim ao meu irmão Gabriel, por cada ensinamento cumprindo seu papel de irmão mais velho.

Eu Djalma, agradeço a minha mulher Valéria por ao longo de todo esse tempo ter me apoiado incondicionalmente na realização deste sonho e a ela peço desculpas pelas ausências, aos meus enteados e filhos, Igor, Pedro, Gabriel e em especial ao meu filho Guilherme, que sempre esteve ao meu lado no sentido literal da palavra, acompanhando de perto todas as minhas vitórias e derrotas e agora juntos comemorando esta grande vitória.

Juntos agradecemos a todos familiares e amigos que estiveram presentes durante toda essa jornada e aos que gostariam de estar, contudo, por algum motivo não puderam, mas enviaram todas energias positivas e pensamentos, aos que se tornaram parte da nossa família durante essa caminhada e puderam acompanhar de perto essa conquista. Pedimos desculpas pelas ausências em decorrência da dedicação Curso de Engenharia. Ao nosso orientador Prof. MSc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva, pela oportunidade e apoio na elaboração e conclusão deste trabalho. Aos amigos e colegas de classe e também aos que conhecemos no decorrer do curso, pelo incentivo e apoio constante durante esta jornada. A todo corpo docente e funcionários do curso de graduação em engenharia elétrica do UniFOA.

## RESUMO

A norma regulamentadora do Ministério do Trabalho e Emprego número 10, NR10, cita que todos os serviços em instalação e serviços de eletricidade deverão ser executados preferencialmente em linhas desenergizadas, mas nem sempre isso é possível, até mesmo pela disponibilidade do sistema, estando as linhas energizadas, surge então os riscos de choque e principalmente do arco elétrico gerado por curtos circuitos. O objetivo deste trabalho é informar a importância de prever os limites da energia incidente geradas por curtos circuitos e através dos cálculos da energia incidente, definir as distâncias admissíveis e as roupas de proteções adequadas, podendo assim o profissional definir estratégias seguras de aproximação para execução de determinadas tarefas, evitando riscos desnecessários na execução de serviços com eletricidade, tomando todas as medidas de controle possíveis para se evitar queimaduras e outros acidentes de origem elétrica. Os cálculos da Energia incidente, também serão os parâmetros para a definição do ATPV das vestimentas a serem utilizadas pelos profissionais da área de eletricidade e também para demarcação das áreas de risco dentro de subestações unitárias e afins.

Palavra-chave: Energia incidente; ATPV, Vestimentas, Arco elétrico.

## SUMARIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 ESTATÍSTICAS DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA.....</b>	<b>16</b>
<b>3 CIRCUITO ELÉTRICO .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 CURTO-CIRCUITO .....</b>	<b>18</b>
<b>3.1.1 ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES DE CURTO .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DE UM CURTO CIRCUITO.....</b>	<b>22</b>
<b>3.1.3 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2 ARCO ELÉTRICO GERADO PELO CURTO-CIRCUITO .....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.1 CARACTERÍSTICAS DOS ARCOS ELÉTRICOS:.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.2 CAUSAS DE UM ARCO ELÉTRICO .....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.3 CONSEQUÊNCIA DOS ARCOS ELÉTRICOS:.....</b>	<b>28</b>
<b>3.3 ENERGIA INCIDENTE .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.2 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3.3 COLETA DE DADOS DA INSTALAÇÃO E DO SISTEMA .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.4 DETERMINAÇÃO DOS MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.5 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3.6 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO .....</b>	<b>34</b>
<b>3.3.7 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO ...</b>	<b>35</b>
<b>3.3.8 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES E CLASSE DOS EQUIPAMENTOS....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.9 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE TRABALHO .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.10 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE NOS EQUIPAMENTOS .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.11 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE APROXIMAÇÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>4 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>41</b>
<b>4.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA.....</b>	<b>41</b>
<b>4.2 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.1 CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2 CÁLCULO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE ALIMENTAÇÃO EM MÉDIA TENSÃO REFERIDA AO LADO DE BAIXA TENSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.4 CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS DOS CABOS DE MÉDIA TENSÃO REFERIDA AO LADO DE BAIXA TENSÃO.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.5 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR .....</b>	<b>45</b>

4.2.6	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO .....	45
4.2.7	CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO CIRCUITO .....	46
4.2.8	CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO .....	46
4.3	CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO 46	
4.3.1	CÁLCULO DO LOGARÍTMO DA CORRENTE DO ARCO .....	46
4.3.2	CÁLCULO DA CORRENTE DO ARCO.....	47
4.4	TEMPO DE ATUAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO.....	47
4.5	DETERMINAR AS DISTÂNCIAS DE TRABALHO.....	47
4.6	CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE.....	48
4.6.1	CÁLCULO DO LOGARÍTMO DA ENERGIA NORMALIZADA .....	48
4.6.2	CÁLCULO DA ENERGIA NORMALIZADA.....	48
4.6.3	CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE .....	48
4.7	CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE APROXIMAÇÃO .....	49
5	MEDIDAS DE PROTEÇÃO.....	50
5.1	VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO.....	50
6	CONCLUSÃO .....	53
7	GLOSSÁRIO.....	54
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Indicadores de Segurança do Trabalho e das Instalações.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2 Circuito elétrico - configuração do SEP .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3 - Corrente de curto simétrico .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4 - Corrente simétrica de curto circuito.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 5 - Corrente parcialmente assimétrica.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 6 - Corrente totalmente assimétrica.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 7 – Correntes assimétricas e simétricas .....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 8 - Capacidade de Interrupção .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 9 - Natureza direcional do arco sem comportamento caótico.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 10 - Ocorrência de um arco elétrico controlado .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 11 – Ocorrência de arco elétrico não controlado .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 12 - Energia Incidente .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 13 – Determinação da energia incidente. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 14 - Danos causados em painéis elétricos pela energia incidente .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 15 – Unifilar da SE em estudo .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 16 - Placa de advertência nível da energia incidente. ....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 17 - Roupas de proteção térmicas .....</b>	<b>52</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Fator da distância em função da classe de tensão.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 2 – Tempo de abertura para disjuntores de potência .....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 3 - Tipo de equipamento e distância de trabalho típica.....</b>	<b>37</b>
<b>Tabela 4 - Vestimentas e equipamentos de proteção (EPI) .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 5 - Raios de delimitação das zonas de risco, controlada e livre.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1 - Cálculo da corrente de curto circuito. ....	33
EQUAÇÃO 2 Cálculo do logaritmo da corrente do arco .....	34
EQUAÇÃO 3 – Cálculo do logaritmo da corrente do arco .....	35
EQUAÇÃO 4 - Cálculo da corrente do arco.....	35
EQUAÇÃO 5 Cálculo do logaritmo da energia normalizada.....	38
EQUAÇÃO 6 - Cálculo da energia normalizada .....	39
EQUAÇÃO 7 - Cálculo da energia incidente .....	39
EQUAÇÃO 8 Cálculo da energia incidente.....	39
EQUAÇÃO 9 - Cálculo da distância de aproximação da falta.....	40

## LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRACOPEL – Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANSI – American National Standards Institute

ASTM - American Society for Testing and Materials

ATPV – Arc Thermal Performance Value

CCM – Centro de Comado de Motores

CENELEC – Comité Européen de Normalisation Électrotechnique

CLT – Consolidação das Leis Trabalhistas

EBT – Energy Breakopen Threshold

EPC – Equipamento de Proteção Coletivo

EPI – Equipamento de Proteção Individual

FR – Fire Resistant

FUNCOGE – Fundação Comitê de Gestão Empresarial

FUNDACENTRO – Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança Saúde e Medicina do Trabalho

IEC – International Electrotechnical Commision

IED – Intelligent Electronic Device

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineer

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego

NACTER - Número de acidentes com terceiros envolvendo a rede elétrica e demais instalações

NBR – Norma Brasileira Registrada

NBR 5410 – Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão

NEC – National Electrical Code

NESC – National Electrical Safety Code

NFPA - National Fire Protection Association

NFPA – National Fire Protection Association

NMOFUPR - Número de mortes de decorrentes de acidentes do trabalho (funcionários próprios)

NMOFUTE - Número de mortes decorrentes de acidentes do trabalho (funcionários terceirizados)

NMOTER - Número de mortes decorrentes de acidentes com terceiros envolvendo a rede elétrica

NR 10 – Norma Regulamentadora Número 10

NR-6 – Norma Regulamentadora número 6

OHSAS – Occupational Health and Safety Assessment Services

OSHA – Occupational Safety and Health Administration

SE – Subestação de Entrada

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SU – Subestação Unitária

## **LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO I - Raios de delimitação zona de risco e zona controlada.....</b>	<b>60</b>
--	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Todos profissionais da área de elétrica, principalmente aquele que trabalham diretamente em equipamentos ou instalações elétricas energizadas, estão sujeitos aos riscos de eletrocussão ou queimaduras geradas pela energia incidente do arco elétrico, existe uma grande evolução tanto das normas de segurança quanto dos procedimentos das empresas no sentido de minimizar as consequências causadas por estas situações. A norma Regulamentadora NR 10 preconiza em seu item 10.6.2 que trabalhos que exijam o ingresso nas zonas de risco, zonas controladas e zonas livre, devem ser realizados mediante procedimentos específicos e detalhados respeitando distâncias que previstas pela própria norma (anexo I).

Os riscos de morte causadas por choque ou arcos elétricos são eminentes, um disjuntor quando manobrado ou uma manutenção em um circuito energizado podem gerar um arco elétrico proveniente de uma falta, onde seus efeitos são inimagináveis e como consequência causar danos irreversíveis aos profissionais que estiverem trabalhando no local onde ocorrer o evento. É muito comum queimaduras de até terceiro grau e danos nas retinas, outra situação que ocorre próximo a um acidente com arco elétrico são as altas pressões geradas pela onda de energia da explosão.

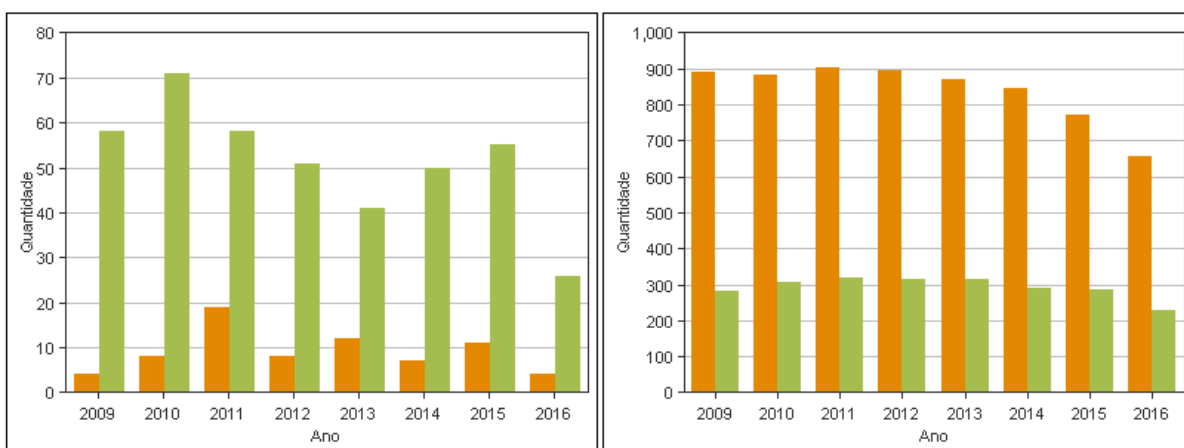
A partir da década de 70, mais precisamente a partir de 1975 iniciaram-se os estudos sobre o isolamento elétrico dos condutores e propagação de fogo em cabos elétricos no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade da Califórnia em Berkeley, Estados Unidos, iniciando também os estudos sobre energia incidente. Em 1982, Ralph Lee, engenheiro eletricista, escreveu um artigo sobre o assunto, *The Other electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns* (o outro perigo da eletricidade: as queimaduras por arco elétrico), que trouxe a primeira modelagem matemática da energia incidente, onde se comprovou que a temperatura de um arco elétrico cresce exponencialmente chegando a grandezas da ordem de 20.000 °C ou mais. Nos dias de hoje existem modelos matemáticos mais precisos, programas computacionais que processam centenas de informações simultânea delimitando a energia incidente e as distâncias seguras de aproximação para execução de uma tarefa segura.

