



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HEITOR RODRIGUES CUNHA

**Projeto de Sistema de Proteção contra Descargas
Atmosféricas para Armazém de Silo de Grande Porte
com Análise Comparativa da Aplicação de Dispositivos
ESE em Relação ao Sistema Convencional conforme a
ABNT NBR 5419**

Heitor Rodrigues Cunha

**Projeto de Sistema de Proteção contra Descargas
Atmosféricas para Armazém de Silo de Grande Porte
com Análise Comparativa da Aplicação de Dispositivos
ESE em Relação ao Sistema Convencional conforme a
ABNT NBR 5419**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT

Orientador Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende

Uberlândia, MG

2026

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela força nos momentos difíceis e pela oportunidade de chegar até aqui.

Aos meus pais, Olindo e Débora, por todo amor, apoio e confiança. Obrigado por nunca terem desistido de mim, mesmo quando o caminho parecia incerto. Tudo o que fizeram por mim não caberia completamente em palavras, mas carrego em cada conquista a presença, o esforço e o cuidado de vocês.

Aos meus irmãos, Vitória e Artur, pelo companheirismo, pela presença e por fazerem parte da minha caminhada.

À minha noiva, Ana Paula, por estar sempre ao meu lado, inclusive nos momentos mais difíceis. Obrigado pela paciência, pelo apoio, pelo carinho e por acreditar em mim quando eu mesmo duvidei.

Aos meus amigos da Confraria do Ribombo, por todo companheirismo, pelas histórias, pelas conversas e pelos momentos que tornaram essa caminhada mais leve e verdadeira.

Ao professor José Roberto Camacho, por todos os ensinamentos transmitidos ao longo da minha formação, pela dedicação à Engenharia Elétrica e pela contribuição importante no meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende, pela orientação, disponibilidade e contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Marcos, por todos os ensinamentos, conselhos e pela confiança depositada em mim. Obrigado por acreditar no meu potencial e por contribuir diretamente para minha evolução profissional.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Elétrica, pela formação, pela estrutura e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para que esta etapa fosse concluída. Esta conquista não representa apenas o fim de um ciclo acadêmico, mas também a prova de que o esforço, a persistência e a fé no próprio caminho podem transformar dificuldades em realização.

*“Quando fechas tuas portas e fazes escuridão dentro,
lembra-te de nunca dizer que estás só;
pois não estás só: Deus está dentro de ti,
e teu gênio está dentro de ti.”*

— Epicteto, *Discursos*, I.14

Resumo

As descargas atmosféricas representam risco relevante para estruturas agroindustriais de grande porte, especialmente armazéns de silos, devido à exposição geométrica, à presença de massas metálicas, ao risco associado a poeiras combustíveis e à sensibilidade de sistemas de automação, medição e controle. Este trabalho analisa um projeto de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) aplicado à unidade Ouro Safra, em Araxá-MG, utilizando as pranchas técnicas do empreendimento como estudo de caso. A metodologia foi desenvolvida com base na série ABNT NBR 5419:2026, contemplando gerenciamento preliminar de risco, avaliação dos subsistemas de captação, descida e aterramento, análise de equipotencialização, definição de Zonas de Proteção contra Raios (ZPR) e discussão da coordenação de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). Adicionalmente, o trabalho compara a solução convencional com captadores Franklin com a alternativa de captadores de emissão antecipada (ESE), considerando materiais técnicos, normas estrangeiras utilizadas pelo fabricante, consulta técnica realizada com a Indelec e limitações de aplicação no contexto brasileiro. Os resultados indicam que a escolha do tipo de captor não elimina a necessidade de uma abordagem sistêmica do SPDA: descidas, aterramento, continuidade elétrica, equipotencialização, ZPR, DPS, inspeção e responsabilidade técnica permanecem fundamentais para a segurança da instalação. Assim, o trabalho contribui ao transformar um projeto real de silos em uma análise técnico-aplicada, evidenciando os pontos que devem ser mantidos, verificados ou complementados quando se compara uma solução convencional com uma alternativa ESE.

Palavras-chave: Proteção contra Descargas Atmosféricas. SPDA. ABNT NBR 5419:2026. Dispositivos de Emissão Antecipada. Silos. Aterramento. DPS.

Abstract

Lightning strikes represent a relevant risk for large agro-industrial structures, especially grain silo facilities, due to their geometric exposure, metallic structures, combustible dust hazards, and the sensitivity of automation, measurement and control systems. This work analyzes a Lightning Protection System (LPS) project applied to the Ouro Safrá facility in Araxá-MG, using the technical drawings of the project as a case study. The methodology was developed based on the ABNT NBR 5419:2026 series, including a preliminary risk assessment, evaluation of air-termination, down-conductor and earthing subsystems, equipotential bonding analysis, definition of Lightning Protection Zones (LPZ) and discussion of Surge Protective Device (SPD) coordination. Additionally, the work compares the conventional solution based on Franklin air terminals with the alternative use of Early Streamer Emission (ESE) air terminals, considering technical materials, foreign standards adopted by the manufacturer, a technical consultation with Indelec and application limitations in the Brazilian context. The results indicate that the choice of air terminal type does not eliminate the need for a systemic LPS approach: down-conductors, earthing, electrical continuity, equipotential bonding, LPZ, SPD coordination, inspection and technical responsibility remain essential for the safety of the installation. Therefore, this work contributes by turning a real silo project into an applied technical analysis, highlighting the points that must be maintained, verified or complemented when comparing a conventional solution with an ESE alternative.

Keywords: Lightning Protection. LPS. ABNT NBR 5419:2026. Early Streamer Emission. Grain Silos. Earthing. SPD.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Recorte da planta baixa do sistema de captação e aterramento da unidade Ouro Safra.	24
Figura 2 – Detalhe do subsistema de captação nos silos e interligações metálicas. .	28
Figura 3 – Vista do subsistema de descida e das Zonas de Proteção contra Raios. .	29
Figura 4 – Detalhe do captor Franklin em mastro fixado à estrutura metálica. . .	30
Figura 5 – Detalhes construtivos do aterramento, conexões e equipotencialização. .	31
Figura 6 – Indicação das ZPR 0A e ZPR 0B na vista da instalação.	32

Lista de tabelas

Tabela 1 – Síntese comparativa entre o sistema convencional analisado e a alternativa ESE/Prevectron.	37
Tabela 2 – Rastreabilidade entre o plano de atividades e as evidências do estudo de caso.	39

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DPS	Dispositivo de Proteção contra Surtos
ESE	Emissão Antecipada (Early Streamer Emission)
LEMP	Pulso Eletromagnético causado por Descarga Atmosférica
MPS	Medidas de Proteção contra Surtos
NBR	Norma Brasileira
NP	Nível de Proteção
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
ZPR	Zona de Proteção contra Raios

Lista de símbolos

A_D	Área de exposição equivalente
C_D	Fator de localização da estrutura
N_D	Número anual esperado de descargas diretas na estrutura
N_G	Densidade de descargas atmosféricas para a terra
R_1	Risco de perda de vida humana
R_T	Risco tolerável
R_p	Raio de proteção do captor ESE
h	Altura da ponta do captor ESE em relação ao plano de referência da área protegida
r	Raio da esfera rolante associado ao nível de proteção
ΔT	Tempo de antecipação do captor ESE
v_e	Velocidade equivalente utilizada para converter ΔT em comprimento
Δ	Comprimento de antecipação equivalente
s	Distância de segurança
k_i, k_c, k_m	Coefficientes para cálculo da distância de segurança
U_w	Tensão suportável de impulso nominal
U_p	Nível de tensão de proteção

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo do trabalho	12
1.2	Contribuições do trabalho	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	Descargas Atmosféricas	14
2.2	Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)	14
2.3	ABNT NBR 5419:2026 e Gerenciamento de Risco	15
2.4	Subsistemas do SPDA Externo	15
2.4.1	Captação	15
2.4.2	Descidas	16
2.4.3	Aterramento	16
2.5	SPDA Interno, Equipotencialização e Distância de Segurança	16
2.6	Zonas de Proteção contra Raios (ZPR) e Coordenação de DPS	17
2.7	Dispositivos de Emissão Antecipada (ESE): Conceito e Posicionamento Normativo	17
2.8	Vulnerabilidades de Silos e Armazéns Agroindustriais	17
3	METODOLOGIA	19
3.1	Levantamento e caracterização da estrutura	19
3.2	Gerenciamento de risco	19
3.3	Análise do SPDA externo	20
3.4	Análise do SPDA interno e das MPS	20
3.5	Análise crítica dos dispositivos ESE	20
3.6	Consolidação do memorial e rastreabilidade do plano	20
4	MATERIAIS, DADOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS	21
5	ESTUDO DE CASO: PROJETO DE SPDA DA UNIDADE OURO SAFRA	23
5.1	Documentação técnica analisada	23
5.2	Caracterização da instalação	25
5.3	Gerenciamento de risco e definição do nível de proteção	25
5.4	Subsistema de captação convencional	26
5.5	Subsistema de descida	29
5.6	Subsistema de aterramento	30

5.7	Equipotencialização das massas metálicas	31
5.8	Zonas de Proteção contra Raios	32
5.9	Proteção interna e coordenação de DPS	32
5.10	Consulta técnica e fundamentos da tecnologia ESE	33
5.10.1	Tempo de antecipação, velocidade equivalente e comprimento de antecipação	33
5.10.2	Aplicação dos parâmetros no raio de proteção	34
5.10.3	Esclarecimento sobre ionização, equipotencialização e raio de proteção	35
5.11	Comparação técnico-aplicada entre o sistema convencional e a alternativa ESE	36
5.12	Parecer técnico preliminar para o estudo de caso	38
5.13	Memorial descritivo do sistema proposto	38
5.14	Rastreabilidade com o plano de atividades	39
6	CONCLUSÃO	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
	APÊNDICE A – SÍNTESE DA CONSULTA TÉCNICA COM FABRI- CANTE ESE	44
	APÊNDICE B – MEMORIAL DE CÁLCULO ACADÊMICO E RAS- TREABILIDADE DOS PARÂMETROS	45
	ANEXO A – PRANCHAS TÉCNICAS DO PROJETO ANALISADO .	48

1 Introdução

As descargas atmosféricas representam uma importante causa de danos em estruturas, sistemas elétricos e equipamentos eletrônicos, especialmente em instalações industriais e agroindustriais de grande porte.

Entre essas estruturas destacam-se os armazéns de silos utilizados no armazenamento e processamento de grãos, os quais apresentam elevada exposição a descargas atmosféricas devido às suas dimensões e características construtivas.

A incidência de descargas atmosféricas pode provocar danos estruturais, falhas em sistemas elétricos, interrupções operacionais, queima de equipamentos e riscos à segurança humana. Dessa forma, torna-se necessária a utilização de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), projetados de acordo com critérios técnicos e normativos.

No Brasil, os critérios para projeto e análise de SPDA são estabelecidos pela ABNT NBR 5419, norma que define procedimentos relacionados ao gerenciamento de risco, proteção externa, proteção interna e medidas de proteção contra surtos elétricos.

Além dos sistemas convencionais de proteção, existem tecnologias alternativas conhecidas como dispositivos de emissão antecipada (ESE), também denominados para-raios ionizantes, cuja aplicação ainda gera discussões técnicas e normativas quanto à sua eficiência, critérios de ensaio, aceitação regulatória e conformidade em relação aos métodos tradicionais previstos pela norma brasileira.

1.1 Objetivo do trabalho

Este trabalho tem como objetivo analisar um projeto de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas aplicado a um armazém de silo de grande porte, utilizando como base um estudo de caso real da unidade Ouro Safra e realizando, adicionalmente, uma comparação técnico-aplicada entre a solução convencional com captosres Franklin e uma alternativa com dispositivos de emissão antecipada.

A análise considera os principais elementos exigidos para a segurança da instalação: captação, descidas, aterramento, equipotencialização, Zonas de Proteção contra Raios, coordenação de DPS, inspeção e responsabilidade técnica. O trabalho também utiliza materiais técnicos de fabricante e consulta técnica com a Indelec para evitar que a discussão sobre ESE fique restrita a uma análise genérica ou apenas normativa.

1.2 Contribuições do trabalho

Este trabalho contribui ao transformar um projeto real de SPDA aplicado a silos agroindustriais em uma análise técnico-aplicada, relacionando as exigências da ABNT NBR 5419 com as decisões práticas observadas nas pranchas da unidade Ouro Safra.

A contribuição não está em propor uma nova tecnologia de proteção, mas em organizar criticamente os elementos que devem ser considerados em uma instalação de grande porte: captação, descidas, aterramento, equipotencialização, ZPR, coordenação de DPS, inspeção, continuidade elétrica e responsabilidade técnica.

Além disso, o trabalho compara a solução convencional baseada em captosres Franklin com a alternativa de captosres de emissão antecipada, considerando materiais técnicos da Indelec, consulta técnica com fabricante, normas estrangeiras usualmente utilizadas para essa tecnologia e as limitações de aplicação no contexto brasileiro.

Dessa forma, o estudo evidencia que a escolha do tipo de captor altera principalmente a estratégia de captação, mas não elimina os demais requisitos fundamentais do SPDA. Em estruturas críticas, como silos agroindustriais, a segurança depende da integração entre proteção externa, proteção interna, aterramento, continuidade elétrica, equipotencialização e proteção contra surtos.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos técnicos e normativos necessários ao desenvolvimento de um projeto de SPDA para armazém de silo de grande porte, bem como à análise comparativa com dispositivos de emissão antecipada (ESE). A fundamentação segue a série ABNT NBR 5419:2026 e a literatura técnica consolidada em engenharia de proteção contra descargas atmosféricas, instalações elétricas e aterramento (ABNT, 2026a; ABNT, 2026b; ABNT, 2026c; ABNT, 2026d; FILHO, 2005; COTRIM, 2010; KINDERMANN, 2018; FILHO, 2017).

2.1 Descargas Atmosféricas

As descargas atmosféricas constituem fenômenos eletromagnéticos de alta energia, resultantes da separação de cargas no interior de cumulonimbus e da posterior equalização entre regiões de potencial diferentes. Conforme a ABNT NBR 5419-1:2026 (ABNT, 2026a), uma descarga para a terra pode ser classificada como *descendente* (líder da nuvem para o solo) ou *ascendente* (líder do solo/estrutura para a nuvem), sendo esta última predominante em estruturas elevadas ou isoladas, como silos agroindustriais.

A corrente de descarga atmosférica é composta por múltiplas componentes, cujos parâmetros definem a severidade dos esforços impostos aos sistemas de proteção. A ABNT NBR 5419-1 estabelece, para os diferentes Níveis de Proteção (NP I a IV), parâmetros como corrente de pico, carga da descarga, energia específica e taxa de variação da corrente (di/dt), os quais são utilizados no dimensionamento dos componentes do SPDA e na avaliação dos esforços térmicos e eletrodinâmicos produzidos pelas descargas atmosféricas.

Esses parâmetros constituem a base para o projeto dos subsistemas de captação, descidas, aterramento e das medidas de proteção contra surtos, permitindo a definição do nível de proteção adequado à estrutura analisada. A polaridade positiva, embora menos frequente, apresenta correntes de maior intensidade, enquanto as componentes negativas subsequentes são responsáveis por parcela significativa dos efeitos eletromagnéticos induzidos em sistemas elétricos e eletrônicos.

2.2 Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

O SPDA é definido pela ABNT NBR 5419-1:2026 como o conjunto de medidas destinado a interceptar a descarga direta, conduzir a corrente à terra com segurança e

evitar centelhamentos perigosos no interior da estrutura. Divide-se em:

- **SPDA Externo:** subsistemas de captação, descida e aterramento (NBR 5419-3:2026, Seção 5 ([ABNT, 2026c](#)));
- **SPDA Interno:** responsável por minimizar centelhamentos perigosos por meio de ligações equipotenciais e manutenção da distância de segurança (s) (NBR 5419-3:2026, Seção 6);
- **Medidas de Proteção contra Surtos (MPS):** voltadas à proteção de sistemas elétricos e eletrônicos contra o LEMP (*Lightning Electromagnetic Pulse*) (NBR 5419-4:2026, Seção 4 ([ABNT, 2026d](#))).

A eficácia do SPDA está condicionada à integridade elétrica dos componentes, continuidade das armaduras, seções mínimas dos condutores e correta instalação das conexões, conforme detalhado nas Tabelas 7 e 8 da NBR 5419-3:2026.

2.3 ABNT NBR 5419:2026 e Gerenciamento de Risco

A série ABNT NBR 5419:2026 substitui a versão de 2015 e está dividida em quatro partes complementares: Parte 1 (princípios gerais e parâmetros de corrente), Parte 2 (gerenciamento de risco e frequência de danos), Parte 3 (proteção contra danos físicos e perigo à vida) e Parte 4 (proteção de sistemas elétricos e eletrônicos internos).

