

# DETERMINAÇÃO DA ENERGIA INCIDENTE EM PAINÉIS ELÉTRICOS DE UMA INDÚSTRIA DE ESPUMA DO OESTE DE SANTA CATARINA PARA ESTABELEECER OS PROCEDIMENTOS DE SEGURANÇA<sup>1</sup>

Robson Mendes<sup>2</sup>  
Felipe Damarem<sup>3</sup>  
Maria Regina Thomaz<sup>4</sup>

## RESUMO

O arco elétrico, definido comumente como a condução de corrente elétrica através do ar, é um dos maiores riscos a que os profissionais da área elétrica estão expostos quando operando em redes e painéis energizados. Como resultante do arco elétrico, tem-se a energia incidente, que envolve uma onda de calor, irradiação, forças eletromagnéticas entre outras, e expressa em cal/cm<sup>2</sup>. São diversos fatores que influenciam no surgimento do arco elétrico e na magnitude da energia incidente, como a corrente de curto-circuito e o tempo de eliminação da falta. Como forma de dimensionar tais forças, foram usados métodos baseados na norma IEEE-1584/2018 e para adequar as vestimentas retardantes a chama, a fim de atender requisitos da NR10/2004, utilizou-se também a normativa NFPA-70E, ambas integradas ao software ETAP, utilizado para a realização dos cálculos. O estudo foi aplicado a uma fábrica de espuma localizada em Chapecó-SC e foram analisados 9 locais distintos em duas configurações possíveis, alimentação da concessionária e alimentação via grupo gerador a diesel utilizado em caso de emergência. Como consequência obteve-se valores relativamente baixos na simulação com o fluxo de potência oriundo da concessionária, com máximo de 4,658 cal/cm<sup>2</sup>, e por outro lado, quando a alimentação de energia surge do grupo gerador chegou-se a valores extremamente altos, na ordem de 396 cal/cm<sup>2</sup>, em que de forma alguma pode-se expor o trabalhador. Por fim deve se assegurar ao máximo a segurança dos profissionais por vezes desprotegidos de tal risco, buscando seccionar remotamente dispositivos e trabalhar sempre que possível com painéis e redes desenergizados.

**Palavras-chave:** Arco elétrico. Energia Incidente. IEEE-1584. NFPA-70E. Software ETAP.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao tratar de eletricidade, logo vem à mente as lâmpadas, a energia, a tecnologia, e não é necessário aprofundar os conhecimentos técnicos para se ter ciência que os riscos envolvendo a eletricidade são significativos, assim como o bem que ela proporciona a população. Somente no ano de 2019, segundo a ABRACOPEL (2020) (Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade) foram 909 acidentes no Brasil classificados como choque elétrico, sendo que destes, 697 foram fatais.

---

<sup>1</sup> Artigo Científico apresentado com requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista pela UCEFF.

<sup>2</sup> UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica. E-mail robsonmendess@outlook.com.

<sup>3</sup> UCEFF Faculdades. Especialista em Engenharia Elétrica. E-mail felipedamarem@uceff.edu.br.

<sup>4</sup> UCEFF Faculdades. Ma em Tecnologia e Gestão da Inovação. E-mail maria@uceff.edu.br.

Apesar do alto índice de fatalidade, a própria ABRACOPEL destaca que os trabalhadores diretamente envolvidos com manutenções em instalações elétricas de empresas, não são o grupo mais atingido. Foram 22 acidentes com choque elétrico, sendo 11 fatais.

Entende-se que mesmo estes trabalhadores mais expostos aos riscos elétricos, o conhecimento e a capacitação destes, bem como os procedimentos para execução de tarefas de serviços em eletricidade, garantem aos profissionais de manutenção elétrica menor risco aos perigos impostos pela energia elétrica. No Brasil a norma que define critérios e medidas de segurança para trabalhos com eletricidade é a NR10 (Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade). Com força de lei, esta norma obriga as empresas a seguirem uma série de medidas administrativas e técnicas a fim de garantir e manter a integridade do profissional.

Mardegan (2012), disserta sobre um dos maiores perigos da eletricidade, o arco voltaico, que é o resultado do rompimento de um meio isolante, seja ar, óleo ou outro dielétrico, pela passagem da corrente elétrica. Esse rompimento da isolação provoca visualmente uma espécie de raio, dando passagem a corrente elétrica entre dois pontos com diferença de potencial, seja fase-terra (monofásico), entre duas fases (bifásico) ou ainda no contato simultâneo das três fases do circuito elétrico (trifásico). Destaca ainda que o arco elétrico tem intensidade luminosa de até 2.000 vezes a iluminação de um escritório, podendo chegar a 20.000°C (4 vezes a temperatura da superfície do sol), ascendendo até o 4º estágio da matéria que é o Plasma.

O arco voltaico é geralmente resultado de um curto-circuito ou manobra de abertura de dois terminais durante a passagem da corrente elétrica. Devido às suas características de elevada temperatura e luminosidade, é considerado altamente perigoso à vida de quem está exposto a ele. Segundo Mardegan (2018), estima-se que 65% dos acidentes com arco elétrico ocorrem durante manutenções em instalações elétricas.

Mardegan (2018) completa ainda, que ao final da década de 1980 surgiu o primeiro artigo, de Ralph Lee, admitindo o elevado risco de queimaduras para trabalhadores submetidos aos arcos elétricos. Surgiram então os primeiros estudos sobre a energia incidente. Essa energia nada mais é que a energia térmica liberada pelo arco e mensurada em cal/cm<sup>2</sup>.

Atualmente a norma 1584 da IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) aborda conceitualmente, tecnicamente e define métodos de cálculo para a energia incidente em instalações elétricas. Em 2002 essa norma teve sua primeira publicação e no ano de 2018 foi atualizada. Também sobre o assunto arco elétrico, a NFPA (National Fire Protection Association) possui a norma 70-E que estabelece requisitos mínimos de segurança para cada nível de energia incidente encontrada através da IEEE 1584.

De acordo com o que foi evidenciado até o momento, indagamos: **Quais os valores de energia incidente e os níveis de proteção desejáveis, a fim de garantir a segurança dos trabalhadores expostos aos riscos do arco voltaico nas instalações elétricas de uma indústria de espuma do oeste de Santa Catarina?**

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos a seguir devem ser abordados: definir a energia incidente, buscar definir o que gera um arco voltaico e quais riscos impõe as instalações e as pessoas, interpretar normas que abordam o tema proposto, entender o que a NR10 aborda sobre segurança contra arco voltaico e por fim, interpretar os requisitos para cálculo de energia incidente, conforme norma IEEE 1584/2018.

Como forma de se obter resultados mais precisos, será utilizado um software para determinar os valores de energia incidente em painéis elétricos de uma indústria do oeste de Santa Catarina, de maneira a estabelecer as medidas mínimas de prevenção, proteção e controle dos riscos do arco voltaico para garantir a segurança dos trabalhadores e das instalações, de acordo com a NFPA 70-E/2018.

O risco de exposição a energia incidente é por vezes desprezada, muito por falta de conhecimento e também, por negligência. Ao abordar a temática exposta neste artigo busca-se acima de tudo, preservar a vida dos trabalhadores e o patrimônio, alertar as pessoas e profissionais sobre os riscos elétricos que estão expostos e como atenuá-los.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Os riscos que envolvem a eletricidade em momento algum devem ser ignorados, porém muitas pessoas não têm conhecimento das possíveis formas em que esses riscos se apresentam, seja por um choque elétrico em um carregador de celular, um incêndio por sobrecarga nos condutores de uma instalação, ou ainda uma descarga atmosférica que atinge uma rede de distribuição podendo danificar dispositivos a ela conectados.

