

Avaliação do Risco de Descargas Atmosféricas em Instalações Industriais contendo Silos Metálicos de Negro de Fumo

M.Sc. João Cruz e João Cuba

Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco – LabRisco, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) – Avenida Professor Mello Moraes 2231, São Paulo/SP - Brasil, CEP: 05508-030.

Jhonatan Albertini e Carina Silva

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) – Avenida Professor Mello Moraes 2231, São Paulo/SP - Brasil, CEP: 05508-030.

SINOPSE

De acordo com o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), o Brasil apresenta em média 77,8 milhões de descargas atmosféricas por ano. Devido as grandes energias envolvidas em possíveis eventos, as descargas atmosféricas se mostram como uma fonte de perigo capaz de gerar acidentes de grande proporção. A Norma ABNT NBR 5419-2 contempla a avaliação de risco e define os requisitos para determinação de proteção de estruturas contra descargas atmosféricas em território nacional. Complexos industriais de processamento de borracha contém estruturas de armazenamento de insumos em silos metálicos verticais. Estes insumos são diferentes tipos de negro de fumo (*carbon black*), substâncias sólidas em forma de pó que garantem às instalações o rótulo de áreas com potencial risco de explosão/incêndio de poeira combustível. O Data Sheet 7-76 da FM Global expõe e discute os aspectos de prevenção e mitigação das explosões e incêndios de poeira combustível. Este trabalho avalia uma estrutura de uma instalação de enriquecimento de borrachas, para a qual se justificam relevantes análises de risco e de consequências devido à incidência de descargas atmosféricas como possíveis fontes de ignição para explosão de poeira combustível. As análises mostraram-se possíveis através do uso conjunto da Norma ABNT NBR 5419-2 e do Data Sheet 7-76 da FM Global. Neste contexto, foram consideradas para a análise de riscos as principais fontes de danos geradas por uma descarga atmosférica na estrutura e no silo metálico contendo negro de fumo, sendo as avaliações feitas acerca da severidade associada à perda de vida humana, incluindo na análise a possibilidade de ferimentos permanentes. Cálculos de risco global à estrutura foram realizados para cenários com e sem a presença de medidas de proteção (utilização de SPDA – Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), sendo os mesmos comparados a fim de comprovar a importância do procedimento de gerenciamento de risco como ferramenta de proteção e de redução dos riscos aos indivíduos. Uma análise qualitativa de consequências mostrou-se suficiente para avaliar as barreiras de segurança projetadas para os silos metálicos de armazenamento e discorrer acerca das reais chances de explosão de poeira.

Palavras-Chave: Análise de Riscos, Análise de Consequências, Descargas Atmosféricas, Negro de Fumo (*Carbon Black*), Silos Metálicos, Explosão de Poeira Combustível.

1. OBJETIVO

O presente estudo tem por objetivo realizar uma análise de risco de incidência de descargas atmosféricas em um sistema de armazenagem de negros de fumo (estrutura contendo silos de armazenamento), de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 5419, com foco na avaliação dos impactos à vida humana, tanto óbitos ou ferimentos. As estruturas contendo silos de negros de fumo (*carbon black*) são típicas de fábricas de borrachas reforçadas e pneus. A análise se mostra necessária para determinação do nível de proteção adequado. Pretende-se reduzir as probabilidades de danos ou a perda resultante com as medidas de

proteção a serem implementadas. Uma Análise de Consequências Qualitativa também se mostra necessária para avaliar os perigos apresentados pelos negros de fumo e constatar os possíveis danos de explosões/incêndios de poeira dentro e fora (ainda dentro da estrutura) dos silos de armazenamento.

2. DESCRIÇÃO

Introduzindo a apresentação das análises realizadas pelo estudo, apresenta-se inicialmente nesta seção uma descrição do escopo do projeto, percorrendo a estrutura e instalação a ser analisada (função/objetivo produtivo), as descargas atmosféricas (fontes dos possíveis danos para nossa estrutura) e os negros de fumo (a substância utilizada como insumo dentro da nossa instalação e que possibilita a criação de ambiente explosivo).

As informações fornecidas ao longo da Descrição e Discussão fornecem ao leitor um guia, possibilitando a reprodução das análises realizadas. É aconselhado o uso em paralelo das normas citadas.

2.1 Estrutura e Instalação

A instalação analisada pertence a uma empresa pneumática brasileira, encontrada na região nordeste, a qual realiza no local reforço de peças de borracha utilizando certas espécies de negro de fumo, substâncias estas que são definidas na sequência, sendo armazenadas em silos metálicos.

Os silos metálicos considerados para este estudo contam com uma espessura superior a 3/8 de polegada, tendo como material base o aço carbono e contendo em sua estrutura um sistema de alívio de pressão projetado. Os silos encontram-se englobados por uma estrutura, a qual está cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos, devido ao isolamento fornecido para esta instalação, afastada da cidade. As dimensões consideradas para a estrutura a ser protegida são: uma altura de 29,4 metros, um comprimento de 19 metros e uma largura de 10,75 metros.

A instalação considerada é conectada por uma linha de energia enterrada na malha de aterramento da planta, com 100 metros de comprimento, em ambiente urbano. A subestação considerada para alimentar esta estrutura está cercada também por objetos da mesma altura ou menores, possuindo as seguintes dimensões: uma altura de 5 metros, um comprimento de 10 metros e uma largura de 10 metros.