A necessidade de proteção é determinada por análise de risco conforme a NBR 5419-2:2026 ([ABNT, 2026b](#)). O risco (R) é calculado como:

$$R = \sum N_X \cdot P_X \cdot L_X \quad (2.1)$$

onde N_X é o número anual de eventos perigosos (fontes S1 a S4), P_X a probabilidade de dano e L_X a perda consequente (L1: vida humana; L3: patrimônio cultural). Para silos agroindustriais, considera-se tipicamente $R_T = 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$ para perda de vida humana. Caso $R > R_T$, medidas de proteção devem ser adotadas até que $R \leq R_T$. Adicionalmente, a frequência de danos (F) é avaliada para sistemas críticos, com $F_T = 0,1 \text{ ano}^{-1}$ para instalações essenciais.

2.4 Subsistemas do SPDA Externo

2.4.1 Captação

O posicionamento dos captadores deve garantir que a estrutura esteja integralmente contida no volume protegido, utilizando um dos três métodos normativos (NBR 5419-3:2026,

Seção 5.3.2.2 (ABNT, 2026c)): esfera rolante, malha ou ângulo de proteção. Para estruturas complexas, o método da esfera rolante é o mais preciso. O raio da esfera (r) depende do NP adotado (NP I: 20 m; NP II: 30 m; NP III: 45 m; NP IV: 60 m). A espessura mínima de chapas metálicas naturais é regida pela Tabela 3 da norma, considerando prevenção de perfuração e ignição de materiais inflamáveis.

2.4.2 Descidas

Os condutores de descida devem ser distribuídos uniformemente no perímetro, com distâncias máximas definidas pelo NP (10 m a 20 m). Anéis intermediários são obrigatórios para estruturas > 20 m ou quando a distância de segurança não é garantida. O coeficiente k_c define a parcela de corrente em cada condutor e é determinado conforme o Anexo C da NBR 5419-3:2026.

2.4.3 Aterramento

O eletrodo deve preferencialmente utilizar a armadura da fundação ou anel enterrado a $\geq 0,5$ m de profundidade. O comprimento mínimo l_1 é obtido em função do NP e da resistividade do solo (ρ). Se $r_e < l_1$, complementa-se com hastes verticais ou radiais. A medição de resistência ôhmica não é requisito de eficácia; o ensaio de continuidade elétrica é o parâmetro normativo (NBR 5419-3:2026, Seção 7.3.4 e Anexo F).

2.5 SPDA Interno, Equipotencialização e Distância de Segurança

O SPDA interno evita centelhamentos perigosos entre condutores do SPDA e partes metálicas internas por meio de:

- **Ligações equipotenciais diretas ou indiretas** (via DPS Classe I ou centelhadores de isolamento);
- **Distância de segurança (s)**, calculada por:

$$s = \frac{k_i \cdot k_c \cdot l}{k_m} \quad (2.2)$$

onde k_i depende do NP (Tabela 11 da NBR 5419-3:2026), k_m do meio isolante (ar: 1; sólido: 0,5) e l do comprimento do trecho analisado. A equipotencialização deve ser realizada na Barra de Equipotencialização Principal (BEP), integrando todas as massas metálicas e blindagens.

2.6 Zonas de Proteção contra Raios (ZPR) e Coordenação de DPS

As MPS são baseadas no conceito de ZPR (NBR 5419-4:2026, Seção 4.3 ([ABNT, 2026d](#))): ZPR 0A (exposta a descarga direta e campo total), ZPR 0B (protegida contra impacto direto, mas exposta ao campo total), ZPR 1, 2, ... (atenuação progressiva do LEMP). A transição entre ZPR exige equipotencialização de todas as linhas que cruzam a fronteira, diretamente ou via DPS coordenado.

Os DPS classificam-se em Classe I (onda 10/350 μs , I_{imp}), Classe II (onda 8/20 μs , I_n) e Classe III (onda combinada, próximo a equipamentos). A coordenação exige que o nível de tensão de proteção efetivo ($U_{p/f}$) não exceda a tensão suportável do equipamento (U_w):

$$U_{p/f} = U_p + \Delta U \leq U_w \quad (2.3)$$

com $\Delta U \approx 0,1 \text{ kV kA}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (NBR 5419-4:2026, Anexo C).

2.7 Dispositivos de Emissão Antecipada (ESE): Conceito e Posicionamento Normativo

Os dispositivos ESE (*Early Streamer Emission*) são apresentados por seus fabricantes como captos capazes de antecipar a emissão do líder ascendente mediante um dispositivo de ionização, ampliando o raio de proteção em relação a uma ponta simples. Normas estrangeiras específicas para essa tecnologia, como NF C 17-102:2011 e NP 4426:2013, utilizam o tempo de antecipação ΔT , a altura de instalação e o nível de proteção para calcular o raio de proteção do captor ([AFNOR, 2011](#); [IPQ, 2013](#)).

No escopo da série ABNT NBR 5419:2026, entretanto, o volume de proteção é verificado pelos métodos normativos aplicáveis ao subsistema de captação, como esfera rolante, malhas e ângulo de proteção. Assim, para fins de conformidade com a norma brasileira, a adoção de um captor ESE não deve ser utilizada para dispensar indevidamente descidas, aterramento, equipotencialização, DPS ou inspeções. Neste trabalho, a tecnologia ESE é avaliada como alternativa técnica de captação, considerando seus materiais de fabricante e normas de referência, mas sempre confrontada com as exigências sistêmicas da ABNT NBR 5419.

2.8 Vulnerabilidades de Silos e Armazéns Agroindustriais

Estruturas de armazenamento de grãos apresentam vulnerabilidades específicas que justificam a adoção de SPDA nível II ou superior:

- **Elevação e geometria:** favorecem descargas ascendentes e laterais;
- **Poeiras combustíveis:** risco de ignição por centelhamento ou aquecimento resistivo (Anexo D da NBR 5419-3:2026);
- **Sistemas de automação e instrumentação:** sensores de nível, umidade, PLCs e redes de comunicação são sensíveis a LEMP e sobretensões conduzidas;
- **Linhas subterrâneas e aéreas:** podem injetar correntes parciais ($I_F = k_e \cdot I/n$) no interior da estrutura.

A classificação de áreas conforme ABNT NBR IEC 60079-10-2 ([ABNT, 2023](#)) é obrigatória quando há presença de atmosferas explosivas, exigindo SPDA isolado ou distâncias de segurança ampliadas.

3 Metodologia

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de revisão bibliográfica, análise normativa e estudo de caso aplicado a um armazém de silos de grande porte. A metodologia foi organizada para manter aderência direta ao plano de atividades aprovado, contemplando caracterização da estrutura, gerenciamento de risco, definição do nível de proteção, projeto do SPDA externo e interno, análise de DPS e avaliação crítica de dispositivos de emissão antecipada.

Inicialmente, foi realizada revisão técnica sobre descargas atmosféricas, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, aterramento, equipotencialização, medidas de proteção contra surtos e dispositivos ESE. Em seguida, foi analisada a documentação técnica do projeto de SPDA da unidade Ouro Safra, localizada em Araxá-MG, com foco nas pranchas de captação, descidas, aterramento, zonas de proteção e notas construtivas. Para aprofundar a comparação com a tecnologia ESE, também foram considerados materiais técnicos da Indelec, normas estrangeiras utilizadas para dimensionamento de captadores de emissão antecipada e uma consulta técnica realizada com representante do fabricante e com participação do orientador.

A partir desses documentos, o estudo foi estruturado nas etapas descritas a seguir.

3.1 Levantamento e caracterização da estrutura

Nesta etapa foram identificados os principais elementos da instalação estudada: silos metálicos, elevadores, estruturas de apoio, malhas de aterramento, pontos de descida, captadores Franklin, circuitos associados à balança e elementos metálicos que exigem equipotencialização. A análise considerou a natureza agroindustrial da instalação, a presença de poeiras combustíveis e a existência de sistemas eletrônicos sensíveis.

3.2 Gerenciamento de risco

O gerenciamento de risco foi conduzido com base na ABNT NBR 5419-2:2026. Foram analisadas a exposição da estrutura, a densidade de descargas atmosféricas da região, a geometria da instalação e a existência de linhas elétricas e de sinal conectadas. O objetivo desta etapa foi justificar tecnicamente a necessidade de proteção e a adoção de um nível de proteção compatível com a criticidade da instalação.

3.3 Análise do SPDA externo

O SPDA externo foi avaliado considerando os três subsistemas previstos na ABNT NBR 5419-3:2026: captação, descidas e aterramento. Foram verificados os captosres Franklin em mastros, as descidas em cabo de alumínio nu, o uso de re-bars e ferragens como componentes naturais, as interligações por solda exotérmica, a malha em cabo de cobre nu e os detalhes de conexão apresentados nas pranchas técnicas.

3.4 Análise do SPDA interno e das MPS

A proteção interna foi analisada com foco em equipotencialização, distância de segurança, definição de Zonas de Proteção contra Raios (ZPR) e coordenação de Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). A atenção principal foi dada aos circuitos da balança, sensores e sistemas de automação, pois estes equipamentos são sensíveis a surtos conduzidos e induzidos.

3.5 Análise crítica dos dispositivos ESE

A análise comparativa dos dispositivos ESE foi realizada em duas etapas. Na primeira, foram levantados os fundamentos apresentados pelo fabricante, incluindo o princípio de antecipação do líder ascendente, os modelos comerciais, o tempo de antecipação ΔT , sua conversão em comprimento equivalente Δ , a fórmula de raio de proteção adotada em normas estrangeiras, os ensaios laboratoriais e os requisitos de descida e aterramento. Na segunda, essas informações foram confrontadas com os critérios da ABNT NBR 5419 e com as características do estudo de caso. Assim, o trabalho não trata a tecnologia apenas como aceitável ou não aceitável, mas avalia o que efetivamente muda na captação e o que permanece obrigatório em termos de descidas, aterramento, equipotencialização, ZPR e DPS.

3.6 Consolidação do memorial e rastreabilidade do plano

Por fim, as análises foram consolidadas em um memorial descritivo técnico, incluindo figuras extraídas das pranchas, comentários normativos e uma tabela de rastreabilidade. Em atendimento à necessidade de tornar os cálculos verificáveis, foi também consolidado no Apêndice B um memorial de cálculo acadêmico com o desenvolvimento de A_D , a expressão paramétrica de N_D , a conversão $\Delta T \rightarrow \Delta$ e um exemplo completo de cálculo de raio de proteção ESE. Essa tabela relaciona cada exigência do plano de atividades com a evidência apresentada no trabalho, buscando demonstrar que os objetivos propostos foram efetivamente contemplados.

4 Materiais, Dados e Ferramentas Utilizadas

Este capítulo reúne os materiais, dados e ferramentas utilizados para desenvolver o estudo de caso e para atender ao plano de atividades do Trabalho de Conclusão de Curso. A intenção não foi apenas listar recursos, mas deixar claro de onde vieram as informações usadas na análise técnica.

Foram utilizados como base a série ABNT NBR 5419:2026, a documentação técnica do projeto de SPDA da unidade Ouro Safra em Araxá-MG, literatura de instalações elétricas, aterramento e compatibilidade eletromagnética, além de ferramentas computacionais para leitura, organização e conferência dos desenhos.

Os principais recursos empregados foram:

- **Normas técnicas:** ABNT NBR 5419:2026, Partes 1, 2, 3 e 4; ABNT NBR IEC 60079-10-2 para referência em atmosferas explosivas por poeiras combustíveis; e ABNT NBR 5410 para critérios gerais de instalações elétricas de baixa tensão.
- **Documentação de campo:** pranchas técnicas do projeto *OURO SAFRA SPDA SILOS*, revisão C, de 03/06/2026, referentes à planta baixa do sistema de captação e aterramento e à vista do subsistema de descida e zonas de proteção ([ENGPOWER, 2026](#)).
- **Ferramentas de desenho:** AutoCAD/BricsCAD para leitura e interpretação das pranchas, identificação dos elementos do SPDA e análise geométrica da captação.
- **Ferramentas de cálculo:** planilhas eletrônicas para organização dos dados de risco, área de exposição equivalente, parâmetros de aterramento, coordenação de DPS e conferência de grandezas elétricas.
- **Bibliografia técnica:** livros e materiais de referência sobre aterramento elétrico, instalações industriais e proteção contra descargas atmosféricas.
- **Materiais técnicos sobre ESE:** apresentação institucional, catálogo do Prevelectron, certificações, exemplos de projeto e normas estrangeiras utilizadas para captadores de emissão antecipada, como NF C 17-102:2011 e NP 4426:2013.
- **Consulta técnica:** reunião realizada em 07/07/2026 com representante da Indelec e participação acadêmica, utilizada como fonte complementar para compreender premissas de aplicação, ensaios, certificações, limitações e aceitação regulatória dos captadores ESE.

Como este trabalho possui caráter acadêmico, alguns dados foram adotados a partir de informações disponíveis nas pranchas e de hipóteses técnicas conservadoras. Valores que dependem de levantamento de campo, como resistividade real do solo, ocupação efetiva da instalação e características finais dos painéis elétricos, devem ser confirmados em uma etapa executiva de projeto.

5 Estudo de Caso: Projeto de SPDA da Unidade Ouro Safra

Este capítulo apresenta o estudo de caso aplicado à unidade da Ouro Safra, localizada na área rural de Araxá-MG. A análise foi desenvolvida a partir da documentação técnica do projeto *OURO SAFRA SPDA SILOS*, revisão C, de 03/06/2026, dos critérios estabelecidos pela série ABNT NBR 5419:2026 e dos materiais técnicos analisados sobre captadores de emissão antecipada.

A proposta deste capítulo é mostrar, de forma prática, como os requisitos do plano de atividades foram atendidos: caracterização da instalação, gerenciamento preliminar de risco, definição do nível de proteção, avaliação do sistema de captação, descidas, aterramento, equipotencialização, zonas de proteção, DPS e análise comparativa da aplicação de dispositivos ESE. A intenção não é apenas indicar itens de norma, mas transformar as pranchas e os materiais técnicos disponíveis em uma comparação de engenharia aplicada.

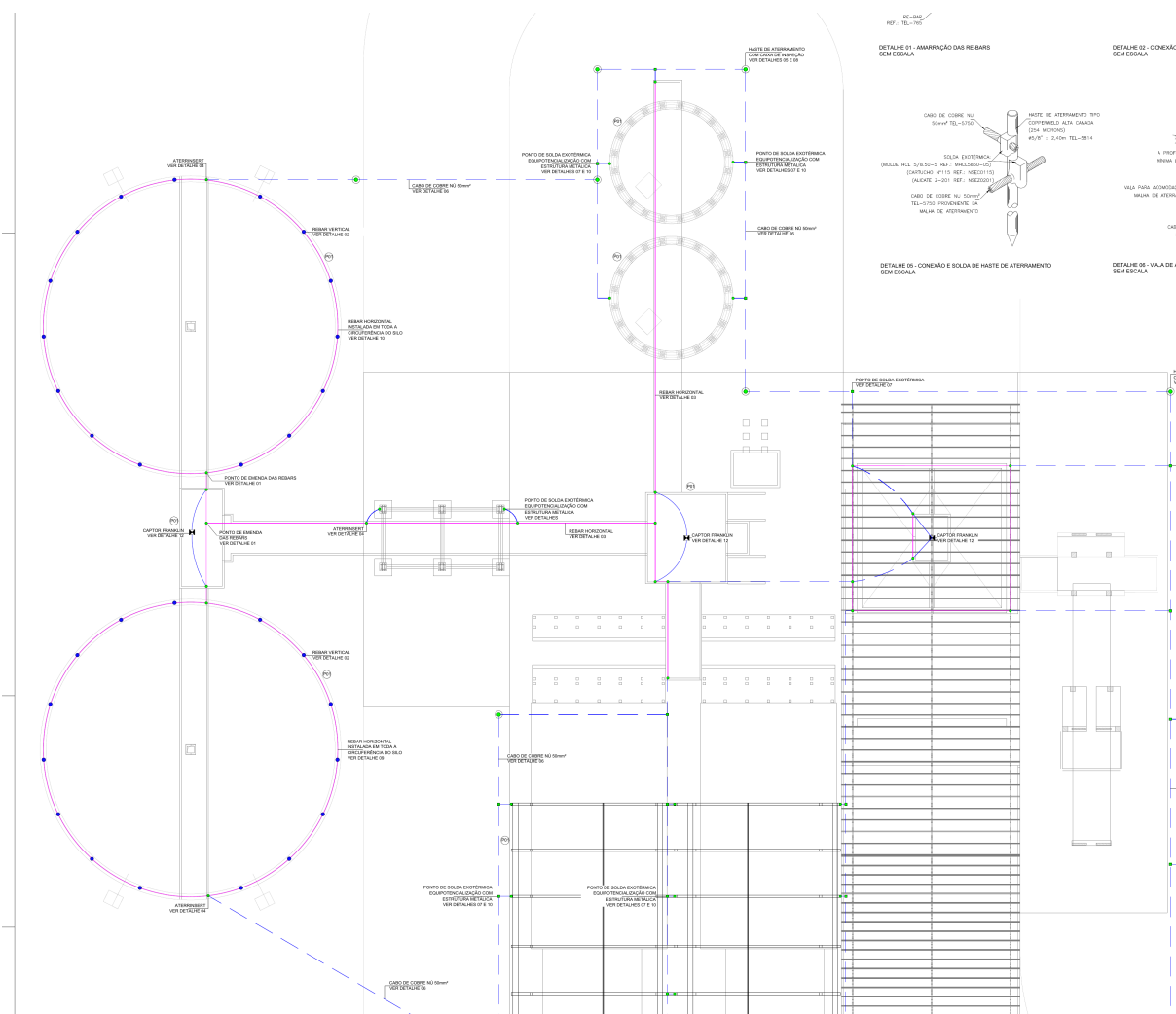
5.1 Documentação técnica analisada

A documentação principal do estudo de caso é composta por duas pranchas técnicas em formato A0. A folha 01/02 apresenta a planta baixa do sistema de captação e aterramento, contendo malha de aterramento, pontos de conexão, re-bars, captadores Franklin, hastes, caixas de inspeção e detalhes construtivos. A folha 02/02 apresenta a vista do subsistema de descida, os captadores em mastros, as descidas em cabo de alumínio nu e a indicação das Zonas de Proteção contra Raios.