A preocupação para com a segurança do trabalhador em eletricidade, além das normas de segurança e saúde cada vez mais restritivas, tem causado grandes mudanças no modo como as instalações elétricas são projetadas, operadas e gerenciadas. Diante disto, mensurar os riscos e dispor soluções para atenuá-los tornou-se etapa indispensável para garantir a integridade das instalações e a segurança dos trabalhadores expostos a ela (SENGER, 2012).

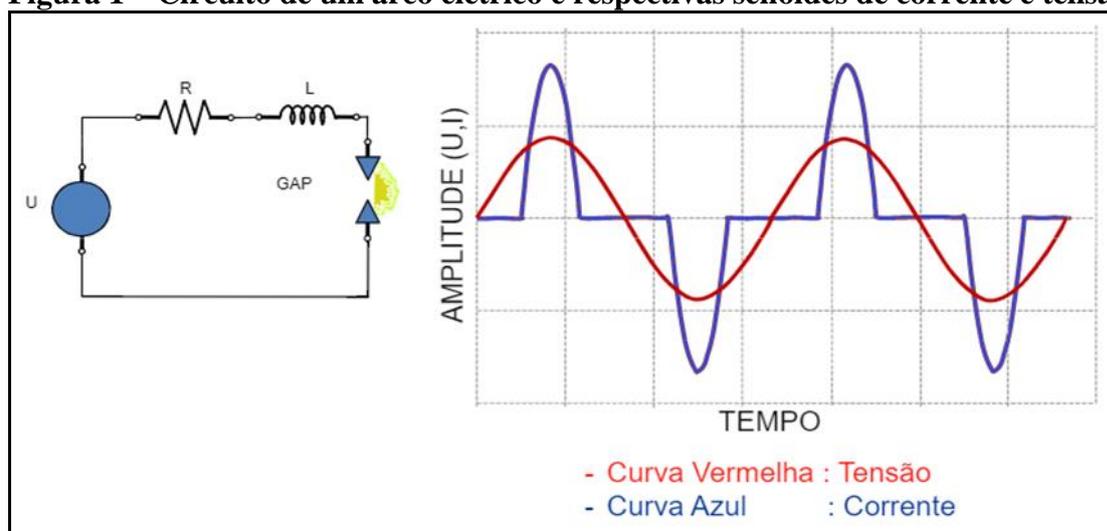
Como destaca Ferreira (2015) as instalações elétricas são parte indispensável de todos os setores da indústria. Para tanto, em toda sua concepção, do projeto a operação e manutenção destes dispositivos demandam atenção especial quanto à segurança humana e patrimonial.

## 2.1 ARCO VOLTAICO

O arco voltaico é definido por Ferreira (2015) como um caminho alternativo do fluxo de corrente elétrica, rompendo a rigidez dielétrica que é o limite de isolamento de um material, este então passa a ser um condutor, como o ar, por exemplo. Completa que o arco elétrico é resultado de uma sequência de fenômenos físicos, inicia pelo efeito corona e ao romper a rigidez dielétrica, a corrente passa a fluir pelo meio, antes isolante, em uma velocidade aproximada de 100 m/s liberando energia nas formas elétrica, térmica, acústica, química, radiação e mecânica.

O arco elétrico é uma descarga que pode surgir sempre que houver rompimento no dielétrico entre dois pontos de potenciais diferentes. A interrupção de correntes elétricas em um disjuntor, por exemplo, também provoca arcos no seu interior, porém de forma controlada. O circuito correspondente a falta por arco elétrico pode ser representada pela Figura 1, o circuito equivalente mostra uma fonte senoidal em série com uma impedância e com um Gap<sup>5</sup>. Os terminais do Gap representam os condutores e o ar é o dielétrico (MARDEGAN, 2012).

**Figura 1 – Circuito de um arco elétrico e respectivas senoides de corrente e tensão**



Fonte: Mardegan (2012).

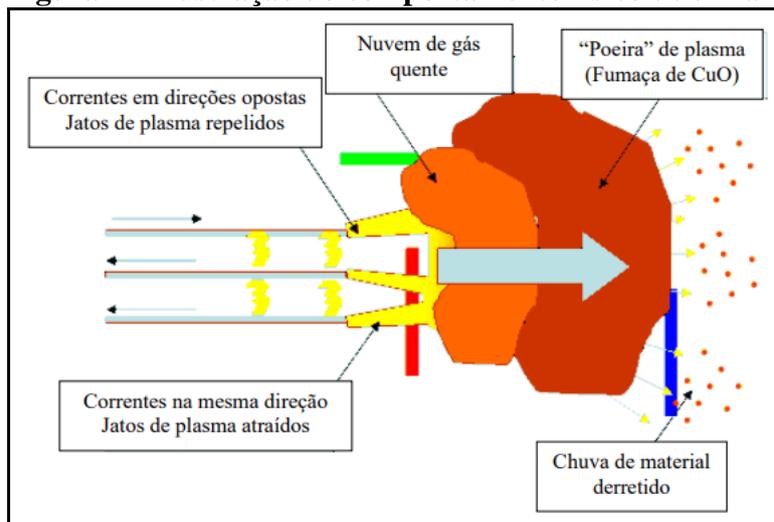
<sup>5</sup> Espaço entre dois pontos de potenciais diferentes preenchido com um dielétrico.

Ao descrever a imagem, Mardegan (2012) disserta sobre as características elétricas do arco, sendo faltas descontinuas e intermitentes, formando ondas de corrente não senoidais não sendo aplicável a teoria fasorial, geralmente as correntes de arco tem valor menor que a corrente de curto-circuito franco (fase-terra) com propriedades puramente resistivas.

### 2.1.1 Riscos do arco voltaico

Senger (2012) salienta que o arco elétrico se revela como um dos riscos elétricos mais nocivos aos trabalhadores podendo causar queimaduras graves com potencial, inclusive, para levá-los a óbito. Entre outros efeitos do arco elétrico, na sua ocorrência, são gerados vapores tóxicos, projeção de metal fundido, luz extremamente intensa e uma onda de pressão devido à expansão do ar.

**Figura 2 – Ilustração do comportamento físico de um arco elétrico**



Fonte: Senger (2012).

Descrevendo fisicamente o arco elétrico, Senger (2012) cita a rápida e irregular mudança na geometria do arco oriundos da convecção, além dos jatos de plasma e forças eletromagnéticas, ocasionando mudanças no trajeto do arco por conta das correntes transitórias. A Figura 2 representa a natureza direcional de um arco elétrico. As forças magnéticas geradas pela corrente alternada forçam sucessivos movimentos de atração e repulsão, os jatos de plasma, seguindo estes movimentos intensos, alimentam a nuvem de plasma.

**Figura 3 – Imagem do comportamento físico de um arco elétrico**



Fonte: IEEE 1584 (2018).

A Figura 3 mostra um arco elétrico com a configuração de eletrodos horizontais onde se atinge o estado de plasma e é forçado para a direção esquerda e horizontal, imagem obtida durante testes realizados para atualização da norma IEEE 1584/2018.

