

SEGURANÇA INTRÍNSECA DE COMPONENTES ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS EM ATMOSFERAS EXPLOSIVAS: DO PROJETO AO CICLO DE VIDA DA INSTALAÇÃO

INTRINSIC SAFETY OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC COMPONENTS IN EXPLOSIVE ATMOSPHERES: FROM DESIGN TO THE INSTALLATION LIFECYCLE

Guilherme da Silva Rodrigues¹

Guilherme Rodrigues de Freitas²

Jeferson Carlos de Almeida Rodrigues³

Jorge Augusto Procopio de Oliveira⁴

Mayra Midyan Brito do Nascimento Pinto⁵

Vinicius Epifanio de Mello⁶

Resumo: Em atmosferas potencialmente explosivas — presentes em refinarias, plataformas de petróleo e gás, indústrias químicas, farmacêuticas e unidades de processamento de grãos — a energia elétrica disponibilizada por instrumentos de campo pode constituir fonte de ignição caso não seja adequadamente limitada. A Segurança Intrínseca (Ex i) é a técnica de proteção que restringe a energia elétrica e térmica de um circuito a níveis inferiores à energia mínima de ignição da atmosfera, tornando-o incapaz de produzir faísca ou aquecimento suficientes para provocar uma explosão, mesmo sob condição de falha. Este trabalho apresenta uma descrição técnica abrangente da segurança intrínseca

-
- 1 Cursando engenharia elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes
 - 2 Cursando engenharia elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes
 - 3 Cursando engenharia elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes
 - 4 Cursando engenharia elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes
 - 5 Cursando engenharia elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes
 - 6 Cursando engenharia elétrica pela Universidade de Mogi das Cruzes

ao longo de todo o ciclo de vida da instalação: classificação de áreas para gases e poeiras, grupos e classes de temperatura de equipamentos, níveis de proteção do equipamento (EPL), parâmetros de entidade, projeto e validação de sistemas intrinsecamente seguros, barreiras zener e isoladores galvânicos, regras de projeto elétrico e cabeamento de campo, redes de campo intrinsecamente seguras (conceitos FISCO e Power-i) e, por fim, os requisitos normativos de inspeção periódica, manutenção preventiva e reparo de equipamentos certificados. A sistematização apresentada baseia-se na série ABNT NBR IEC 60079 e nas correspondentes normas internacionais IEC, cobrindo desde a concepção do circuito até sua manutenção em campo.

Palavras-chave: segurança intrínseca; atmosferas explosivas; áreas classificadas; barreira zener; sistemas intrinsecamente seguros; inspeção e manutenção Ex; IEC 60079.

Abstract: In potentially explosive atmospheres — found in refineries, oil and gas platforms, chemical and pharmaceutical plants and grain-processing facilities — the electrical energy made available by field instruments may constitute an ignition source if not adequately limited. Intrinsic Safety (Ex i) is the protection technique that restricts the electrical and thermal energy of a circuit to levels below the minimum ignition energy of the atmosphere, rendering it incapable of producing a spark or heating sufficient to cause an explosion, even under fault conditions. This work presents a comprehensive technical description of intrinsic safety across the whole installation life cycle: area classification for gases and dusts, equipment groups and temperature classes, Equipment Protection Levels (EPL), entity parameters, design and validation of intrinsically safe systems, zener barriers and galvanic isolators, field wiring design rules, intrinsically safe fieldbus networks (FISCO and Power-i concepts) and, finally, the normative requirements for periodic inspection, preventive maintenance and repair of certified equipment. The systematization presented is based on the ABNT NBR IEC 60079 series and the corresponding international IEC standards, covering the process from circuit conception through to its field maintenance.