2.2 Descargas Atmosféricas

Descargas atmosféricas, ou simplesmente raios, podem ser definidos como o rompimento do isolamento em ar entre duas superfícies carregadas eletricamente com polaridades opostas ocasionando o surgimento de uma corrente elétrica muito intensa. As intensidades das descargas variam dentro da ordem de grandeza das dezenas de kA. Uma forma de avaliar a frequência de descargas elétricas em uma região é através do índice cerâmico, que representa o número médio de dias com trovoadas durante um ano em uma determinada região. Deste índice é determinada, com auxílio de métodos empíricos, a densidade de descargas para o solo em uma área por ano.[1 – 3]

Atualmente mapas de densidade de descargas atmosféricas podem ser encontradas na NBR 5419:2015[4] para todo o território nacional. A Figura 1 apresenta parte do mapa da região nordeste.[4]

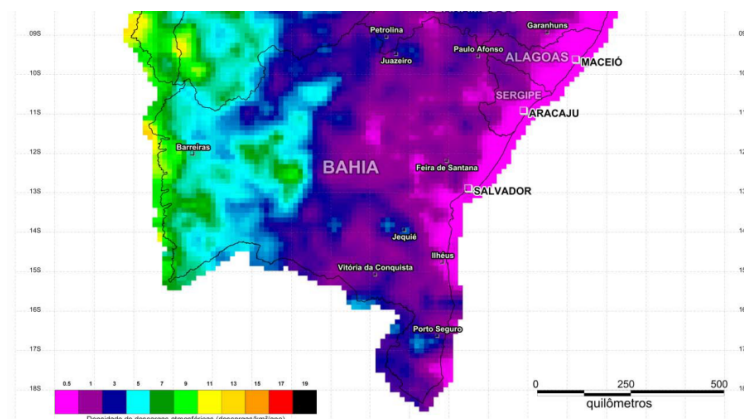


Figura 1 – Densidade de descargas atmosféricas (N_G) - Parte do mapa da região nordeste (descargas/km²/ano). Imagem adaptada da Norma NBR 5419-2.[4]

A principal fonte de danos tem origem na corrente gerada por uma descarga atmosférica, e sua severidade está relacionada ao ponto de impacto da descarga, deste modo, segundo a NBR 5419-2 temos que, as fontes de dano associada a descarga elétrica podem ser classificadas na Norma NBR 5419-2:[4]

- S1: Descarga atmosférica que atinge a estrutura;
- S2: Descarga atmosférica que atinge áreas próximas à estrutura;
- S3: Descarga atmosférica que atinge a linha de energia elétrica, linha telefônica e cabo de internet;
- S4: Descarga atmosférica que atinge as proximidades da linha de energia elétrica, linha telefônica e cabo de internet.

Para aplicações práticas, é usual distinguir entre três tipos básicos de danos os quais aparecem como consequência das descargas atmosféricas, são estas:[4]

- D1: Ferimentos aos seres vivos por choques elétricos;
- D2: Danos físicos;
- D3: Falhas de sistemas eletroeletrônicos.

Cada tipo de dano, sozinho ou em combinação com outros, pode produzir diferentes perdas consequentes em uma estrutura a ser protegida. O tipo de perda pode acontecer dependendo das características da própria estrutura e do seu conteúdo. Dentro da referida norma, estas podem ser classificadas através de perda de vida humana, de serviço público, de patrimônio cultural e de valor econômico. Para neste trabalho será considerada:[4]

- L1: Perda de vida humana (incluindo ferimentos permanentes).

A avaliação de risco a ser considerada será o associado à perda L1:

- R1: risco de perda de vidas humanas ou danos permanentes.

O risco R1 é calculado através da soma dos seus componentes de risco. A Tabela 1 apresenta, de modo geral, os componentes de risco (R_i) de acordo com as fontes e os tipos de danos assim como seus agrupamentos pela fonte.[4]

Tabela 1 – Componente de risco e seus agrupamentos.[4]

Componente	Descrição
Descargas atmosféricas na estrutura	
R_A :	Componente relativo a ferimentos aos seres vivos causados por choque elétrico devido às tensões de toque e passo dentro da estrutura e fora nas zonas até 3m ao redor dos condutores de descidas. Perdas do tipo L1 e L4 (quando a estrutura contiver animais);
R_B :	Componente relativo a danos físicos causados por centelhamentos perigosos dentro da estrutura iniciando incêndio ou explosão, os quais podem também colocar em perigo o meio ambiente. As perdas são L1, L2, L3 e L4;
R_C :	Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP (<i>Lightning Eletromagnetic Impulse</i>). Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos junto com o tipo L1.
Descargas atmosféricas perto da estrutura	
R_M :	Componente de risco relativo a falhas de sistemas internos causados por LEMP. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos junto com o tipo L1.
Descargas atmosféricas em uma linha conectada à estrutura	
R_U :	Componente relativo a ferimentos aos seres vivos. Perdas do tipo L1 e L4 para propriedades agrícolas;

R_V : Componente relativo a danos físicos (incêndio ou explosão). Todos os tipos de perdas podem ocorrer (L1, L2, L3 e L4);

R_W : Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos junto com o tipo L1.