A Figura 1 mostra que o sistema não se limita à instalação de um captor isolado. A solução utiliza captação convencional, conexões às estruturas metálicas, malha de aterramento, pontos de solda exotérmica, caixas de inspeção e interligações equipotenciais. Essa característica é importante porque estruturas de armazenamento de grãos possuem elevada exposição e não devem depender de uma solução pontual ou apenas comercial.

Além das pranchas da Ouro Safra, foram avaliados materiais técnicos da Indelec, incluindo apresentação institucional, catálogo técnico do Prelectron, certificados e exemplos de projeto com captor ESE, bem como normas estrangeiras usualmente associadas a essa tecnologia, como NF C 17-102:2011 e NP 4426:2013 ([INDELEC do Brasil, 2025a](#); [INDELEC do Brasil, 2026](#); [AFNOR, 2011](#); [IPQ, 2013](#); [Bureau Veritas, 2026](#)). Também foi considerada a consulta técnica realizada com representante da Indelec em 07/07/2026, utilizada como apoio para compreender premissas de aplicação, ensaios, aceitação regulatória e limitações

Figura 1 – Recorte da planta baixa do sistema de captação e aterramento da unidade Ouro Safra.



Fonte: Adaptado de ENGPOWER (ENGPOWER, 2026).

da tecnologia no Brasil (ALMEIDA; CUNHA; REZENDE, 2026).

5.2 Caracterização da instalação

A instalação analisada é um complexo agroindustrial destinado ao armazenamento e movimentação de grãos. A estrutura é composta por silos metálicos, elevadores, passarelas, bases de concreto, balança, estruturas auxiliares, painéis elétricos e sistemas de automação. O conjunto apresenta grande quantidade de massas metálicas e linhas elétricas/de sinal que precisam ser tratadas de forma integrada.

As principais vulnerabilidades identificadas são:

- altura elevada dos silos e elevadores, favorecendo a incidência direta de descargas atmosféricas;
- presença de poeiras combustíveis, com risco de incêndio ou explosão em condições específicas de concentração e ignição;
- estruturas metálicas extensas, que exigem continuidade elétrica e equipotencialização;
- existência de equipamentos eletrônicos sensíveis, como balanças, sensores e sistemas de automação;
- possibilidade de surtos conduzidos por linhas de energia, controle e sinal.

Para efeito acadêmico de pré-dimensionamento, foram adotadas dimensões aproximadas compatíveis com a análise do conjunto: altura máxima em torno de 35 m, comprimento aproximado de 60 m e largura aproximada de 20 m. Esses valores devem ser confirmados em campo ou em prancha dimensional específica caso o projeto seja convertido em memorial executivo.

5.3 Gerenciamento de risco e definição do nível de proteção

A necessidade de proteção foi avaliada conforme a lógica da ABNT NBR 5419-2:2026. Para uma estrutura isolada, a área de exposição equivalente A_D representa a superfície equivalente de coleta utilizada para estimar o número anual de eventos perigosos associados a descargas diretas na estrutura. Ela não deve ser confundida com o parâmetro Δ empregado posteriormente na formulação dos captadores ESE: A_D é uma área, expressa em m^2 ou km^2 , enquanto Δ é um comprimento equivalente, expresso em metros.

Considerando, de forma preliminar, comprimento $L = 60$ m, largura $W = 20$ m e altura $H = 35$ m, obtém-se:

$$A_D = L \cdot W + 2 \cdot (3H) \cdot (L + W) + \pi \cdot (3H)^2 \quad (5.1)$$

Na Equação 5.1, o termo $L \cdot W$ corresponde à projeção horizontal da estrutura, o termo $2(3H)(L + W)$ representa a contribuição associada às faixas laterais de exposição e o termo $\pi(3H)^2$ representa a contribuição das regiões arredondadas nas extremidades da área equivalente. Substituindo os valores adotados:

$$A_D = 60 \cdot 20 + 2 \cdot 105 \cdot (60 + 20) + \pi \cdot 105^2 \quad (5.2)$$

$$A_D \approx 52\,636 \text{ m}^2 = 0.052\,636 \text{ km}^2 \quad (5.3)$$

A frequência anual esperada de descargas diretas na estrutura pode ser expressa por:

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} \quad (5.4)$$

onde N_G é a densidade de descargas atmosféricas para a terra, em descargas por km^2 por ano, e C_D é o fator de localização. Com $C_D = 1,0$ e o valor de A_D calculado acima, a expressão pode ser escrita de forma paramétrica como $N_D = 0,052636 N_G$ eventos por ano. O valor numérico final de N_D não foi fechado porque o presente trabalho não dispõe, entre os arquivos de projeto, do valor oficial de N_G adotado para a coordenada final da instalação; inserir um valor não rastreado criaria uma falsa precisão.

Essa etapa demonstra a elevada exposição geométrica do conjunto e sustenta a necessidade de avaliação completa do risco. Considerando ainda a natureza agroindustrial, a presença de poeiras combustíveis e sistemas eletrônicos sensíveis, o estudo adota como premissa acadêmica o Nível de Proteção II (NP II), que deve ser confirmado por planilha normativa completa em uma etapa executiva. O desenvolvimento numérico disponível é consolidado no Apêndice B.

É importante destacar que o cálculo final de risco depende de informações de campo não integralmente disponíveis neste trabalho, como ocupação real, rotinas operacionais, existência de sistema de detecção e combate a incêndio, características finais das linhas conectadas e medidas já existentes. Por isso, os cálculos apresentados possuem caráter acadêmico e de pré-dimensionamento, sem substituir um laudo executivo assinado.

5.4 Subsistema de captação convencional

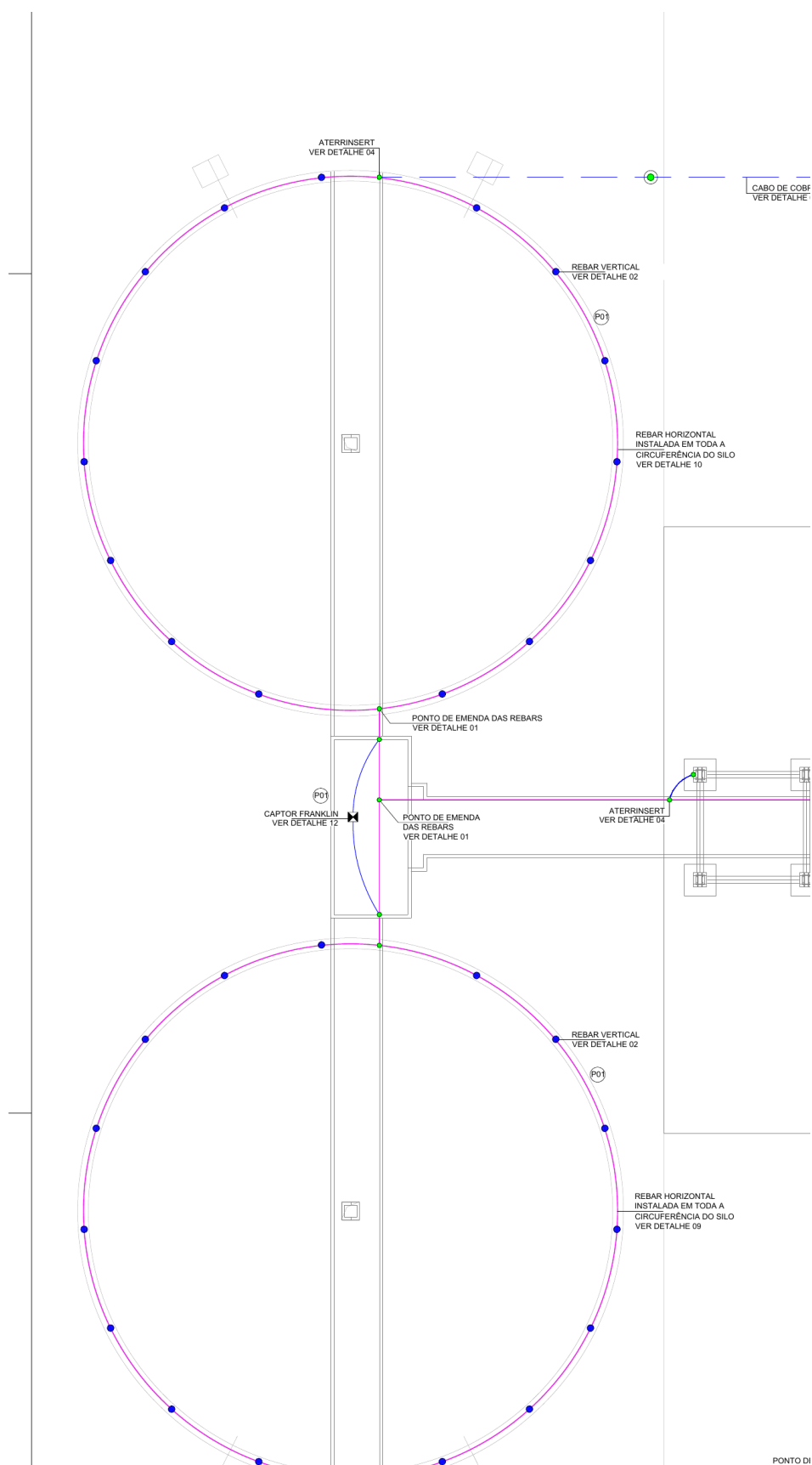
O subsistema de captação observado nas pranchas utiliza captadores do tipo Franklin em mastros e elementos metálicos interligados à estrutura. Na folha 01/02 são indicados

captores Franklin, re-bars horizontais instaladas na circunferência dos silos e pontos de conexão com o sistema de aterramento. Na folha 02/02, os captores aparecem instalados em mastros fixados às estruturas metálicas mais elevadas.

A Figura 2 evidencia a existência de anéis e pontos de conexão ao redor dos silos. Em estruturas metálicas de grande porte, essa solução é tecnicamente coerente porque distribui melhor as correntes da descarga atmosférica, reduz a concentração de corrente em um único caminho e favorece a equipotencialização do conjunto.

Pelo ponto de vista normativo, o captor deve ser avaliado a partir dos métodos convencionais da ABNT NBR 5419-3:2026, como esfera rolante, malhas ou ângulo de proteção. Para este tipo de estrutura, com diferentes alturas e geometrias, o método da esfera rolante é o mais indicado para verificar laterais, passarelas, elevadores e regiões de sombra.

Figura 2 – Detalhe do subsistema de captação nos silos e interligações metálicas.

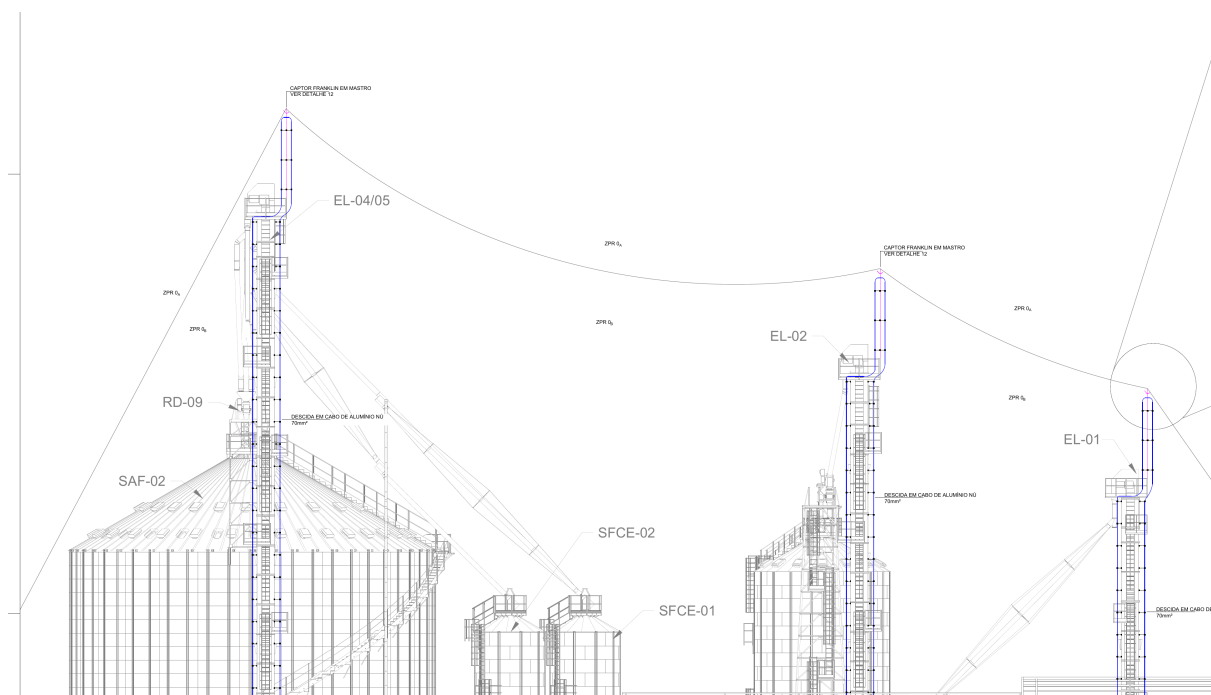


Fonte: Adaptado de ENGPOWER (ENGPOWER, 2026).

5.5 Subsistema de descida

O subsistema de descida tem a função de conduzir a corrente da descarga atmosférica do subsistema de captação até o subsistema de aterramento. Na prancha 02/02, são indicadas descidas em cabo de alumínio nu de 70 mm², conectadas à malha de aterramento por solda exotérmica.

Figura 3 – Vista do subsistema de descida e das Zonas de Proteção contra Raios.

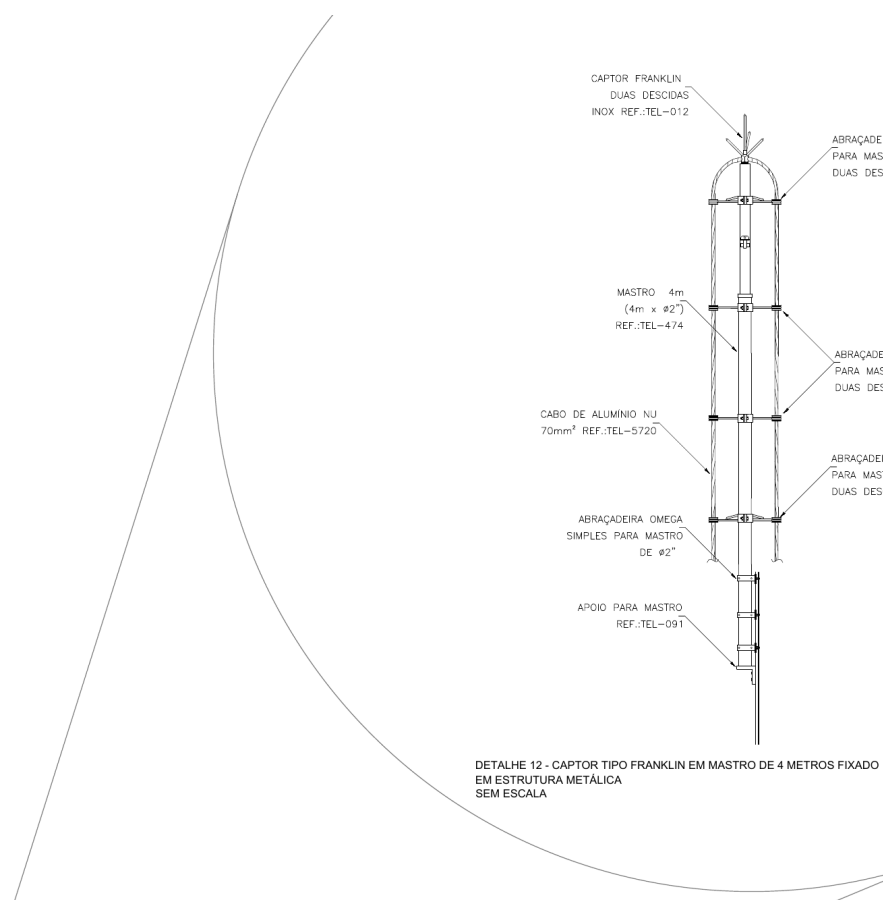


Fonte: Adaptado de ENGPOWER ([ENGPOWER, 2026](#)).