Keywords: intrinsic safety; explosive atmospheres; hazardous areas; zener barrier; intrinsically safe systems; Ex inspection and maintenance; IEC 60079

INTRODUÇÃO

As indústrias de processo — petróleo e gás, química, petroquímica, farmacêutica e de processamento de grãos, entre outras — convivem rotineiramente com a presença de gases, vapores, névoas ou poeiras combustíveis capazes de formar, junto ao ar atmosférico, misturas passíveis de ignição. Nesses ambientes, denominados atmosferas explosivas, qualquer fonte de energia elétrica ou térmica acima de um limiar característico da substância presente pode desencadear uma explosão, com consequências potencialmente catastróficas para pessoas, instalações e meio ambiente.

A crescente automação e instrumentação dessas plantas — sensores de temperatura, pressão, nível e vazão, transmissores, atuadores e redes de campo — multiplicou o número de circuitos elétricos e eletrônicos de baixa potência instalados dentro das áreas classificadas. Para viabilizar essa instrumentação sem comprometer a segurança do processo, a engenharia elétrica dispõe de diferentes técnicas de proteção “Ex”, das quais a Segurança Intrínseca (Ex i) se destaca por atuar diretamente na causa do risco: a limitação da energia disponível no circuito, e não apenas no seu confinamento.

Historicamente, a normalização técnica sobre atmosferas explosivas no Brasil completa, em 2025, vinte anos de evolução contínua desde a publicação da primeira Norma Técnica Brasileira adotada da série ABNT NBR IEC 60079, o que reflete tanto o amadurecimento da indústria nacional de petróleo, gás e química quanto a crescente harmonização das práticas brasileiras com os padrões internacionais da IEC (DE OLIVEIRA et al., 2024). Esse processo de atualização normativa é constante: diversas partes da série — incluindo as que tratam de inspeção, manutenção e reparo de equipamentos — foram revisadas nos últimos anos, o que reforça a necessidade de o profissional de engenharia manter-se permanentemente atualizado quanto à edição vigente de cada norma aplicável

ao seu projeto.

A segurança de uma instalação intrinsecamente segura, contudo, não se esgota na etapa de projeto. A série de normas ABNT NBR IEC 60079 trata o tema sob a ótica do ciclo total de vida da instalação “Ex” — abrangendo a classificação de áreas, a certificação de equipamentos, o projeto elétrico e o cabeamento de campo, a montagem, a inspeção inicial e periódica, a manutenção preventiva e, quando necessário, o reparo e a recertificação de equipamentos danificados. Negligenciar qualquer uma dessas etapas pode comprometer a proteção originalmente projetada, ainda que o circuito tenha sido corretamente especificado no início do projeto.

DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O presente estudo abrange a descrição técnica dos princípios de segurança intrínseca aplicados a componentes elétricos e eletrônicos de baixa potência — instrumentos de campo, barreiras zener e isoladores galvânicos — operando em atmosferas explosivas de gases e vapores (Grupo II) e, de forma complementar, de poeiras combustíveis (Grupo III), conforme os requisitos da série de normas ABNT NBR IEC 60079. O estudo estende-se ao longo do ciclo de vida da instalação, incluindo projeto elétrico e cabeamento (ABNT NBR IEC 60079-14), redes de campo digitais intrinsecamente seguras (conceitos FISCO e Power-i), inspeção e manutenção periódica (ABNT NBR IEC 60079-17) e reparo de equipamentos certificados (ABNT NBR IEC 60079-19). Não são objeto deste trabalho as demais técnicas de proteção “Ex” de contenção ou confinamento de energia (invólucro à prova de explosão, imersão em óleo, pressurização plena), tampouco a proteção de equipamentos mecânicos não elétricos (série ABNT NBR ISO 80079).

