



# ***XI IEEE ESW-Brasil 2023***

## **A Engenharia Elétrica na Segurança do Trabalho**

17 a 19 de outubro de 2023 – São Paulo - SP

### **Aplicação de Medida de Controle de Engenharia para a Redução dos Níveis de Energia Incidente em uma Planta de Mineração – Estudo de Caso Real**

**Henrique Fantoni Primo**  
SM&A Sistemas Elétricos e  
Automação  
henrique.fantoni@sma-  
eng.com.br

**Filipe Barcelos Resende**  
VALE  
filipe.resende@vale.com

**Israel Resende Rodrigues**  
SM&A Sistemas Elétricos e  
Automação  
israel.rodrigues@sma-  
eng.com.br

**Giuliano de Oliveira Carnevali**  
SM&A Sistemas Elétricos e  
Automação  
giuliano.carnevali@sma-  
eng.com.br

#### **RESUMO**

As normas OHSAS 18001 e ISO 45001 estabelecem requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional e recomendam que as Medidas de Controle para Redução do Risco da ocorrência de Arcos em Sistemas Elétricos devem obedecer, preferencialmente, uma hierarquia. Nessa hierarquia os Controles de Engenharia são prioritários em relação as Medidas Administrativas, Alertas/Sinalização e Utilização de EPI. Dentro desse contexto, este artigo apresenta a implantação de duas medidas de controle de engenharia em um painel de média tensão, realizadas com a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos e um religador trifásico, para a redução da energia incidente em uma planta de mineração.

Através da análise da oscilografia, de um evento real, gerada por um relé de arco, idêntico ao utilizado neste estudo de caso, porém instalado em outro painel, pode-se comprovar o baixo tempo de atuação desses dispositivos de proteção. Considerando o baixo tempo de atuação, temos confirmada a eficácia da solução adotada, garantindo a segurança do operador, bem como minimizando os danos físicos aos equipamentos em caso de ocorrências de curtos-circuitos e arcos elétricos dentro de um painel.

#### **1.0 – INTRODUÇÃO**

Em 1982 o engenheiro Ralph H. Lee publicou um artigo na IEEE [1] abordando que em instalações elétricas existe um outro perigo além do choque elétrico, tão importante quanto, que é o arco elétrico. No trabalho foi apresentada pela primeira vez uma modelagem matemática consistente para o cálculo da energia incidente, definida na norma NFPA 70E [2] como a quantidade de energia impressa em uma superfície, a certa distância da fonte, gerada durante um evento de arco elétrico. A partir do artigo supracitado, diversas metodologias foram e estão sendo desenvolvidas para se obter os níveis de energia incidente em sistemas de corrente alternada e contínua.

As empresas e indústrias no mundo tem aumentado a preocupação com a segurança de trabalhos realizados em instalações elétricas, devido as severas consequências provocadas pela exposição dos profissionais a um arco elétrico. Entretanto, muitas empresas estão preocupadas em apenas adequar as vestimentas de segurança dos profissionais em relação aos níveis de energia incidente calculados.

O presente artigo tem como objetivo destacar a importância da adoção de medidas de controle de engenharia para redução dos níveis de energia incidente.

Inicialmente, será apresentado um breve resumo da normalização e a contextualização sobre o assunto, de forma a embasar a importância das medidas de controle de engenharia, descritas anteriormente. Na sequência será apresentado o estudo de caso desenvolvido em uma mineradora, apresentando as características do sistema elétrico em questão e a comparação entre os resultados dos níveis de energia incidente obtidos antes e após a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos no painel de média tensão analisado e de um religador na rede aérea que o alimenta. O baixo tempo de atuação desse relé de arco é comprovado por meio da análise de uma oscilografia, gerada por outro dispositivo de proteção idêntico (mesmo modelo e fabricante) ao utilizado nesse estudo de caso, após a ocorrência de um evento real de curto-circuito dentro de um painel de baixa tensão em outra subestação dessa mesma mineradora.