A Figura 3 mostra a descida em cabo de alumínio nu junto aos elevadores e estruturas elevadas. A distribuição das descidas deve buscar caminhos curtos, retilíneos e bem interligados à malha de aterramento. Em silos e estruturas metálicas, a utilização de componentes naturais é possível, desde que haja continuidade elétrica e conexões adequadas.

A prancha também apresenta o detalhe do captor Franklin em mastro de 4 m, com abraçadeiras de fixação e dupla descida, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Detalhe do captor Franklin em mastro fixado à estrutura metálica.



Fonte: Adaptado de ENGPOWER ([ENGPOWER, 2026](#)).

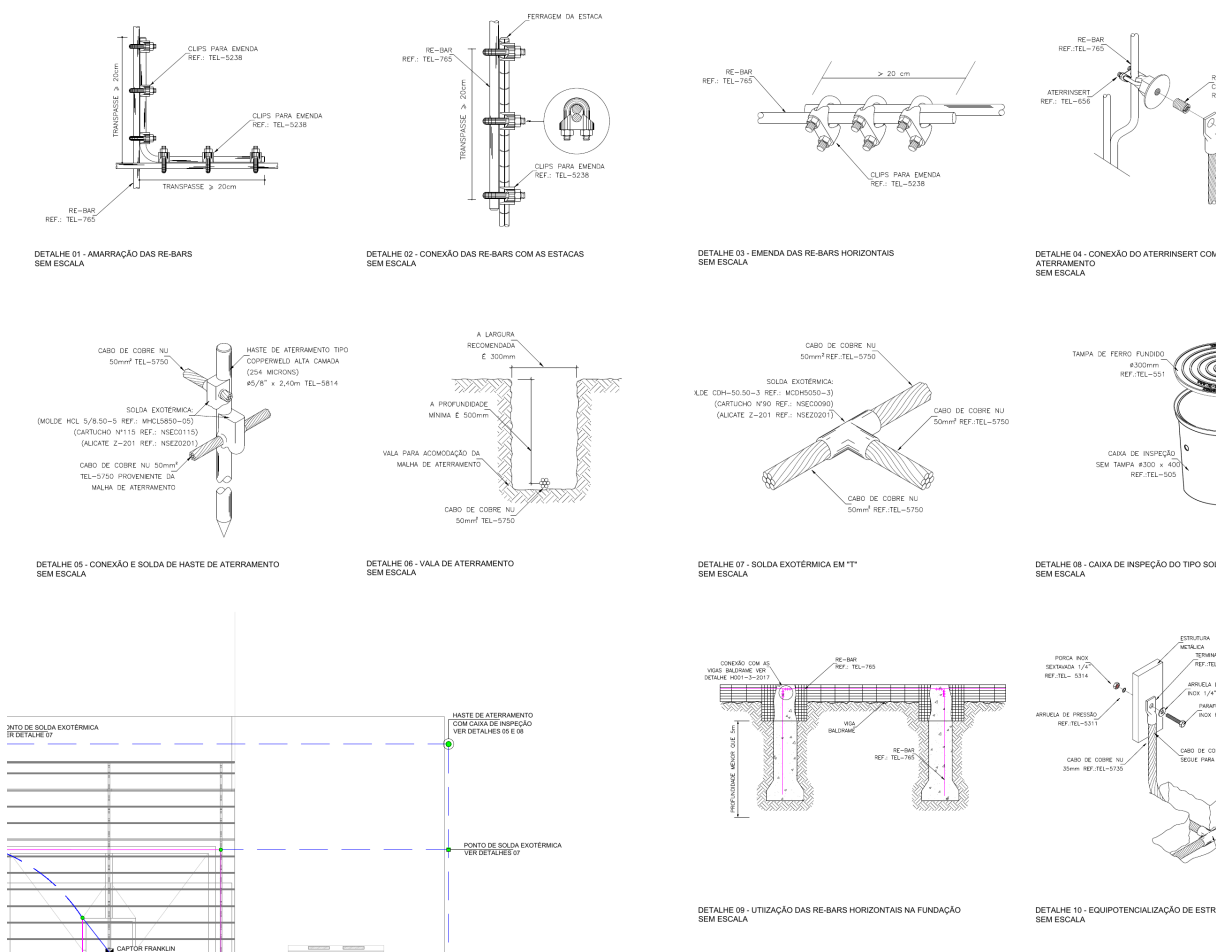
5.6 Subsistema de aterramento

O subsistema de aterramento tem papel decisivo no escoamento da corrente da descarga atmosférica e na redução de diferenças de potencial perigosas. A prancha 01/02 especifica malha de aterramento em cabo de cobre nu de 50 mm², hastes de aterramento tipo copperweld, caixas de inspeção, conexões por solda exotérmica e vala para acomodação da malha.

Na Figura 5, observam-se detalhes de haste de aterramento, vala, solda exotérmica em “T”, caixa de inspeção, conexão com re-bars e equipotencialização de estruturas metálicas. Esses detalhes fortalecem o caráter prático, pois mostra como o sistema deve ser executado e inspecionado.

A nota técnica de projeto estabelece que a malha de aterramento deve ser enterrada em vala de 50 cm de profundidade e lançada a uma distância mínima de 1 m no entorno externo das edificações. Também exige que as interligações do cabo de cobre nu sejam executadas por solda exotérmica ou conexão por compressão, o que é coerente com a necessidade de baixa impedância e boa durabilidade das conexões.

Figura 5 – Detalhes construtivos do aterramento, conexões e equipotencialização.



Fonte: Adaptado de ENGPOWER (ENGPOWER, 2026).

5.7 Equipotencialização das massas metálicas

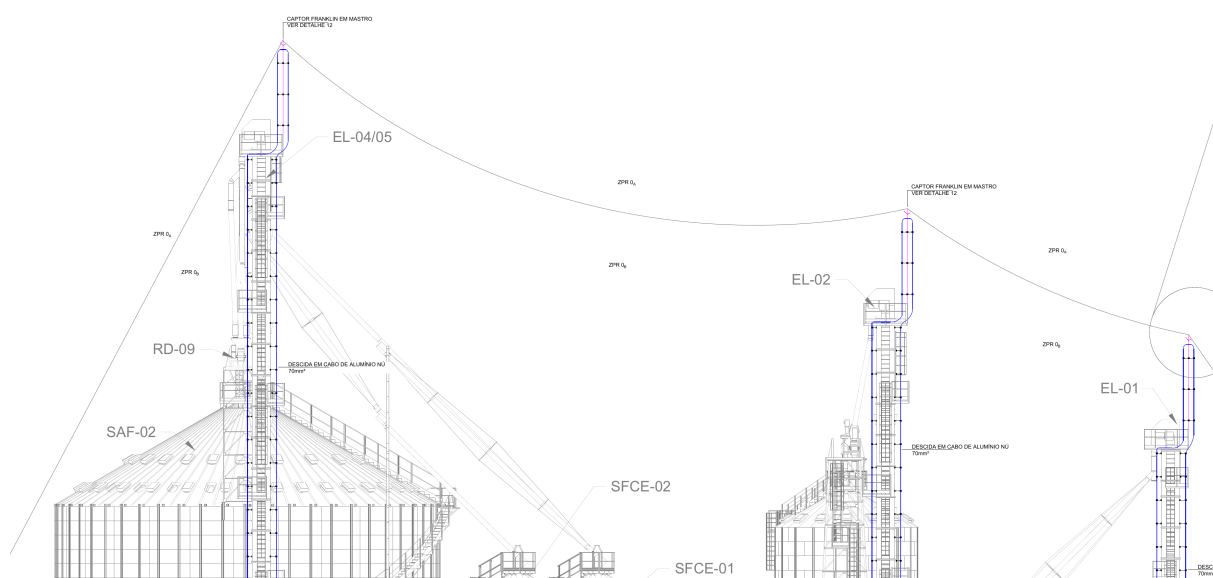
A equipotencialização é indispensável em uma unidade formada por silos, passarelas, elevadores, tubulações, painéis, eletrodutos e estruturas metálicas. Na documentação analisada, as notas técnicas determinam que estruturas metálicas existentes, tubulações, quadros de distribuição, eletrodutos metálicos, calhas e equipamentos sejam interligados ao sistema de aterramento.

Esse ponto é essencial porque, em uma descarga atmosférica, o perigo não está apenas no ponto de impacto. Diferenças de potencial entre partes metálicas podem gerar centelhamentos perigosos, tensões de toque, tensões de passo e danos a equipamentos eletrônicos. Assim, a equipotencialização transforma o SPDA em um sistema integrado.

5.8 Zonas de Proteção contra Raios

A prancha 02/02 identifica regiões classificadas como ZPR 0A e ZPR 0B. A ZPR 0A corresponde à região exposta à descarga atmosférica direta e ao campo eletromagnético total. A ZPR 0B corresponde à região protegida contra impacto direto, mas ainda sujeita ao campo eletromagnético da descarga.

Figura 6 – Indicação das ZPR 0A e ZPR 0B na vista da instalação.



Fonte: Adaptado de ENGPOWER (ENGPOWER, 2026).

A Figura 6 permite visualizar a relação entre os captos, as estruturas elevadas e as zonas protegidas. Essa análise é importante para definir onde devem ocorrer as transições de proteção, onde linhas devem ser equipotencializadas e onde DPS devem ser instalados.

5.9 Proteção interna e coordenação de DPS

A documentação técnica analisada recomenda DPS Classe II nos circuitos da balança, com o objetivo de proteger componentes eletrônicos sensíveis. Essa recomendação é pertinente, mas deve ser tratada como parte de uma estratégia maior de coordenação de proteção contra surtos.

Pela lógica da ABNT NBR 5419-4:2026, os DPS devem ser escolhidos considerando as fronteiras entre ZPRs, a suportabilidade dos equipamentos, a corrente presumida de surto, o tipo de linha e a distância até as cargas sensíveis. Em uma instalação com SPDA externo, linhas de energia e sinal e equipamentos eletrônicos, a proteção deve ser coordenada em cascata, normalmente com DPS Classe I na entrada onde houver possibilidade de

corrente parcial de descarga, DPS Classe II nos quadros de distribuição e DPS Classe III próximo aos equipamentos mais sensíveis, quando necessário.

No caso da balança, sensores e automação, a análise crítica indica que apenas especificar DPS Classe II pode não ser suficiente se as linhas cruzarem fronteiras de zonas de proteção sem equipotencialização adequada. Por isso, o memorial deve prever a conferência das linhas de alimentação, cabos de sinal, blindagens, aterramento dos eletrodutos metálicos e conexão ao barramento de equipotencialização.

5.10 Consulta técnica e fundamentos da tecnologia ESE

Com o objetivo de evitar uma análise meramente teórica dos dispositivos ESE, foi considerada a consulta técnica realizada com a Indelec em 07/07/2026. Na reunião, foram discutidos o princípio físico do captor ionizante, ensaios laboratoriais, normas estrangeiras de dimensionamento, aplicações industriais e limitações de aceitação regulatória no Brasil (ALMEIDA; CUNHA; REZENDE, 2026).

Segundo os materiais analisados, o captor Prevectron é apresentado como um para-raios com dispositivo de ionização, caracterizado por um tempo de antecipação ΔT em relação a uma ponta simples de referência. O catálogo técnico da Indelec apresenta modelos com diferentes valores de eficiência, como TS10, TS25, S40, S50 e S60, associados respectivamente a tempos de antecipação de 10, 25, 40, 50 e 60 μs (INDELEC do Brasil, 2026). Esse parâmetro não é, por si só, um raio de proteção: ele representa uma antecipação temporal determinada por procedimento de ensaio comparativo e posteriormente convertida em um comprimento equivalente para uso geométrico.

5.10.1 Tempo de antecipação, velocidade equivalente e comprimento de antecipação

Para tornar explícita a passagem de uma grandeza temporal para uma grandeza espacial, adota-se neste trabalho a notação auxiliar v_e para a velocidade equivalente utilizada nessa conversão. Quando a relação é apresentada na forma $\Delta = v\Delta T$, o fator v deve ser entendido como essa velocidade equivalente de conversão, e não como uma velocidade de propagação medida do líder atmosférico. Por clareza, utiliza-se a notação v_e ao longo desta versão. A formulação empregada pelas referências de ESE corresponde a:

$$\Delta = v_e \cdot \Delta T \quad (5.5)$$

com $v_e = 10^6$ m/s e ΔT expresso em segundos. Portanto, quando ΔT é informado em microssegundos, a conversão numérica torna-se particularmente simples:

$$\Delta[\text{m}] = \Delta T[\mu\text{s}] \quad (5.6)$$

pois $10^6 \text{ m/s} \times 10^{-6} \text{ s} = 1 \text{ m}$. A verificação dimensional é direta: $[v_e][\Delta T] = (\text{m/s})(\text{s}) = \text{m}$. Assim, um modelo com $\Delta T = 50 \mu\text{s}$ corresponde a $\Delta = 50 \text{ m}$, enquanto um modelo com $\Delta T = 60 \mu\text{s}$ corresponde a $\Delta = 60 \text{ m}$. O símbolo v_e é utilizado aqui apenas para explicitar fisicamente a conversão; nos materiais oficiais do fabricante, a mesma relação aparece de forma direta como $\Delta = \Delta T \times 10^6$, com ΔT em segundos (INDELEC, 2021).

É importante distinguir três grandezas. O tempo ΔT é o resultado de eficiência/antecipação associado ao ensaio do captor; v_e é a velocidade equivalente adotada para converter esse tempo em distância; e Δ é o comprimento de antecipação equivalente que efetivamente entra na equação geométrica do raio de proteção. Portanto, Δ não representa a distância física de uma peça do captor nem uma extensão real previamente formada no ar: trata-se de um parâmetro equivalente de cálculo.

Os materiais técnicos do Prevelectron também descrevem a detecção do fenômeno pela monitoração contínua da variação do campo elétrico atmosférico, indicada como $\Delta E/\Delta t$. Nessa razão, E representa o campo elétrico e t o tempo. Esse gradiente de campo não deve ser confundido com o tempo de eficiência ΔT empregado no dimensionamento do raio de proteção (INDELEC do Brasil, 2026). A relação entre h , r , Δ e R_p , bem como os valores de r para os quatro níveis de proteção, também é apresentada no material oficial do fabricante com referência explícita à NF C 17-102:2011 (INDELEC, 2021).

5.10.2 Aplicação dos parâmetros no raio de proteção

Nas normas NF C 17-102:2011 e NP 4426:2013, o raio de proteção do captor ESE é relacionado à altura h , ao raio da esfera rolante r correspondente ao nível de proteção e ao comprimento de antecipação Δ . A altura h é medida entre a ponta do captor e o plano horizontal que passa pelo ponto mais distante da área ou objeto que se pretende proteger; portanto, h não é necessariamente igual ao comprimento físico do mastro. Para $h \geq 5 \text{ m}$, a expressão utilizada é:

$$R_p(h) = \sqrt{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)} \quad (5.7)$$

Nessa expressão, R_p é o raio de proteção em metros; h é a altura definida acima; r assume 20, 30, 45 ou 60 m para os níveis de proteção I, II, III ou IV, respectivamente; e Δ é obtido pelas Equações 5.5 e 5.6. Para $2 \text{ m} \leq h \leq 5 \text{ m}$, utiliza-se a interpolação:

$$R_p(h) = \frac{h \cdot R_p(5)}{5} \quad (5.8)$$

Como verificação de consistência, a prancha técnica “P.SPDA – Silo e Armazém” fornecida pela Indelec indica, para o modelo S50, raios de 68 m, 76 m e 86 m nos níveis I, II e III (INDELEC do Brasil, 2025b). Adotando $\Delta T = 50 \mu s$, tem-se $\Delta = 50$ m. Para NP II, $r = 30$ m e, tomando $h = 5$ m, a Equação 5.7 fornece $R_p = 75,99$ m, que arredondado resulta em 76 m, reproduzindo o valor indicado na prancha. O cálculo completo e a comparação para os quatro níveis são apresentados no Apêndice B.

A NP 4426 estabelece limite de $60 \mu s$ para o valor de ΔT utilizado no dimensionamento, mesmo que um ensaio apresente valor superior (IPQ, 2013). Esses critérios explicam por que os raios de proteção variam com o modelo do captor, a altura efetiva h e o nível de proteção selecionado.

Os materiais da Indelec também informam ensaios e certificações associados ao Prevelectron, incluindo ensaios ambientais, compatibilidade eletromagnética, ensaios de corrente impulsiva e avaliação laboratorial do tempo de antecipação. Certificados do Bureau Veritas indicam conformidade de modelos Prevelectron 3 com requisitos do Anexo C da NF C 17-102:2011, enquanto o catálogo cita ensaio normativo de corrente I_{imp} de 100 kA e ensaio máximo de 230 kA em laboratório da Unicamp para o modelo S60 (Bureau Veritas, 2026; INDELEC do Brasil, 2026).

5.10.3 Esclarecimento sobre ionização, equipotencialização e raio de proteção

Um ponto importante para a defesa deste trabalho é separar corretamente três conceitos que, na prática, podem ser confundidos: ionização do ar, equipotencialização e raio de proteção. A eletrônica do captor ESE não “transfere” a equipotencialização para o raio ascendente e também não elimina a necessidade de aterramento. A equipotencialização é uma função do sistema de interligações metálicas, condutores de descida, BEP/BEL, massas metálicas e malha de aterramento. Portanto, ela continua sendo executada por meios condutivos e deve ser verificada independentemente do tipo de captor adotado.