## 2 ESTATÍSTICAS DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA

Os principais riscos de acidente com eletricidade são: o choque; arco elétrico e a exposição a campos eletromagnéticos, no que diz respeito ao choque e arco elétrico, ambos, podem causar incêndios, mortes, agravar situações e causar outras vítimas.

Dentro do decreto-lei 5.452 de 1943, que é a CLT – Consolidação das Leis trabalhistas, no Título II, O capítulo V, com a inserção dos artigos de 154 a 201, criados pela lei 6514 de 1977, estipulam os direitos e deveres do governo empregados e empregadores, quer seja esfera federal, estadual ou municipal na área da Segurança e da Medicina do Trabalho, essas leis foram regulamentadas através da Portaria número 3.214/78 que instituiu as NR's -Normas Regulamentadoras do Trabalho Urbano, Rural e Marítimo, totalizando hoje 36 normas.

No Brasil as estatísticas que relacionam os acidentes de trabalho são encontradas no site do ministério do trabalho e emprego, porém, não é especificada a origem do acidente, a ANEEL informa de forma não oficial alguns acidentes de origem elétrica, esses acidentes não refletem o quadro real brasileiro, uma vez que estas estatísticas são somente das empresas que fazem parte da FUNCOGE. Atualmente a FUNCOGE reúne em seu quadro de mantenedoras do setor de energia elétrica 73 empresas públicas e privadas, estas são responsáveis por mais de 90% de toda a eletricidade gerada, transmitida e distribuída no Brasil. As empresas informam de forma não obrigatória os acidentes ocorridos conforme figura 1, recentemente outra associação ABRACOPEL, começou uma pesquisa de estatísticas de acidentes de origem elétrica mais completa, porém não se trata de organismo oficial do governo.





	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>NMOFUPR</b>	4	8	19	8	12	7	11	4
<b>NMOFUTE</b>	58	71	58	51	41	50	55	26
<b>NACTER</b>	892	881	902	895	871	846	773	657
<b>NMOTER</b>	282	306	317	315	314	292	287	229

Figura 1 - Indicadores de Segurança do Trabalho e das Instalações

Fonte: <<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/IndicadoresSegurancaTrabalho/pesquisaGeral.cfm>>>

### 3 CIRCUITO ELÉTRICO

Um circuito elétrico básico é composto por uma fonte geradora, uma carga e um seccionador, dependendo da configuração outros componentes poderão ser inseridos resistores, capacitores, indutores entre outros dispositivos, são conectados entre si por meios de cabos ou barramentos, formando então a malha do circuito elétrico, quando o seccionador é fechado e existindo uma diferença de potencial entre os polos do seccionador, existirá um deslocamento de elétrons ao longo do circuito, este fluxo de elétrons se denomina corrente elétrica, conforme figura 2.

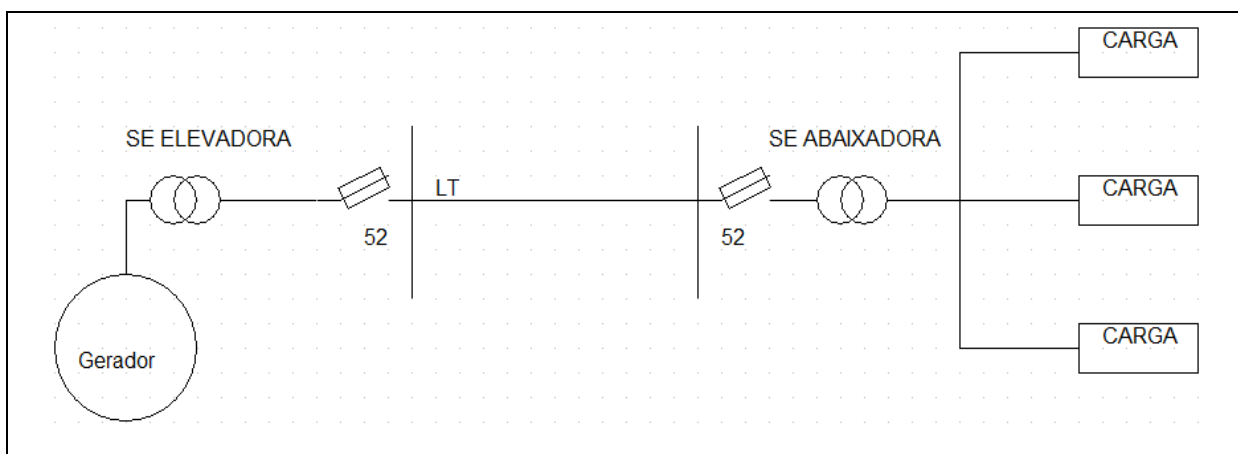


Figura 2 Circuito elétrico - configuração do SEP

Fonte: Autores

### 3.1 CURTO-CIRCUITO

A corrente elétrica sempre procura o caminho de menor resistência para completar o circuito, quando esta impedância se reduz a um nível muito baixo entre dois pontos de potenciais diferentes, teremos então um aumento significativo da corrente elétrica, pela própria lei de Georg Simon Ohm<sup>1</sup>, Lei de Ohm, que enuncia: “*A corrente elétrica é diretamente proporcional a tensão elétrica aplicada ao circuito e inversamente proporcional a resistência elétrica deste circuito*”, então sendo a impedância da linha diminuída, tendendo a zero, a corrente aumentará á proporção inversa, tendendo a um valor muito alto, dependendo das características do circuito.

O curto circuito ocorre quando há uma falha na isolação elétrica entre dois pontos de potenciais diferentes e a corrente elétrica que percorre o circuito retorna a fonte por um caminho mais curto.

A isolação elétrica pode ser sólida, quando o isolamento é feito por material sólido, como o cloreto de polivinila (PVC) ou outro material sólido isolante. Líquida, quando o isolamento é feito por um material liquido, como o óleo isolante ou outro líquido inerte. Gasosa, quando o isolamento é feito pelo próprio ar ou uma atmosfera inerte, que não conduza corrente elétrica.

Quando dois pontos de potenciais diferentes se conectam por motivos de falha, temos o curto circuito, neste caso a corrente de curto circuito circulando atingindo grandezas da ordem de 10 a 100 vezes o valor nominal da corrente que circula no ponto da falha.

Esta corrente elétrica intensa causa danos não só aos circuitos elétricos como também aos equipamentos, este tipo de curto é chamado de curto circuito sólido ou curto circuito franco. Outro tipo de curto circuito é o arco elétrico quando não existe o contato físico dos potenciais, o que ocorre é a disrupção do dielétrico conectando um potencial ao outro através do ar, quando ocorre o arco ocorre também uma grande dissipação de energia seguida de explosão, fogo e um superaquecimento do condutor, essa dissipação de energia recebe o nome de energia incidente liberada.

Paralelamente ao curto circuito e a energia incidente liberada, surgem os esforços mecânicos nos condutores elétricos ou entre componentes do equipamento,

---

<sup>1</sup> (Erlangen, 16 de março de 1789 — Munique, 6 de julho de 1854), físico e matemático alemão, irmão do matemático Martin Ohm, enunciou em 1827 e publicou a monografia Estudo Matemático da Corrente Galvânica, na qual esclarece as diferenças entre a eletricidade térmica e a galvânica, entre intensidade e quantidade de eletricidade.

como exemplo uma tensão de 10 KV com uma corrente de curto de 40 KA, estima-se que a pressão entorno do arco leva 10 ms para atingir 15 T/m<sup>2</sup>, a temperatura do arco aumenta podendo atingir grandezas da ordem de 20.000 °C.

Quando ocorre o curto circuito a corrente sobe muito rapidamente até um valor de crista e diminui exponencialmente passando pelos valores transitórios, subtransitórios até atingir o regime estacionário ou permanente (figura 3)

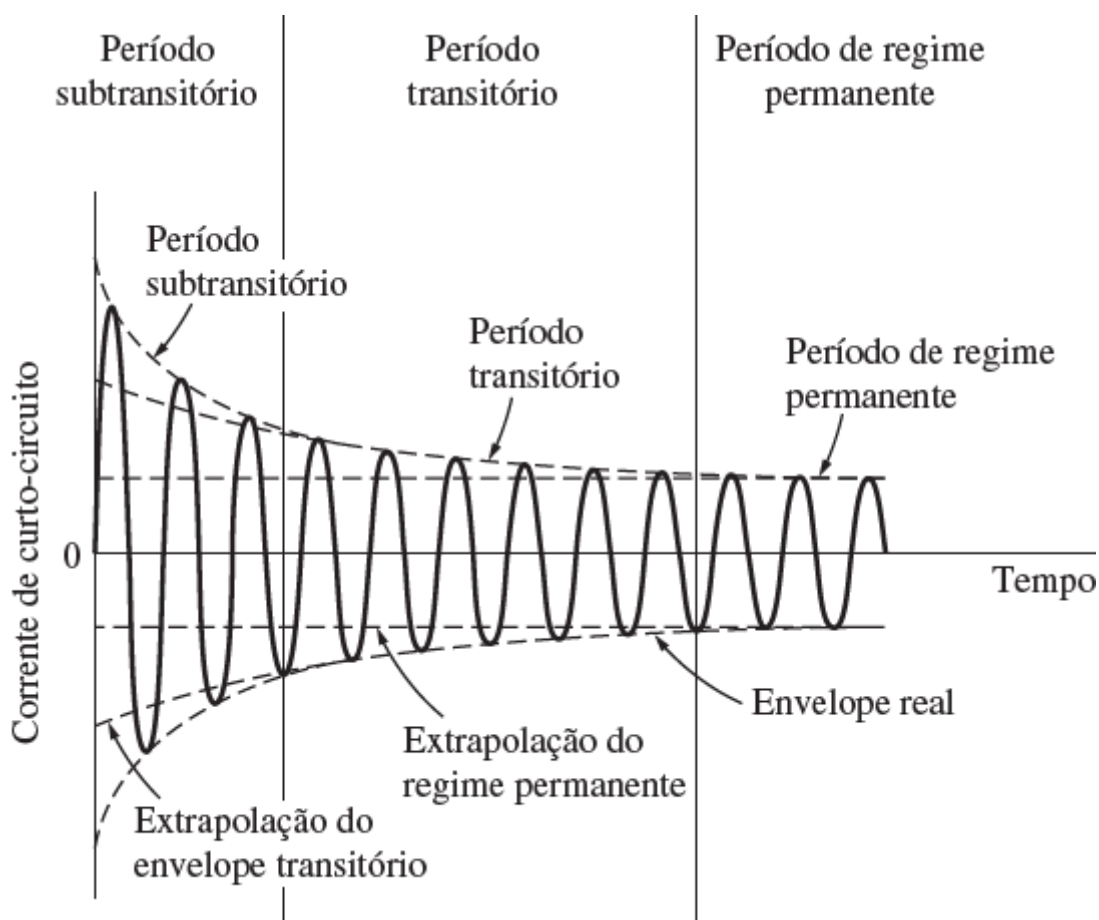


Figura 3 - Corrente de curto simétrico  
Fonte: Chapman 5ª edição

### 3.1.1 ANÁLISE DAS FORMAS DE ONDA DAS CORRENTES DE CURTO

Mamede (2007), esclarece que as correntes de curtos circuitos se caracterizam pelas influências das correntes de defeitos em função das fontes geradoras. Ao longo de todo o período de permanência da falta as correntes assumem formas diversas quanto a sua posição em relação ao eixo dos tempos.