### **2.1.2 Proteção contra arco voltaico**

Os profissionais que atuam diretamente com instalações elétricas estão sujeitos aos riscos impostos pelo arco elétrico. Durante inspeções, manutenções, análises termográficas, as quais por vezes devem ser realizadas com painéis energizados a fim de se identificar possíveis problemas e obter resultados mais precisos, estes trabalhadores ficam sujeitos aos danos de um arco elétrico.

Segundo Queiroz (2011) o uso de EPIs contra queimaduras originadas por um arco elétrico deve ser a última opção para proteção dos profissionais. Os projetos devem prever recursos que permitam atuar na origem do arco elétrico, visando diminuir o tempo de exposição dos trabalhadores a energia incidente originada pelo arco elétrico.

A energia liberada e os danos subsequentes com origem de um arco elétrico, são determinados em função da tensão, magnitude da corrente de curto-circuito e do tempo de eliminação da referida falta. Com objetivo de diminuir as perdas causadas pelo arco elétrico algumas ações podem ser tomadas para amenizar ou eliminar ao menos uma das grandezas supracitadas (MARDEGAN, 2018).

Dentre as possibilidades de proteção contra arco aplicáveis, Queiroz (2012) traz a utilização de detectores de arco elétrico no interior dos painéis, que são sensores de luminosidade que detectam o espectro de luz originado pelo arco. Podendo ainda aplicar painéis resistentes a arco, com características construtivas definidas para suportar o fenômeno físico do arco elétrico, desde a alta pressão até mesmo as altas temperaturas. Além de relés específicos, com conexões para os sensores de luminosidade e com uma taxa de amostragem das correntes de curto-circuito mais detalhada que dos relés convencionais.

**Quadro 1 – relação Tipo de proteção x Danos causados**

Tipo de proteção	Consequências	
	Trabalhador	Equipamentos
EPI's/ Vestimentas especiais	Proteção elevada	Dano elevado
Painel com proteção para arco interno	Proteção elevada	Dano parcial
Operação remota	Proteção elevada	Dano elevado
Relé de detecção de arco	Proteção elevada	Proteção elevada

Fonte: Adaptado de Queiroz (2012).

O Quadro 1 traz um comparativo entre as proteções aplicáveis contra arcos voltaicos e seus respectivos danos em trabalhadores e nos próprios painéis e equipamentos. Como é possível observar, somente com relé de detecção de arco é possível assegurar uma proteção elevada para ambos, mas todas as aplicações têm como objetivo primordial garantir a vida dos profissionais expostos.

## 2.2 ENERGIA INCIDENTE

Os primeiros estudos referentes a energia incidente surgiram na década de 1980, quando Lee (1987) chamou a atenção para outro risco inerente a eletricidade além do choque elétrico, eram os efeitos do arco elétrico que, de acordo com suas estimativas, para uma pessoa submetida a uma queimadura de até segundo grau não seria fatal, e que por tanto, o valor máximo da energia incidente na distância de trabalho não deveria exceder 1,2cal/cm<sup>2</sup>. Caso estivesse sujeito a valores maiores, medidas de atenuação deveriam ser previstas.

A energia incidente mensurada em cal/cm<sup>2</sup> é a intensidade térmica do arco elétrico pela área de abrangência. Conforme Bottaro (2016) durante os testes para determinar a energia incidente são utilizados sensores térmicos do tipo calorímetros sendo instalados internamente nos painéis elétricos além de sensores externos, ambos detectam a variação de temperatura que

através de cálculos serão convertidas em energias entregues aos transdutores, podendo ser transmitidas (sensores no painel) ou incidentes (sensores externos adjacentes ao painel).

As energias incidentes, são valores variáveis para cada condição de queimadura ou não. A cada ensaio, um arco elétrico é induzido sob condições controladas e amostras de temperatura são coletadas pelos sensores calorímetros externos, e posteriormente convertidas em energia (calor) (BOTTARO, 2016).

## 2.3 NORMAS VIGENTES E APLICÁVEIS

### 2.3.1 Norma IEEE 1584

O cálculo de energia incidente a partir da norma IEEE 1584 é um método empírico, ou seja, se dá a partir de cálculos definidos com base nas centenas de testes realizados e seguindo uma série de passos pré-determinados para cada instalação a ser examinada.

#### **Quadro 2 – Sequência de passos para cálculo de energia incidente**

ETAPA	AÇÃO DE ACORDO COM A IEEE 1584
1	Coleta de dados da instalação e do sistema
2	Determinar os modos de operação do sistema e suas características
3	Determinar a corrente de curto-circuito
4	Determinar a corrente de arco elétrico
5	Definir os dispositivos de proteção e o tempo de duração do arco
6	Determinar as tensões do sistema e a classe dos equipamentos
7	Determinar a distância de trabalho
8	Calcular a energia incidente em todos os equipamentos
9	Determinar a distância segura de aproximação contra arco elétrico

Fonte: Adaptado da IEEE-1584 (2018).

Os passos apresentados no Quadro 2 tem como objetivo elencar toda e qualquer informação necessária para alimentar os cálculos de energia incidente. Para que o estudo realmente se mostre eficaz, os dados devem estar precisos e atualizados, desde diagramas unifilares a estudos de curto-circuito. Em muitos casos podemos ter mais de uma fonte alimentando um mesmo ponto, seja a concessionária ou grupo gerador. Dados de coordenação e seletividade são imprescindíveis, bem como tempo de atuação das proteções.

A IEEE 1584 determina ainda para quais casos sua metodologia de cálculo pode ser aplicada, sendo a tensão de linha entre 208V e 15000V, frequência de 50Hz e 60Hz.

**Tabela 1 – configurações possíveis para aplicação da IEEE 1584**

<b>Nível de tensão</b>	<b>Corrente de curto-circuito mínima</b>	<b>Corrente de curto-circuito máxima</b>	<b>Distância mínima entre eletrodos</b>	<b>Distância máxima entre eletrodos</b>
208V a 600V	500A	106000A	6,35mm	76,2mm
601V a 15000V	200A	65000A	19,5mm	254mm

Fonte: Dados da pesquisa (2020).

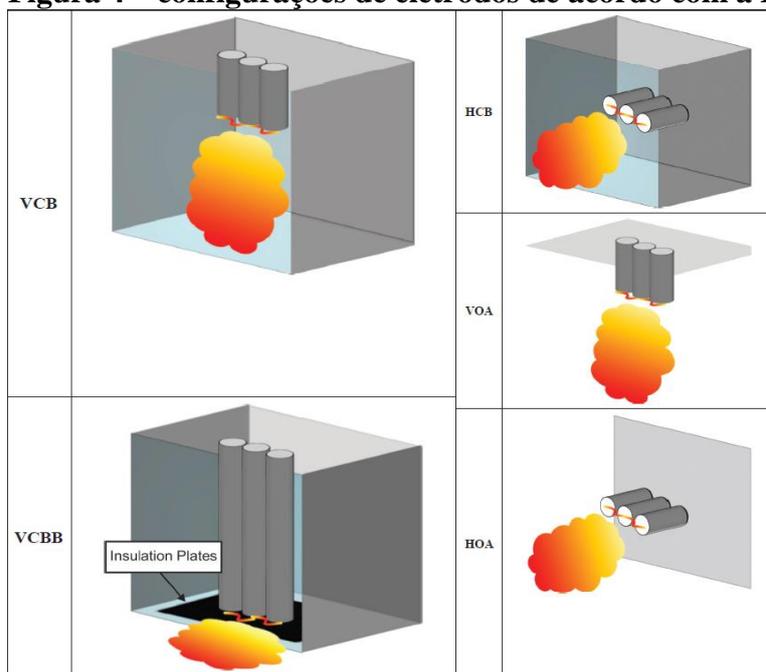
A Tabela 1 apresenta as referências de valores, mínimos e máximos, em que podem se aplicar as equações da norma IEEE 1584/2018. Para valores intermediários a estes, utiliza-se fórmulas de interpolação e ajustes, com coeficientes pré-determinados pela norma. O método em questão tem alto índice de complexidade e de dimensões equivalentes, por isso se faz necessário a utilização de softwares específicos para calcular a energia incidente, entre os mais utilizados estão o EasyPower e o ETAP.