Descargas atmosféricas perto de uma linha conectada à estrutura

R_Z : Componente relativo a falhas de sistemas internos causados por sobretensões induzidas nas linhas que entram na estrutura e transmitidas a esta. Perdas do tipo L2 e L4 podem ocorrer em todos os casos junto com o tipo L1.

Considerando suas componentes, o risco R_1 para a estrutura descrita pode ser obtido através da Equação (1).

$$R_1 = R_A + R_B + R_C + R_M + R_U + R_V + R_W + R_Z \quad (1)$$

Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) são necessários se o risco R_1 for maior que o risco tolerado (R_T). Neste caso, medidas de proteção devem ser adotadas de modo a reduzir o risco ao nível tolerável. A Figura 2 apresenta um fluxograma contendo o procedimento básico para o gerenciamento do risco.[4]

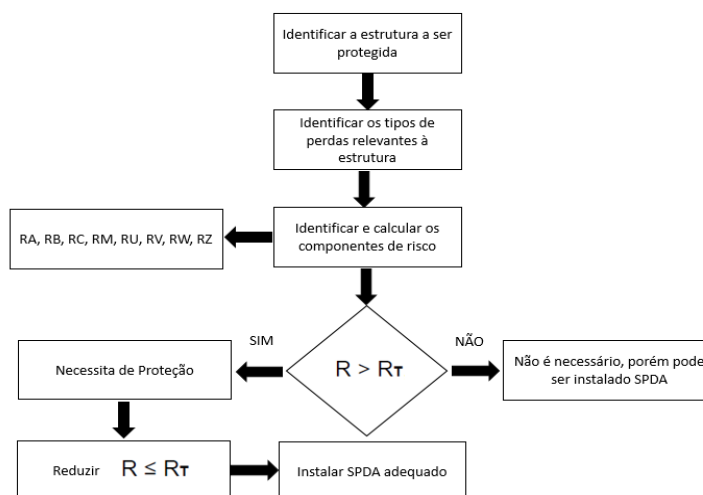


Figura 2 – Fluxograma para gerenciamento de risco e determinação da aplicação de SPDA. O fluxograma é de autoria própria desta publicação.

Assim, a proteção contra descargas atmosféricas é realizada através da mitigação dos efeitos de uma descarga sobre a estrutura, dado que, como abordado anteriormente as descargas são fenômenos naturais, não sendo possível evitar sua ocorrência.[4]

A principal medida para redução das tensões geradas pela descarga é o direcionamento da descarga para o solo através de um caminho de baixa impedância. Esse caminho é provido pelo sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA).[4]

As características do sistema de proteção para determinadas aplicações são definidas pela NBR 5419-3, e dependem do nível de proteção adotado. O nível de proteção interfere diretamente na eficiência de proteção, e consequentemente, na probabilidade de um dano ocorrer na estrutura a ser protegida. A Tabela 2 apresenta os valores de probabilidade de uma descarga causar danos físicos (PF) por classe de SPDA disposto pela NBR 5419-2.[4]

Tabela 2 – P_F associado as medidas de proteção – NBR 5419-2.[4]

Características da estrutura	Classe do SPDA	P_F
Estrutura não protegida por SPDA	-	1
Estrutura protegida por SPDA	IV	0,200
	III	0,100
	II	0,050
	I	0,020
Estrutura com subsistema de captação conforme SPDA classe I e uma estrutura metálica continua ou de concreto armado atuando como subsistema de descida natural.		0,010
Estrutura com cobertura metálica e um subsistema de captação, possivelmente incluindo componentes naturais, com proteção completa de qualquer instalação na cobertura contra descargas atmosféricas diretas e uma estrutura metálica continua ou de concreto armado atuando como um subsistema de descidas natural.		0,001

Descargas atmosféricas também podem causar a falha de sistemas elétricos e eletrônicos nas estruturas, assim, de modo análogo aos SPDA os dispositivos de proteção de surto (DPS) são empregados para protegerem os equipamentos elétricos. Quando ocorrem as descargas estes sistemas conectam os condutores de sinal e energia a terra enquanto duram os surtos provocados na rede. De modo análogo aos SPDA, a probabilidade de uma descarga causar a falha de sistemas elétricos e eletrônicos (PFE) associada a estes dispositivos pode ser obtida através da NBR-5419-2 e estão dispostos na Tabela 3.[4]

Tabela 3 – P_{FE} de sistemas DPS – NBR-5419-2.[4]

Nível de Proteção	P_{FE}
Nenhum sistema de DPS coordenado	1
II-IV	0,05
II-IV	0,02
II-IV	0,01

2.3 Negros de Fumo

Os negros de fumo são caracterizados por serem substâncias sólidas, enquadradas como pó fino, com grande área superficial, visto sua escala nanométrica. Suas diferentes classes são todas compostas essencialmente por grandes cadeias de carbono.[5]

Os negros de fumo são usualmente divididos entre duas categorias, de acordo com sua aplicação, sendo elas os *rubber blacks* e os da “categoria especial” (*specialty-grade*). A primeira categoria, a dos *rubber blacks*, é a de interesse para este estudo, visto ser a classe utilizada pela instalação analisada. Esta categoria de negros de fumo é a utilizada essencial para aplicações de reforço de borrachas, altamente usado por indústrias pneumáticas, como a do estudo.[5]

O uso do negro de fumo pela indústria pneumática e de reforço de borracha deve-se a descoberta das vantagens da incorporação de partículas de negro de fumo à borracha natural, elevando substancialmente sua resistência mecânica.