Corrente simétrica de curto circuito é aquela em que a componente senoidal se forma simetricamente em relação ao eixo dos tempos (figura 4), típica das correntes de curto permanentes

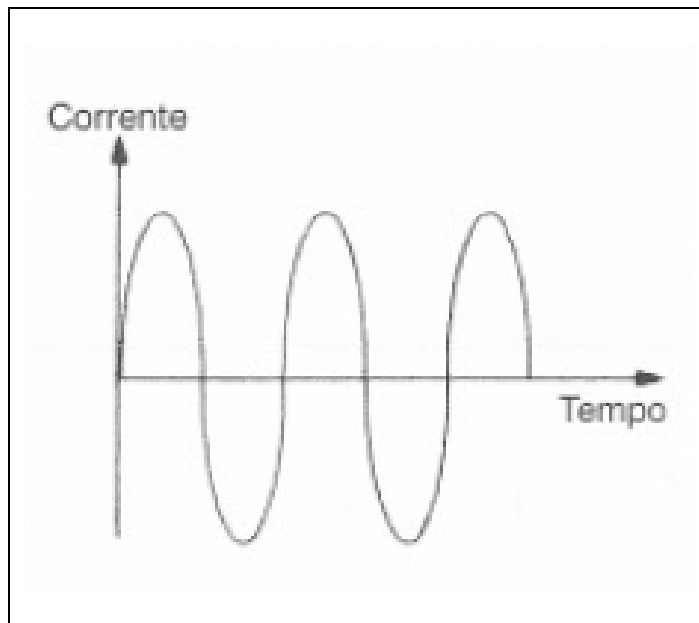


Figura 4 - Corrente simétrica de curto circuito  
Fonte: Instalações elétricas Industriais - Mamede.

Corrente assimétrica de curto circuito é aquela em que a componente senoidal se forma de modo assimétrico em relação ao eixo dos tempos, pode assumir formas distintas, parcialmente assimétrica a assimetria acontece de forma parcial (figura 5).

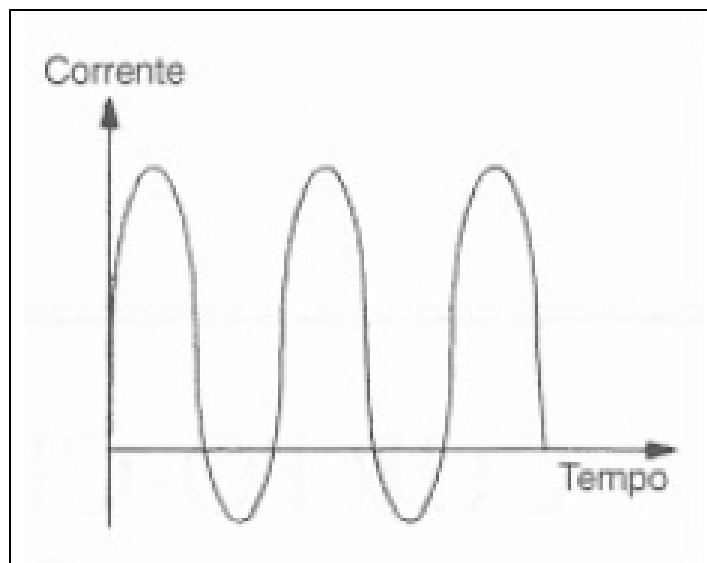


Figura 5 - Corrente parcialmente assimétrica  
Fonte: Instalações elétricas Industriais - Mamede

Totalmente assimétrica toda a senoide se situa acima do eixo dos tempos (figura 6).

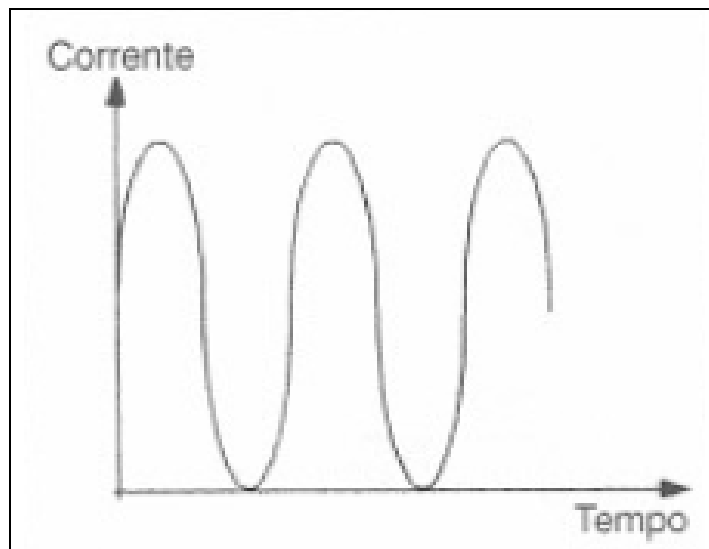


Figura 6 - Corrente totalmente assimétrica  
Fonte: Instalações elétricas Industriais - Mamede

Corrente assimétrica e simétrica, neste caso a assimetria é temporária tendo um início assimétrico e passado posteriormente para simétrico (figura 7)

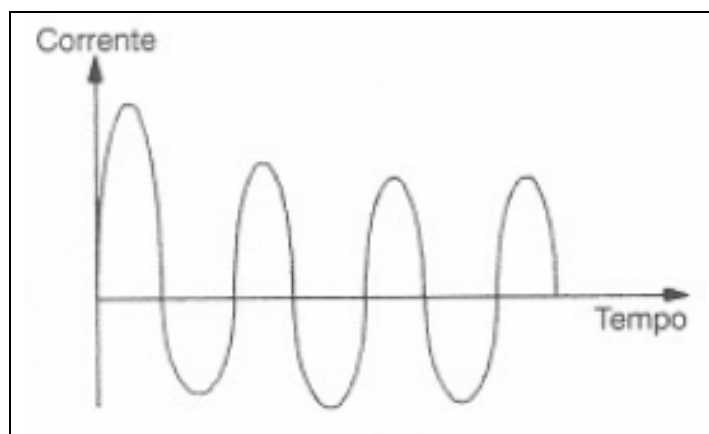


Figura 7 – Correntes assimétricas e simétricas  
Fonte: Instalações elétricas Industriais - Mamede

A NBR 5410/2008 em seu item 5.3.5.1, Determinação das Correntes de Curto-Circuito Presumidas, cita que “As correntes de curto-circuito presumidas devem ser determinadas em todos os pontos da instalação onde for julgado necessário, essa determinação pode ser efetuada por cálculo ou por medição”.

Kindermann (1997) cita que as correntes de curto circuitos deverão ser conhecida em todo o sistema elétrico para todos e possíveis defeitos e que o conhecimento da corrente de curto atende a diversos objetivos como por exemplo;

Dimensionamento das linhas de transmissão em relação ao limite suportável de elevação da temperatura; Dimensionamento de disjuntores quanto a seção dos seus contatos e a capacidade disruptiva da câmara de extinção de arco; Dimensionamento de Transformadores; Efetuar coordenação dos relés de proteção e conhecer o tempo de atuação dos relés conseqüentemente o tempo da eliminação do defeito, porém conforme norma NFPA 70E deve-se acrescentar o cálculo da energia incidente.

Para o cálculo da corrente do curto circuito algumas informações básicas são necessárias, local exato do curto circuito, se no gerador, linha de transmissão ou painéis elétricos, se o curto circuito é trifásico, bifásico, monofásico para terra ou bifásico para terra, as reatâncias no local do curto, a impedância do circuito, a potência ou a corrente de carga da linha, a partir destes dados calcula-se a corrente de curto circuito.

Após a ocorrência de um arco elétrico, mesmo com cálculos estimados, não se pode afirmar de forma categórica como será o comportamento do curto circuito, a própria norma IEEE 1584, cita que mesmo com configurações idênticas, todo o comportamento de um curto circuito é diferente, mesmo que a extensão da avaria dependa da configuração envolvida.

### **3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DE UM CURTO CIRCUITO**

Sendo o curto circuito uma ligação de baixa impedância entre dois pontos de potenciais diferentes, existem algumas características que o definem, dentre as mais usuais destacam-se três: O tempo de duração, a origem e o tipo em relação as fases.

Tempo de duração do curto circuito: É o tempo em que os curtos circuitos permanecem ativos, normalmente é da ordem de milésimos de segundo e estes podem ser divididos também em auto-extinguíveis, transitórios ou estacionários.

Origem do curto circuito: É a forma como surge o curto circuito podendo ser por falha de isolamento, sobretensões transitórias geradas por pico de tensão, descargas atmosféricas ou falha mecânica.

Tipo de curto circuito: Os curtos circuitos podem ser monofásicos, onde ocorre o curto entre uma das fases e o condutor de proteção, bifásico onde ocorre o curto entre duas fases e o condutor de proteção, trifásico onde ocorre o curto entre as três

fases é o condutor de proteção, pode ocorrer ainda o curto bifásico o trifásico sem a presença do condutor de proteção (terra).

### 3.1.3 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO

Muito importante é o cálculo da corrente de curto em circuitos elétricos, nestes cálculos são definidos todos os requisitos elétrico e mecânicos dos dispositivos de proteção, resistência mecânica dos painéis e barramentos, com ele também é especificada a base para o cálculo da energia incidente do arco elétrico.

Merlin (2015), o curto circuito mais crítico é o trifásico e com base nestes valores são especificadas as proteções do sistema, também é o curto circuito com menor probabilidade de ocorrência, de qualquer forma protege-se um sistema elétrico pela situação mais crítica. A determinação correta da corrente de curto circuito é tão importante quanto a determinação da corrente nominal, o tamanho do sistema deve ser criteriosamente avaliado para a definição do valor da corrente de curto circuito, os disjuntores e fusíveis devem ser dimensionados dentro de sua adequada capacidade de interrupção, permitindo a sua abertura segura para a máxima corrente de curto circuito que poderá fluir dentro do sistema. Esta corrente é diretamente proporcional ao tamanho do sistema, (sua capacidade de fornecer energia) e não tem relação com a carga do ramal a ser protegido (figura 8).

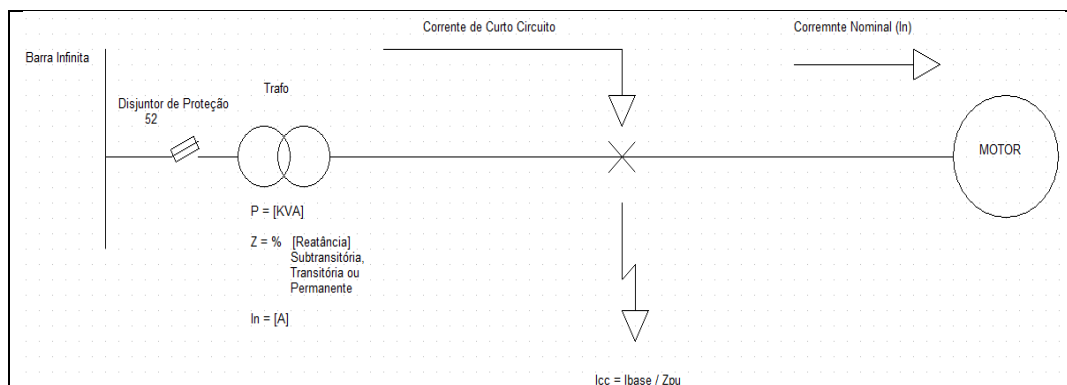


Figura 8 - Capacidade de Interrupção  
Fonte: Autores

O cálculo da Corrente de curto circuito, será demonstrado no estudo de caso capítulo 3, item 3.3.5 e um exemplo prático no capítulo 4 item 4.2.8.

### 3.2 ARCO ELÉTRICO GERADO PELO CURTO-CIRCUITO

Além do curto circuito sólido, que é aquele onde há o contato físico entre as partes em curto, existe também o curto circuito por arco elétrico, que é mais comum, sempre que ocorre uma falha de isolamento entre dois potenciais diferentes através do ar, podendo ser entre fases ou entre fases e terra, estabelece o arco elétrico que é caracterizado pela ionização da atmosfera na região do curto circuito, o ar nesta região se torna um condutor gasoso e a corrente elétrica circulará por esse meio, essa corrente elétrica será menor que a do curto circuito sólido.