As configurações de eletrodos possíveis também são citadas na norma, e dizem respeito a forma com que eles adentram no painel, ou se posicionam no ambiente conforme exemplificadas na Figura 4, podendo ser:

- VCB: configuração vertical, enclausurada em gabinete.
- VCBB: configuração vertical, enclausurada em gabinete terminando em superfície dielétrica.
- HCB: configuração horizontal, acondicionada em gabinete.
- VOA: eletrodo na posição vertical, ao ar livre.
- HOA: eletrodo na posição horizontal, ao ar livre.

Cada configuração de eletrodo diz respeito a forma com que os eletrodos adentram o gabinete ou o espaço em questão, e estão exemplificadas na Figura 4.

**Figura 4 – configurações de eletrodos de acordo com a IEEE 1584**



Fonte: IEEE 1584 (2018).

### 2.3.1.1 Norma NFPA 70E

A normativa em questão, intitulada “Standard for Electrical Safety in the Workplace” estabelece padrões de segurança para trabalhos em eletricidade, definindo por exemplo distâncias de segurança para choque elétrico, tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada.

Para os riscos de arco elétrico também estabelece a distância segura para se trabalhar, e ainda define os EPIs a serem utilizados para cada nível de energia incidente determinada por duas formas de cálculo, o método de estimativa teórica, baseada nos estudos de Ralph Lee e cálculos empíricos com base na IEEE 1584. A NFPA 70E estabelece EPIs que atenuem a energia incidente a partir de  $1,2\text{cal/cm}^2$ , que ao atingir uma pessoa sem vestimenta adequada causaria queimaduras de segundo grau não fatal, até  $40\text{cal/cm}^2$  na distância de trabalho, além desse valor não há vestimentas que possibilitem a execução do trabalho de forma segura.

Para definir a proteção adequada a norma traz o ATPV (Arc Thermal Performance Value) que é um valor em  $\text{cal/cm}^2$  atribuído ao tecido da roupa retardante a chama, e indica o valor máximo de energia incidente sobre este tecido com probabilidade de causar queimaduras de segundo grau no lado protegido igual a 50%.

As vestimentas retardantes as chamas são classificadas em 4 categorias de risco de acordo com o nível de energia suportada.

**Quadro 3 – performance mínima da vestimenta por categoria de risco**

Nível/Risco Categoria	Performance mínima
1	4 cal/cm <sup>2</sup>
2	8 cal/cm <sup>2</sup>
3	25 cal/cm <sup>2</sup>
4	40 cal/cm <sup>2</sup>

Fonte: adaptado de NFPA 70E (2018).

A análise do Quadro 3 é simples, a categoria de risco é limitada pela performance mínima da roupa retardante a chama, por exemplo uma vestimenta com ATPV entre 8cal/cm<sup>2</sup> e 24cal/cm<sup>2</sup> atende ao Risco 2.

**2.3.2 Norma NR 10**

A Norma Regulamentadora n°10 da Subsecretaria de Inspeção do Trabalho tem como objetivo determinar métodos e procedimentos de segurança em instalações e serviços com eletricidade, não trata especificamente do arco elétrico, porém em seu item 10.2.9.2 determina que “As vestimentas de trabalho devem ser adequadas às atividades, devendo contemplar a condutibilidade, inflamabilidade e influências eletromagnéticas” (NR10, 2019).

Para atender este item específico, e prover as vestimentas adequadas, devemos primeiro realizar os cálculos de arco voltaico e energia incidente, por tanto, torna-se obrigatório a realização dos estudos em questão.

**2.4 SOFTWARE ETAP**

O software ETAP é um dos mais completos do mercado, composto por diversos módulos de análises para sistemas elétricos de potência tanto para corrente alternada como para corrente contínua. As soluções variam de fluxo de potência, proteção e seletividade, cálculo de curto circuito, energia incidente, entre outros.

Com capacidade de identificar e analisar áreas de alto risco de arco elétrico e energia incidente, o módulo Arc Flash do ETAP inclui diferentes métodos de cálculo de arco elétrico para uma avaliação detalhada e precisa de sistemas de baixa, média e alta tensão, simulando e avaliando vários métodos de mitigação no estudo e determinando os níveis de energia incidente (ETAP, 2019).

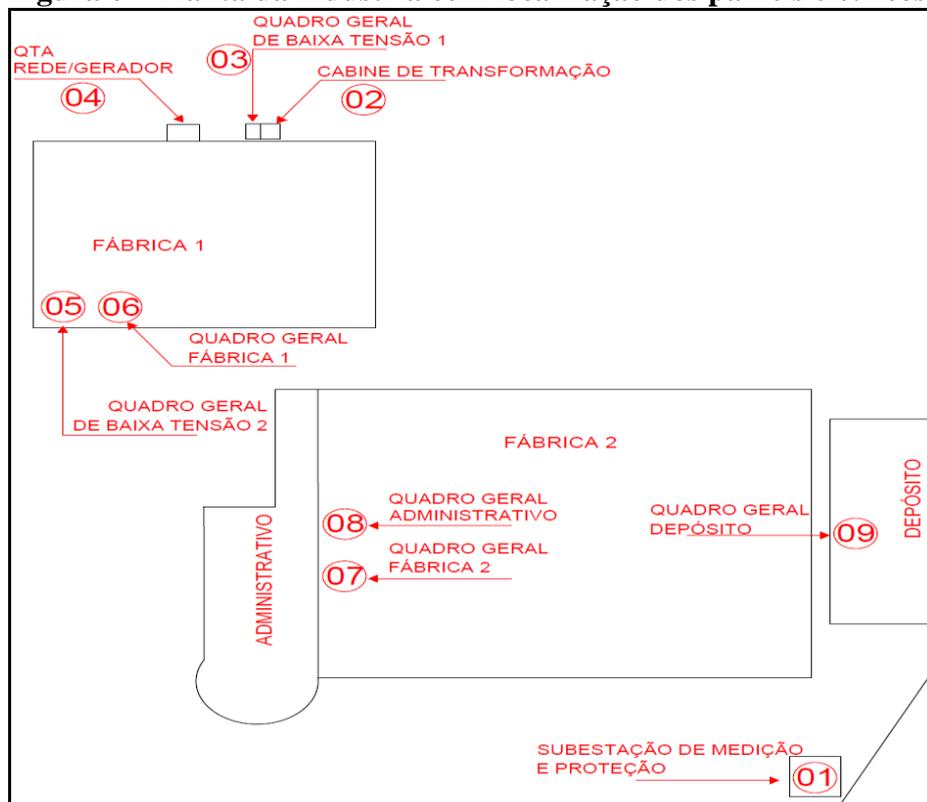
O Arc Flash Analysis é um módulo completamente integrado que resolve vários cenários, proporciona a avaliação rápida e fácil dos riscos de arco elétrico e análise de energia



### 3.1 COLETA DE DADOS

O cálculo para determinação da energia incidente precedeu-se da coleta de dados do sistema através dos projetos elétricos da instalação, contemplando o diagrama unifilar e o estudo de proteção. Complementando as informações necessárias foi realizado levantamento técnico no local, com o objetivo de verificar os níveis de tensão elétrica de painéis e quadros elétricos, características dos condutores, dimensões dos painéis, configuração dos eletrodos, tipos e características dos disjuntores elétricos e capacidade de suportabilidade a correntes de curto circuito dos disjuntores.