No final do artigo é concluída a eficácia das medidas de controle de engenharia adotadas para reduzir os níveis de energia incidente, garantindo a segurança dos profissionais e minimizando os danos físicos aos equipamentos.

## 2.0 – NORMALIZAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO

No Brasil, o Ministério do Trabalho e Emprego, por meio da Comissão Tripartite Paritária Permanente (CTPP), elabora e atualiza normas regulamentadoras, com objetivo de melhorar as condições e o meio ambiente do trabalho. Essas Normas Regulamentadoras (NR) são disposições complementares ao Capítulo V (Da Segurança e da Medicina do Trabalho) do Título II da Consolidação das Leis do Trabalho (CLT) e consistem em obrigações, direitos e deveres a serem cumpridos por empregadores e trabalhadores com o objetivo de garantir trabalho seguro e sadio, prevenindo a ocorrência de doenças e acidentes de trabalho. No caso específico de trabalhos em instalações elétricas e serviços em eletricidade destacam-se as seguintes NRs:

- NR-06 [3] que estabelece os requisitos para aprovação, comercialização, fornecimento e utilização de Equipamentos de Proteção Individual – EPI;
- NR-10 [4] que estabelece as condições mínimas para a segurança e saúde do trabalhador em instalações elétricas e serviços em eletricidade. Ela determina os parâmetros necessários para prevenção e controle dos riscos no ambiente de trabalho;
- NR-26 [5] que NR estabelece medidas quanto à sinalização e identificação de segurança a serem adotadas nos locais de trabalho.

Com relação aos níveis de energia incidente, o item 10.3.9 da NR-10 [4] apresenta os itens mínimos de segurança que devem estar presentes no memorial descritivo do projeto, dentre eles uma especificação técnica das características relativas à proteção contra choques elétricos, queimaduras e outros riscos adicionais.

A norma técnica ABNT NBR IEC 61482 [6] apresenta recomendações e orientações para utilização de vestimenta de proteção contra riscos térmicos de um arco elétrico para trabalhos em instalações energizadas (com tensão), obedecendo ao disposto na NR-06 [3].

O item 10.10.1 da NR-10 [4] informa que nas instalações e serviços em eletricidade deve ser adotada sinalização adequada de segurança, destinada à advertência e à identificação, obedecendo ao disposto na NR-26 [5].

Além dos trechos apresentados, outras normas nacionais e internacionais, tais como ABNT NBR 16384 [7], NFPA-70E [2], OSHA 29 [8] e NESC [9], também recomendam que todas as empresas devem calcular, armazenar, divulgar e sinalizar os níveis de Energia Incidente em todos os locais nos quais os profissionais podem realizar trabalhos em sistemas energizados.

Os padrões de vestimentas de segurança antichamas (contra arcos elétricos) dos profissionais são definidos pela empresa de acordo com os níveis de energia incidentes calculados. Normalmente, adota-se que os profissionais estão aptos a trabalhar em locais cuja energia incidente calculada seja igual ou menor ao valor do ATPV (Arc Thermal Protection Value) de suas vestimentas padrões. Para trabalhos em locais com energia incidente superior ao ATPV padrão, devem ser utilizadas vestimentas complementares (com valores de ATPV superiores). O indicador ATPV foi definido na norma técnica ASTM F1959 [10] em 1999 pela Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM - American Society for Testing and Materials) para medir o desempenho dos tecidos contra arco elétrico, sendo o valor máximo da energia incidente sobre o tecido que resulta numa probabilidade de 50% de que o calor transferido provoque uma queimadura do segundo grau, ou seja, 5 Joules por cm<sup>2</sup> (1,2 cal/cm<sup>2</sup>). Este valor é obtido mediante ensaios realizados pelo fabricante, utilizando a metodologia definida nessa mesma norma.