Para Queiroz e Senger (2012), 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, sendo que a maioria dessas faltas é iniciada por meio de um curto-circuito do tipo 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 caótico, pois envolve uma rápida e irregular mudança na geometria do arco devido à convecção, aos jatos de plasma e às forças eletromagnéticas.

Queiroz e Senger (2012), citam também que 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, a figura 9 demonstram a natureza direcional de um arco elétrico, porém não ilustra o comportamento caótico, observa-se que as corrente alternada das três fases criam forças magnéticas sucessivas de atração e repulsão, movimentando de forma intensa os jatos de plasma, que, por sua vez, alimentam uma nuvem de plasma.



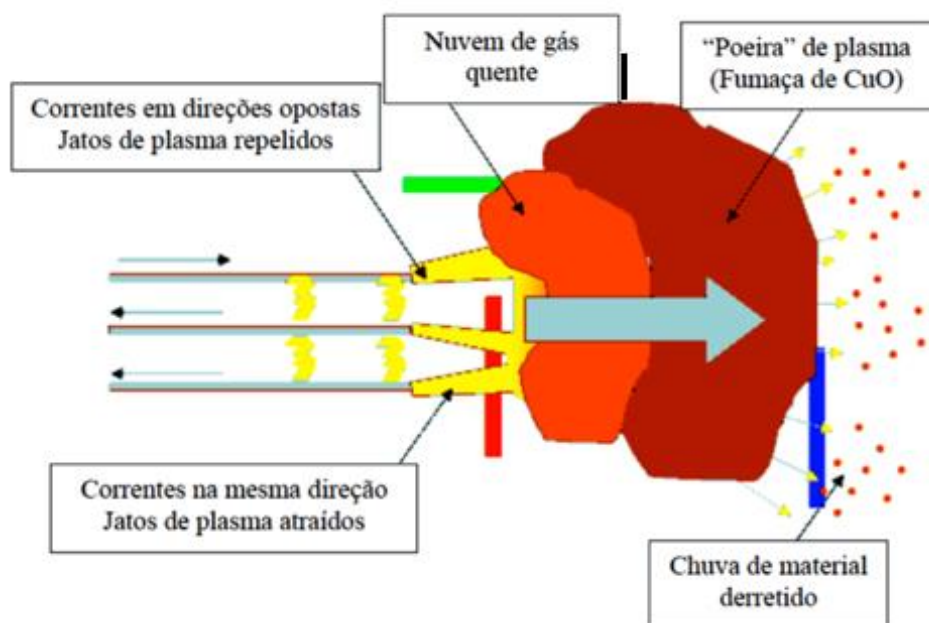


Figura 9 - Natureza direcional do arco sem comportamento caótico.

Fonte: O setor elétrico edição 72

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, complementam.

Tomiyoshi (2009) considera que a energia incidente liberada por um arco elétrico é extremamente alta e pode causar ferimentos severos até a uma distância de três metros do ponto de falha. O mesmo acontece no caso de distância menor em equipamentos de baixa tensão. A energia liberada varia de acordo com a configuração do sistema elétrico e nível de curto circuito disponível no ponto da falha.

Segundo Manual de Orientação do MTE (2016), arco elétrico é gerado pela ionização de gás como consequência de uma conexão elétrica entre dois eletrodos de diferentes fases ou entre um eletrodo e um circuito de terra. Normalmente é gerado acidentalmente devido à falha de equipamentos em curto circuito e libera grande quantidade de energia calorífica num curto intervalo de tempo, capaz de provocar a fusão de metais componentes dos equipamentos, que podem ser lançados contra

pessoas e objetos que estejam nas proximidades causando queimaduras severas e combustão.

### **3.2.1 CARACTERÍSTICAS DOS ARCOS ELÉTRICOS:**

O arco elétrico é muito perigoso quando ocorre de forma não controlada, dependendo do ponto da falha queimaduras fatais poderão ocorrer até mesmo a uma distância de 3 metros. As principais características do arco elétrico são: Grande dissipação de energia, seguida de explosão e fogo; curta duração da ordem de milésimo de segundos; as temperaturas geradas podem atingir grandezas da ordem entre 6.000°C a 30.000°C.

### **3.2.2 CAUSAS DE UM ARCO ELÉTRICO**

É comum a ocorrência dos arcos elétricos em circuitos elétricos, porém de forma controlada como nos casos de abertura de chaves e disjuntores de circuito elétricos (figura 10), interruptores, seccionadores, solda á arco e outros. O grande problema do arco é quando este acontece de forma não controlada (figura 11), como nos casos de curtos circuitos (Riscos Elétricos - SENAI 2011).



Figura 10 - Ocorrência de um arco elétrico controlado  
Fonte: SENAI - 2011



Figura 11 – Ocorrência de arco elétrico não controlado  
Fonte: SENAI 2011

Normalmente os arcos elétricos são produzidos por: abertura de um circuito com carga; mau contato; pela perda de pressão dos parafusos de conexão; depreciação da isolação (sobretensão, sobrecarga e fim de vida do dielétrico); defeito de fabricação de componentes ou equipamento (quando não detectada no início, o mesmo aparece ao longo da vida); projeto e instalação inadequada ou mal dimensionada; manutenção inadequada (introdução de mudanças sutis, sem avaliação técnica adequada); contatos acidentais ou inadvertidos de ferramentas ou peças (Erro humano); contaminação do ambiente (ratos, gatos, animais em geral e também pelo excesso de umidade, água).

Falhas por arco elétrico nesta condição provoca a ionização do ar, que tem sua temperatura aumentada derretendo materiais metálicos e condutores, essa explosão de calor é chamada de energia incidente.

### **3.2.3 CONSEQUÊNCIA DOS ARCOS ELÉTRICOS:**

Como consequência do aumento da temperatura geradas pelo arco poderão ocorrer: Queimaduras de 1º; 2º e 3º grau potencialmente fatais, em alguns casos até mesmo amputação de membros; ferimentos por quedas, caso o trabalhador esteja em diferença de nível; problemas na retina, devido a emissão de luz ultravioleta e infravermelho; danos físicos devido a onda de pressão originada pela explosão; ferimentos e queimaduras devido a ação de partículas derretidas de metal.

### **3.3 ENERGIA INCIDENTE**

Quando ocorre a ruptura do dielétrico de um material isolante, seja por esforço mecânico, por desgaste natural ou qualquer outro motivo, surge na maioria dos casos o arco elétrico e acompanhado deste uma quantidade de energia, que dependendo de alguns fatores, poderá atingir grandes proporções, essa energia vem acompanhada de uma grande massa de calor em alta temperatura, a qual chamamos de energia incidente.

Segundo a norma NFPA 70E-2015, energia incidente é a quantidade de energia térmica impressa em uma superfície, a uma dada distância da fonte, gerada durante a ocorrência de um arco elétrico. Pelo MTE a energia incidente é definida como parte da energia liberada como resultado do arco elétrico ou do fogo repentino que incide sobre determinado ponto. Se um profissional que estiver trabalhando nas proximidades poderá ser atingido severamente, caso não esteja utilizando vestimentas e equipamento de proteção adequado.

#### **3.3.1 DETERMINAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE**

O nível da energia incidente é calculado em cal/cm<sup>2</sup>, este é o valor da exposição que o profissional da área de elétrica estará exposto no local do evento,

tudo isto deve ser documentado dentro de procedimentos operacionais padrão próprios de cada empregador.

Queiroz e Senger (2012), diz que em função da relevância dos riscos de arco e choque elétrico, as principais normas no mundo que se destacam são NFPA 70E (National Fire Protection Association) e a IEEE 1584/2004 (Institute of Electrical and Electronics Engineers), estas são os principais parâmetros referenciais utilizados para medição e condicionar meios para minimizar os riscos para os trabalhadores.

O nível de energia incidente (figura 12) baseia-se na distância entre a face e a região torácica do profissional e o ponto de origem da falta.

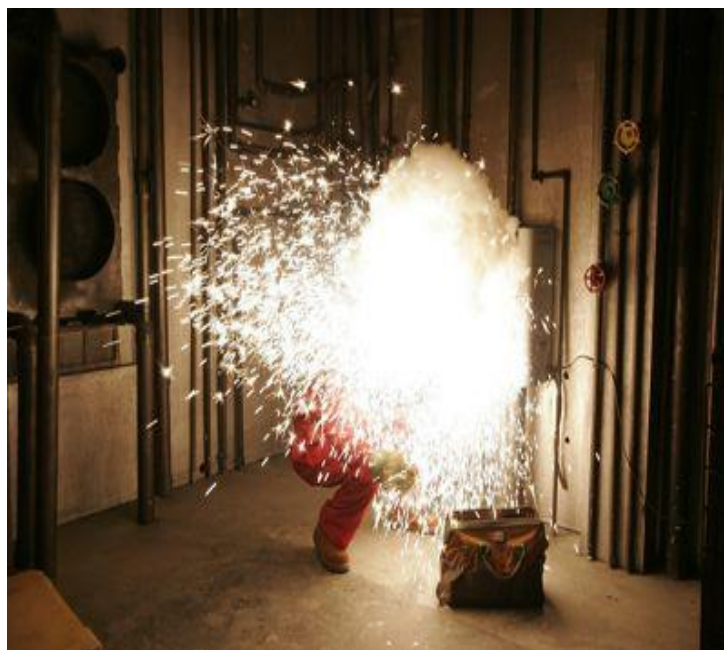


Figura 12 - Energia Incidente  
Fonte: SENAI 2011

Tim Crnko T. e Dyrnes S. (2000), citam em seu artigo que ao longo dos anos, ferramentas analíticas foram desenvolvidas para melhorar avaliar os perigos possíveis contra faltas de arco. O conhecimento e ferramentas para gerenciar riscos de falhas de arco são ainda no início estágios de desenvolvimento, mas avanços estão sendo feitos. Por causa de lesões e óbitos a IEEE através da norma NFPA70E (requisitos de segurança elétrica para os locais de trabalho dos funcionários) adotaram fórmulas para definir a distância de trabalho de um arco potencial, estas fórmulas foram desenvolvidas para determinar o tipo de equipamento de proteção que um trabalhador necessita utilizar quando trabalha em equipamentos elétricos com risco de arco elétrico.

A norma IEEE 1584/2004 define todas informações técnicas para o cálculo da energia incidente e as distâncias seguras de aproximação do risco do arco elétrico, esses cálculos empregam modelos matemáticos baseados em estatísticas e ajustes de curvas de equipamentos de proteção, foram desenvolvidas pelo corpo técnico da IEEE para análise de sistemas em alta e baixa tensão, portanto esta norma deve ser utilizada em situações que estão dentro das seguintes características que normalmente são as mais utilizadas em todo o mundo: tensão compreendida entre 208 V e 15000 V; sistema trifásico; frequência de 50 Hz a 60 Hz; corrente de curto-circuito de 700 A a 106 kA; espaçamento entre condutores de 13 mm a 152 mm.

### 3.3.2 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE.

Queiroz R. A. S e Senger E. (2012), mostram o passo a passo para cálculo da energia incidente pelo método da IEEE 1584/2004, são necessárias nove etapas para estimativa da energia incidente e determinação dos EPIs adequados. A Figura 13 apresenta essas etapas, o cálculo da energia incidente será demonstrado no estudo de caso capítulo 4, item 4.6.

ETAPA	IEEE 1584
1	Coletas de dados da instalação e do sistema
2	Determinação dos modos de operação do sistema
3	Determinação da corrente de curto-circuito
4	Determinação da corrente do arco elétrico
5	Características dos dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco
6	Determinação das tensões dos sistemas e a classe dos equipamentos
7	Determinação da distância de trabalho
8	Cálculo da energia incidente em todos os equipamentos
9	Determinação da distância segura de aproximação do ponto da falta

Figura 13 – Determinação da energia incidente.

Fonte: Adaptado da norma IEEE 5484/2004

### **3.3.3 COLETA DE DADOS DA INSTALAÇÃO E DO SISTEMA**

Deve-se reunir todas as informações do sistema onde será calculada a energia incidente, deverão ser levantados todos os diagramas unifilares que deveram estar atualizados, considerar os circuitos de distribuição de baixa tensão e possíveis alimentadores alternativos.