**Figura 6 – Planta da indústria com localização dos painéis elétricos principais**



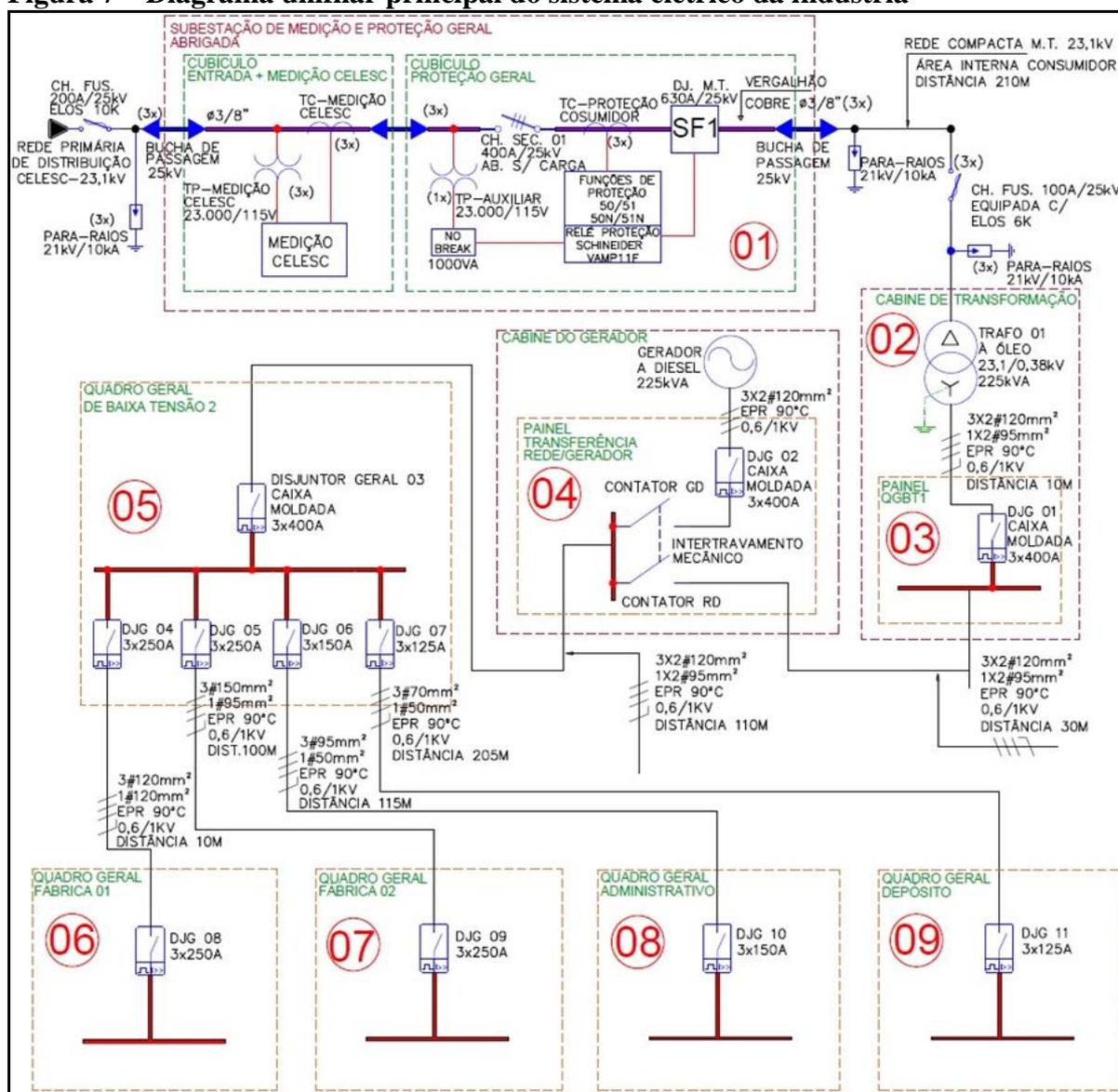
Fonte: Adaptado dos dados da pesquisa (2020).

A planta baixa da indústria é representada pela Figura 6, com destaque para a localização dos painéis elétricos e subestações, em que foram avaliados os valores de energia incidente. Os painéis elétricos estão ordenados pelo fluxo da energia elétrica consumida pela planta industrial e com a nomenclatura admitida pela empresa.

O diagrama unifilar apresentado na Figura 7 destaca-se por representar, as principais características elétricas do sistema, como proteções elétricas, condutores elétricos, distâncias

de circuitos, dentre outras. Os pontos de análise da energia incidente estão numerados em sequência, da entrada da energia na instalação até o seu consumo.

**Figura 7 – Diagrama unifilar principal do sistema elétrico da indústria**



Fonte: Adaptado dos dados da pesquisa (2020).

A Tabela 2, apresenta as informações que foram utilizadas para configuração do ETAP e consequentemente realizadas as simulações da energia incidente.

**Tabela 2 – Dados para cálculo da energia incidente de acordo com a IEEE1584/2018**

Ponto de análise	Corrente de curto-circuito máxima	Tempo de atuação da proteção	Dimensão do painel LxAxP	Configuração dos eletrodos	Distância entre os eletrodos
01	706,64 A	0,02s	--	HOA	300mm
02	5,986 kA	0,02s	--	HOA	250mm
03	5,764 kA	0,02s	1900x800x800mm	HCBB	55mm
04	5,314 kA	0,02s	1900x800x800mm	VCBB	25mm
05	3,41 kA	0,02s	1900x800x800mm	VCBB	25mm
06	3,3 kA	0,02s	1900x800x800mm	HCBB	50mm
07	2,62 kA	0,02s	1900x800x800mm	VCBB	30mm
08	3,009 kA	0,02s	1900x800x800mm	HCBB	50mm
09	1,67 kA	0,02s	1900x800x800mm	HCBB	50mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a norma IEEE 1584/2018, estão indicados na tabela 2 os painéis elétricos onde foram considerados os cálculos de energia incidente, os valores de curto-circuito calculados para cada painel, o tempo de atuação das proteções elétricas para cada valor de curto circuito, as dimensões dos painéis elétricos quando considerado e a distância entre os eletrodos.

### 3.2 APLICAÇÃO DO ARC FLASH ANALYSIS

No software ETAP, se deu a construção do diagrama unifilar apresentado na figura 7. Para cada elemento elétrico do sistema foi inserido suas características elétricas e mecânicas. Também foram pontuadas as localizações elétricas críticas para determinação das energias incidentes. Definido o sistema no ETAP, através do módulo Arc Flash Analysis, foi simulada a energia incidente em cada ponto pré-determinado do sistema elétrico da indústria considerando alguns cenários elétricos.