JUSTIFICATIVA

A correta especificação de circuitos intrinsecamente seguros exige domínio simultâneo de



conceitos de classificação de áreas, características elétricas dos componentes e critérios normativos de compatibilidade entre parâmetros de campo e de barreira. Falhas de especificação — por exemplo, o uso de uma barreira cujos parâmetros de saída excedam os limites admissíveis do instrumento de campo, ou a ausência de segregação adequada do cabeamento — podem anular a proteção pretendida e expor trabalhadores e instalações a risco real de explosão. Do mesmo modo, uma instalação corretamente projetada pode perder sua condição de segurança ao longo do tempo caso não seja submetida a inspeções periódicas e manutenção preventiva, ou caso um equipamento danificado seja reparado sem observância dos requisitos normativos de recertificação. Compreender tecnicamente esses critérios, do projeto ao ciclo de vida completo da instalação, é, portanto, requisito indispensável para engenheiros que atuam em projeto, instalação, operação ou manutenção elétrica em áreas classificadas.

OBJETIVOS DO ESTUDO

Objetivo Geral

Descrever tecnicamente os princípios de segurança intrínseca aplicados a componentes elétricos e eletrônicos que operam em atmosferas explosivas, sistematizando os critérios normativos de projeto, instalação, operação, inspeção, manutenção e reparo estabelecidos pela série ABNT NBR IEC 60079.

Objetivos Específicos

- Descrever os fundamentos da classificação de áreas classificadas para gases, vapores e poeiras combustíveis;
- Caracterizar os grupos de equipamentos, subdivisões, classes de temperatura e níveis de proteção do equipamento (EPL) aplicáveis à Segurança Intrínseca;



- Sistematizar os parâmetros de entidade e os critérios de compatibilidade entre campo e barreira, incluindo a avaliação de sistemas conforme a ABNT NBR IEC 60079-25;
- Detalhar o princípio de funcionamento das barreiras zener e dos isoladores galvânicos;
- Descrever as regras de projeto elétrico, cabeamento e montagem de circuitos Ex i em campo, conforme a ABNT NBR IEC 60079-14;
- Apresentar os conceitos FISCO e Power-i para redes de campo intrinsecamente seguras;
- Sistematizar os requisitos de inspeção periódica e manutenção preventiva (ABNT NBR IEC 60079-17) e de reparo e recuperação de equipamentos certificados (ABNT NBR IEC 60079-19).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

ATMOSFERAS EXPLOSIVAS E ENERGIA MÍNIMA DE IGNIÇÃO

Define-se atmosfera explosiva como a mistura de ar, em condições atmosféricas, com substâncias inflamáveis na forma de gás, vapor, névoa ou poeira, em quantidade tal que uma fonte de ignição a inflame, propagando a combustão a toda a mistura não queimada (ABNT NBR IEC 60079-10-1, 2019). A ignição de tal mistura depende da energia mínima de ignição (Minimum Ignition Energy — MIE), definida como a menor quantidade de energia capaz de inflamar a mistura mais facilmente ignitável de uma dada substância, tipicamente da ordem de dezenas a centenas de microjoules para gases do Grupo II (DE OLIVEIRA et al., 2024).

Fontes potenciais de ignição em circuitos elétricos incluem: centelhas de comutação (abertura/ fechamento de contatos), descargas capacitivas ou indutivas armazenadas em componentes reativos, arcos elétricos por curto-circuito e superfícies aquecidas por efeito Joule. A Segurança Intrínseca atua restringindo simultaneamente a energia elétrica (tensão e corrente) e a energia armazenada em elementos reativos (indutores e capacitores) do circuito de campo a níveis inferiores à MIE da atmosfera presente, mesmo diante de falhas no equipamento (ABNT NBR IEC 60079-11, 2013).

A MIE varia significativamente entre substâncias e é um dos critérios que determinam o



subgrupo de gás (item 2.4) ao qual uma atmosfera pertence. A Tabela 1 apresenta valores típicos de referência para gases comumente encontrados na indústria, exemplificando por que substâncias como o hidrogênio exigem os níveis de proteção mais restritivos.