Diante do exposto acima, pode-se observar que, ao utilizar uma vestimenta antichamas cujo valor de APTV indicado seja igual aos níveis de energia incidente calculados naquele local, o profissional estará sujeito a uma probabilidade de 50% de chance de ter uma queimadura de 2º grau em caso de ocorrência de arcos elétricos. Dessa

forma, medidas de controle tem sido cada vez mais utilizadas para reduzir os níveis de energia incidente e proporcionarem uma maior segurança para os profissionais.

O item 10.2.1 da NR-10 [4] determina que em todas as intervenções em instalações elétricas devem ser adotadas medidas preventivas de controle do risco elétrico e de outros riscos adicionais, mediante técnicas de análise de risco, de forma a garantir a segurança e a saúde no trabalho.

A norma OHSAS 18001 [11], cuja sigla significa Occupational Health and Safety Assessment Services, é um padrão internacional que estabelece requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional. O objetivo é proteger e assegurar que os colaboradores de uma organização tenham um ambiente de trabalho saudável e seguro. Essa norma concentra-se em controlar os perigos e fornece uma estrutura para o gerenciamento eficaz da saúde e segurança no trabalho, incluindo todos os aspectos do gerenciamento de riscos e conformidade legal.

A norma ISO 45001 [12] é a nova norma ISO para saúde e segurança ocupacional e foi estabelecida para melhorar drasticamente os níveis de segurança e produtividade no local de trabalho. Com ênfase no compromisso de gerenciamento, envolvimento dos trabalhadores e controle de riscos, a ISO 45001 visa prevenir lesões, doenças e mortes relacionadas ao trabalho, especificando requisitos para um sistema de gerenciamento de saúde e segurança ocupacional. Essa norma, diferente da OHSAS 18001 que se concentra exclusivamente em riscos, e não em soluções, adota uma abordagem proativa que requer a avaliação e a remediação de riscos de perigo antes que eles causem acidentes e lesões.

Em comum, essas duas normas OHSAS 18001 e ISO 45001 estabelecem requisitos relacionados à Gestão da Segurança e Saúde Ocupacional e recomendam que as Medidas de Controle para Redução do Risco devem obedecer preferencialmente a hierarquia apresentada na Figura 1. Essas normas também ressaltam que todas as medidas de controle possíveis, para o sistema analisado, deverão ser implementadas em conjunto, ou seja, ao mesmo tempo.

Pode-se observar na Figura 1 que a utilização de EPI é a última medida recomendada pelas normas. Nessa mesma figura, verifica-se que os alertas/sinalizações e as medidas administrativas são consideradas menos eficientes que os controles de engenharia.

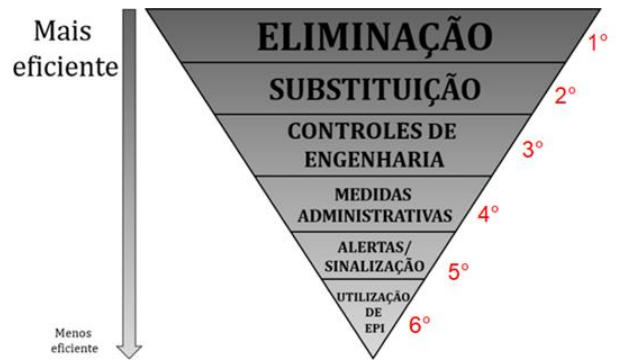


Figura 1 - Hierarquia das Medidas de Controle.

### 3.0 – ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado nesse artigo se refere à implantação de duas medidas de controle de engenharia em um painel de média tensão, realizadas com a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos e um religador, para a redução da energia incidente em uma planta de mineração.

#### 3.1 – SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

O sistema elétrico analisado nesse artigo, aborda os cálculos da energia incidente no painel de média tensão QD-02, instalado na Subestação Secundária de uma planta de mineração. Esse painel é alimentado pelo QD-01, instalado na Subestação Principal, via uma rede aérea de 13,8 kV, conforme diagrama unifilar simplificado apresentado na Figura 2.