Queiroz R. A. S e Senger E. (2012) explicam que os diagramas devem mostrar os transformadores, linhas de transmissão, circuitos de distribuição, sistemas de aterramento elétrico, reatores limitadores de correntes e outros equipamentos limitadores de corrente, correção ou estabilização de tensão, capacitores, chaves seccionadoras, disjuntores e CCMs. Também deve considerar painéis e cubículos, incluindo equipamentos de proteção, chaves fusíveis (informando o tipo e capacidade dos fusíveis), alimentadores e circuitos derivados, bem como motores menores que 600 V e transformadores para instrumentos e proteção.

Segundo a IEEE 1584/2004, motores com potência superior ou igual a 37 kW contribuem de maneira significativa para os valores de curto-circuito, deveram então providenciar todos os dados para o cálculo da corrente de curto-circuito, para o estudo em questão deve considerar todas as fontes de energia, incluindo a concessionária, geradores auxiliares e motores acima de 37 kW

### **3.3.4 DETERMINAÇÃO DOS MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA**

De acordo com a IEEE 1584/2004, sistemas radiais são aqueles que possuem um único sentido de operação normal, porém existem outros sistemas mais complexos, como os sistemas reticulados e anel ou duplo anel, que trabalham modos de operação distintos, a exemplo das subestações unitárias com um ou mais alimentadores ou ainda geradores com possibilidade para operar em conjunto com a concessionaria de energia.

### 3.3.5 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Devem ser calculadas todas as correntes de curto circuito nos vários pontos do sistema onde existam maior incidência de manutenção afim de avaliar todos os riscos pertinentes, existem programas comerciais que possibilitam a inclusão de barras para execução dos cálculos e que permitem um fácil chaveamento entre os modos de operação, esses cálculos também poderão ser feitos por modelos matemáticos.

A IEEE 1584/2004 recomenda que todas as informações referentes ao diagrama unifilar e os dados coletados dos equipamentos sejam inseridos em um programa para cálculo de curto-circuito.

#### 3.3.5.1 FORMULÁRIO PARA CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO

Em qualquer circuito elétrico todos os componentes e equipamentos possuem suas impedâncias percentuais em uma certa potência de base, faz então necessário transforma-las em uma única potência de base.

Impedância percentual do circuito

$$Z\% = \frac{ZI}{V} \quad Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b}$$

Onde:

- Z = Impedância [ $\Omega$ ]
- Z% = Impedância percentual [%]
- Z<sub>pu</sub> = Impedância por unidade
- V<sub>b</sub> = Tensão de base do circuito [V]
- Z<sub>b</sub> = Impedância de base [ $\Omega$ ]
- S<sub>b</sub> = Potência de base do equipamento [KVA]
- I = Corrente em [A]



Valor Por Unidade (pu)

$$G_{pu} = \frac{G}{G_b}$$

Onde

$G_{pu}$  = Grandeza por unidade  
 $G$  = Grandeza na base original  
 $G_b$  = Grandeza na base escolhida

Alinhamento das bases (mudança de base)

$$Z_{pu\ novo} = Z_{pu\ velho} \left( \frac{S_b\ novo}{S_b\ velho} \right) \left( \frac{V_b\ velho}{V_b\ novo} \right)^2$$

Cálculo da corrente de curto circuito simétrica

$$I_{cc\ simétrica} = \frac{I_b}{Z_{pu}} [A]$$

Corrente de base

$$I_b = \frac{S_b}{V_b \times \sqrt{3}} [A]$$

Pode-se calcular a corrente de curto simétrica simplificada utilizando também a formula:

$$I_{cc\ simétrica} = \frac{S_b}{V_b \times \sqrt{3} \times Z\%} [A]$$

**EQUAÇÃO 1 - Cálculo da corrente de curto circuito.**

$$I_{cc} = \frac{V}{\sqrt{3} \times Z} [A] \quad (1)$$

### 3.3.6 DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO

Após a determinação da corrente de curto circuito, calcula-se a corrente do arco elétrico nos mesmos pontos onde foram calculados anteriormente, ou seja, os pontos de acesso dos trabalhadores desde que haja interesse quanto ao risco do arco elétrico.

A corrente do arco elétrico depende da corrente de curto-circuito (logaritmo da corrente de curto), da distância entre os condutores (tabela 1 IEEE 1584/2002), se é dentro ou fora de um invólucro e do nível de tensão do ponto de falha. A corrente do arco elétrico pode ser calculada pela aplicação de equações estabelecidas na norma IEEE 1584/2002, para sistemas de baixa tensão (até 1 kV) ou para tensões maiores, entre 1 kV e 15 kV aplicar a equação (2).

#### EQUAÇÃO 2 Cálculo do logaritmo da corrente do arco

$$\log I_a = K + 0,662 \times \log I_{cc} + 0,0966V + 0,000526G + 0,5588V \times \log I_{cc} - 0,00304G \times \log I_{cc} \quad (2)$$

Onde:

- Log = Logaritmo base 10 de  $I_{bf}$
- $I_a$  = Corrente do arco elétrico [kA]
- K = -0,153 para arco fora de invólucro [C<sup>te</sup>] ou -0,097 para arco dentro de invólucro [C<sup>te</sup>]
- $I_{bf}$  = Corrente de curto para uma falta trifásica
- V = Tensão do sistema em kV
- G = Distância dos condutores em mm.

Tensão do sistema [kV]	Tipo de equipamento	Distancia típica entre condutores [mm]	Distância x fator
0,208 - 1	Ambiente aberto	10 - 40	2,000
	Painel de distribuição	32	1,473
	CCM e painel	25	1,641
	Cabos	13	2,000
>1<5	Ambientes aberto	102	2,000
	Painel de distribuição	13 – 102	0,973
	Cabos	13	2,000
>5<15	Ambientes aberto	13 - 153	2,000
	Painel de distribuição	153	0,973
	Cabos	13	2,000

Tabela 1 - Fator da distância em função da classe de tensão  
Fonte: IEEE 1584/2004

Para tensões compreendidas entre 1 kV e 15 kV, não existe distinção entre as configurações em ambiente aberto ou ambiente fechado, os fatores aplicáveis as distancias são iguais, deve então ser aplicada a equação (3):

### **EQUAÇÃO 3 – Cálculo do logaritmo da corrente do arco**

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf} \quad (3)$$

Onde

Log = Logaritmo base 10

$I_a$  = Corrente do arco elétrico [kA]

$I_{bf}$  = Corrente de curto para uma falta trifásica

Para o cálculo da corrente do arco utiliza-se a equação 4

### **EQUAÇÃO 4 - Cálculo da corrente do arco**

$$I_a = 10^{\log I_a} \text{ [A]} \quad (4)$$

Esta etapa determina, ainda, que deve ser calculada uma segunda corrente do arco elétrico equivalente a 85% da  $I_a$ , com o objetivo de determinar um segundo tempo de duração do arco.

### **3.3.7 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA E DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO**

Tanto a norma IEEE 1584/2004 como a NR10 em seu item 10.14.4 determina que toda a documentação prevista deve estar permanentemente à disposição dos

trabalhadores que atuam em serviços e instalações elétricas, respeitadas as abrangências, limitações e interferências nas tarefas.

Para fusíveis, as curvas de tempo/corrente dos fabricantes podem incluir o tempo de fusão e de interrupção. Neste caso, deve-se adotar o tempo de interrupção. Caso o fabricante forneça somente a média do tempo de fusão, deve-se somar 15% no tempo de fusão, desde que esse tempo seja de até 0,03 s. Para tempo superior a 0,03 s, soma-se 10% no tempo de fusão. Essas somas têm por objetivo determinar o tempo total da interrupção.

Para disjuntores com relés de proteção integrados, a curva tempo/corrente inclui as informações referentes ao tempo de disparo e o tempo de interrupção.

Para disjuntores operados por relés externos, a curva do relé mostra somente o tempo de operação do relé na região temporizada.

Para relés operando na região instantânea, considera-se a sua operação em 16 ms, à frequência de 60 Hz, devendo ser somado tempo para abertura do disjuntor. A IEEE 1584/2004 possui uma tabela em que recomenda-se tempos de abertura para disjuntores de potência (tabela 2).

Tensão e tipo de disjuntor	Tempo de abertura em 60 Hz (ciclos)	Tempo de abertura (s)
Baixa tensão (< 1kV) caixa moldada relé de proteção integrado	1,5	0,025
Baixa tensão (< 1kV) caixa isolada com relé de proteção integrado ou operado por relé externo	3,0	0,050
Média tensão (1 a 36,2 kV)	5,0	0,080
Alta Tensão	8,0	0,130

Tabela 2 – Tempo de abertura para disjuntores de potência

Fonte: Adaptada da Norma IEEE 1585/2004

### 3.3.8 DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES E CLASSE DOS EQUIPAMENTOS

Muito importante documentar tanto as tensões do sistema quanto o tipo do equipamento, isto deve ser feito em cada ponto do barramento conforme dispõe a Tabela 1 supramencionada, o objetivo é identificar o espaçamento entre os barramentos que apesar de ser padronizada deve ser parte integrante do cálculo da

energia incidente e o nível de isolamento dos equipamentos que apesar de não ser parte integrante dos cálculos deve ser informada, todas essas informações deverão ser inseridas no procedimento operacional padrão que é obrigatório na execução de qualquer atividade em eletricidade conforme preconiza a NR 10 em seu item 10.11 - procedimentos de trabalho, 10.11.1 os serviços em instalações elétricas devem ser planejados e realizados em conformidade com procedimentos de trabalho específicos, padronizados, com descrição detalhada de cada tarefa, passo a passo, assinados por profissional que atenda ao que estabelece o item 10.8 desta NR.

### 3.3.9 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE TRABALHO

De acordo com a IEEE 1584/2004, a proteção contra arco elétrico é sempre baseada no nível de energia incidente que atinge a face ou o corpo de um trabalhador a uma determinada distância e não na energia incidente que atinge suas mãos ou braços. O nível do dano depende da porcentagem da pele do corpo de uma pessoa que sofre uma queimadura, a cabeça e o corpo representam a maior parte da superfície do corpo humano, por isso queimaduras nessas áreas são mais graves do que aquelas ocorridas nas extremidades do corpo. A Tabela 3, adaptada da tabela 1 da IEEE 1584, apresenta as distâncias de trabalho típicas de acordo com os tipos de equipamentos.

Tipo de equipamento	Distância de trabalho típica [mm]
Painel de 15 kV	910
Painel de 5 kV	910
Painel de baixa tensão	610
CCMs e quadros elétricos de baixa tensão	455
Cabos	455
Outros	A ser determinada no campo

Tabela 3 - Tipo de equipamento e distância de trabalho típica

Fonte: Adaptada da norma IEEE 1584/2004

OBS: Distância típica é a distância entre o trabalhador e a fonte de origem do arco.

### 3.3.10 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE NOS EQUIPAMENTOS

Primeiramente calcula-se a energia normalizada, que a energia mais próxima a fonte de origem do arco elétrico, a partir de então, calcula-se a energia incidente, que é a energia responsável pelos efeitos que ocorrem com os painéis elétricos (figura 14) e profissionais que atuam próximo ao ponto de origem do arco elétrico, queimaduras e outros efeitos como quedas de diferença de nível.



Figura 14 - Danos causados em painéis elétricos pela energia incidente  
Fonte: SENAI 2011

A IEEE 1584 recomenda a utilização de um programa para cálculo da energia incidente. A própria IEEE 1584 disponibiliza uma planilha em Excel para a realização desses cálculos. Para a realização dos cálculos de energia incidente, a norma estabelece que deve ser determinado, primeiramente, o valor da energia incidente normalizada, a qual é baseada em valores normalizados para um arco de 200 ms de duração e uma distância de 610 mm entre o ponto de origem do arco e uma pessoa. Essa energia pode ser estimada por meio da equação (5).