Substância	Subgrupo típico	MIE aproximada
Propano / Butano	IIA	≈ 0,25 mJ
Etileno	IIB	≈ 0,09 mJ
Hidrogênio	IIC	≈ 0,02 mJ
Acetileno	IIC	≈ 0,02 mJ

Tabela 1 — Valores típicos de energia mínima de ignição (MIE) por substância. Fonte: adaptado de DE OLIVEIRA et al. (2024).

CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA GASES E VAPORES

A classificação de áreas é o processo de análise e categorização de um ambiente em que atmosferas explosivas podem ocorrer, de modo a orientar a seleção e instalação adequadas de equipamentos elétricos. Para atmosferas de gases, vapores e névoas (Grupo II), a ABNT NBR IEC 60079-10-1 (2019) define três zonas, segundo a probabilidade e a persistência da atmosfera explosiva:

Zona	Definição	Exemplo típico
Zona 0	Atmosfera explosiva presente continuamente, ou por longos períodos, ou frequentemente.	Interior de tanques de armazenamento de líquidos inflamáveis.
Zona 1	Atmosfera explosiva com probabilidade de ocorrer em operação normal.	Área ao redor de pontos de dreno e amostragem.
Zona 2	Atmosfera explosiva não esperada em operação normal e, se ocorrer, apenas por curtos períodos.	Área ao redor de flanges e conexões bem vedadas.

Tabela 2 — Classificação de zonas para atmosferas de gases e vapores (Grupo II). Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-10-1 (2019).

A classificação de áreas deve considerar, entre outros fatores, a fonte de liberação da substância inflamável (contínua, primária ou secundária), a taxa de liberação, a ventilação disponível no local e a densidade relativa do gás ou vapor em relação ao ar. O resultado do estudo é normalmente representado em desenhos de classificação de áreas, que orientam diretamente a seleção dos equipamentos elétricos a serem instalados em cada zona.

CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS PARA POEIRAS COMBUSTÍVEIS

Para atmosferas de poeiras combustíveis (Grupo III), a ABNT NBR IEC 60079-10-2 (2016) estabelece procedimento de classificação análogo ao dos gases, considerando tanto nuvens de poeira em suspensão quanto camadas de poeira depositadas sobre superfícies — estas últimas capazes de gerar nuvens explosivas por ressuspensão. As zonas correspondentes são numeradas na faixa 20 a 22, análogas em definição às Zonas 0 a 2 dos gases, conforme a Tabela 3.

Zona	Definição
Zona 20	Nuvem de poeira combustível no ar presente continuamente, por longos períodos ou frequentemente.
Zona 21	Nuvem de poeira combustível com probabilidade de ocorrer em operação normal.
Zona 22	Nuvem de poeira combustível não esperada em operação normal e, se ocorrer, apenas por curto período.

Tabela 3 — Classificação de zonas para atmosferas de poeiras combustíveis (Grupo III). Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-10-2 (2016).

De forma análoga aos subgrupos de gases, os equipamentos para poeiras combustíveis são classificados nos subgrupos IIIA (fibras combustíveis), IIIB (poeiras não condutivas) e IIIC (poeiras condutivas), este último o mais restritivo, por representar o maior risco de formação de trilhas condutoras e falhas de isolamento (ABNT NBR IEC 60079-0, 2020).

GRUPOS DE EQUIPAMENTOS E SUBDIVISÕES

A ABNT NBR IEC 60079-0 (2020) classifica os equipamentos elétricos destinados a atmosferas explosivas em três grupos: Grupo I, para minas subterrâneas sujeitas a grisú; Grupo II, para atmosferas de gases e vapores em superfície; e Grupo III, para atmosferas de poeiras combustíveis. O Grupo II subdivide-se ainda em IIA, IIB e IIC, em ordem crescente de facilidade de ignição da mistura (menor MIE e menor Máxima Folga Experimental de Segurança — MESG), sendo o hidrogênio e o acetileno representativos do subgrupo IIC, o mais restritivo. Um equipamento certificado para IIC pode ser aplicado em atmosferas IIB ou IIA, mas não o inverso — o mesmo princípio de compatibilidade descendente aplica-se aos subgrupos de poeira (IIIC cobre IIIB e IIIA).