O que a tecnologia ESE busca produzir, segundo o fabricante e as normas específicas associadas, é a antecipação da emissão do líder ascendente. Em uma tempestade, a aproximação do líder descendente aumenta o campo elétrico local. O captor, por estar conectado ao subsistema de descida e ao aterramento, encontra-se referenciado ao potencial da estrutura. A eletrônica interna acumula energia por efeito eletrostático e, quando o campo atinge determinada condição, promove pulsos de ionização nas proximidades da ponta. Essa ionização local reduz a rigidez dielétrica do ar ao redor do captor e favorece a formação antecipada do líder ascendente.

Assim, o aumento do raio de proteção apresentado nas normas de ESE não deve ser entendido como uma amplificação de energia do raio nem como uma substituição da

equipotencialização. Trata-se de uma interpretação geométrica: o tempo de antecipação ΔT é convertido em um comprimento equivalente Δ conforme a Equação 5.5, isto é, $\Delta = v_e \Delta T$, e esse comprimento é inserido na expressão do raio de proteção. Em termos práticos, a tecnologia procura fazer com que o líder ascendente se inicie antes no captor ESE do que em uma ponta simples, aumentando a probabilidade de interceptação da descarga naquele ponto.

Para a análise de engenharia, esse esclarecimento é essencial: o captor ESE pode alterar a estratégia de captação, mas não altera os fundamentos de condução da corrente e de proteção interna. A corrente da descarga, uma vez captada, ainda precisa ser conduzida por descidas adequadas até o aterramento, com controle de diferenças de potencial, redução de centelhamentos perigosos e coordenação de DPS para proteção dos sistemas elétricos e eletrônicos.

Ainda assim, para este trabalho, essas informações são tratadas como premissas técnicas de uma tecnologia alternativa, e não como substituição automática dos critérios da ABNT NBR 5419. A aplicação em uma instalação real depende do responsável técnico, da aceitação do órgão competente e da compatibilização com os demais subsistemas do SPDA.

5.11 Comparação técnico-aplicada entre o sistema convencional e a alternativa ESE

A Tabela 1 sintetiza a comparação entre a solução convencional representada nas pranchas da Ouro Safra e uma alternativa conceitual baseada em captor ESE/Prevectron. A comparação é qualitativa, pois a definição final do modelo, quantidade de captores, altura dos mastros e custo dependeria de memória de cálculo específica do fabricante e das dimensões finais da instalação.

Tabela 1 – Síntese comparativa entre o sistema convencional analisado e a alternativa ESE/Prevectron.

Critério	Sistema convencional Ouro Safrá	Alternativa ESE/Prevectron
Base de projeto	ABNT NBR 5419, com captosres Franklin, descidas, aterramento, equipotencialização, ZPR e DPS.	Normas específicas para ESE, como NF C 17-102 e NP 4426, associadas à análise do responsável técnico e à aceitação local.
Princípio de captação	Interceptação por elementos metálicos posicionados conforme métodos geométricos convencionais.	Antecipação do líder ascendente por dispositivo de ionização, segundo premissas do fabricante.
Parâmetro principal	Geometria física dos captosres, altura, esfera rolante, malha ou ângulo de proteção.	Tempo de antecipação ΔT , altura de instalação, nível de proteção e raio declarado R_p .
Descidas	Cabos e componentes naturais devem conduzir a corrente até a malha de aterramento.	Continuam necessárias; normas estrangeiras também tratam de condutores de descida e componentes naturais.
Aterramento	Malha em cobre nu, hastes, caixas, conexões por solda exotérmica e interligações.	Continua obrigatório; a tecnologia de captação não elimina o subsistema de aterramento.
Equipotencialização	Interligação de massas metálicas, quadros, tubulações, eletrodutos e equipamentos.	Permanece obrigatória para reduzir diferenças de potencial e centelhamentos perigosos.
DPS e ZPR	Devem ser definidos conforme as fronteiras entre zonas e a suportabilidade dos equipamentos.	Continuam necessários; o captor ESE não protege, isoladamente, linhas de energia, sinal e automação contra surtos.
Vantagem possível	Maior rastreabilidade direta pela ABNT NBR 5419 e menor discussão regulatória.	Possível redução de pontos de captação e simplificação de implantação em alguns cenários de grande área.
Limitação principal	Pode exigir maior quantidade de elementos físicos e maior interferência construtiva.	Aceitação normativa variável no Brasil e necessidade de justificativa técnica específica para o raio estendido.
Aplicabilidade no caso analisado	Solução já representada nas pranchas técnicas do estudo de caso.	Alternativa conceitual dependente de cálculo do fabricante, validação do responsável técnico e aceitação do órgão competente.

Fonte: Elaborada pelo autor com base no projeto analisado, materiais técnicos da Indelec e consulta técnica realizada.

A comparação mostra que a principal diferença entre as soluções está na estratégia de captação. A alternativa ESE pode apresentar vantagem em redução de elementos de captação e facilidade de implantação em determinados cenários, especialmente em áreas abertas ou estruturas com poucos pontos elevados. Entretanto, ela não elimina a necessidade de descidas, aterramento, equipotencialização, ZPR, DPS, inspeção e responsabilidade técnica.

Para silos agroindustriais, a aplicação deve ser ainda mais criteriosa, pois a geometria elevada e metálica, a existência de passarelas, elevadores, bases, tubulações e equipamentos sensíveis tornam insuficiente uma análise baseada apenas no raio de proteção em planta. É necessário verificar caminhos de corrente, descargas laterais, continuidade elétrica e efeitos de surtos conduzidos e induzidos.

5.12 Parecer técnico preliminar para o estudo de caso

Com base nas informações disponíveis, o sistema convencional apresentado nas pranchas da Ouro Safra possui maior rastreabilidade direta em relação à ABNT NBR 5419, pois seus subsistemas podem ser verificados por critérios normativos. A alternativa ESE/Prelectron apresenta fundamentação técnica própria, ensaios e normas estrangeiras de referência, mas sua aplicação no contexto brasileiro exige tratamento cuidadoso quanto à aceitação regulatória, memória de cálculo e responsabilidade técnica.

Assim, para este estudo de caso, a solução ESE não deve ser tratada como substituição automática do sistema convencional. Ela pode ser avaliada como alternativa ou complemento de captação, desde que sejam mantidos e verificados os requisitos de descida, aterramento, equipotencialização, ZPR, DPS e inspeção. O ponto central, portanto, não é apenas escolher entre Franklin ou ESE, mas garantir que toda a instalação seja protegida como sistema integrado.

5.13 Memorial descritivo do sistema proposto

Com base na análise das pranchas e nos critérios normativos, o sistema de proteção estudado contempla:

- captores Franklin instalados nos pontos elevados da estrutura;
- mastros metálicos fixados aos elevadores e estruturas de apoio;
- descidas em cabo de alumínio nu de 70 mm²;
- utilização de re-bars e estruturas metálicas como componentes naturais, mediante garantia de continuidade elétrica;
- malha de aterramento em cabo de cobre nu de 50 mm²;
- hastes de aterramento, caixas de inspeção e conexões por solda exotérmica;
- equipotencialização de massas metálicas, tubulações, eletrodutos, quadros e equipamentos;
- identificação de ZPR 0A e ZPR 0B;
- recomendação de DPS para circuitos sensíveis, com necessidade de coordenação entre classes de DPS;
- inspeção visual semestral e inspeção periódica por profissional habilitado.

A solução analisada atende ao objetivo central do trabalho por permitir a avaliação de um SPDA convencional aplicado a uma estrutura agroindustrial de grande porte. Ao mesmo tempo, evidencia que a segurança da instalação depende do conjunto completo de medidas, e não apenas da escolha de um captor.

5.14 Rastreabilidade com o plano de atividades

A Tabela 2 relaciona os itens previstos no plano de atividades com as evidências apresentadas no desenvolvimento do trabalho.

Tabela 2 – Rastreabilidade entre o plano de atividades e as evidências do estudo de caso.

Requisito	Evidência apresentada	Local no TCC
Caracterização do armazém	Descrição da unidade, silos, elevadores, estruturas metálicas e sistemas sensíveis.	Capítulos 3 e 5
Gerenciamento de risco	Estimativa de exposição, discussão de risco e adoção preliminar de NP II.	Seção 5.3
Subsistema de captação	Captores Franklin, mastros, re-bars e análise comparativa com alternativa ESE.	Seções 5.4, 5.10 e 5.11
Subsistema de descida	Descidas em cabo de alumínio nu de 70 mm ² e discussão de descidas na alternativa ESE.	Seções 5.5 e 5.11
Subsistema de aterramento	Malha em cobre nu de 50 mm ² , hastes, vala, solda exotérmica e comparação com requisitos ESE.	Seções 5.6 e 5.11
Equipotencialização	Interligação de estruturas metálicas, tubulações, eletrodutos, quadros e equipamentos.	Seção 5.7
ZPR	Identificação de ZPR 0A e ZPR 0B e relação com proteção interna.	Seção 5.8
DPS	Análise crítica dos circuitos da balança e necessidade de coordenação.	Seção 5.9
Análise ESE	Consulta técnica, materiais do fabricante, fórmula de raio de proteção e matriz comparativa.	Seções 5.10 a 5.12
Memorial e desenhos	Síntese dos materiais, pranchas anexadas e registro da consulta técnica.	Seção 5.13, Apêndice A e Anexo A

Fonte: Elaborada pelo autor.

O estudo de caso foi utilizado para conectar a norma à prática de projeto, enquanto a consulta técnica com o fabricante permitiu transformar a discussão sobre ESE em uma comparação aplicada entre soluções.

6 Conclusão

O presente trabalho analisou um projeto de Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas aplicado a uma instalação agroindustrial de grande porte da Ouro Safra, localizada em Araxá-MG. A partir da série ABNT NBR 5419:2026, da documentação técnica disponível, dos materiais de fabricantes e da consulta técnica realizada sobre captadores ESE, foi possível relacionar conceitos de gerenciamento de risco, captação, descidas, aterramento, equipotencialização, Zonas de Proteção contra Raios e coordenação de DPS com um caso real de engenharia.

A análise mostrou que estruturas de silos exigem tratamento cuidadoso, pois combinam grande altura, elevada exposição, extensas massas metálicas, presença de poeiras combustíveis e sistemas eletrônicos sensíveis. Por isso, a proteção contra descargas atmosféricas não pode ser reduzida à instalação isolada de um captor. É necessário um sistema completo, com caminhos de corrente bem definidos, aterramento adequado, continuidade elétrica, equipotencialização, proteção coordenada contra surtos e procedimentos de inspeção e manutenção.

No estudo de caso, as pranchas técnicas evidenciaram uma solução convencional baseada em captadores Franklin, descidas em cabo de alumínio nu, malha de aterramento em cabo de cobre nu, hastes, caixas de inspeção, solda exotérmica e interligação das massas metálicas. Esses elementos permitiram consolidar um memorial técnico compatível com o plano de atividades e demonstrar a aplicação prática dos subsistemas do SPDA externo e interno.

A avaliação das ZPR mostrou a importância de distinguir as regiões expostas à descarga direta das regiões protegidas contra impacto direto, mas ainda submetidas ao campo eletromagnético da descarga. Essa distinção é fundamental para a proteção de balanças, sensores, painéis e sistemas de automação. Nesse ponto, a especificação de DPS Classe II nos circuitos da balança foi considerada tecnicamente relevante, mas insuficiente se tratada de forma isolada. A proteção interna deve ser coordenada em cascata, considerando fronteiras entre zonas, suportabilidade dos equipamentos e equipotencialização das linhas.

Quanto aos dispositivos de emissão antecipada (ESE), a análise foi ampliada a partir dos materiais técnicos da Indelec e da consulta realizada com o fabricante. Verificou-se que a tecnologia possui fundamentação própria, modelos comerciais com diferentes tempos de antecipação, ensaios laboratoriais, certificações e normas estrangeiras de referência, como NF C 17-102 e NP 4426. Entretanto, no contexto brasileiro, sua aplicação deve ser avaliada com cautela, pois a ABNT NBR 5419 não estabelece procedimento específico para adoção automática de raios de proteção ampliados por emissão antecipada.

A comparação técnico-aplicada indicou que a principal diferença entre a solução convencional e a alternativa ESE está na estratégia de captação. A análise da formulação mostrou que o tempo de antecipação ΔT é convertido em um comprimento equivalente Δ , que passa a integrar o cálculo do raio de proteção juntamente com a altura efetiva h e o raio r associado ao nível de proteção. O exemplo numérico desenvolvido no Apêndice B reproduziu os raios informados em uma prancha técnica de silo e armazém da Indelec, tornando rastreável a aplicação da expressão. Uma solução com Prevelectron pode apresentar vantagens potenciais em termos de redução de pontos de captação, facilidade de implantação e cobertura de áreas extensas. Contudo, ela não elimina requisitos fundamentais como descidas, aterramento, continuidade elétrica, equipotencialização, definição de ZPR, coordenação de DPS, inspeção e responsabilidade técnica. Em silos agroindustriais, esses requisitos são especialmente importantes devido à geometria da instalação, às estruturas metálicas e à presença de sistemas eletrônicos sensíveis.

Como contribuição, o trabalho não se limita a afirmar que uma tecnologia é superior à outra. A contribuição principal foi transformar um projeto real de SPDA em uma análise comparativa de engenharia, mostrando quais requisitos permanecem obrigatórios independentemente do tipo de captor e quais pontos devem ser verificados quando se considera uma alternativa ESE. Dessa forma, o estudo reforça que a segurança de uma instalação crítica depende da integração entre captação, descidas, aterramento, equipotencialização, ZPR, DPS, inspeção e responsabilidade técnica.

Para uma etapa executiva completa, recomenda-se complementar este estudo com medição de resistividade do solo, ensaio de continuidade elétrica das massas metálicas, confirmação das dimensões finais da instalação, levantamento detalhado dos painéis elétricos, identificação dos cabos de energia e sinal, fechamento da análise de risco por planilha normativa e elaboração de memória de cálculo executiva específica para eventual solução ESE, com definição de modelo, quantidade de captadores, alturas efetivas e implantação final. O Apêndice B atende ao objetivo acadêmico de demonstrar e tornar rastreáveis os cálculos disponíveis, mas não substitui essa memória executiva. Ainda assim, o desenvolvimento apresentado atende ao objetivo acadêmico proposto, pois aplica a ABNT NBR 5419 a um caso real de SPDA para armazém de silos e apresenta uma análise crítica e comparativa da aplicação de dispositivos ESE frente ao sistema convencional.

Referências Bibliográficas

ABNT. *ABNT NBR IEC 60079-10-2: Atmosferas explosivas – Parte 10-2: Classificação de áreas – Atmosferas de poeiras explosivas*. Rio de Janeiro, 2023. Citado na página 18.

ABNT. *ABNT NBR 5419-1:2026: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 1: Princípios gerais*. Rio de Janeiro, 2026. Citado na página 14.

ABNT. *ABNT NBR 5419-2:2026: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 2: Análise de risco*. Rio de Janeiro, 2026. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.

ABNT. *ABNT NBR 5419-3:2026: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 3: Danos físicos a estruturas e perigos à vida*. Rio de Janeiro, 2026. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 16.

ABNT. *ABNT NBR 5419-4:2026: Proteção contra descargas atmosféricas – Parte 4: Sistemas elétricos e eletrônicos internos na estrutura*. Rio de Janeiro, 2026. Citado 3 vezes nas páginas 14, 15 e 17.

AFNOR. *NF C 17-102:2011: Protection against lightning – Early streamer emission lightning protection systems*. Paris, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.

ALMEIDA, V.; CUNHA, H. R.; REZENDE, P. H. O. *Consulta técnica sobre tecnologia ESE/Prevelectron e aplicação em SPDA*. 2026. Reunião técnica realizada em 07/07/2026 com base em materiais da Indelec. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 33.

Bureau Veritas. *Certificado de conformidade: Prevelectron 3*. [S.l.], 2026. Certificado técnico fornecido em material do fabricante. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 35.

COTRIM, A. A. M. B. *Instalações Elétricas*. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010. Citado na página 14.

ENGPOWER. *Projeto SPDA - Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas - Ouro Safra S/A - Área Rural de Araxá/MG*: Pranchas técnicas ouro safra spda silos, revisão c, folhas 01/02 e 02/02. [S.l.], 2026. Citado 7 vezes nas páginas 21, 24, 28, 29, 30, 31 e 32.

FILHO, J. M. *Instalações Elétricas Industriais*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Citado na página 14.

FILHO, S. V. *Descargas Atmosféricas: Uma abordagem de engenharia*. São Paulo: Artliber, 2005. Citado na página 14.

INDELEC. *PREVECTRON 3 Connect: Lightning Rod*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://indelec.com/wp-content/uploads/PREVECTRON-3-CONNECT-BROCHURE.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2026. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 46.

INDELEC do Brasil. *Apresentação técnica Indelec 2025: Prevelectron e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas*. [S.l.], 2025. Material técnico fornecido ao autor. Citado na página 23.