Na simulação dos cenários de energia incidente foi possível trabalhar várias ações no sistema elétrico, desde as operações de abertura e fechamento dos dispositivos de proteção para manutenção, até manobras de emergência em disjuntores, chaves e fusíveis.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

Os valores de energia incidente foram obtidos para cada ponto analisado do sistema. Foram comparadas as amplitudes entre a distância de trabalho e o limite máximo que o arco elétrico pode atingir, de forma que não seja fatal. Também foi possível gerar as etiquetas de

alerta para serem fixadas nos painéis elétricos, contendo as informações básicas de segurança para trabalhos nesses locais e painéis.

Os valores de distância segura sem EPI's trata da variação de espaço entre a origem do arco voltaico e o ponto onde o mesmo gera uma energia incidente de  $1,2\text{cal/cm}^2$ , que de acordo com Lee (1987), essa energia calorífera caso atinja uma pessoa sem proteção adequada ainda causaria queimaduras de segundo grau, porém não fatal, e no Software ETAP é apresentado como *Arc Flash Boundary* (AFB).

A distância de trabalho estabelecida para todos os pontos é de 18 polegadas, equivalentes a 45,72cm. A corrente de arco, também chamada corrente de falta, têm valores idênticos a corrente de curto-circuito, como apresentou Mardegan (2012) o valor é geralmente a baixo em virtude de que, para gerar o arco voltaico há o rompimento de um dielétrico, ou seja, um material isolante.

Através do módulo Arc Flash Analysis, do software ETAP, foi possível determinar os valores de energia incidentes para dois cenários: a indústria alimentada pela concessionária de energia elétrica, Celesc Distribuição S.A e a indústria alimentada somente pelo grupo gerador diesel, o qual opera em casos de falta de energia por parte da concessionária.

As Tabelas 3 e 4, ambas mostram os valores de energia incidente e as distâncias de segurança para duas situações, sendo para arcos elétricos ocorridos a jusante<sup>6</sup> do dispositivo de proteção, o que geralmente gerará energia incidente menores, e para arcos elétricos a montante<sup>7</sup> do dispositivo de proteção, neste caso os níveis de energia incidente serão maiores, pois a eliminação do arco elétrico se dará pelo dispositivo a montante do ponto considerado.

Apresentados na Tabela 3, estão os dados gerados pelo ETAP a partir do fornecimento de energia pela concessionária e tendo a corrente de arco elétrico com valores iguais para as duas situações analisadas, visto que ambas ocorrem no mesmo ponto e são diferenciadas somente pelo lado do disjuntor em que se aplica a falta.

Em geral, no cenário da Tabela 3 existem dimensões ínfimas de energia incidente, motivado pela atuação rápida das proteções, aspecto levantado por Mardegan (2018) como valor diretamente proporcional a intensidade do arco elétrico, assim como a corrente de curto-circuito, com valores atuais que podem ser considerados baixos, e justificados pela distância da unidade consumidora até a subestação de distribuição da concessionária.

---

<sup>6</sup> Do ponto de vista fonte-carga é após o dispositivo.

<sup>7</sup> Do ponto de vista fonte-carga é anterior ao dispositivo.

**Tabela 3 – Conexão com a rede da concessionária**

	Local de Análise								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Corrente de Arco (kA)	0,712	2,9	3,603	4,251	2,829	2,214	2,116	1,591	1,108
E. I. a Jusante (cal/cm <sup>2</sup> )	0,092	1,195	0,426	0,149	0,121	0,318	0,113	0,374	0,275
Nível de Risco NFPA-70E	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Distância Segura (cm)	33,53	45,72	27,43	12,38	12,86	23,77	12,34	25,72	22,1
Duração do Arco (s)	0,016	0,292	0,021	0,021	0,022	0,027	0,027	0,044	0,047
E. I. a Montante (cal/cm <sup>2</sup> )	0,592	2,103	4,658	0,268	4,223	0,318	1,343	0,764	0,614
Nível de Risco NFPA-70E	1	1	2	1	2	1	1	1	1
Distância segura (cm)	97,38	57,64	88,39	21,97	82,75	23,77	47,33	29,12	27,4
Duração do Arco (s)	0,035	0,351	0,265	0,025	0,794	0,027	0,186	0,094	0,085

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Para esse caso, se fosse considerado somente a energia incidente de arcos oriundos após os disjuntores teria valores quase desprezíveis, onde a distância de segurança permaneceu igual ou menor que o estipulado como distância de trabalho, podendo neste caso, trabalhar sem qualquer EPI para proteção contra energia incidente desde que dentro dos limites estabelecidos.

O maior valor obtido foi 1,195cal/cm<sup>2</sup> na bucha de baixa tensão do transformador, e pode ser explicado pela distância entre a falta e a proteção atuante, que para tal, é o disjuntor de média tensão da cabine de medição.

Porém ao aplicar a falta a montante do disjuntor, no mesmo painel, altera-se automaticamente o tempo de atuação da proteção sem alterar a corrente que irá alimentar o arco voltaico. E na Tabela 3 fica visível esta diferença, partindo do tempo de duração do arco, que somente para o caso 6 permaneceu igual, que para esta situação a proteção atuante ainda permanece muito próxima da falta.

Para todos os outros casos houve um aumento súbito da energia incidente, mudando apenas o ponto do painel que se aplica a falta e, atingindo mais de 10 vezes o valor apresentado

no mesmo local para o caso 3, saindo de 0,426 cal/cm<sup>2</sup> a jusante para 4,658 cal/cm<sup>2</sup> a montante do disjuntor, sendo que na maioria ao menos quase dobrou.

Já a distância de segurança nessa situação, aumentou consideravelmente, chegando a dobrar quando comparada a situação de trabalho. Mesmo não sendo valores considerados de grande risco, devem ser tidos como orientativos a fim de se manter a integridade dos que possam estar expostos. Como nos locais 3 e 5 em que a princípio poderiam ser operados inclusive sem EPI, agora devem atender a vestimenta mínima exigida de acordo com o quadro 3, é de risco 2 com ATPV de ao menos 8 cal/cm<sup>2</sup>.

**Tabela 4 – Conexão com o grupo gerador a diesel**

	Local de Análise								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Corrente de Arco (kA)	-	-	-	1,237	1,127	0,881	1,012	0,788	0,673
E. I. a Jusante (cal/cm <sup>2</sup> )	-	-	-	278,7	190,2	347,5	97,15	23,49	18,705
Nível de Risco NFPA-70E	-	-	-	IND	IND	IND	IND	3	3
Distância segura (cm)	-	-	-	1381	752,9	1154	518,2	198,1	176,78
Duração do Arco (s)	-	-	-	134,7	98,51	180,7	54,17	5,77	5,42
E. I. a Montante (cal/cm <sup>2</sup> )	-	-	-	396	328	347,5	113,2	28,12	22,51
Nível de Risco NFPA-70E	-	-	-	IND	IND	IND	IND	3	3
Distância segura (cm)	-	-	-	1565	1015	1154	769,5	231,7	196,2
Duração do Arco (s)	-	-	-	214,5	169,8	180,7	56,09	7,46	6,35

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Tabela 4 considera o cenário simulado para a alimentação oriunda do grupo gerador a diesel, com potência ativa de 157,5 kW. Neste caso a contatora da rede no QTA está aberta e a contatora do gerador está fechada, por tanto os pontos 1, 2 e 3 não possuem valores definidos já que seu fluxo de potência só existe pelo fornecimento da concessionária. Observa-se ainda que as correntes de falta são comparáveis a menor corrente de curto-circuito encontrada nas análises anteriores, porém a energia incidente para tais correntes é de certa forma exorbitante,

e justificada pelo alto tempo de duração do arco elétrico. Por ser uma corrente por vezes menor, o dispositivo de proteção não detecta imediatamente como sendo uma falta por arco devido a sua robustez.