CLASSES DE TEMPERATURA

A classe de temperatura relaciona a máxima temperatura superficial que um equipamento pode atingir em operação (incluindo condições de falha) com a temperatura de autoignição da substância inflamável presente. A ABNT NBR IEC 60079-0 (2020) estabelece seis classes, de T1 (450 °C) a T6 (85 °C), conforme a Tabela 4.

Classe	Temperatura superficial máxima
T1	450 °C
T2	300 °C
T3	200 °C
T4	135 °C
T5	100 °C
T6	85 °C

Tabela 4 — Classes de temperatura de equipamentos elétricos. Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-0 (2020).



Para equipamentos de poeiras combustíveis, em vez de uma classe padronizada, a norma exige a declaração direta da temperatura máxima de superfície do equipamento (T_{max}), a qual deve ser comparada tanto à temperatura de ignição da nuvem de poeira quanto à temperatura de ignição de uma camada de poeira de referência, aplicando-se a regra dos dois terços a esta última (ABNT NBR IEC 60079-0, 2020).

NÍVEIS DE PROTEÇÃO DO EQUIPAMENTO (EPL)

O Nível de Proteção do Equipamento (Equipment Protection Level — EPL) expressa o nível de risco de o equipamento se tornar uma fonte de ignição, correlacionando-se diretamente com a zona em que pode ser instalado. A Tabela 5 sintetiza os EPLs definidos pela ABNT NBR IEC 60079-0 (2020) para gases (“G”) e poeiras (“D”).

EPL	Significado	Zona de aplicação
Ga	Risco muito elevado de proteção; não deve se tornar fonte de ignição em operação normal, falha esperada ou falha rara.	Zona 0, 1 e 2
Gb	Risco elevado de proteção; não deve se tornar fonte de ignição em operação normal ou falha esperada.	Zona 1 e 2
Gc	Risco reforçado; não deve se tornar fonte de ignição em operação normal.	Zona 2
Da / Db / Dc	Definições análogas às de Ga/Gb/Gc, aplicadas a atmosferas de poeiras combustíveis.	Zona 20/21 · 21/22 · 22

Tabela 5 — Níveis de Proteção do Equipamento (EPL). Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-0 (2020).

O EPL relaciona diretamente o nível de proteção “ia”, “ib” e “ic” da técnica de segurança intrínseca (item 2.8.2) aos EPLs Ga, Gb e Gc, respectivamente — um equipamento Ex ia é certificado com EPL Ga e pode, portanto, ser instalado em Zona 0.

TÉCNICAS DE PROTEÇÃO “EX” — VISÃO GERAL

A série ABNT NBR IEC 60079 prevê diferentes técnicas de proteção contra explosão, cada uma atuando sobre uma das três condições necessárias à ignição (combustível, comburente e fonte de energia), conforme sintetizado na Tabela 6.

Sigla	Técnica	Princípio
Ex d	Invólucro à prova de explosão	Contém a explosão interna e impede sua propagação ao exterior.
Ex e	Segurança aumentada	Medidas construtivas que reduzem a probabilidade de arcos, centelhas e aquecimento excessivo.
Ex i	Segurança intrínseca	Limita a energia do circuito abaixo da energia mínima de ignição.
Ex p	Pressurização	Impede a entrada da atmosfera explosiva por sobrepressão interna com gás de proteção.
Ex m	Encapsulamento	Envolve partes que podem gerar centelha ou calor em composto isolante.
Ex o	Imersão em óleo	Imerge partes vivas em óleo, impedindo contato com a atmosfera explosiva.
Ex q	Enchimento com pó	Preenche o invólucro com material particulado que impede a propagação de uma explosão interna.
Ex n	Não acendível	Aplicável à Zona 2; restringe fontes de ignição em operação normal.