A norma ASTM 1765-04[6] é a principal referência para as propriedades materiais dos negros de fumo, sendo a norma que classifica as diferentes classes de negro de fumo enquadrados na categoria *rubber black*. Os negros de fumo desta classe são classificados de acordo com uma nomenclatura contendo inicialmente uma letra, N ou S, seguida de uma sequência de 3 números. A nomenclatura, classificação e as propriedades são explicadas de forma completa na norma, sendo que a nomenclatura tem como intenção diferenciar os negros de fumo quanto à influência destes na velocidade de cura da borracha e quanto a área superficial, apresentando ao final diferentes propriedades físicas.

Os negros de fumo das classes de N-200 até N-800, da categoria *rubber blacks*, compõe grande parte da produção mundial da substância, sendo superior a 90% da produção mundial dos negros de fumo. Estes são os negros de fumo mais utilizados pela indústria pneumática e consequentemente pela instalação analisada. [5]

De acordo com Norma de comunicação de perigos da OSHA EUA 2012[7] os negros de fumo são substâncias classificadas como apresentando potencial perigo de formação de poeira combustível. Esta norma apresenta uma recomendação para a não exposição dos negros de fumo a temperaturas acima de 300 °C, sendo a uma possível temperatura de ignição para a substância.

As poeiras combustíveis (*combustible dust*), categoria material na qual se enquadram os negros de fumo em suspensão no ar, são classificadas pelo Data Sheet 7-111[8] da FM Global como sendo: “Qualquer material orgânico, partículas de metal não oxidado ou outros materiais oxidáveis devem ser considerados combustíveis. Testes envolvendo diferentes tipos de ignição a pequenas camadas ou pilhas destes materiais podem ajudar a identificar tais materiais como combustíveis, mas podem resultar em falsos negativos”.

A informação acerca da possível ignição desta poeira combustível traz à tona uma possibilidade comum de certos sólidos em suspensão no ar formando poeiras combustíveis, o perigo de explosão/incêndio de poeira.

Apesar da possibilidade do perigo de explosão/incêndio do negro de fumo, grande parte das categorias de negro de fumo são consideradas como poeiras “difíceis de sofrerem ignição” (*hard to ignite*, HTI) pelo Data Sheet 7-111b[5] da FM Global. Estas poeiras são consideradas substâncias com um perigo de explosão/incêndio de poeira limitado. Isto significa que, em geral, os negros de fumo livres de impurezas e outras substâncias são difíceis de sofrer ignição. Sendo assim, não são substâncias que apresentam combustão espontânea. Além disso, ao sofrer ignição por uma determinada fonte de energia, a substância tende a queimar lentamente.

O termo “difícil de sofrerem ignição” (*hard to ignite*, HTI) é uma designação criada pela FM Global para classificar poeiras de sólidos em suspensão, as quais foram testadas utilizando fontes de ignição de 400 J. Este determinado teste foi responsável por categorizar grande parte das categorias de negro de fumo como de difícil ignição, ficando fora desta classificação apenas os negros de fumo da classe N-100, alguns da classe N-200 e os negros de fumo da categoria especial, sendo estes considerados como mais suscetíveis a uma explosão/incêndio de poeira, quando em suspensão no ar.[5]

Uma vez que grande parte do negro de fumo utilizado pela instalação se concentra nas classes N-200 até N-800, as quais são quase na totalidade considerados como de difícil ignição, a probabilidade do perigo de explosão/incêndio de poeira é considerada remota. Além desta classificação designando uma baixa probabilidade do perigo, ainda existem requisitos para que haja uma explosão/incêndio de uma suposta poeira combustível, sendo necessários ainda: uma concentração suficiente dos sólidos no ar, formando uma poeira de combustível, e uma fonte de ignição suficientemente energética, capaz de causar a ignição da poeira.

Mesmo com as considerações anteriores, os negros de fumo ainda são considerados como possíveis formadores de poeiras combustíveis, passíveis do perigo de explosão/incêndio, quando em suspensão no ar, devendo assim serem analisados com cautela quanto a possibilidade deste tipo de perigo, mesmo que a probabilidade seja remota. Alguns motivos que podem exigir maior cautela são: podem existir impurezas no negro de fumo, como por exemplo de óleo combustível, situação que eleva risco de explosão de poeira, independente da classificação do mesmo; podem existir fontes de ignição provenham demasiada energia ao ambiente da estrutura, possível para certas descargas atmosféricas por exemplo; podem existir na instalação negros de fumo não classificados como de difícil ignição.[5, 9, 10]

Visando uma maior cautela, a FM Global recomenda a realização de testes de ignição das poeiras possíveis da instalação para as instalações que contenham negros de fumo. Estes testes são utilizados para descartar ou analisar as consequências de explosão de poeira dentro e fora (dentro da estrutura) dos silos metálicos. Para situações nas quais existam chances de explosões internas ao silo de armazenamento, são dimensionados alívios de pressão para os mesmos.[5, 9, 10]

3. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de Risco

A análise de risco foi realizada tendo como base a NBR 5419-2 (2015)[4], para a estrutura sem nenhum sistema de proteção e com sistemas de proteção. Para tanto, algumas considerações e informações sobre o sistema são necessárias, ao realizar a análise do sistema sem proteção e contendo proteção. Deste modo, informações gerais e as considerações para análise sem proteção são:[4]

- Densidade de descargas atmosféricas (NG): 1/km²/ano;
- Proteção adicional contra tensões de passo e toque: Sem proteção;
- Sistema de proteção contra descargas atmosféricas: Não possui;
- Sistema de DPS: Não possui;
- Número total de pessoas na estrutura (nt): 5;
- Risco de explosão: Sólido explosivo;
- Tipo de piso: Concreto e terra;
- Localização relativa: Cercado por objetos de mesma altura ou mais baixos.