INDELEC do Brasil. *Projeto SPDA – Silo e Armazém*. [S.l.], 2025. Prancha técnica de exemplo com captor Prevector S50, emissão inicial de 10/12/2025, fornecida ao autor. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 46.

INDELEC do Brasil. *Catálogo Indelec do Brasil 2026: Prevector 3*. [S.l.], 2026. Catálogo técnico fornecido ao autor. Citado 5 vezes nas páginas 23, 33, 34, 35 e 46.

IPQ. *NP 4426:2013: Proteção contra descargas atmosféricas – Sistemas com dispositivo de ionização não radioativo*. Portugal, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 17, 23 e 35.

KINDERMANN, G. *Aterramento Elétrico*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2018. Citado na página 14.

APÊNDICE A – Síntese da consulta técnica com fabricante ESE

Este apêndice registra, de forma resumida, os principais pontos técnicos aproveitados da consulta realizada em 07/07/2026 com representante da Indelec, com participação do orientador e do autor. O objetivo da reunião foi compreender a tecnologia de captors de emissão antecipada, levantar premissas de projeto e evitar que a comparação com o sistema convencional ficasse apenas conceitual.

Os principais pontos incorporados ao trabalho foram:

- o captor ESE/Prelectron foi apresentado como tecnologia baseada na antecipação do líder ascendente por monitoramento do campo elétrico e emissão controlada de cargas;
- os modelos comerciais foram associados a diferentes tempos de antecipação, variando de 10 a 60 μs ;
- o raio de proteção foi relacionado à altura de instalação, ao nível de proteção e ao comprimento de líder antecipado, conforme critérios de normas estrangeiras como NF C 17-102 e NP 4426;
- foram mencionados ensaios laboratoriais de antecipação, suportabilidade a correntes impulsivas, ensaios ambientais e compatibilidade eletromagnética;
- foi discutido que a adoção de captor ESE não elimina a necessidade de descidas, aterramento, equipotencialização, ZPR e DPS;
- a aceitação regulatória no Brasil foi tratada como variável por estado e dependente do responsável técnico, do órgão competente e da documentação apresentada;
- para o estudo de caso, a aplicação de ESE foi considerada como alternativa técnica de captação, e não como substituição automática de todo o sistema convencional.

Como encaminhamento técnico, a reunião reforçou que a comparação adequada entre SPDA convencional e ESE deve considerar não apenas o raio de proteção, mas também caminhos de corrente, subsistema de descida, aterramento, continuidade elétrica, proteção de linhas, DPS, aceitação normativa e responsabilidade técnica.

APÊNDICE B – Memorial de cálculo acadêmico e rastreabilidade dos parâmetros

Este apêndice consolida os cálculos numéricos efetivamente utilizados no estudo de caso e explicita as hipóteses adotadas. O objetivo é dar rastreabilidade aos valores apresentados no texto, sem transformar o TCC em um projeto executivo. Dados não disponíveis nos arquivos técnicos não são arbitrados como se fossem medições de campo.

B.1 Área de exposição equivalente A_D

Para o pré-dimensionamento acadêmico foram adotadas as dimensões globais $L = 60$ m, $W = 20$ m e $H = 35$ m. A área de exposição equivalente utilizada na estimativa de descargas diretas é:

$$A_D = LW + 2(3H)(L + W) + \pi(3H)^2 \quad (6.1)$$

Substituindo os valores:

$$A_D = 60 \cdot 20 + 2 \cdot 105 \cdot (60 + 20) + \pi \cdot 105^2 \quad (6.2)$$

$$= 1200 + 16800 + 34636,06 \quad (6.3)$$

$$= 52636,06 \text{ m}^2 \quad (6.4)$$

$$= 0,052636 \text{ km}^2. \quad (6.5)$$

Com $C_D = 1,0$, a frequência anual de descargas diretas pode ser mantida de forma paramétrica como:

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} = 0,052636 N_G. \quad (6.6)$$

O fechamento numérico de N_D exige o valor oficial de N_G correspondente à localização definitiva da estrutura. Como esse dado não está documentado nos arquivos fornecidos ao estudo, ele não foi inventado neste memorial.

B.2 Conversão de ΔT em comprimento Δ

Para a formulação de ESE, o tempo de antecipação é convertido em comprimento equivalente pela relação:

$$\Delta = v_e \Delta T, \quad (6.7)$$

na qual se explicita, neste trabalho, $v_e = 10^6$ m/s. Se a mesma conversão for escrita como $\Delta = v \Delta T$, então v representa esse fator equivalente; a notação v_e é usada aqui para evitar sua interpretação como uma velocidade atmosférica diretamente medida. Dimensionalmente, $[v_e][\Delta T] = (\text{m/s})(\text{s}) = \text{m}$. Se ΔT for informado em microssegundos:

$$\Delta[\text{m}] = \Delta T[\mu\text{s}]. \quad (6.8)$$

Dessa forma:

Modelo	ΔT	Δ
TS10	10 μs	10 m
TS25	25 μs	25 m
S40	40 μs	40 m
S50	50 μs	50 m
S60	60 μs	60 m

Os valores de ΔT acima correspondem aos modelos Prevectoron considerados nos materiais técnicos analisados e são também apresentados no material oficial do fabricante (INDELEC do Brasil, 2026; INDELEC, 2021). O parâmetro Δ é uma distância equivalente de cálculo e não deve ser interpretado como uma peça física ou como um líder já formado com esse comprimento.

B.3 Exemplo completo do raio de proteção para o modelo S50

A prancha de exemplo “P.SPDA – Silo e Armazém”, fornecida pela Indelec, informa raios de proteção para o modelo S50 (INDELEC do Brasil, 2025b). Para reproduzir numericamente esses valores, considera-se $\Delta T = 50 \mu\text{s}$, logo $\Delta = 50$ m, e altura efetiva $h = 5$ m. Para $h \geq 5$ m:

$$R_p = \sqrt{2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta)}. \quad (6.9)$$

Para o Nível de Proteção II, $r = 30$ m:

$$R_p = \sqrt{2 \cdot 30 \cdot 5 - 5^2 + 50(2 \cdot 30 + 50)} \quad (6.10)$$

$$= \sqrt{300 - 25 + 5500} \quad (6.11)$$

$$= \sqrt{5775} \quad (6.12)$$

$$= 75,99 \text{ m} \approx 76 \text{ m}. \quad (6.13)$$

O mesmo procedimento para os quatro níveis fornece:

Nível	r (m)	R_p calculado (m)	Arredondado (m)
I	20	68,37	68
II	30	75,99	76
III	45	86,17	86
IV	60	95,26	95

Os resultados dos níveis I, II e III coincidem, após arredondamento, com os valores 68 m, 76 m e 86 m indicados na prancha de silo e armazém. Essa conferência não significa que um único captor S50 tenha sido dimensionado para substituir o sistema convencional da Ouro Safra; ela apenas valida a aplicação numérica da fórmula com um exemplo técnico pertencente ao conjunto de materiais estudado.

B.4 Relação entre A_D e Δ

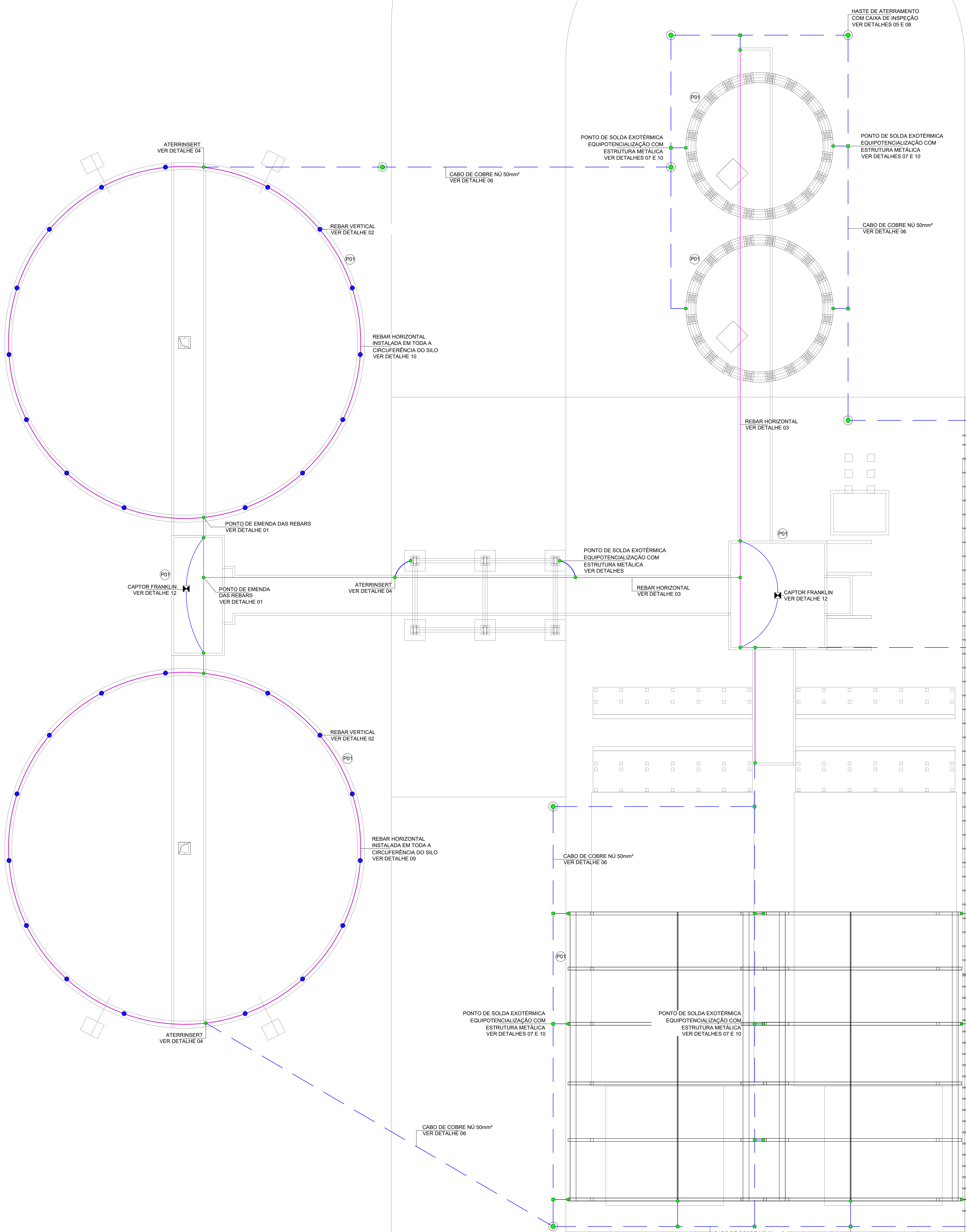
Embora ambos apareçam no mesmo TCC, A_D e Δ pertencem a etapas diferentes do projeto. O primeiro é uma **área de exposição equivalente** usada no gerenciamento de risco da ABNT NBR 5419-2. O segundo é um **comprimento de antecipação equivalente** usado na formulação de raio de proteção das normas específicas de ESE. Assim, não existe substituição de A_D por Δ , nem relação dimensional direta entre essas duas grandezas.

B.5 Dados ainda necessários para um memorial executivo

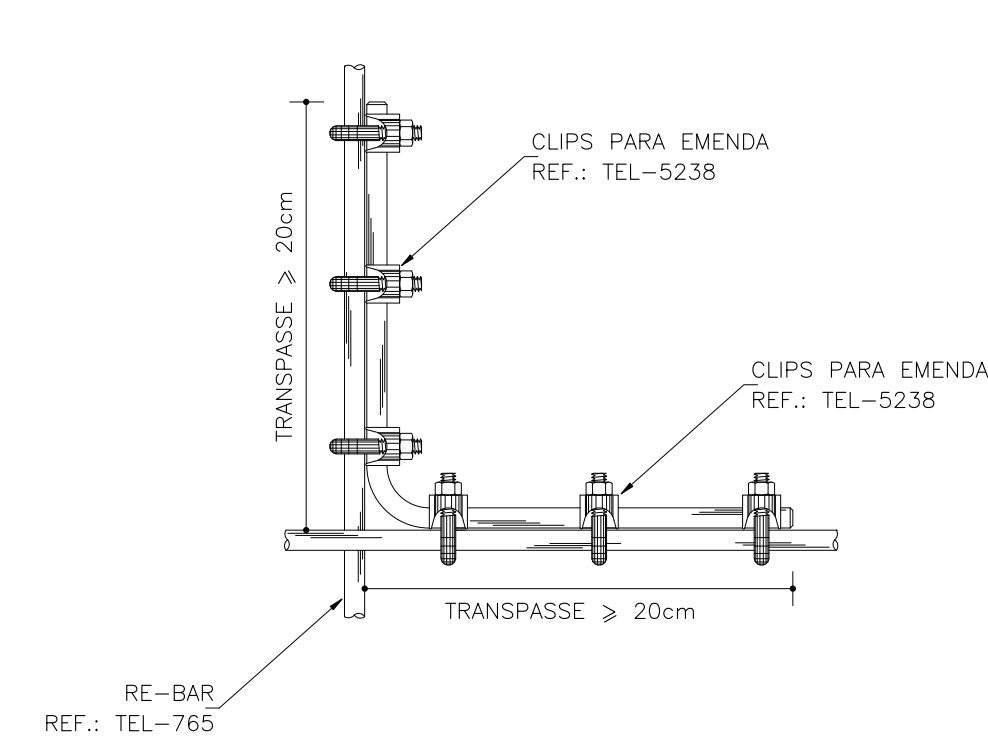
Para transformar este memorial acadêmico em documento executivo de engenharia, ainda devem ser confirmados, no mínimo: coordenadas e N_G oficial da instalação; dimensões finais de todas as estruturas; resistividade do solo; continuidade elétrica das massas e componentes naturais; ocupação e rotinas operacionais; classificação de áreas; características das linhas de energia e sinal; painéis e DPS instalados; alturas efetivas h de eventual solução ESE; modelo e quantidade de captores; e compatibilização final com os critérios de responsabilidade técnica e aceitação aplicáveis ao empreendimento.

ANEXO A – Pranchas técnicas do projeto analisado

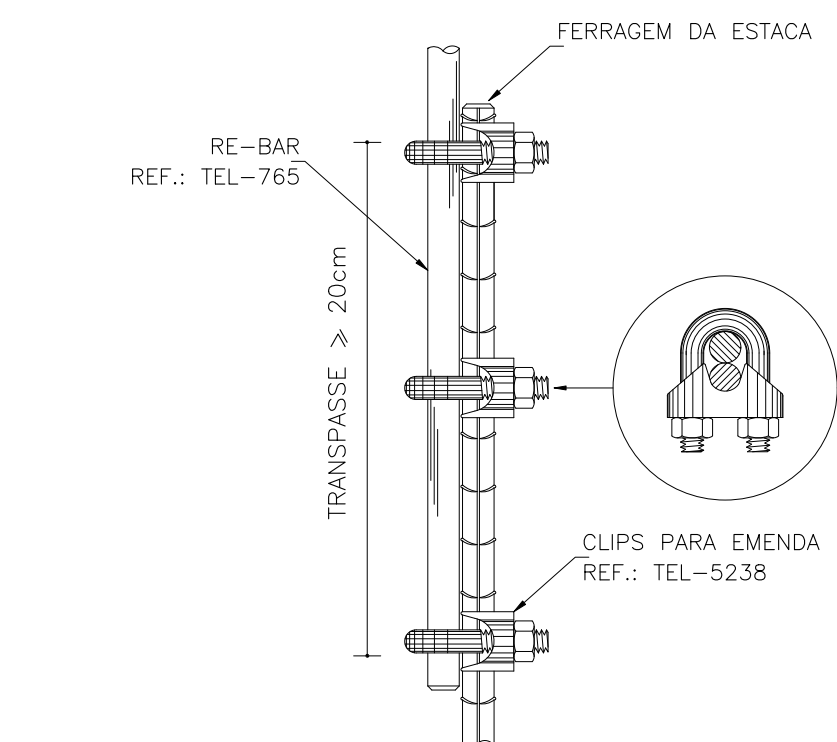
Este anexo apresenta as pranchas técnicas utilizadas como base do estudo de caso. As figuras inseridas no Capítulo 5 foram extraídas e adaptadas dessas pranchas, enquanto as folhas completas são mantidas aqui para consulta integral do projeto analisado.