Tabela 6 — Principais técnicas de proteção “Ex”. Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-0 (2020) e DE OLIVEIRA et al. (2024).

Diferentemente das técnicas de contenção (Ex d, Ex o, Ex q), que pressupõem a possibilidade de ignição interna e atuam para impedir sua propagação ao ambiente externo, a segurança intrínseca é uma técnica preventiva: o circuito é projetado para jamais liberar energia suficiente para causar a ignição, o que permite, inclusive, intervenções de manutenção e calibração com o circuito energizado, sem necessidade de permissão de trabalho a quente.

SEGURANÇA INTRÍNSECA (Ex i)

Princípio de funcionamento

A ABNT NBR IEC 60079-11 (2013, p. 1) define segurança intrínseca como o tipo de proteção baseado na restrição da energia elétrica dentro de equipamentos e de fiação de interconexão expostos à atmosfera potencialmente explosiva, a um nível abaixo do qual pode ocorrer ignição por centelhamento ou por efeitos térmicos. Essa norma especifica os requisitos construtivos e de ensaio para equipamentos com proteção por segurança intrínseca nos níveis “ia”, “ib” e “ic”, incluindo os ensaios de centelhamento em condições controladas, os critérios de temperatura de superfície e os requisitos de isolamento e afastamento entre circuitos de diferentes tensões.

Níveis de proteção “ia”, “ib” e “ic”

A norma define três níveis de proteção, associados à quantidade de falhas independentes consideradas na análise de segurança do circuito:

- Nível “ia”: o circuito permanece seguro mesmo com a aplicação de duas falhas independentes; aplicável às Zonas 0, 1 e 2 — nível mais restritivo, adequado a atmosferas onde a mistura explosiva está presente continuamente.
- Nível “ib”: o circuito permanece seguro com uma falha independente; aplicável às Zonas 1 e 2.
- Nível “ic”: o circuito permanece seguro em operação normal, sem falhas; aplicável somente à Zona 2.

Parâmetros de entidade

O critério normativo de compatibilidade entre um instrumento de campo e a barreira que o

alimenta é conhecido como conceito de entidade (“entity concept”). Cada instrumento intrinsecamente seguro possui parâmetros máximos de entrada, e cada barreira possui parâmetros máximos de saída, conforme a Tabela 7.

Parâmetro de campo (entrada)	Parâmetro de barreira (saída)	Significado
Ui — tensão máxima de entrada	Uo — tensão máxima de saída	Tensão de circuito aberto que o equipamento suporta / que a barreira fornece
Ii — corrente máxima de entrada	Io — corrente máxima de saída	Corrente de curto-circuito admissível / disponibilizada pela barreira
Pi — potência máxima de entrada	Po — potência máxima de saída	Potência máxima dissipável no instrumento / fornecida pela barreira
Ci — capacitância interna	Co — capacitância externa admissível	Energia reativa capacitiva do instrumento / limite permitido pela barreira
Li — indutância interna	Lo — indutância externa admissível	Energia reativa indutiva do instrumento / limite permitido pela barreira

Tabela 7 — Parâmetros de entidade do conceito de compatibilidade campo–barreira. Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-11 (2013) e ABNT NBR IEC 60079-25 (2021).

A instalação é considerada intrinsecamente segura quando são simultaneamente satisfeitas as condições da Equação 1, que relacionam os parâmetros de saída do sistema associado (barreira) aos parâmetros de entrada do equipamento de campo, somados aos parâmetros reativos do próprio cabo de interligação (Ccabo e Lcabo):

$$U_o \leq U_i \quad I_o \leq I_i \quad P_o \leq P_i \quad C_o \geq (C_i + C_{\text{cabo}}) \quad L_o \geq (L_i + L_{\text{cabo}})$$

Equação 1 — Critério de compatibilidade de entidade. Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-25 (2021).