As características da linha de energia que alimenta o sistema são compostas por:

- Comprimento (LL): 100 metros;
- Roteamento da linha: Enterrada em malha de aterramento;
- Blindagem na linha: Não possui;
- Neutro multi aterrado: Não;
- Blindagem conectada ao mesmo barramento de equipotencialização que o equipamento: Não;
- Proteção contra descargas diretas (interfaces isolantes): Não;
- Medida de proteção contra descarga atmosférica em uma linha que adentre a estrutura: Restrições físicas;
- Localização: Urbana.

Para análise do sistema com proteção as considerações levantadas foram:

- SPDA com nível de proteção I, com descidas e captos naturais;
- Solo equipotencializado;
- DPS coordenado, conforme nível de proteção I;
- Espaçamento entre descidas de 6m ($W_m = 6m$);
- Fiação interna sem blindagem, mas com precauções para evitar laços do mesmo condutor;
- Tensão de impulso suportável dos equipamentos de 2,5 kV ($U_w = 2,5kV$).

As Equações necessárias para o cálculo de R1 e seus componentes são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Tabela de Equações para cálculo de R1.[4]

Equação	Numeração
$R_1 = R_{A1} + R_{B1} + R_{C1} + R_{M1} + R_{U1} + R_{V1} + R_{W1} + R_{Z1}$	(1)
$R_A = N_D \cdot P_A \cdot L_A$	(2)
$R_B = N_D \cdot P_B \cdot L_B$	(3)
$R_C = N_D \cdot P_C \cdot L_C$	(4)
$R_M = N_M \cdot P_M \cdot L_M$	(5)
$R_U = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_U \cdot L_U$	(6)
$R_V = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_V \cdot L_V$	(7)
$R_W = (N_L + N_{DJ}) \cdot P_W \cdot L_W$	(8)
$R_Z = N_Z \cdot P_Z \cdot L_Z$	(9)
$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6}$	(10)
$N_M = N_G \cdot A_M \cdot 10^{-6}$	(11)
$N_L = N_G \cdot A_L \cdot C_L \cdot C_I \cdot C_T \cdot 10^{-6}$	(12)
$N_{DJ} = N_G \cdot A_{DJ} \cdot C_{DJ} \cdot C_T \cdot 10^{-6}$	(13)

$$N_Z = N_G \cdot A_I \cdot C_I \cdot C_E \cdot C_T \cdot 10^{-6} \quad (14)$$

$$P_A = P_{TA} \cdot P_B \quad (15)$$

$$P_C = P_{SPD} \cdot C_{LD} \quad (16)$$

$$P_M = (K_{S1} \cdot K_{S2} \cdot K_{S3} \cdot K_{S4})^2 \quad (17)$$

$$P_U = P_{TU} \cdot P_{EE} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD} \quad (18)$$

$$P_V = P_{EB} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD} \quad (19)$$

$$P_W = P_{SPD} \cdot P_{LD} \cdot C_{LD} \quad (20)$$

$$P_Z = P_{SPD} \cdot P_{LI} \cdot C_{LI} \quad (21)$$

$$L_A = r_T \cdot L_T \cdot \left(\frac{n_z}{n_t}\right) \cdot \left(\frac{t_z}{8760}\right) \quad (22)$$

$$L_B = r_P \cdot r_f \cdot h_z \cdot L_T \cdot \left(\frac{n_z}{n_t}\right) \cdot \left(\frac{t_z}{8760}\right) \quad (23)$$

$$L_C = L_O \cdot \left(\frac{n_z}{n_t}\right) \cdot \left(\frac{t_z}{8760}\right) \quad (24)$$

$$A_D = L \cdot W + 2 \cdot (3 \cdot H) \cdot (L + W) + \pi \cdot (3 \cdot H)^2 \quad (25)$$

$$A_L = 40 \times L_L \quad (26)$$

$$A_{DJ} = L_{DJ} \cdot W_{DJ} + 2 \cdot (3 \cdot H_{DJ}) \cdot (L_{DJ} + W_{DJ}) + \pi (3 \cdot H_{DJ})^2 \quad (27)$$

A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados para cálculo dos riscos associados a R1, para o sistema sem proteção.