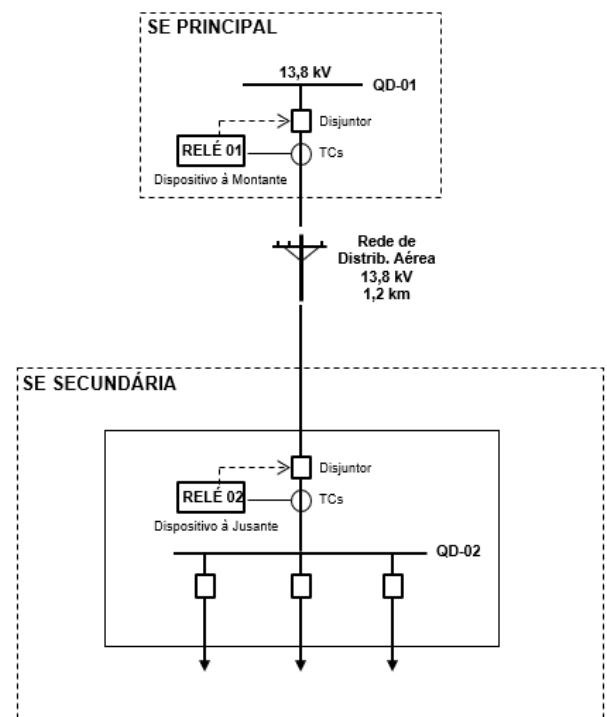


Figura 2 – Diagrama Unifilar Simplificado.

Utilizando as premissas e as metodologias de cálculo definidas na norma IEEE 1584 [13] e os dados principais do sistema informados na Tabela 1 foram obtidos os níveis de energia incidente no painel QD-02 apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 - Dados do sistema analisado.

Vnom (kV)	Icc Máx (kA)	Config. Eletrodos QD-02	Tempo atuação Relé 02 (ms)	Tempo atuação Relé 01 (ms)
13,8	15	HCB	400	600

Conforme diretrizes dessa norma IEEE 1584 [13], os cálculos da energia incidente foram realizados para duas configurações:

- Line Side, referente aos compartimentos de entrada de cabos e do disjuntor (destacados em verde na Figura 3);
- Load Side, referente aos barramentos e compartimentos dos demais cubículos desse painel (destacados em vermelho na Figura 3).



Figura 3 – Painel com destaque de Zona 1: Line Side e Zona 2: Load Side.

Tabela 2 - Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Config.	Iarc (kA)	T Relés (ms)	T DJ (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm <sup>2</sup> )
Line Side	13,6	600	80	5870	<b>26,16</b>
Load Side	13,6	400	80	4758	<b>18,47</b>

Pode-se observar na Tabela 2 que os níveis de energia incidente obtidos no QD-02 estão extremamente elevados nas duas configurações analisadas.

De acordo com os Padrões Normativos internos dessa mineradora, as intervenções ou manobras nesse painel só poderão ser realizadas quando ele estiver desenergizado ou quando os profissionais estiverem utilizando vestimentas antichamas complementares, uma vez que os níveis de energia incidente calculados foram superiores a 8 cal/cm<sup>2</sup>.

### 3.2 – MEDIDA DE CONTROLE DE ENGENHARIA

De forma a viabilizar que os profissionais realizem as intervenções e manobras no QD-02 energizado, utilizando a vestimenta antichamas padrão com ATPV 10,1 cal/cm<sup>2</sup>, foi definida uma medida de engenharia contemplando a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos no cubículo de entrada desse painel. Conforme apresentado no catálogo do relé utilizado [14], o fabricante garante que a faixa do tempo máximo de atuação da proteção contra arcos elétricos varia de acordo com a informação transcrita da Figura 4:

- De 2 a 5 ms quando da utilização das saídas digitais rápidas;
- De 7 a 13 ms quando da utilização das saídas digitais convencionais.