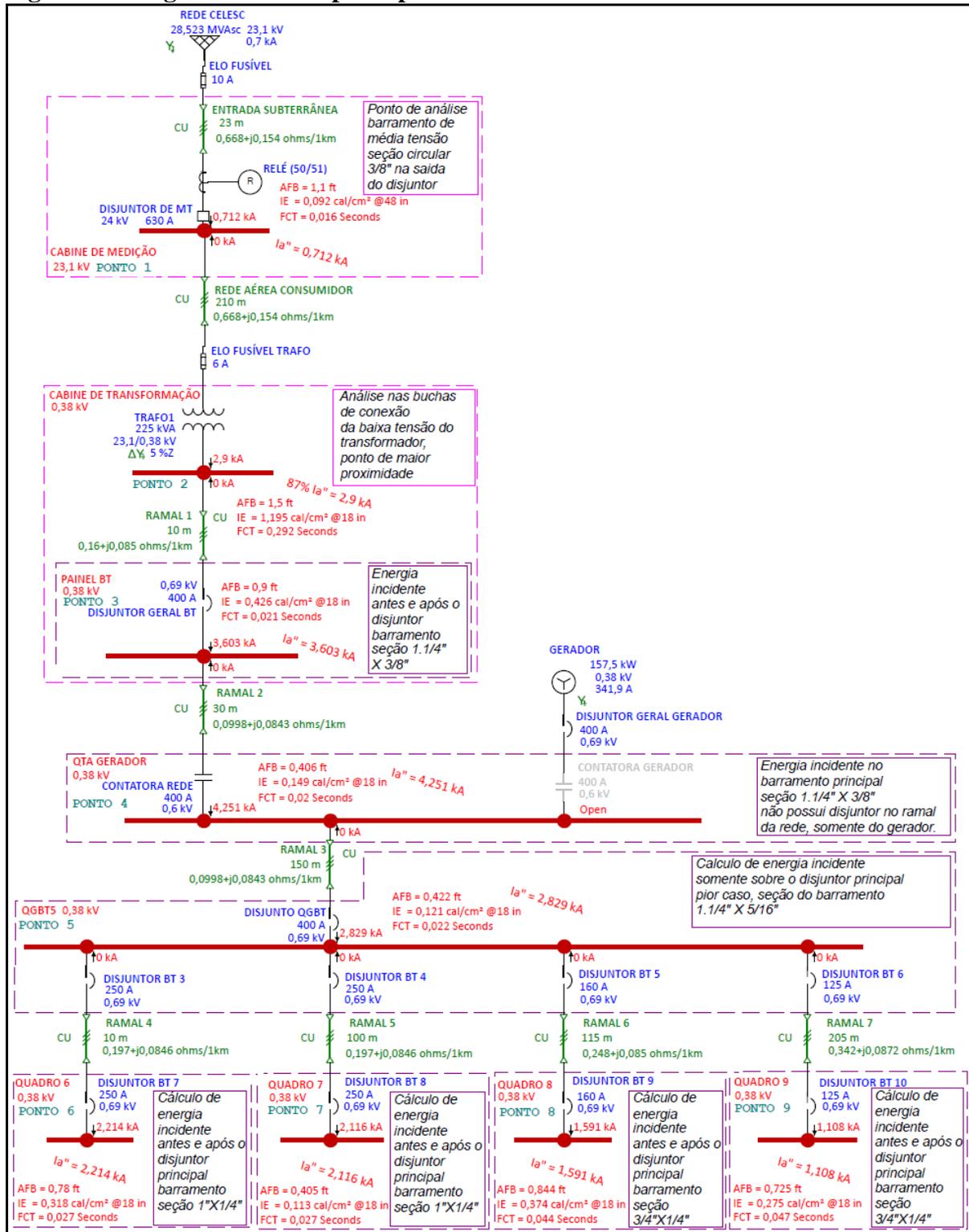
Vale aplicar o comparativo anterior, dos valores possíveis de se encontrar em um mesmo gabinete, prevalece demasiado quando a origem do arco elétrico se dá a montante do disjuntor geral. Como exemplo desmedido temos o QGBT 5 que chega a aumentar 72% a energia incidente comparado com o lado a jusante, e nos demais pontos a variação ficou entre 16% e 42% de aumento. Salvo o QGBT 6 que permaneceu inalterado quando das duas possibilidades devido à proximidade das proteções.

Ao tratar da distância de segurança, a variação de espaço é similar à de energia incidente, chega-se a valores inaplicáveis em termos de execução de manutenção, 15,65 metros no QTA do grupo gerador, quase 2 metros a mais que se ocorresse a falta a jusante. Nos demais painéis observou-se valores que não condizem com a realidade de um manutentor, que muitas vezes não dispõem de tal espaço para assegurar a proteção de pessoas próximas ou equipamentos.

Ao menos nos painéis 4, 5, 6 e 7, outra forma de mitigação do arco elétrico deve ser prevista, como operações somente com a rede desenergizada ou remotamente, assegurando acima de tudo a vida do manutentor. Queiroz (2012) salienta que para garantir a segurança do trabalhador e atenuar os danos na infraestrutura o mais indicado é a utilização de um relé de detecção de arco.

Pode-se observar na Figura 8, a forma como os dados são apresentados no ETAP, após criar o diagrama de impedâncias e proteções, e a inserção dos dados do sistema obtêm-se todos os valores pré-selecionados. O caso apresentado é a simulação na configuração da tabela 3, visto que a contatora de conexão do gerador está aberta no painel QTA Gerador ponto 4 de análise, e a jusante do disjuntor.

Figura 8 – Diagrama unifilar principal do sistema elétrico da indústria no ETAP



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

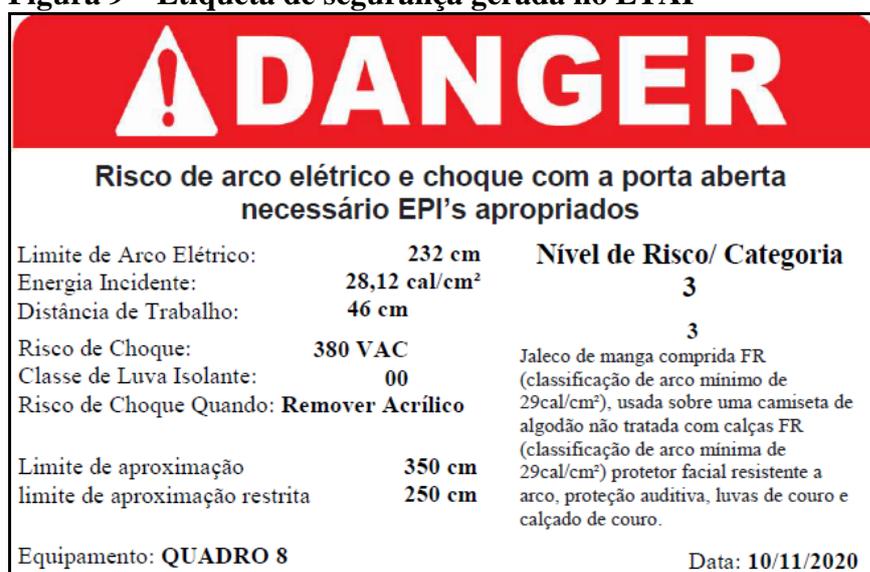
Inesperadamente em contraste com demais valores obtidos, o ponto 4 (QTA Gerador) apresentou uma energia incidente de  $396 \text{ cal/cm}^2$  podendo atingir uma distância aproximada de 15,65 metros com uma duração de 214,5 segundos. Para tal situação não existem vestimentas adequadas que suportem a quantidade de energia térmica, ondas de pressão e luz além de forças eletromagnéticas que Senger (2012) afirma serem parte integrante de um arco voltaico.