Tabela 5 – Tabela de Parâmetros para cálculo de R1 – Sistema sem proteção.[4]

Parâmetro	Descrição	Valor	Observação
N_G	Densidade de descargas atmosféricas	1/km ² /ano	-
A_D	Área de exposição equivalente da estrutura – Equação (3)	29.891,35 m ²	-
C_D	Fator de localização da estrutura	0,5	Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos.
P_{TA}	Probabilidade de uma descarga causar choque	1	Estrutura sem proteção contrachoque.
P_B	Probabilidade de uma descarga causar danos físicos	1	Sem SPDA.
r_t	Fator de redução da perda de vida que depende do tipo de solo ou piso	10 ⁻²	Para superfície do tipo concreto ou terra.
n_z	Número total de pessoas na zona	5 pessoas	-
n_t	Número total de pessoas na estrutura	5	-
t_z	Tempo de permanência de pessoas na zona	2.607	-
L_T	Número relativo médio (típico) de vítimas feridas por choque elétrico devido a um evento perigoso	10 ⁻²	Para estrutura com risco de explosão.

r_p	Fator de redução da perda devido a danos físicos que depende das medidas adotadas de proteção contra incêndio	1	Para estrutura com risco de explosão.
r_f	Fator de redução da perda devido a danos físicos que depende do risco de explosão ou incêndio na estrutura	1	Sem redução para estrutura com risco de explosão de explosivos sólidos.
h_z	Fator de aumento devido a danos físicos por perigo especial	1	Sem risco especial.
L_F	Número relativo médio (típico) de vítimas feridas por danos físicos devido a um evento perigoso	10^{-1}	Para estrutura com risco de explosão.
P_{SPD}	Probabilidade de uma descarga causar falha a sistemas internos (depende no nível de proteção contra surto)	1	Estrutura sem DPS.
C_{LD}	Fator que depende das condições da linha que está conectada ao sistema interno	1	Linha de energia enterrada, sem blindagem, sem neutro multi-aterrado.
L_O	Número relativo médio (típico) de vítimas feridas por falhas de sistemas internos devido a um evento perigoso	10^{-1}	Para estrutura com risco de explosão.
A_M	Área de exposição equivalente de descargas que atingem perto da estrutura extensão de uma linha de 500m de distância do perímetro da estrutura	815.148,16 m ²	-
K_{S1}	$K_{S1} = 0,12 \cdot w_{m1}$	1	Sem SPDA.
K_{S2}	$K_{S2} = 0,12 \cdot w_{m2}$	1	Sem blindagem.
W_{m1}	Espaçamento entre as estruturas de concreto armado (m)	-	Sem Blindagem.
W_{m2}			
K_{S3}	Fator que depende do tipo de fiação interna	1	-
K_{S4}	$K_{S4} = \frac{1}{U_W}$	1	Para sistemas com suportabilidade não especificada.
U_W	Tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido (kV)	1	Não especificado.
A_L	Área de exposição equivalente das descargas que atingem a linha	4.000 m ²	-
C_I	Fator de instalação da linha	0,01	Enterrada em malha de aterramento.
C_E	Fator ambiental	0,1	Linha em área urbana.
C_T	Fator do tipo de linha	1	Linha de energia ou sinal.
A_{DJ}	Área de exposição equivalente da estrutura adjacente	1.406,86 m ²	-
C_{DJ}	Fator de localização da estrutura adjacente	0,5	Estrutura cercada por objetos da mesma altura ou mais baixos.

C_T	Fator do tipo de linha	1	Linha de energia ou sinal.
P_{TU}	Probabilidade de uma descarga em uma linha que adentre a estrutura causar choque	0	Restrições físicas.
P_{EB}	Fator que depende das condições da linha que está conectada ao sistema	1	Sem DPS.
P_{LD}	Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica em uma linha conectada	1	Linha enterrada sem blindagem.
A_I	Área de exposição equivalente das descargas que atingem a terra perto da linha	400.000 m ²	-
P_{LI}	Probabilidade de uma descarga perto de uma linha conectada a estrutura causar falha de sistemas internos	1	Linha de energia com tensão suportável de 1kV.
C_{LI}	Fator que depende das condições da linha	1	Linha de energia enterrada, sem blindagem, sem neutro multi-aterrado.

Para realização da análise para o sistema com proteção, alguns parâmetros sofrem modificação. A Tabela 6 os apresenta, assim como os novos valores, dado as considerações elencadas anteriormente para o sistema protegido.

Tabela 6 – Ajuste de parâmetros para sistema com proteção.[4]

Parâmetro	Descrição	Valor	Observação
P_{TA}	Probabilidade de uma descarga causar choque	0,01	Estrutura com equipotencialização do solo.
P_B	Probabilidade de uma descarga causar danos físicos	0,02	Estrutura protegida por SPDA classe I.
P_{SPD}	Probabilidade de uma descarga causar falha a sistemas internos (depende no nível de proteção contra surto)	0,01	Estrutura com DPS nível I.
C_{LD}	Fator que depende das condições da linha que está conectada ao sistema interno	0	Precauções para evitar laços do mesmo condutor.
K_{S1}	$K_{S1} = 0,12 \cdot w_{m1}$	0,72	-
K_{S2}	$K_{S2} = 0,12 \cdot w_{m2}$	1	-
W_{m1} W_{m2}	Espaçamento entre as estruturas de concreto armado	6 m	-
K_{S3}	Fator que depende do tipo de fiação interna	0,2	Sem Blindagem - Laço de mesmo condutor evitado.
K_{S4}	$K_{S4} = \frac{1}{U_w}$	0,4	-
U_w	Tensão suportável nominal de impulso do sistema a ser protegido	2,5 kV	-
P_{TU}	Probabilidade de uma descarga em uma linha que adentre a estrutura causar choque	0	Restrições físicas.
P_{EB}	Fator que depende das condições da linha que está conectada ao sistema	0,01	Estrutura com DPS nível I.
P_{LD}	Probabilidade de falha de sistemas internos devido a uma descarga atmosférica em uma linha conectada	1	$U_w = 2,5kV$, linha enterrada sem blindagem.
P_{LI}	Probabilidade de uma descarga perto de uma linha conectada a estrutura causar falha de sistemas internos	0,3	Linha de energia com tensão suportável de 2,5kV.
C_{LI}	Fator que depende das condições da linha	1	Linha de energia enterrada, sem blindagem, sem neutro multi-aterrado.