SEL-751 arc-flash protection is exceptionally fast. Typical relay operating times are in the order of 2–5 ms when equipped with the optional fast hybrid (high-speed) output card. With standard, electromechanical outputs, tripping time increases to 7–13 ms. Fault clearing time is typically longer, determined by the breaker operating time, which often adds three to five cycles.

Figura 4 – Catálogo relé SEL-751.

O relé de arco foi instalado no cubículo de entrada do QD-02, sendo configurado para duas zonas de proteção (Zona 1: Line Side e Zona 2: Load Side) e para atuação nas saídas digitais rápidas.

Entretanto, devido à grande distância e a impossibilidade de lançamento de fibra ótica entre as Subestações Principal e Secundária, a atuação (TRIP) das duas zonas de proteção do relé de arco foram direcionadas para o respectivo disjuntor, instalado no cubículo de entrada do QD-02, conforme diagrama simplificado apresentado na Figura 5.

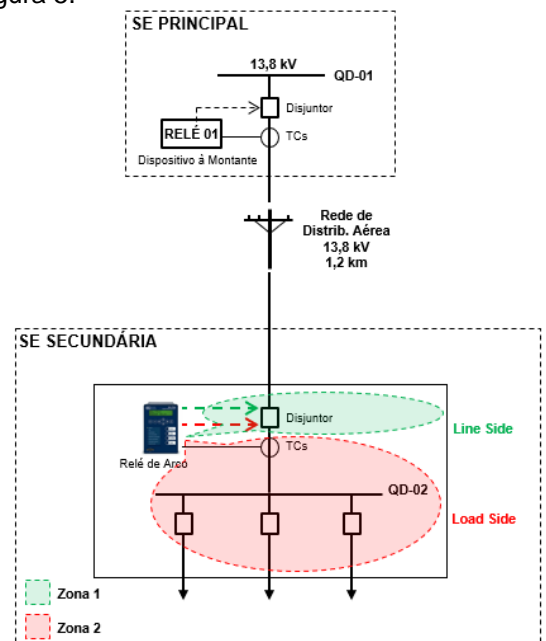


Figura 5 – Diagrama Unifilar Simplificado.

A Tabela 3 apresenta os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02, considerando a instalação do relé de arco.

Tabela 3 - Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Avaliação	I <sub>arc</sub> (kA)	T (ms)	T disp (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm <sup>2</sup> )
Line Side	13,6	600	80	5870	26,16
Load Side	13,6	5	80	1674	3,27

Pode-se observar que apesar da instalação do relé de arco, os níveis de energia incidente no cubículo de entrada do QD-02, referentes à análise de Line Side, permaneceu inalterado, uma vez que o tempo de atuação utilizado (600 ms) foi mantido como sendo do dispositivo à montante (Relé 01, instalado no QD-01).

Para adequar os níveis de energia incidente para essa configuração (Line Side), foi necessária a definição de outra medida de controle de engenharia. Nesse caso, foi realizada a instalação de um religador no último poste da rede aérea antes da descida para a entrada dos cabos isolados na Subestação Secundária, que são conectados no QD-02, ver Figura 6. Dessa forma, a atuação da Zona 2 (Line Side) de proteção do relé de arco foi direcionada para a abertura do religador, conforme diagrama unifilar simplificado apresentado na Figura 7.



Figura 6 – Religador instalado no poste.

A Tabela 4 apresenta os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02 após a instalação do relé de arco e do religador.

Tabela 4 – Níveis de Energia Incidente no QD-02.

Avaliação	I <sub>arc</sub> (kA)	T (ms)	T disp (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm <sup>2</sup> )
Line Side	13,6	5	80	1674	3,27
Load Side	13,6	5	80	1674	3,27

Pode-se observar na Tabela 4 que os níveis de energia incidente obtidos no QD-02 (3,27 cal/cm<sup>2</sup>) são inferiores ao limite de 8 cal/cm<sup>2</sup>, permitindo que os profissionais realizem intervenções ou manobras nesse painel quando ele estiver energizado, utilizando apenas as vestimentas antichamas padrões da empresa com ATPV de 10,1 cal/cm<sup>2</sup>.