#### EQUAÇÃO 5 Cálculo do logaritmo da energia normalizada

$$\log E_n = k_1 + k_2 + 1,081 \log I_a + 0,0011G \left[ \frac{J}{cm^2} \right] \quad (5)$$

Onde

Log = Logaritmo base 10

$E_n$  = Energia normalizada [ $J/cm^2$ ] (200 ms - 610 mm)

$K_1$  = -0,792 para arco fora de invólucro [ $C^{te}$ ] ou  
-0,555 para arco dentro de invólucro [ $C^{te}$ ]

$K_2$  = 0 para sistema isolado ou aterrado por alta resistência;  
- 0,113 para sistemas solidamente aterrados

G = Distância dos condutores em mm. (tabela 1)

Para o cálculo da energia incidente utiliza-se a equação 6

### EQUAÇÃO 6 - Cálculo da energia normalizada

$$E_n = 10^{\log E_n} \left[ \frac{J}{cm^2} \right] \quad (6)$$

Para se converter a energia normalizada em energia incidente utiliza-se a equação 7

### EQUAÇÃO 7 - Cálculo da energia incidente

$$E_i = 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \left[ \frac{J}{cm^2} \right] \quad (7)$$

### EQUAÇÃO 8 Cálculo da energia incidente

$$E_i = C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right) \left[ \frac{cal}{cm^2} \right] \quad (8)$$

Onde:

$E_i$  = Energia incidente [ $J/cm^2$ ]

$C_f$  = Fator de cálculo

1,0 para tensões > 1 kV

1,5 para tensões  $\leq$  1 kV

$E_n$  = Energia normalizada equação 4

t = Tempo de atuação dos dispositivos de proteção (tempo de extinção do arco)

D = Distância do profissional ao ponto de falha

X = Expoente de distância, conforme tabela 1.

### 3.3.11 DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE APROXIMAÇÃO

A partir da década de 70 quando se iniciaram os estudos da energia incidente muitas ferramentas veem sendo criadas para uma melhor avaliação dos perigos que uma falta pode causar.

A NFPA 70E ou a IEEE 1584 definem a distância de trabalho como sendo a distância da fonte do arco em que a energia incidente de calor correspondente a 1,2 (cal/cm<sup>2</sup>), ou 5,0 (J/cm<sup>2</sup>), incide sobre a pele humana sem equipamento de proteção.

Segundo Crnko T e Dyrnes S (2000), 1,2 cal/cm<sup>2</sup> ou 5,0 j/cm<sup>2</sup> é o limiar de queimaduras de segundo grau. 1,0 cal por cm<sup>2</sup> corresponde a exposição da pele humana sobre brasa de um cigarro durante o tempo de um segundo.

Para determinar a distância segura de aproximação, deve-se aplicar a seguinte equação (9):

#### EQUAÇÃO 9 - Cálculo da distância de aproximação da falta

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \text{ [mm]} \quad (9)$$

Onde

- D<sub>B</sub> = Distância de aproximação do profissional ao ponto de falha [mm]
- C<sub>f</sub> = Fator de cálculo será 1,0 para tensões > 1 kV ou 1,5 para tensões ≤ 1 kV
- E<sub>n</sub> = Energia normalizada equação 5
- E<sub>i</sub> = Energia incidente equação 6 [j/cm<sup>2</sup>]
- t = Tempo de atuação dos dispositivos de proteção (tempo de extinção do arco)
- X = Expoente de distância, conforme tabela 1.



## 4 ESTUDO DE CASO

O objetivo principal do estudo de caso é analisar o comportamento da corrente de curto para posteriormente efetuar o cálculo da energia incidente gerada por um arco elétrico. Para o cálculo da corrente de curto circuito presumida será apresentado um estudo de caso da subestação unitária de alimentação das instalações elétricas do SENAI unidade operacional Volta Redonda, a metodologia utilizada será a proposta na IEEE 1584/2004, e referenciada na publicação "*Arc Flash Hazard Incident Energy Calculations Study of the Standards*" a partir do resultado calcula-se a energia incidente para se adotar as medidas de controle dos riscos contra arco elétrico.

A IEEE 1584 recomenda um programa para cálculo da corrente de curto circuito com a inserção de todos os dados da instalação principalmente os dados contidos no diagrama unifilar onde são encontrados os dimensionamentos, as impedâncias, tipo do sistema de aterramento, números de linhas, nível de tensão, tempo de atuação dos dispositivos de proteção e outros dados. Existem softwares que possibilitam a entrada de muitas variáveis é muito importante os cálculos da corrente de curto circuito principalmente nos locais onde os profissionais da área têm acesso, pois é a partir deles que se calcula a energia incidente.

### 4.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

A configuração da instalação elétrica da subestação em estudo apresenta na entrada nível de tensão de 13.8 kV e a distribuição para os painéis secundários é feito por redes subterrâneas e aéreas, possui dois transformadores abaixadores com potência de 750 KVA, 60 HZ, tensão de saída 127/220 V, com impedância de 6.81 %, alimentando cargas variadas, destacam-se como as principais as da oficina de solda, oficina de máquinas operatrizes (torno, fresas, centro de usinagem CNC - controle numérico computadorizado), laboratórios de ensaios elétricos e hidropneumáticos. A figura 15, apresenta o diagrama unifilar simplificado da configuração da subestação, todo o sistema de aterramento instalado é configurado conforme o nível de tensão, tanto a entrada de 13,8 kV, como as saídas de 220V e 127 V com a ligação do condutor neutro solidamente aterrados.

Segundo Geraldo Kindermann (1997), as estatísticas sobre curtos circuitos pela ocorrência dos tipos de defeitos são: curtos circuitos trifásicos 4%; curtos circuitos bifásicos sem contato de terra 13%; Curtos circuitos bifásicos com contato de terra 12%; curtos-circuitos monofásicos 71%.

Nos estudos de curto circuitos sempre são utilizadas as situações mais críticas no caso, curtos circuitos trifásicos.

Diagrama unifilar da subestação em estudo figura 15.

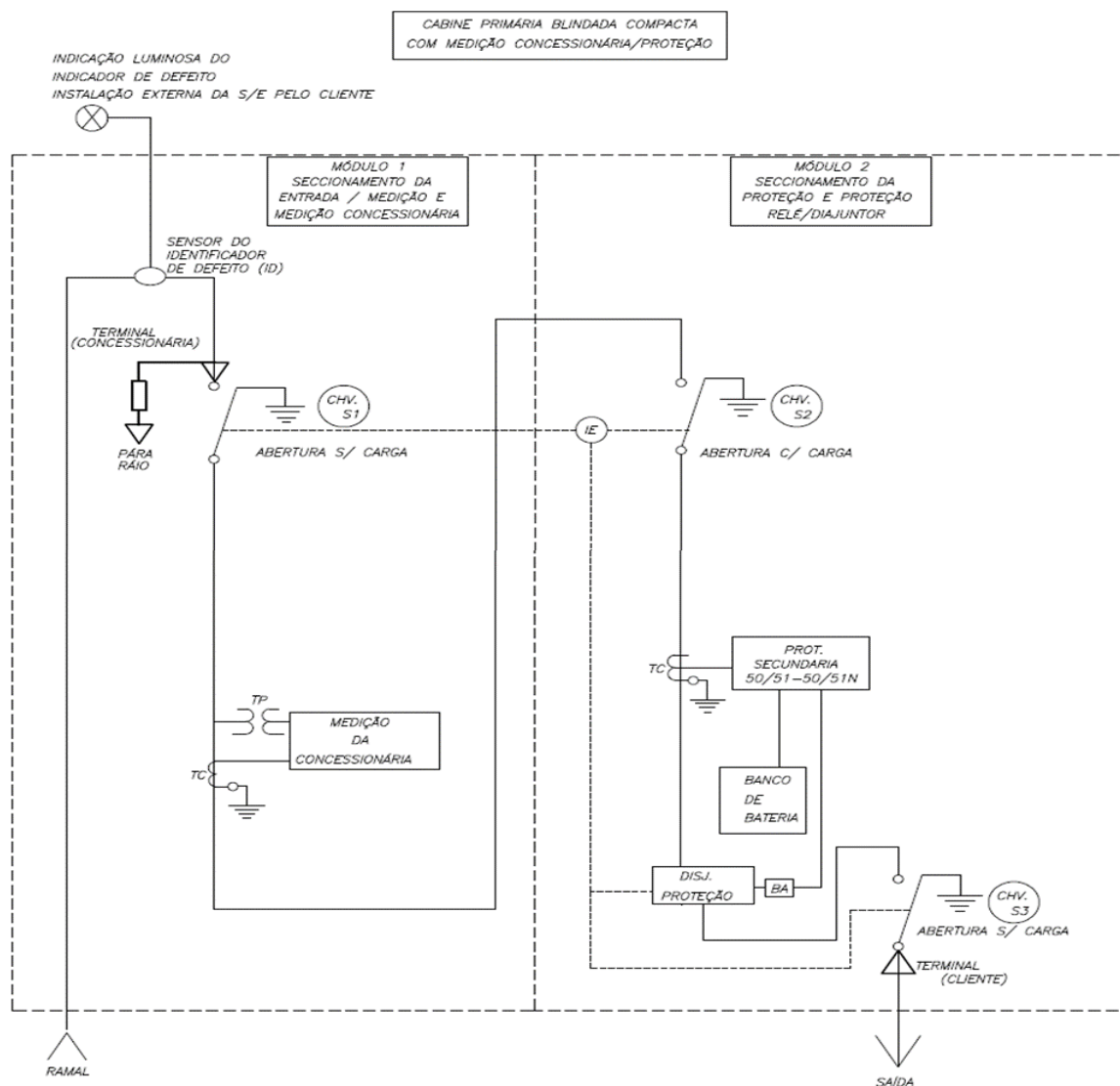


Figura 15 – Unifilar da SE em estudo  
Fonte: SENAI

## 4.2 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CURTO

### 4.2.1 CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS

Os cálculos deste estudo de caso serão baseados na seguinte configuração:

Tensão de entrada 13.800 V.

Tensão de saída 127/220 V.

Distância das barras padrão de 153 mm

Fator de distância 0,973

Potência do transformador 750 KVA

Frequência do sistema 60 HZ

Impedância 6.31%

Sistema de aterramento - Solidamente aterrado

Cabos de Média tensão – 25 mm<sup>2</sup>

Cabos de Baixa tensão - 50 mm<sup>2</sup>

A ocorrência da falta será no lado ponto de conexão do barramento de baixa, após a conexão do cabo BT, com a distribuição para a planta do SENAI, alguns dados serão de valores aproximados, uma vez que não foi informado pela concessionária os valores exatos.

Potência do curto circuito no ponto da falta -  $S_{cc} = 400$  MVA

### 4.2.2 CÁLCULO DA RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO

$$K = \frac{V_{\text{Primario}}}{V_{\text{secundário}}}$$

$$K = \frac{13800}{220} = 62,727$$

#### 4.2.3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE ALIMENTAÇÃO EM MÉDIA TENSÃO REFERIDA AO LADO DE BAIXA TENSÃO.

$$Z_{eq\ MT} = \frac{V_{MT}^2}{S_{cc}} = \frac{13,8^2}{400} = 0,4761\ \Omega$$

$$Z_{eq\ MT \rightarrow BT} = \frac{Z_{eq\ MT}}{K^2} = \frac{0,4761}{62,727^2} = 0,121 \times 10^{-3}\ \Omega$$

$$X_{cc\ MT \rightarrow BT} = 0,995 \times 0,121 \times 10^{-3} = 0,1204 \times 10^{-3}\ \Omega$$

$$R_{cc\ MT \rightarrow BT} = 0,1 \times X_{cc\ MT \rightarrow BT} = 0,1 \times 0,1204 \times 10^{-3} = 0,01204 \times 10^{-3}\ \Omega$$

$$Z_{eq\ alim \rightarrow BT} = (0,01204 \times 10^{-3} + j0,1204 \times 10^{-3})\ \Omega$$

#### 4.2.4 CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS DOS CABOS DE MÉDIA TENSÃO REFERIDA AO LADO DE BAIXA TENSÃO

Média Tensão 13.8 KV

Cabos de 25 mm<sup>2</sup> (L)

Capacidade de condução 167 A

Comprimento aproximado de 10 m.