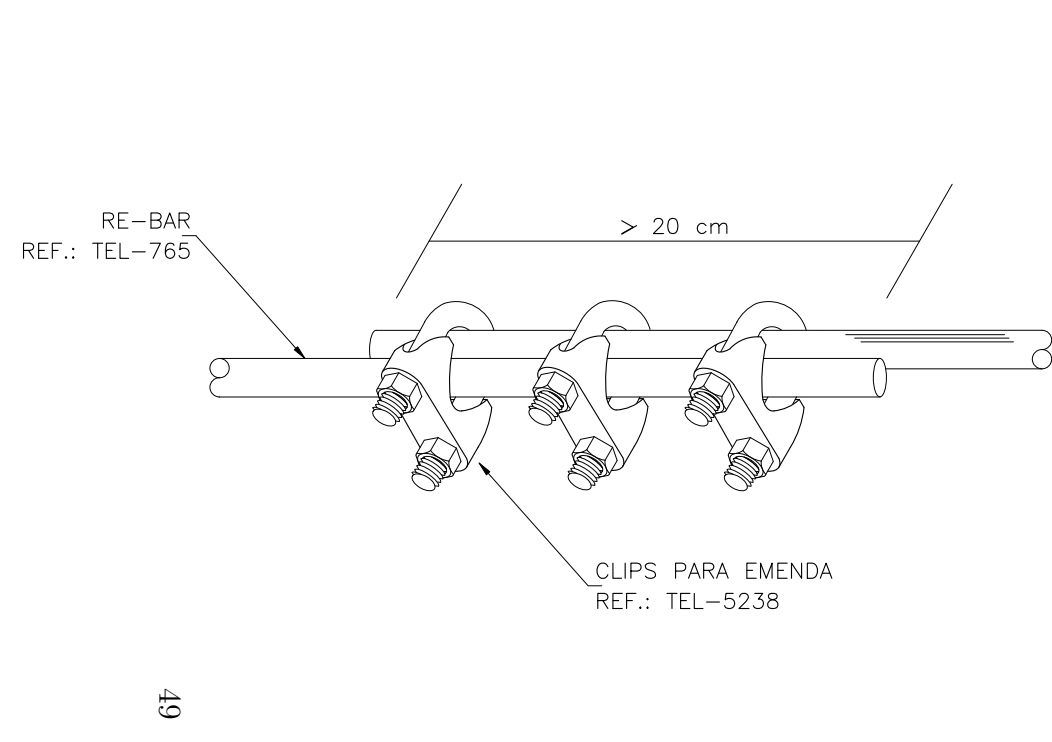
DETALHE 01 - AMARRAÇÃO DAS RE-BARS SEM ESCALA



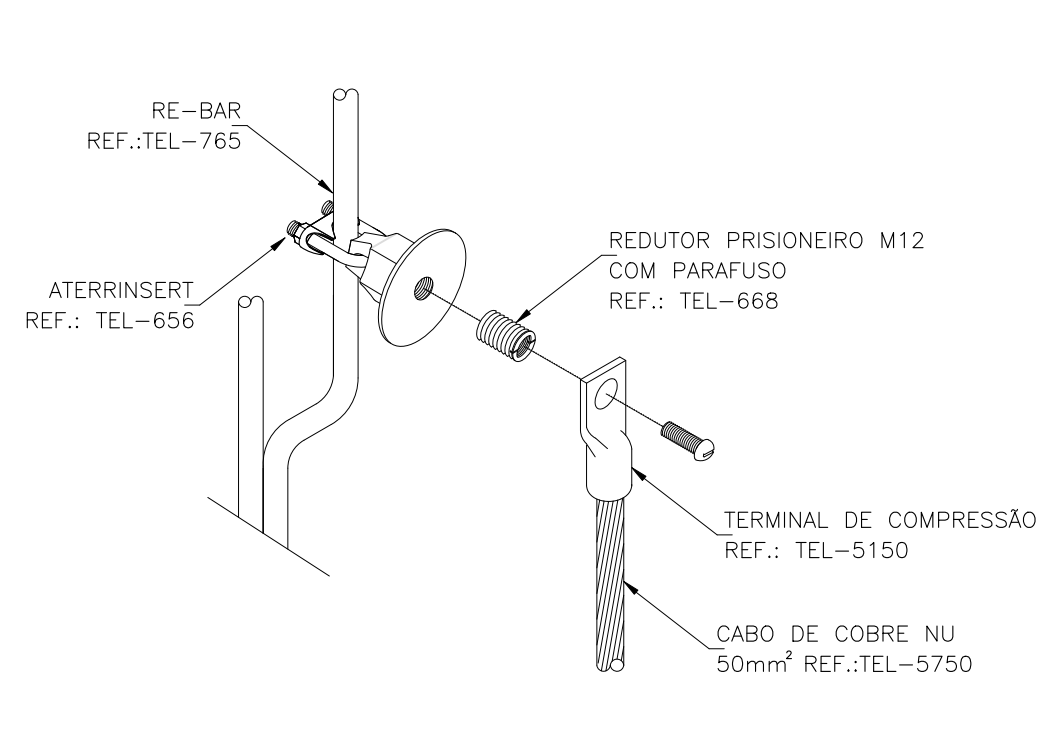
DETALHE 02 - CONEXÃO DAS RE-BARS COM AS ESTACAS SEM ESCALA



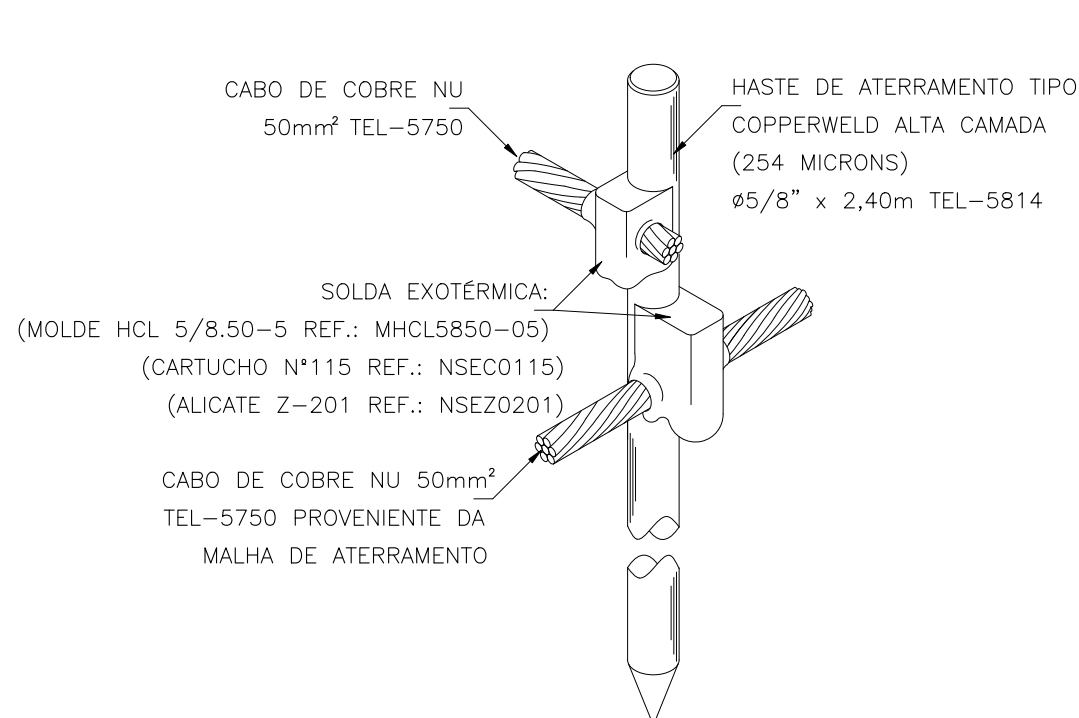
DETALHE 03 - EMENDA DAS RE-BARS HORIZONTAIS SEM ESCALA



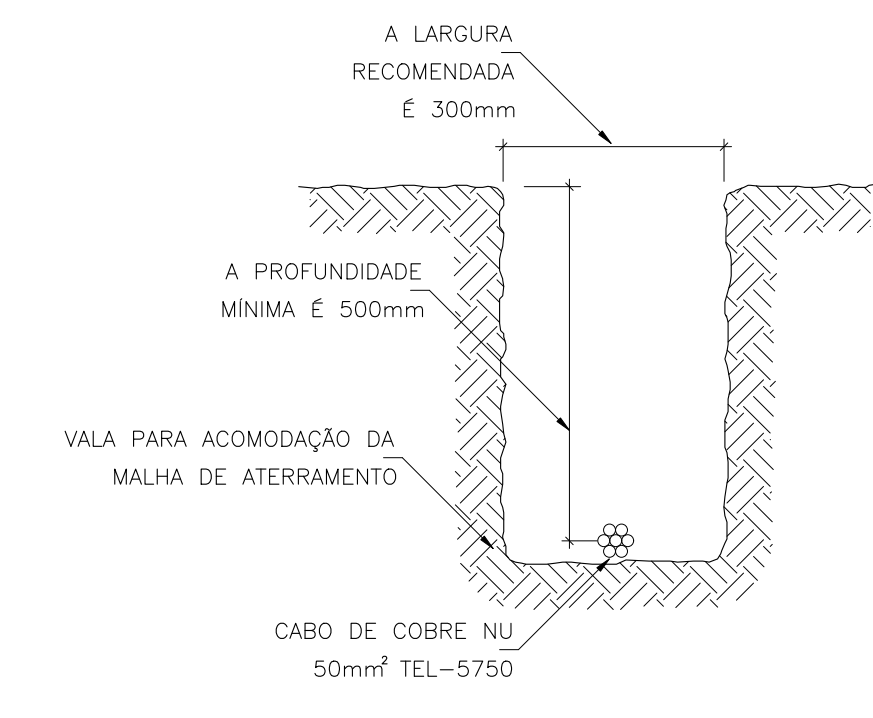
DETALHE 04 - CONEXÃO DO ATERRINSERT COM AS RE-BARS E MALHA DE ATERRAMENTO SEM ESCALA



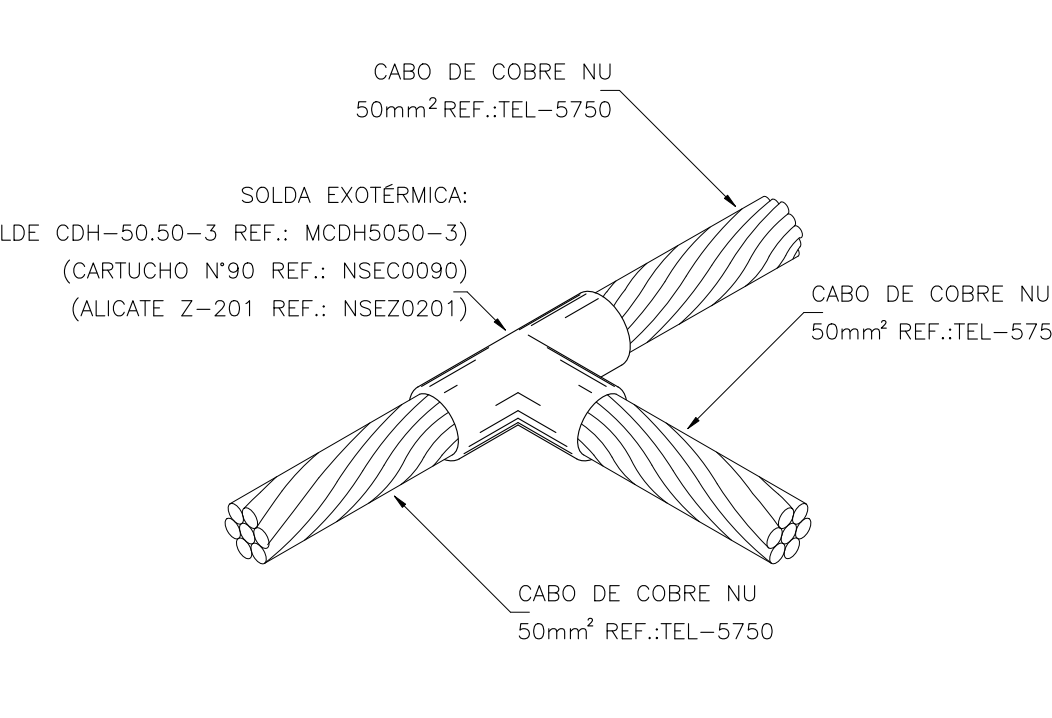
DETALHE 05 - CONEXÃO E SOLDA DE HASTE DE ATERRAMENTO SEM ESCALA



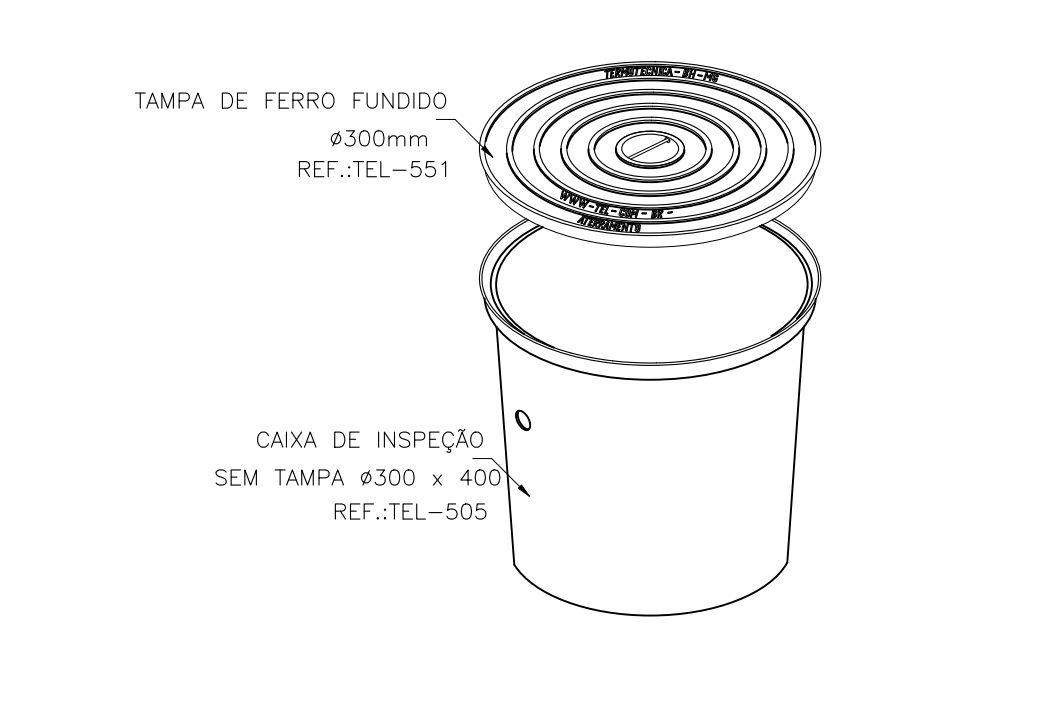
DETALHE 06 - VALA DE ATERRAMENTO SEM ESCALA



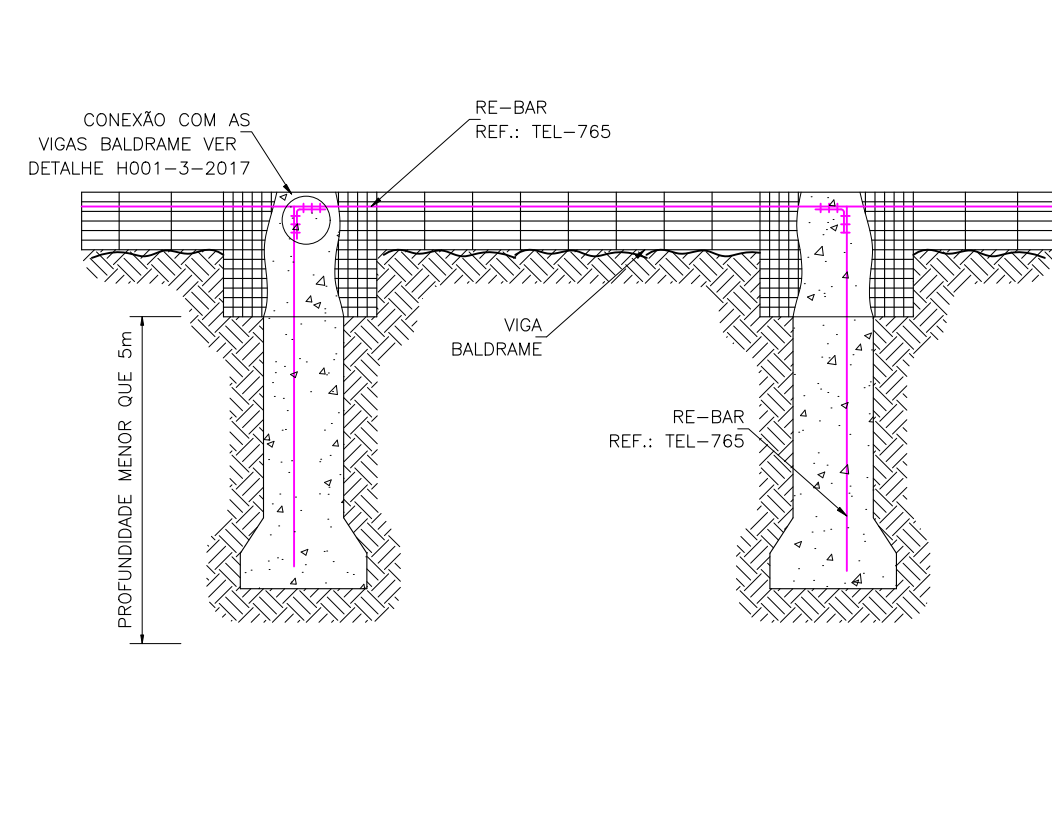
DETALHE 07 - SOLDA EXOTÉRMICA EM "T" SEM ESCALA