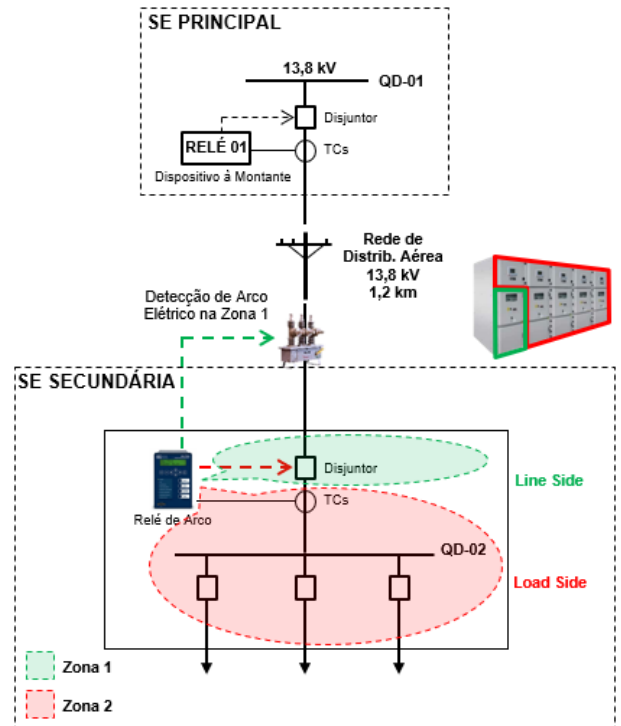


Figura 7 – Diagrama Unifilar Simplificado.

### 3.3 – OSCILOGRAFIA DE EVENTO REAL

A Figura 8 apresenta uma oscilografia registrada por outro relé de arco, idêntico ao utilizado nesse artigo (mesmo modelo e fabricante), após a ocorrência de um evento real de curto-circuito dentro de um painel de baixa tensão, instalado em outra subestação dessa mesma mineradora.

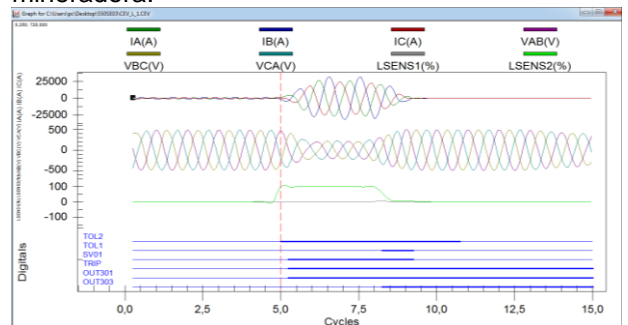


Figura 8 – Oscilografia gerada pelo relé de arco.

Pode-se observar na oscilografia que o relé atuou (TRIP) com um tempo de aproximadamente 0,25 ciclos (em torno de 4,17 ms), dentro da faixa de 2 a 5 ms garantida pelo fabricante, considerando a utilização das saídas digitais rápidas. Verifica-se também nessa oscilografia que o tempo de abertura/extinção do arco pelo disjuntor de baixa tensão foi de aproximadamente 4 ciclos (em torno de 66,7 ms).

A Tabela 5 apresenta os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02 considerando o tempo real de atuação dos contatos de saídas rápidas do relé, obtido pela oscilografia da Figura 8. Os tempos de

abertura/extinção do arco pelo disjuntor foram mantidos, uma vez que os valores obtidos na oscilografia se referem a um dispositivo de baixa tensão.

*Tabela 5 – Níveis de Energia Incidente no QD-02.*

Avaliação	Iarc (kA)	T (ms)	T disp (ms)	AFB (mm)	E (cal/cm <sup>2</sup> )
Line Side	13,6	4,17	80	1664	3,24
Load Side	13,6	4,17	80	1664	3,24

#### 4.0 – CONCLUSÕES

O artigo apresentou inicialmente um breve resumo da normalização e contextualização sobre conceitos de energia incidente e indicadores de vestimentas (ATPV), de forma a embasar a importância da adoção de medidas de controle de engenharia.