Além da verificação nominal, a norma exige fatores de segurança na certificação do fabricante: tipicamente, fator 1,5 sobre tensão e corrente e fator 2,0 sobre a potência dissipável, de modo a cobrir tolerâncias de fabricação e efeitos de temperatura (ABNT NBR IEC 60079-11, 2013).

Conceito de falha simples e dupla falha

A análise de segurança de um circuito “ia” ou “ib” considera a aplicação sistemática de falhas contáveis (curto-circuito ou circuito aberto em componentes, ruptura de trilhas de isolamento, etc.), avaliando se, mesmo após uma ou duas falhas independentes, a energia liberada permanece abaixo dos limites de ignição com a margem de segurança normativa. Componentes considerados “infalíveis” pela norma — como resistores e diodos que atendam a critérios construtivos específicos — podem ser excluídos da contagem de falhas, o que reduz a complexidade da análise (DE OLIVEIRA et al., 2024).

SISTEMAS ELÉTRICOS INTRINSECAMENTE SEGUROS

Enquanto a ABNT NBR IEC 60079-11 (2013) normatiza a construção e o ensaio de equipamentos individuais, a ABNT NBR IEC 60079-25 (2021) trata especificamente do projeto, do cálculo e da validação de malhas e sistemas elétricos intrinsecamente seguros, ou seja, do conjunto formado por um ou mais instrumentos de campo, o cabo de interligação e a barreira (ou fonte associada) que os alimenta. Essa norma distingue sistemas de parâmetros concentrados — em que toda a capacitância e indutância do circuito podem ser tratadas como elementos discretos localizados nas extremidades — de sistemas de parâmetros distribuídos, aplicáveis a cabos longos, em que a reatância se distribui ao longo do comprimento e pode exigir métodos de cálculo mais elaborados (ABNT NBR IEC 60079-25, 2021).

Quando múltiplos equipamentos de campo são interligados a uma mesma barreira — como

em redes de campo digitais em topologia multiponto —, a avaliação de compatibilidade não pode ser feita isoladamente por item, mas sim para o sistema como um todo, somando-se as capacitâncias e indutâncias de todos os dispositivos e do próprio cabeamento. A norma também trata da combinação de fontes lineares (como uma barreira zener, cuja curva tensão-corrente é aproximadamente linear) e fontes não lineares (como uma fonte chaveada limitada por circuito eletrônico ativo), estabelecendo métodos específicos de avaliação para cada caso (ABNT NBR IEC 60079-25, 2021).

A validação de um sistema intrinsecamente seguro pode ser realizada por três abordagens complementares previstas na ABNT NBR IEC 60079-25 (2021): (i) verificação por conceito de entidade simplificado, aplicável a malhas ponto a ponto com um único dispositivo de campo, conforme detalhado no item 2.8.3; (ii) verificação por sistema certificado, na qual o fabricante já certifica a combinação específica de barreira, cabo (com limites de comprimento e especificação) e modelo de dispositivo de campo, dispensando novos cálculos por parte do projetista; e (iii) verificação por cálculo de sistema, empregada em configurações não cobertas por certificação de sistema, na qual o projetista realiza o somatório de parâmetros reativos e a análise de compatibilidade descrita nos itens 3.4 e 3.5 deste trabalho. A escolha da abordagem mais adequada depende da disponibilidade de sistemas certificados pelo fabricante da barreira e da complexidade da malha em análise.

BARREIRAS DE SEGURANÇA INTRÍNSECA

Barreira zener

A barreira zener é um dispositivo passivo instalado na fronteira entre a área segura e a área classificada, composto tipicamente por diodos zener em derivação (shunt), resistores limitadores de corrente e fusíveis, encapsulados em resina para garantir isolamento galvânica mecânica. Em operação normal, os diodos zener permanecem polarizados abaixo da tensão de ruptura e não interferem no sinal; em condição de falha na área segura (por exemplo, contato acidental com uma fonte de tensão superior à nominal), os diodos zener entram em condução, grampeando a tensão em um valor seguro

e desviando o excesso de corrente, que funde o fusível e interrompe permanentemente o circuito (CARLETTI et al., 2021).