Através dos parâmetros elencados anteriormente, os riscos foram calculados para o sistema sem e com proteção. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos.

Tabela 7 – Resultados da análise de risco para sistema sem e com proteção.

Componentes do Risco	Valor Calculado (yr^{-1})	
	Sistema Sem Proteção	Sistema Com Proteção
R_a	$4,45.10^{-07}$	$4,45.10^{-07}$
R_b	$4,45.10^{-04}$	$4,45.10^{-04}$
R_{c1}	$4,45.10^{-04}$	$4,45.10^{-04}$
R_{m1}	$2,43.10^{-02}$	$8,05.10^{-07}$
R_u	0,00	$2,11.10^{-10}$
R_v	$2,11.10^{-05}$	$2,11.10^{-07}$
R_{w1}	$2,11.10^{-05}$	$2,11.10^{-07}$
R_{z1}	$3,57.10^{-06}$	$3,57.10^{-08}$
R1	$2,52.10^{-02}$	$6,15.10^{-06}$

Para o sistema sem proteção, o risco R1 calculado é superior ao risco tolerado sugerido pela norma ($R_T = 10^{-5}$), implicando na necessidade de utilizar medidas de proteção.

Além disso, é possível notar que para o primeiro cenário, onde o sistema não continha sistema de proteção, o risco relacionado a falha de sistemas internos, associado a descarga próxima a estrutura (R_{m1}), apresenta cerca de 96% do risco total R1. Este componente sofreu redução significativa após as considerações elucidadas anteriormente, corroborando para a redução do risco total R1 no segundo cenário, implicando no atendimento ao risco tolerado segundo a norma.

3.2 Análise de Consequências para Explosão de Poeira Combustível

A Seção 3.1. aborda as Análises de Risco associados aos indivíduos ocupacionalmente expostos da instalação, presentes dentro da estrutura. Estes perigos são advindos diretamente pelas descargas atmosféricas na instalação ou próximas da instalação, sendo as mesmas o foco da avaliação deste estudo, seguindo com os termos fornecidos pela Norma Brasileira ABNT NBR 5419-2 [4]. Nessas Seções apresentou-se o procedimento para quantificar o risco para cada indivíduo atuando dentro da estrutura, devido a possível explosão de poeira dentro da estrutura, causada por uma descarga atmosférica. No entanto, nota-se uma observação relevante no procedimento da norma, presente na Nota 2 da Tabela C.2 do Anexo C da Norma ABNT NBR 5419-2 [4], na qual é descrito que em uma análise das descargas atmosféricas em instalações/estruturas que apresentam o risco de explosão, deve-se realizar uma avaliação adicional mais detalhada, mitigando as possibilidades de dano causados por explosão.

Esta observação presente na Norma ABNT NBR 5419-2 [4] entra em acordo com a necessidade de cautela abordada na Seção 2.3., motivo para a avaliação mais aprofundada quanto ao perigo de explosão/incêndio da possível poeira combustível de negro de fumo na instalação, dentro e fora dos silos metálicos. Sendo assim, o estudo de Análise de Risco com ênfase nas descargas atmosféricas em uma estrutura contendo silos de negro de fumo exigiu uma Análise de Consequências devido a este perigo.

A abordagem da Análise de Consequência passou-se para os perigos de explosão de poeira combustível de negro de fumo dentro e fora (fora do silo, mas dentro da estrutura) do silo de armazenamento, levando a necessidade de avaliação de outro documento da FM Global, o Data Sheet 7-76 [9], o qual é a referência para recomendações de prevenção para lidar com materiais químicos com chances de explosão e incêndio de poeira.

A Análise de Consequências foi avaliada de forma qualitativa, sendo consistente com a instalação/estrutura avaliada. Para isso, exigiu-se uma série de considerações quanto a instalação/estrutura para avaliação de possíveis cenários acidentais. Todas as considerações feitas têm caráter conservador, sendo elas:

- Ocorreu uma descarga atmosférica com uma corrente suficiente para ser dissipada em alguma superfície material da instalação, causando um aumento da temperatura significativo, capaz de causar a ignição dos negros de fumo;