Foi apresentado um estudo de caso real desenvolvido em uma mineradora, no qual foram calculados os níveis de energia incidente no painel de média tensão QD-02, considerando o projeto original, ou seja, os dispositivos de proteção atuando com temporização definida para a filosofia de coordenação convencional (Relé 01 com  $t = 600$  ms e Relé 02 com  $t = 400$  ms). Nesse caso, os resultados obtidos foram  $26,16 \text{ cal/cm}^2$ , para análise Line Side, e  $18,47 \text{ cal/cm}^2$ , para Load Side, sendo eles superiores ao limite definido nos Procedimentos Normativos internos da empresa ( $8 \text{ cal/cm}^2$ ). Para adequar os níveis de energia incidente ao valor limite, foi adotada uma medida de controle de engenharia, que é a mais utilizada atualmente, a qual contempla a instalação de um relé de proteção contra arcos elétricos no cubículo de entrada do QD-02. Entretanto, essa medida não se mostrou suficiente, pois não alterou o valor de energia incidente calculado para a análise da configuração Line Side.

A solução final adotada nesse estudo de caso, capaz de reduzir os níveis de energia incidente em todas as configurações analisadas, foi a implementação de mais uma medida de controle de engenharia, porém nada comum. Essa medida contempla a instalação de um religador no último poste da rede aérea antes da descida para a entrada dos cabos isolados na Subestação Secundária, que são conectados no QD-02. Dessa forma, com a atuação da zona de proteção da Line Side do relé de arco sendo direcionada para a abertura do religador, o nível da energia incidente calculado para essa configuração foi de  $3,27 \text{ cal/cm}^2$ , igualando ao valor obtido para Load Side.

Diante de tudo o que foi apresentado, pode-se concluir que o artigo obteve êxito ao comprovar, utilizando cálculos e a análise de uma oscilografia de um evento real, a importância e a

eficácia da utilização em conjunto das duas medidas de controle de engenharia. Estas definidas para a redução dos níveis de energia incidente no painel analisado, garantindo a segurança dos profissionais e minimizando os danos físicos aos equipamentos.

#### 5.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lee, Ralph H. "The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-18, Issue: 3, May/June 1982.
- [2] Norma técnica NFPA-70E:2023 – "Standard for Electrical Safety in the Workplace".
- [3] Norma Regulamentadora NR-6 de 28/07/2022 – "Equipamento de Proteção Individual - EPI".
- [4] Norma Regulamentadora NR-10 de 30/07/2019 – "Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade".
- [5] Norma Regulamentadora NR-26 de 06/09/22 – "Sinalização de Segurança".
- [6] Norma técnica ABNT NBR IEC 61482:2023 – "Trabalho Sob Tensão - Vestimenta de Proteção contra Perigos Térmicos de um Arco Elétrico".
- [7] Norma técnica ABNT NBR 16384:2020 – "Segurança em Eletricidade — Recomendações e orientações para trabalho seguro em serviços com eletricidade".
- [8] Norma técnica OSHA 29 CFR 1910 – "Occupational Safety and Health Standards".
- [9] Norma técnica National Electrical Safety Code (NESC):2023.
- [10] Norma Técnica ASTM F1959/F1959M:22 – "Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing".
- [11] Norma Técnica OHSAS 18001:2007 – "Occupational Health and Safety Assessments Series".
- [12] Norma Técnica ISO 45001:2018 PT – "Sistemas de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional - Requisitos com orientação para uso".
- [13] Norma Técnica IEEE 1584:2018 – "Guide For Performing Arc-flash Hazard Calculation".
- [14] SEL-751 Feeder Protection Relay – "Instruction manual".