R<sub>c</sub>=0,971 Ω/km Tabela média tensão prysmian cable

X<sub>c</sub>=0,154 Ω/km Tabela média tensão prysmian cable

$$Z_{cabo\ MT} = (0,971 \times 10^{-3} + j0,154 \times 10^{-3})\ \Omega/m$$

$$Z_{MT \rightarrow BT} = \frac{L(R_{c\ MT} + jX_{c\ MT})}{K^2}$$

$$Z_{eq\ cab\ BT} = \frac{10(0,971 \times 10^{-3} + j0,154 \times 10^{-3})}{62,727^2}$$

$$Z_{eq\ cab\ BT} = (2,4678 \times 10^{-6} + j3,914 \times 10^{-7})[\Omega]$$

#### 4.2.5 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR

Transformador ENSA = 750 KVA

$V_{\text{primário}} = 13.8 \text{ KV}$

$V_{\text{secundário}} = 220 \text{ V}$

Impedância percentual = 6,31%

Perdas no cobre = 3% (valor aproximado)

$$|Z|_{\text{tr}} = \frac{V^2 \times Z\%}{S_{\text{tr}}} = \frac{220^2 \times 0,0631}{750000} = 4,0721 \times 10^{-3} \Omega$$

$$R_{\text{tr}} = \frac{P_{\text{cu}}[\%] \times S_{\text{tr}}}{3I^2} = \frac{0,03 \times 750 \times 10^3}{3 \left( \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 220} \right)} = 1,936 \times 10^{-3} \Omega$$

$$X_{\text{tr}} = \sqrt{(Z_{\text{tr}}^2 - R_{\text{tr}}^2)} = \sqrt{(4,072 \times 10^{-3})^2 - (1,936 \times 10^{-3})^2} = 4,509 \times 10^{-3} \Omega$$

$$Z_{\text{tr}} = (1,936 \times 10^{-3} + j4,509 \times 10^{-3}) \Omega$$

#### 4.2.6 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO

Baixa Tensão 220 KV

Cabos de 50 mm<sup>2</sup> (L)

Capacidade de condução 246 A

Comprimento aproximado de 10 m.

$R_c = 0,47 \Omega/\text{km}$  Tabela baixa tensão prysmian cable

$X_c = 0,154 \Omega/\text{km}$  Tabela baixa tensão prysmian cable

$$Z_{\text{cabo BT}} = (0,47 \times 10^{-3} + j0,11 \times 10^{-3}) \Omega/\text{m}$$

$$Z_{\text{cabo BT}} = 10(0,47 \times 10^{-3} + j0,11 \times 10^{-3})$$

$$Z_{\text{cabo BT}} = (4,7 \times 10^{-3} + j1,1 \times 10^{-3})[\Omega]$$

#### 4.2.7 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA EQUIVALENTE DO CIRCUITO

$$Z_{\text{eq BT}} = (0,01204 \times 10^{-3} + j0,1204 \times 10^{-3}) + (2,4678 \times 10^{-6} + j3,914 \times 10^{-7}) \\ + (1,936 \times 10^{-3} + j4,509 \times 10^{-3}) + (4,7 \times 10^{-3} + j1,1 \times 10^{-3})$$

$$Z_{\text{eq BT}} = (6,6505 \times 10^{-3} + j5,7298 \times 10^{-3})\Omega$$

$$Z_{\text{eq BT}} = \sqrt{(6,6505 \times 10^{-3})^2 + (5,7298 \times 10^{-3})^2} = 8,7784 \times 10^{-3}\Omega$$

#### 4.2.8 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO

$$I_{\text{cc}} = \frac{V_{\text{BT}}}{\sqrt{3} \times Z_{\text{eq BT}}} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 8,7784 \times 10^{-3}}$$

$$I_{\text{cc}} = 14469,32 \text{ A}$$

### 4.3 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO

Para calcular a corrente do arco, calcula-se o logaritmo da corrente do arco e a partir de então calcula-se a corrente do arco elétrico

#### 4.3.1 CÁLCULO DO LOGARÍTMO DA CORRENTE DO ARCO

Para tensões entre 1 kV e 15 kV, não existe distinção das configurações em ambiente aberto ou ambiente fechado, utiliza-se então a equação 3

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log I_{bf}$$

$$\log I_a = 0,00402 + 0,983 \log(14469,32)$$

$$\log I_a = 4,0933736963$$

#### 4.3.2 CÁLCULO DA CORRENTE DO ARCO

$$I_a = 10^{\log I_a}$$

$$I_a = 10^{4,0933736963}$$

$$I_a = 12409 \text{ A}$$

#### 4.4 TEMPO DE ATUAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Conforme tabela da norma IEEE 1584/2004, (aqui tabela 2), o tempo de abertura será de 0,05 s, para disjuntor em baixa tensão caixa isolada com relé de proteção interligado ou operado por relé externo.

#### 4.5 DETERMINAR AS DISTÂNCIAS DE TRABALHO

Conforme tabela da norma IEEE 1584/2004 (tabela 3), as distâncias de trabalho relativas ao nível de tensão também são padronizadas devendo o profissional atentar para isso e também deverá constar no documento quando da execução do serviço.

A distância de trabalho definida por norma para a situação proposta é de 610 mm

## 4.6 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE

Para este cálculo efetua-se primeiro o cálculo da energia normalizada, esta energia é baseada em valores normalizados para um arco de 200 ms a uma distância de 610 mm do ponto de origem do arco elétrico a um profissional.

### 4.6.1 CÁLCULO DO LOGARÍTMO DA ENERGIA NORMALIZADA

$$\log E_n = -0,113 + 1,081 \log I_a + 0,0011G$$

$$\log E_n = -0,113 + 1,081 \times \log_{10}(12,41) + 0,0011 \times 153$$

$$\log E_n = 1,23763$$

### 4.6.2 CÁLCULO DA ENERGIA NORMALIZADA

$$E_n = 10^{\log E_n}$$

$$E_n = 10^{1,23763} = 17,2834 \text{ J/cm}^2$$

### 4.6.3 CÁLCULO DA ENERGIA INCIDENTE

Calculada a energia normalizada, calcula-se a energia incidente

$$E_i = C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$E_i = 1,5 \times 17,2834 \left( \frac{0,050}{0,2} \right) \left( \frac{610^{0,973}}{153^{0,973}} \right)$$

$$E_i = 24,89 \text{ cal/cm}^2$$



## 4.7 CÁLCULO DA DISTÂNCIA DE APROXIMAÇÃO

$$D_B = \left[ 4,184 C_f E_n \left( \frac{t}{0,2} \right) \left( \frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$D_B = \left[ 4,184 \times 1,5 \times 17,2834 \left( \frac{0,050}{0,2} \right) \left( \frac{610^{0,973}}{24,89} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 688 \text{ mm}$$

O cálculo da energia incidente por si só não reflete o que realmente acontece quando da ocorrência de um arco elétrico, tudo isso é um estudo de análise de risco, para tanto todos os cálculos de engenharia devem ser executados por profissionais legalmente habilitados, todos os parâmetros devem ser analisados da mesma forma a aplicabilidade do modelo matemático utilizado na instalação.

É interessante que cada painel seja identificado como um a placa informando alguns dados como especificado na figura 16.

	<b>PERIGO RISCO DE ARCO ELÉTRICO</b>
<b>UTILIZE SEMPRE A VESTIMENTA APROPRIADA</b>	
DISTÂNCIA LIMITE DE APROXIMAÇÃO: _____	
TENSÃO DO CIRCUITO: _____ kV    CORRENTE DE CURTO CIRCUITO: _____ kA	
TEMPO DE ATUAÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO: _____ s	
ENERGIA INCIDENTE CALCULADA: _____ cal/cm <sup>2</sup>	
VESTIMENTAS APROPRIADA: _____	
<b>NÃO EXECUTE QUALQUER TAREFA SEM AS ROUPAS DE PROTEÇÕES ADEQUADAS</b>	

Figura 16 - Placa de advertência nível da energia incidente.

Fonte: autores

## **5 MEDIDAS DE PROTEÇÃO**

No Brasil o Ministério do Trabalho e Emprego é responsável por editar as normas de segurança brasileira. A NR 6 é a responsável por estabelecer exigências legais para aplicação e uso dos EPIs, esta determina que todo dispositivo ou produto fixo ou móvel, de uso individual utilizado pelo trabalhador, visa minimizar riscos incidentes que possam ameaçar a segurança e a saúde no trabalho.

Com relação a proteção contra arco elétrico estabelece-se que os EPIs dos trabalhadores devem protegê-los dos contra os agentes térmicos para todo os membros do corpo.

### **5.1 VESTIMENTAS DE PROTEÇÃO**

A Norma NFPA 70E assim como a norma IEEE 1584/2004, determina que todos os serviços em instalações elétricas executados dentro das zonas de risco ou controlada devem ser aplicados o método do cálculo da energia incidente para determinação da vestimenta adequada, assim como os demais EPI's, neste estudo fica determinado o nível de energia incidente ( $\text{cal/cm}^2$ ) que o profissional da área de eletricidade ficará exposto devendo ser obrigatoriamente documentado conforme preconiza a norma NR10 do Ministério do Trabalho.

O nível da energia incidente baseia-se do na distância em que o trabalhador na condição de executante fica exposto os efeitos do arco elétrico, as roupas de proteção térmicas devem cobrir todo o corpo não deixando nenhuma parte do corpo exposta.

A aplicação deste cálculo permite o uso das tabelas 130.7(C)(15)(a) e 130.7(C)(15)(b) e a tabelas 130.7(C)(15)(b) e 130.7(C)(15), disponíveis na própria norma e exemplificada na tabela (4)

CATEGORIA DO RISCO	VESTIMENTA DE PROTEÇÃO
0	Vestimenta de proteção, fibra natural não tratada (por exemplo, algodão não tratado, lã, nylon, seda ou mistura desses materiais), com gramatura mínima de 152 g/cm <sup>2</sup> . Camisas (manga comprida), Calças (compridas) Óculos de segurança, Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo), Luvas de contra arco elétrico gramatura mínima 152 g/cm <sup>2</sup> .
1	Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 4 cal/cm <sup>2</sup> Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco Equipamento de proteção Capacete Óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Luvas de couro Sapato de segurança em couro, quando necessário
2	Vestimenta resistente a arco elétrico, com suportabilidade mínima de 8 cal/cm <sup>2</sup> Camisas e calças compridas resistentes a arco ou macacão resistente a arco Protetor facial resistente a arco ou capuz carrasco resistente a arco e balaclava resistente a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário Equipamento de proteção Capacete Óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Luvas de couro Sapato de segurança em couro, quando necessário
3	Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada, de modo que atenda a classificação de arco mínima de 25 cal/cm <sup>2</sup> Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida Calças compridas resistentes a arco, quando requerida Macacão resistente a arco, quando requerido Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida Capuz carrasco resistente a arco Luvas resistentes a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário Equipamento de proteção Capacete Óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Sapato de segurança em couro, quando necessário
4	Vestimenta resistente a arco elétrico selecionada, de modo que atenda a classificação de arco mínima de 40 cal/cm <sup>2</sup> Camisas de manga comprida resistente a arco, quando requerida Calças compridas resistentes a arco, quando requerida Macacão resistente a arco, quando requerido Jaqueta resistente a arco elétrico, quando requerida Capuz carrasco resistente a arco Luvas resistentes a arco Jaqueta resistente a arco, agasalho, vestimenta impermeável ou forro para capacete, quando necessário Equipamento de proteção Capacete Óculos de segurança Proteção auditiva (modelo de inserção no canal auditivo) Sapato de segurança em couro, quando necessário

Tabela 4 - Vestimentas e equipamentos de proteção (EPI)

Fonte: Adaptada da tabela 130.7(C) (16) da NFPA 70E

Toda a roupa de proteção é fabricada com tecidos especiais resistente ao fogo, para evitar queimaduras nos trabalhadores figura 17.

A partir de 1999 a ASTM – American Society for Testing and Materials, definiu um indicador para a seleção desses EPI's para o ATPV (Arc Thermal Protection Value).