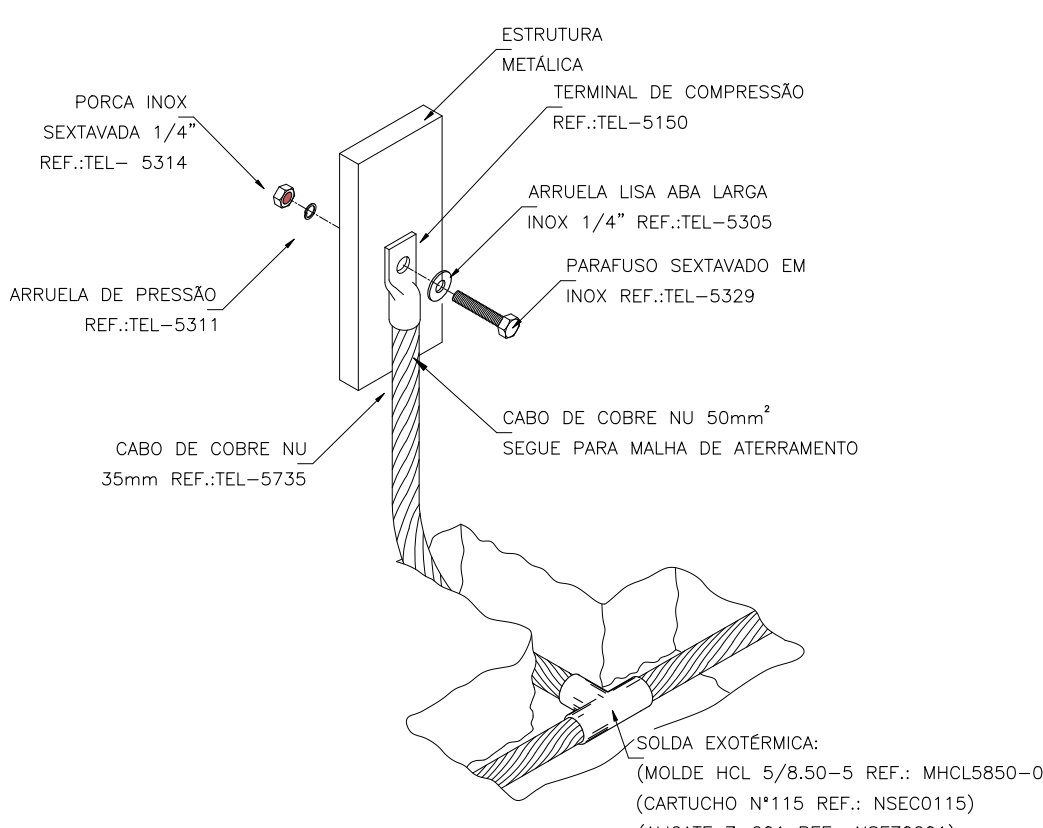
DETALHE 08 - CAIXA DE INSPEÇÃO DO TIPO SOLO SEM ESCALA



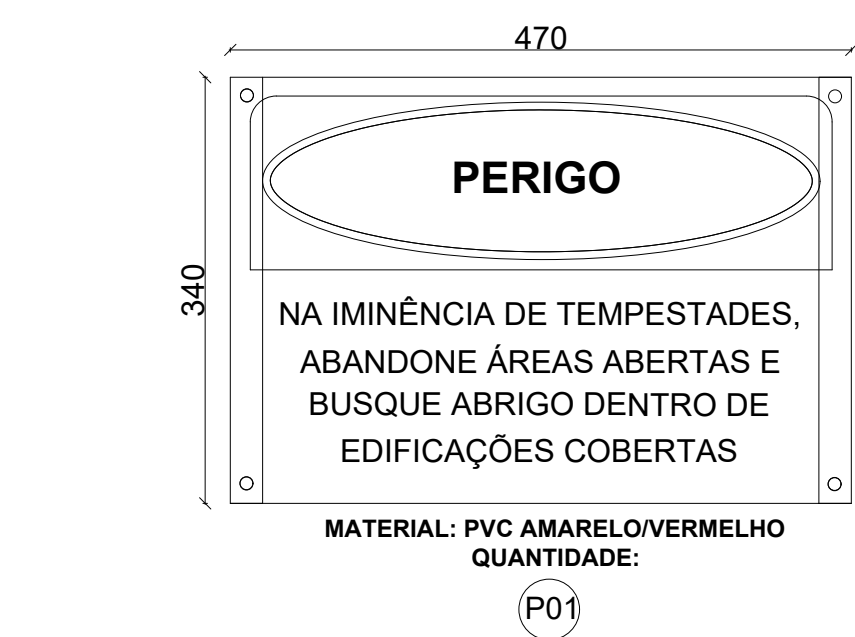
DETALHE 09 - UTILIZAÇÃO DAS RE-BARS HORIZONTAIS NA FUNDAÇÃO SEM ESCALA



DETALHE 10 - EQUIPOTENCIALIZAÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS SEM ESCALA



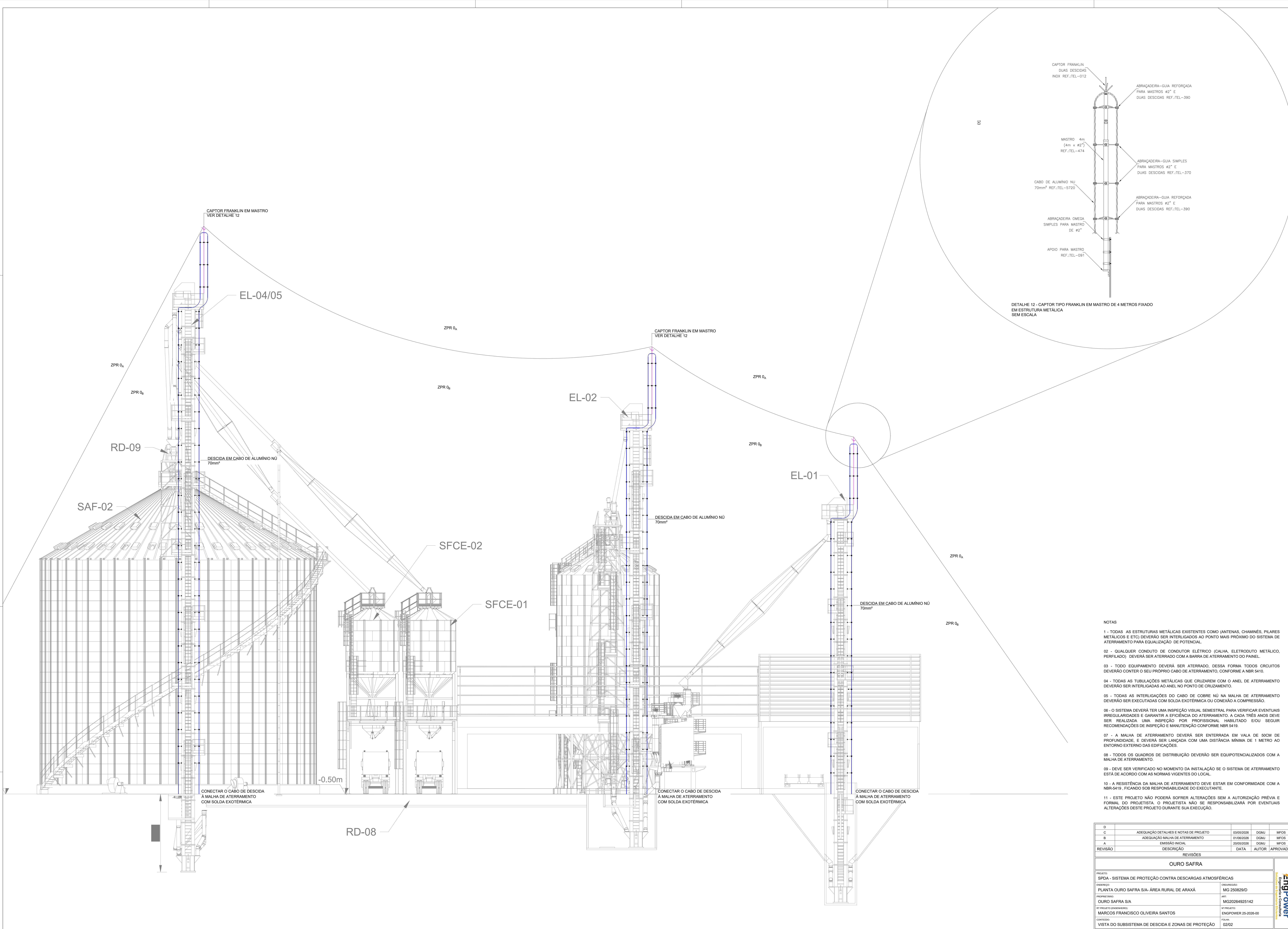
DETALHE 11 - PLACA DE ADVERTÊNCIA SEM ESCALA



NOTAS

- 1 - TODAS AS ESTRUTURAS METÁLICAS EXISTENTES COMO (ANTENAS, CHAMINÉS, PILARES METÁLICOS E ETC) DEVERÃO SER INTERLIGADOS AO PONTO MAIS PRÓXIMO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO PARA EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAL.
- 02 - QUALQUER CONDUITO DE CONDUTOR ELÉTRICO (CALHA, ELETRODUTO METÁLICO, PERFILADO) DEVERÁ SER ATERRADO COM A BARRA DE ATERRAMENTO DO PAINEL.
- 03 - TODO EQUIPAMENTO DEVERÁ SER ATERRADO, DESSA FORMA TODOS CIRCUITOS DEVERÃO CONTER O SEU PRÓPRIO CABO DE ATERRAMENTO, CONFORME A NBR 5410.
- 04 - TODAS AS TUBULAÇÕES METÁLICAS QUE CRUZAREM COM O ANEL DE ATERRAMENTO DEVERÃO SER INTERLIGADAS AO ANEL NO PONTO DE CRUZAMENTO.
- 05 - TODAS AS INTERLIGAÇÕES DO CABO DE COBRE NÚ NA MALHA DE ATERRAMENTO DEVERÃO SER EXECUTADAS COM SOLDA EXOTÉRMICA OU CONEXÃO A COMPRESSÃO.
- 06 - O SISTEMA DEVERÁ TER UMA INSPEÇÃO VISUAL SEMESTRAL PARA VERIFICAR EVENTUAIS IRREGULARIDADES E GARANTIR A EFICIÊNCIA DO ATERRAMENTO. A CADA TRÊS ANOS DEVE SER REALIZADA UMA INSPEÇÃO POR PROFISSIONAL HABILITADO E/OU SEGUIR RECOMENDAÇÕES DE INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO CONFORME NBR 5419.
- 07 - A MALHA DE ATERRAMENTO DEVERÁ SER ENTERRADA EM VALA DE 50CM DE PROFUNDIDADE, E DEVERÁ SER LANÇADA COM UMA DISTÂNCIA MÍNIMA DE 1 METRO AO ENTORNO EXTERNO DAS EDIFICAÇÕES.
- 08 - TODOS OS QUADROS DE DISTRIBUIÇÃO DEVERÃO SER EQUIPOTENCIALIZADOS COM A MALHA DE ATERRAMENTO.
- 09 - DEVE SER VERIFICADO NO MOMENTO DA INSTALAÇÃO SE O SISTEMA DE ATERRAMENTO ESTÁ DE ACORDO COM AS NORMAS VIGENTES DO LOCAL.
- 10 - A RESISTÊNCIA DA MALHA DE ATERRAMENTO DEVE ESTAR EM CONFORMIDADE COM A NBR-5419, FICANDO SOB RESPONSABILIDADE DO EXECUTANTE.
- 11 - ESTE PROJETO NÃO PODERÁ SOFRER ALTERAÇÕES SEM A AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E FORMAL DO PROJETISTA. O PROJETISTA NÃO SE RESPONSABILIZARÁ POR EVENTUAIS ALTERAÇÕES DESTES PROJETO DURANTE SUA EXECUÇÃO.
- 12 - DEVERÃO SER CONSIDERADOS DPS CLASSE II NOS CIRCUITOS DA BALANÇA, A FIM DE EVITAR DANOS EM COMPONENTES ELETRÔNICOS SENSÍVEIS A PICOS E VARIAÇÕES DE TENSÃO.

D	C	ADEQUAÇÃO DETALHES E NOTAS DE PROJETO	03/05/2028	DMJ	MFOS
B		ADEQUAÇÃO MALHA DE ATERRAMENTO	01/05/2028	DMJ	MFOS
A		EMIÇÃO INICIAL	23/05/2028	DMJ	MFOS
REVISÃO		DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	APROVADO
REVISÕES					
OURO SAFRA					
PROJETO: SPDA - SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS					
ENCOMENDADO: PLANTA OURO SAFRA S/A- ÁREA RURAL DE ARAXÁ			DESENVOLVIDO: MG 250829/D		
PROJETO: OURO SAFRA S/A			Nº PROJETO: ENGPOWER 25-2028-00		
PROJETO: MARCOS FRANCISCO OLIVEIRA SANTOS			DATA: 01/02		
CONTÉUDO: PLANTA BAIXA - SISTEMA DE CAPTAÇÃO E ATERRAMENTO					



NOTAS

1 - TODAS AS ESTRUTURAS METÁLICAS EXISTENTES COMO (ANTENAS, CHAMINÉS, PILARES METÁLICOS E ETC) DEVERÃO SER INTERLIGADOS AO PONTO MAIS PRÓXIMO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO PARA EQUALIZAÇÃO DE POTENCIAL.

02 - QUALQUER CONDUTO DE CONDUTOR ELÉTRICO (CALHA, ELETRODUTO METÁLICO, PERFILADO) DEVERÁ SER ATERROADO COM A BARRA DE ATERRAMENTO DO PAINEL.

03 - TODO EQUIPAMENTO DEVERÁ SER ATERROADO, DESSA FORMA TODOS OS CIRCUITOS DEVERÃO CONTER O SEU PRÓPRIO CABO DE ATERRAMENTO, CONFORME A NBR 5419.

04 - TODAS AS TUBULAÇÕES METÁLICAS QUE CRUZAREM COM O ANEL DE ATERRAMENTO DEVERÃO SER INTERLIGADAS AO ANEL NO PONTO DE CRUZAMENTO.

05 - TODAS AS INTERLIGAÇÕES DO CABO DE COBRE NÚ NA MALHA DE ATERRAMENTO DEVERÃO SER EXECUTADAS COM SOLDA EXOTÉRMICA OU CONEXÃO A COMPRESSÃO.

06 - O SISTEMA DEVERÁ TER UMA INSPEÇÃO VISUAL SEMESTRAL PARA VERIFICAR EVENTUAIS IRREGULARIDADES E GARANTIR A EFICIÊNCIA DO ATERRAMENTO. A CADA TRÊS ANOS DEVE SER REALIZADA UMA INSPEÇÃO POR PROFISSIONAL HABILITADO E/OU SEGUIR RECOMENDAÇÕES DE INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO CONFORME NBR 5419.

07 - A MALHA DE ATERRAMENTO DEVERÁ SER ENTERRADA EM VALA DE 50CM DE PROFUNDIDADE, E DEVERÁ SER LANÇADA COM UMA DISTÂNCIA MÍNIMA DE 1 METRO AO ENTORNO EXTERNO DAS EDIFICAÇÕES.

08 - TODOS OS QUADROS DE DISTRIBUIÇÃO DEVERÃO SER EQUIPOTENCIALIZADOS COM A MALHA DE ATERRAMENTO.

09 - DEVE SER VERIFICADO NO MOMENTO DA INSTALAÇÃO SE O SISTEMA DE ATERRAMENTO ESTÁ DE ACORDO COM AS NORMAS VIGENTES DO LOCAL.

10 - A RESISTÊNCIA DA MALHA DE ATERRAMENTO DEVE ESTAR EM CONFORMIDADE COM A NBR 5419, FICANDO SOB RESPONSABILIDADE DO EXECUTANTE.

11 - ESTE PROJETO NÃO PODERÁ SOFRER ALTERAÇÕES SEM A AUTORIZAÇÃO PRÉVIA E FORMAL DO PROJETISTA. O PROJETISTA NÃO SE RESPONSABILIZARÁ POR EVENTUAIS ALTERAÇÕES DESTES PROJETO DURANTE SUA EXECUÇÃO.

REVISÕES				
REVISÃO	DESCRIÇÃO	DATA	AUTOR	APROVADO
D	ADEQUAÇÃO DE DETALHES E NOTAS DE PROJETO	03/05/2028	DGMJ	MFOS
C	ADEQUAÇÃO MALHA DE ATERRAMENTO	01/05/2028	DGMJ	MFOS
B	EMISSÃO INICIAL	23/05/2026	DGMJ	MFOS
A				
PROJETO: SPDA - SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS				
ENGENHEIRO: PLANTA OURO SAFRA S/A- ÁREA RURAL DE ARAXÁ		DESENHADOR: MG 250829/D		
PROPRIETÁRIO: OURO SAFRA S/A		Nº PROJETO: ENGPOWER 25-2028-00		
Nº PROJETO/ENGENHEIRO: MARCOS FRANCISCO OLIVEIRA SANTOS		FOLHA: 02/02		
CONTEÚDO: VISTA DO SUBSISTEMA DE DESCIDA E ZONAS DE PROTEÇÃO				