Tendo como base as orientações da norma NFPA-70E (2018) para determinar o nível de risco e vestimenta de proteção mínima adequada, a mesma prevê como máximo o nível de risco 4 onde vestimentas robustas e que limitam a mobilidade do profissional suportem ao menos  $40 \text{ cal/cm}^2$ . Para casos onde foram ultrapassados os valores de referência e não se pode garantir a proteção do profissional exposto, classificou-se como indeterminado.

Os níveis de risco encontrados demonstram que para atender a NR10 (2004) o manutentor deve estar equipado com a vestimenta mínima estipulada pela NFPA-70E (2018) que neste caso por certo devem suportar ao menos  $29 \text{ cal/cm}^2$  integrando assim o nível de risco 3. Lembrando Queiroz (2011) que salienta a vestimenta como a última opção de proteção, pois apesar de fornecer proteção elevada, da mesma forma pode ainda prover danos elevados.

O software ETAP ainda forneceu as etiquetas de segurança para cada local, conforme modelo apresentado na Figura 9, representa a placa de segurança do painel 8, com os dados obtidos no estudo, além de orientações contra choque elétrico e a vestimenta mínima exigida para se operar manutenções e manobras no local. Essa identificação deve ser alocada na parte externa à frente do painel.

**Figura 9 – Etiqueta de segurança gerada no ETAP**



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante das prerrogativas estabelecidas pelas normas IEEE-1584/2018 e NFPA-70E/2018 estima-se que nem todos os casos podem ser aplicados a tais textos, e diante do grau de complexidade dos cálculos envolvidos fica praticamente inviável a realização do estudo de energia incidente e proteção para o mesmo, sem a utilização de um software, no caso o ETAP.

Os valores obtidos através do software foram um tanto quanto surpreendentes quando comparamos nos dois cenários aplicados, ora alimentado pela concessionária, outra alimentada pelo grupo gerador a diesel. E o quanto os valores são influenciáveis por ajustes delicados em disjuntores e dispositivos de proteção que chegam a passar despercebidos na maioria das vezes, desde a escolha até o start-up.

Outro ponto relevante é como correntes de falta com valores que podem ser considerados ínfimos, chegam a gerar essa onda de energia tão intensa quanto os valores obtidos com a rede alimentada com o gerador. Sugere-se que alterações nos dispositivos de proteção, como instalação de disjuntores com ajustes mais precisos a fim de sensibilizar rapidamente quando a corrente de falta for de menor porte.

Deve se atentar ainda para ter como base de definição do EPI ou EPC o pior caso apresentado, até prevendo que o manutentor não tenha discrepâncias de valores de ATPV em suas vestimentas, tem que haver um padrão nivelado por cima. Quanto aos locais onde vestimentas não conseguem garantir a segurança do trabalhador deve-se identificar corretamente as distâncias para que pessoas não qualificadas mantenham a mínima requerida pelo presente estudo.

Ainda é recomendável um estudo mais aprofundado na origem do arco elétrico partindo de grupo gerador síncrono instalado dentro da unidade consumidora, em paralelo com a rede ou somente para emergência, buscando abordar proteções intrínsecas dos mesmo que possam eliminar a falta em caso de falha do disjuntor a jusante.

## REFERÊNCIAS

ABRACOPEL. **Anuário estatístico ABRACOPEL 2019/2020, 2020**. Disponível em: <<https://abracopel.org/estatisticas/>>. Acesso em: 17 ago. 2020.

BOTTARO, Marcio; RAPOSO, Ivan Bueno. **Proteção contra arco elétrico, 2016**. Disponível em: <<https://www.osestoreletrico.com.br/protecao-contra-arco-eletrico/>>. Acesso em: 17 ago. 2020.

ETAP, Software. **Arc Flash Analysis**. Disponível em: < <https://etap.com/product/arc-flash-software>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

FERREIRA, Castellane; MAZUCATO JUNIOR, Sérgio. **Comparativo entre topologias de detecção de arco elétrico, 2015**. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/comparativo-entre-topologias-de-deteccao-de-arco-eletrico/>>. Acesso em: 17 ago. 2020.

IEEE, STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE Std 1584: IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations**. 2018.

IFELL, Engenharia. Disponível em: < <https://www.ifell.com.br/atpv/>>. Acesso em: 27 ago. 2020.

LEE, Ralph H. **Pressures Developed by Arcs, 1987**. Disponível em: < [http://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/Pressures\\_developed\\_by\\_arc.pdf](http://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Pressures_developed_by_arc.pdf) >. Acesso em: 23 ago. 2020.

MARDEGAN, Claudio S. **Proteção e Seletividade em Sistemas elétricos Industriais**. São Paulo. Atitude: 2012. p. 76-81.

MARDEGAN, Claudio S.; PARISE Giuseppe. **Estudos de arco elétrico – Cálculo de energia incidente**, Revista O Setor Elétrico; ed 144. São Paulo. 2018.

MARDEGAN, Claudio S.; PARISE, Giuseppe. **O arco elétrico**, Revista O Setor Elétrico; ed 145. São Paulo. 2018.

NFPA, National Fire Protection Association. **NFPA-70E: Standard for Electrical Safety in the Workplace**. 2018.

NR10, Norma Regulamentadora nº 10. **NR10: SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE**. Escola Nacional da Inspeção do Trabalho, 2019. Disponível em: < [https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\\_SST/SST\\_NR/NR-10.pdf](https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-10.pdf)>. Acesso em: 17 ago. 2020.

QUEIROZ, A. R. S. **Utilização de relés digitais para mitigação dos riscos envolvendo arco elétrico, 2011**. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-30052012-124531/publico/UTILIZACAO\\_DE\\_RELES\\_DIGITAIS\\_PARA\\_MITIGACAO\\_DOS\\_RISCOS.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-30052012-124531/publico/UTILIZACAO_DE_RELES_DIGITAIS_PARA_MITIGACAO_DOS_RISCOS.pdf)>. Acesso em: 30 ago. 2020.

QUEIROZ, A. R. S.; SENGER E. C.; **Dispositivos de proteção contra arco elétrico – sensores de luminosidade**, Revista O Setor Elétrico; ed 78. São Paulo. 2012.

SENGER, E. C.; QUEIROZ A. R. S.; **A natureza e os riscos do arco elétrico**, Revista O Setor Elétrico; ed 72. São Paulo. 2012.