- Há na instalação diferentes classes de negros de fumo da categoria *rubber black*, utilizados para reforço de borracha e comuns em atividades fabris como a deste estudo. Independente da presença majoritária ou não de negros de fumo das classes N-100 e N-200 na instalação/estrutura, os quais podem ser considerados de mais fácil ignição, os negros de fumo presentes são considerados como possíveis de sofrerem ignição nas temperaturas apresentadas devido a descarga atmosférica da consideração anterior;
- Há no interior do silo condições favoráveis a uma possível explosão de poeira, com uma quantidade significativa de negro de fumo de característica explosiva em suspensão, caracterizada como poeira combustível;
- Há no interior da estrutura (exterior do silo) condição semelhante a consideração anterior. Esta consideração fica de acordo com a informação passada pela empresa proprietária da instalação, a qual consiste na estrutura ser classificada pelo corpo de bombeiros, segundo a Norma NBR IEC 60079 [11], como Zona 21, ou seja, uma zona passível da presença de poeira inflamável/explosiva mesmo em condições normais de operação;
- Os silos de armazenamento foram projetados em acordo com a Norma ABNT NBR 5419-2 [4], tendo uma espessura superior a mínima estabelecida pela norma e material adequado para as paredes do silo. Esta consideração garante que o silo ao ser atingido diretamente pela descarga atmosférica não sofrerá mudança de temperatura capaz de causar furos ou pontos quentes, impedindo a ignição do negro de fumo dentro do silo. É considerada uma espessura de 3/8 de polegada de aço carbono para a parede do silo;
- Os silos de armazenamento têm um sistema de alívio projetado em acordo com estudos que analisam situações com probabilidade de explosão de poeira combustível. Foi considerado para este caso o artigo de Tamanini e Valiulis [10], citado no Data Sheet 7-76 [9] para avaliar as consequências de uma explosão de poeira internas aos armazenamentos. O artigo provém a expertise para se realizar o projeto de sistemas de alívio capazes de conter as consequências da explosão de poeira dentro do silo de armazenamento. Este artigo se tornou a base de um *software* desenvolvido pela FM Global para avaliar consequências de explosões de poeira.

A Análise de Consequências levou a abordagem conservadora abordada pelas Seções anteriores, com as análises feitas nas Seções 3.1. e 3.2. considerando probabilidades não remotas de explosão do ambiente dentro da estrutura (fora dos silos de armazenamento) causado pela suspensão de poeiras de negro de fumo, de acordo com uma probabilidade definida pela própria Norma ABNT NBR 5419-2 [4] para ambientes explosivos, mesmo que perigo de explosão seja relatado repetidas vezes por este estudo como improvável.

Após as considerações feitas é considerado que exista uma chance muito remota de uma explosão de poeira interna ao silo, devido a dificuldade de se esquentar a região interna do silo através das descargas atmosféricas. Mesmo que essa explosão de poeira interna ao silo se mostre possível, esta não deve exceder a barreira de contenção, o próprio silo de armazenamento, visto que o sistema de alívio de pressão é projetado de forma a aliviar qualquer possível explosão interna.

4. CONCLUSÃO

Após realizada a análise de risco pode-se notar que o risco causado por descargas atmosféricas pode ser expressivo quando não controlado, e que em casos especiais, como instalações com risco de explosão, apenas o SPDA pode não ser suficientes para reduzir o risco causado pelas descargas atmosféricas a níveis aceitáveis. Os resultados obtidos para a instalação com medidas de proteção e sem medidas de proteção explicitam a importância da realização do procedimento de gerenciamento de risco para garantir que as medidas adotadas sejam adequadas para garantir a proteção dos indivíduos. A análise de consequências apontou para chances remotas de explosão de poeira interna do silo devido a temperatura no interior do silo não atingir níveis significativos/problemáticos, mesmo ao ser atingido por descarga atmosférica. Além disso, o silo se mostrou seguro em termos de alívio de pressão, servindo como uma barreira de segurança extra em caso de explosão interna.

5. REFERÊNCIAS:

- [1] COELHO VILSON L., Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas. Universidade Federal de Santa Catarina. Tese de Doutorado. BR (2012).
- [2] FILHO SALARI CLAVIO J., Efeito das descargas atmosféricas no desempenho de linhas de transmissão – modelagens nos domínios do tempo e da frequência. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. BR (2006).
- [3] FILHO MAMEDE J., *Instalações Elétricas Industriais*, Editoria LTC, Rio de Janeiro, Brasil, (2017).
- [4] ABNT, “Proteção Contra Descargas Atmosféricas Parte 2: Gerenciamento de Risco”, ABNT NBR 5419-2, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, (2015).
- [5] FM Global, “Carbon Black”, Property Loss Prevention Data Sheets 7-111b, Factory Mutual Insurance Company – FM Global, (2019).
- [6] ASTM International, “Standard Classification System for Carbon Blacks Used in Rubber Products”, D 1765 – 04, ASTM International, (2004).
- [7] OSHA, “Occupational Safety and Health Administration section 1910.1200”, HazCom 2012, Hazard Communication Standard – OSHA EUA, (2012).
- [8] FM Global, “Chemical Process Industries”, Property Loss Prevention Data Sheets 7-111, Factory Mutual Insurance Company – FM Global, (2019).
- [9] FM Global, “Prevention and Mitigation of Combustible Dust Explosion and Fire”, Property Loss Prevention Data Sheets 7-76, Factory Mutual Insurance Company – FM Global, (2020).
- [10] FRANCESCO TAMANINI and JOHN VALIULIS, “Improved Guidelines For The Sizing Of Vents In Dust Explosions”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 9, Número 1, Página 105, (1996).
- [11] ABNT, “Explosive atmospheres Part 7: Equipment protection by increased safety”, ABNT NBR IEC 60079-7, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, (2018).