Barico (2015) cita que: o arco elétrico, em uma falha, é um agente térmico comparado à solda elétrica a arco. A diferença é que nos serviços em eletricidade, os arcos ocorrem por falha, liberando energia muito superior a de uma máquina de solda e é um risco suscetível de ameaça à segurança e à saúde do trabalhador. Logo, o trabalhador deve ser protegido pelo EPI da mesma maneira que protegemos os soldadores.



Figura 17 - Roupas de proteção térmicas  
Fonte: Acervo Professor Cláudio Márcio de Freitas da Silva

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho abrange todas as etapas do cálculo da energia incidente de trabalhos realizados nas zonas de risco, controlada e distância de aproximação, de acordo com a metodologia prevista nas normas NFPA 70E e Norma IEEE 1584/2004.

Existem software para simulação em sistemas elétricos que indicam a categoria do risco e o ATPV recomendado em conformidade com a NFPA 70E.

Como visto no estudo, profissionais da área de elétrica não podem simplesmente trabalhar num sistema elétrico sem conhecimentos básicos de eletricidade, os riscos inerentes são muitos, deve se observar tanto os métodos de proteção das instalações quanto os da proteção pessoal dos profissionais. Todos os sistemas de proteção são essenciais em circuitos elétricos, é importante possuir os disjuntores de proteção térmica e os disjuntores diferenciais residuais. Para se trabalhar em linhas energizadas onde o risco de arco elétrico é eminente, não devemos fazê-lo sem as roupas de proteção térmicas adequadas que hoje é a melhor forma de proteção contra os efeitos do arco elétrico.

## 7 GLOSSÁRIO

**DIELÉTRICO** – É tudo aquilo que dificulta a passagem da corrente elétrica entre dois pontos de potenciais diferentes.

**COERENTE DE FALTA** - Em um equipamento elétrico, uma falta elétrica é o contato acidental entre partes energizadas que estão em níveis diferentes de tensão ou entre uma parte energizada e a terra ou a massa. A impedância desse contato pode variar desde muito alta até um valor muito baixo (caso este de falta direta). Logo, uma corrente de curto circuito acidental é um caso particular de corrente de falta.

**FUNCOGE** - Fundação COGE é uma entidade jurídica de direito privado, sem fins lucrativos, cuja missão é prover conhecimento e soluções de gestão empresarial que agreguem valor à cultura técnica das organizações, priorizando o setor energético. Atualmente reúne em seu quadro de mantenedoras do setor de energia elétrica setenta empresas públicas e privadas, responsáveis, em seu conjunto, por mais de 90% de toda a eletricidade gerada, transmitida e distribuída no Brasil.

**FUNDACENTRO** - Produção e difusão de conhecimentos que contribuam para a promoção da segurança e saúde dos trabalhadores e das trabalhadoras, visando ao desenvolvimento sustentável, com crescimento econômico, equidade social e proteção do meio ambiente.

**NR-6** – Norma Regulamentadora número 6, Equipamento de Proteção Individual EPI.

**NR -10** – Norma Regulamentadora número – 10, segurança em instalações e serviços de eletricidade.

## 8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PORTAL ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica – “Segurança do Trabalho, Indicadores de Segurança do Trabalho e das Instalações”, Disponível em:

<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/IndicadoresSegurancaTrabalho/pesquisaGeral.cfm>> Acesso em 21 de junho de 2017.

Portal EPE – Empresa de Pesquisa Energética – “Base de dados para estudos de curto circuito – PDE 2023” (atualizado em 03/11/2014), disponível em:

<[http://www.epe.gov.br/Transmissao/Paginas/Basededadosparaestudosdecortocircuito%E2%80%93PDE2023\(atualizadoem03112014\).aspx?CategoriaID](http://www.epe.gov.br/Transmissao/Paginas/Basededadosparaestudosdecortocircuito%E2%80%93PDE2023(atualizadoem03112014).aspx?CategoriaID)> acesso em 12 de outubro de 2017.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. (NFPA 70E), “Standard for Electrical Safety in the Workplace”. Quincy, Massachusetts, 2009.

CONSOLIDAÇÃO DAS LEIS TRABALHISTAS (CLT), de 1943, Decreto-lei n. 5.452, de 1943, regulamentada no Título II, Capítulo V, artigos 154 a 201.

NBR 14039 - Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.

NBR 5410 - Instalações elétricas em baixa tensão.

NORMA REGULAMENTADOR 6, Portaria número 3.214/78.

NORMA REGULAMENTADOR 10, Portaria número 3.214/78.

SEMINÁRIOS TÉCNICOS ENGENHEIROS E PROJETISTAS, “Proteção das Instalações elétricas de BT contra os efeitos das sobrecargas através dos Disjuntores e Fusíveis”. SIEMENS 2003

FILHO, João Mamede, instalações elétricas Industriais, sétima edição, editora LTC editora Rio de Janeiro 2007.

LANG, Mike; JONES, Ken., “Exposed to the Arc Flash Hazard”, IEEE Transactions on industry applications, vol. 51, no. 1, janeiro / fevereiro. 2015;

RISCOS ELÉTRICOS, curso básico de segurança em instalações e serviços de eletricidade, terceira edição, SENAI, Brasília 2011.

PRIMEIROS SOCORROS, curso básico de segurança em instalações e serviços de eletricidade, terceira edição, SENAI, Brasília 2011.

CHAPMAN, Stephen J., Fundamentos de Máquinas elétricas, 5ª edição, tradução: Anatólio Laschuk. – Porto Alegre, AMGH editora, 2013

RESENDE, Felipe Barcelos, “Proteção Elétrica em Subestações: uma Abordagem sobre a Energia Incidente”. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, 2016

ELECTRICITY FORUM, volume 7, Electrical safety and arc flash handbook, The Electricity Forum, Ontário, Canadá. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) F-1959: Standard Test Method for Determining the Arc Thermal Performance Value of Materials for Clothing. West Conshohocken, 1999

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEER - IEEE 1584: Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation. Nova York. 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) F-1959: Standard Test Method for Determining the Arc Thermal Performance Value of Materials for Clothing. West Conshohocken, 1999.

AMMERMAN, R. F.; SEN, P. K.; NELSON, J. P. “Arc Flash Hazard Incident Energy Calculations Study of The Standards”: IEEE 1584 and 70E. In: Petroleum and Chemical Industry Technical Conference, 13p, 2007.



REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA, v. 34, n. 4, 4313 (2012)  
www.sbfisica.org.br.

ANDREWS, J.J.; JONES, R.A.; McLUNG, L.B., NFPA 70E 2000, “atualização de requisitos de segurança para locais de trabalho de funcionários”, EEE Industry Applications Magazine (Volume: 7, edição: 3, junho de 2001)

PROGRAMA DE FORMAÇÃO TÉCNICA CONTINUADA “os efeitos do curto circuito”  
Schneider Eletric.

Occupational Safety and Health Administration – OSHA <https://www.oshs.gov>  
Administração de segurança e saúde no trabalho

KINDERMANN. Geraldo, Curto Circuito. Segunda edição, editora Sagra Luzzatto, Porto Alegre 1997

QUEIROZ, Alan Romulo Silva; SENGER, Eduardo César. “A natureza e os riscos do arco elétrico”. O Setor Elétrico, Edição 72 – p36-40, janeiro de 2012.

QUEIROZ, Alan Romulo Silva; SENGER, Eduardo César; FIGUEIREDO, Maurício. “Principais normas sobre os riscos dos arcos elétricos”. O Setor Elétrico, Edição 73, fevereiro de 2012.

QUEIROZ, Alan Romulo Silva; SENGER, Eduardo César. “A NFPA 70 E e os requisitos de segurança para arco elétrico. Seleção de EPIs”. O Setor Elétrico, Edição 74 – p30-45, maio de 2012.

QUEIROZ, Alan Romulo Silva; SENGER, Eduardo César, “A NFPA 70E e os métodos para cálculo de energia incidente” O Setor Elétrico, Edição 75, abril de 2012

QUEIROZ, Alan Romulo Silva; SENGER, Eduardo César, “A IEEE 1584 e os métodos para cálculo de energia incidente e distância segura de aproximação”, O Setor Elétrico, Edição 76, maio 2012

QUEIROZ, Alan Romulo Silva, “Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico”. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, 2011.

PROGRAMA DE FORMAÇÃO TÉCNICA CONTINUADA, “Os efeitos do curto circuito”, Schneider Eletric.

ANDRADE, Humberto Dionísio de; DANTAS, Emmanuel Ramon Marques; GUIMARÃES, Ádller de Oliveira; LIMA, Adelson, Menezes; AGUIAR, Victor Paula Brandão, “Arco elétrico”, O Setor Elétrico, Edição 112 - maio de 2015.

MARDEGAN, Cláudio, “Curto-circuito para a s eletividade”, Fontes de curto-circuito, O Setor Elétrico, Edição 130, novembro de 2016.

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”, 2016;

TOMIYOSHI, Luiz. K, “Vestimenta de Proteção Contra Queimaduras por Arcos Elétricos”, O Setor elétrico”, Edição 74 – p30-35, março de 2012.

PETROBRAS/NORTEC. N-2830: “Critérios de segurança para ambientes e serviços em painéis e equipamentos elétricos com potencial de arco”. Rio de Janeiro, 2006.

MERLIN, Vitor Luiz., “Curto Circuito e Sistemas de Proteção”, Engenheiros associados, outubro de 2015, disponível em: (acesso outubro de 2017) <[http://www.engenheirosassociados.com.br/artigos/curto\\_circuito.php](http://www.engenheirosassociados.com.br/artigos/curto_circuito.php)>

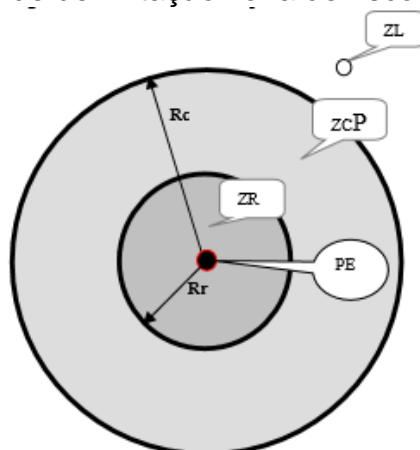
CRNKO, Tim e STEVE, Dyrnes, “Arcing, flash/blast review with safety suggestions for design and maintenance”, Member of IEEE, Atlanta, GA, USA, USA June 2000

FERNANDEZ-PELLO A. C, “Study of the Fire Performance of Electrical Cables”, Department of Mechanical Engineering University of California at Berkeley, Berkeley, California, USA, 1975

PRISMIAN CABLES END SYSTEMS, Tabela de cabos elétricos para alta tensão de uso geral – dimensionamento de condutores.

PRISMIAN CABLES END SYSTEMS, Tabela de cabos elétricos para baixa tensão de uso geral – dimensionamento de condutores

## ANEXO I - Raios de delimitação zona de risco e zona controlada



Faixa de tensão Nominal da instalação elétrica em KV	Rr – Raio de delimitação entre zonas de riscos e controlada, em metros	Rc – Raio de delimitação entre zonas controlada e livre, em metros.
<1	0,20	0,70
≥1 e <3	0,22	1,22
≥3 e <6	0,25	1,25
≥6 e <10	0,35	1,35
≥10 e <15	0,38	1,38
≥15 e <20	0,40	1,40
≥20 e <30	0,56	1,56
≥30 e <36	0,58	1,58
≥36 e <45	0,63	1,63
≥45 e <60	0,83	1,83
≥60 e <70	0,90	1,90
≥70 e <110	1,00	2,00
≥110 e <132	1,10	3,10
≥132 e <150	1,20	3,20
≥150 e <220	1,60	3,60
≥220 e <275	1,80	3,80
≥275 e <380	2,50	4,50
≥380 e <480	3,20	5,20
≥480 e <700	5,20	7,20

Tabela 5 - Raios de delimitação das zonas de risco, controlada e livre

Fonte: Norma Regulamentadora número 10