Por não promover isolamento galvânica entre os lados seguro e classificado, a barreira zener exige aterramento de referência de baixíssima impedância, dedicado e redundante, conforme especificado pelo fabricante e pela ABNT NBR IEC 60079-14 (2021).

Isolador galvânico (barreira ativa)

O isolador galvânico é um dispositivo ativo que também limita a energia transferida ao circuito de campo, porém por meio de acoplamento óptico, indutivo ou capacitivo, sem conexão elétrica direta entre a área segura e a área classificada. Essa característica dispensa o aterramento de referência exigido pela barreira zener e reduz a suscetibilidade a ruído e a laços de terra, sendo atualmente a solução predominante em novos projetos de instrumentação (DE OLIVEIRA et al., 2024).

PROJETO ELÉTRICO E CABEAMENTO DE CAMPO

A ABNT NBR IEC 60079-14 (2021) estabelece as regras de projeto elétrico, seleção, cabeamento e montagem de instalações elétricas em áreas classificadas, incluindo requisitos específicos para circuitos Ex i. Entre as exigências centrais para segurança intrínseca estão: a segregação física entre cabos de circuitos Ex i e cabos de circuitos convencionais (não Ex i), evitando o roteamento conjunto em eletrodutos, bandejas ou multicabos não segregados; a separação mínima entre bornes de circuitos intrinsecamente seguros e não intrinsecamente seguros em réguas de terminais, tipicamente por meio de barreiras físicas ou distâncias mínimas normalizadas; e a identificação inequívoca (usualmente em azul-claro) de toda a fiação, bornes e componentes pertencentes a circuitos Ex i, de modo a evitar conexões acidentais indevidas durante a instalação ou a manutenção (ABNT NBR IEC



60079-14, 2021).

A norma também especifica os critérios de aterramento de referência para barreiras zener, os limites de resistência de aterramento, e os requisitos de proteção contra surtos e descargas atmosféricas nos limites entre área segura e área classificada, aspectos que devem ser verificados tanto em projeto quanto durante a montagem física da instalação.

REDES DE CAMPO INTRINSECAMENTE SEGURAS: FISCO E POWER-i

Para redes de campo digitais — como Foundation Fieldbus H1 e Profibus PA, que alimentam múltiplos instrumentos por um único par de fios em topologia multiponto — a aplicação estrita do conceito de entidade tradicional exigiria cálculos individuais complexos para cada combinação de dispositivos. O conceito FISCO (Fieldbus Intrinsically Safe Concept), normatizado pela IEC 60079-27 (2008), simplifica esse processo ao fixar parâmetros padronizados de tensão, corrente e potência para a fonte de alimentação de rede, para o cabo (resistência, capacitância e indutância por unidade de comprimento) e para cada dispositivo de campo, permitindo montar uma rede intrinsecamente segura sem uma análise de segurança individualizada para cada nova configuração, além de facilitar a adição de dispositivos sem necessidade de reavaliação completa do sistema.

Já o conceito Power-i, tratado pela ABNT IEC/TS 60079-39 (2019), representa uma evolução mais recente, baseada na limitação dinâmica e eletronicamente controlada da duração e da energia da centelha, em vez da limitação estática por resistores e diodos zener. Ao monitorar continuamente as condições do circuito e interromper eletronicamente a energia em tempo muito curto após a detecção de uma falha, sistemas Power-i permitem disponibilizar maior potência a dispositivos de campo — como câmeras, atuadores motorizados e equipamentos de maior consumo — mantendo o mesmo nível de segurança de um circuito Ex i convencional, o que amplia significativamente as aplicações da segurança intrínseca em redes de automação industrial e IIoT (Industrial Internet of Things).

A Tabela 8 compara as características centrais dos dois conceitos, evidenciando os cenários

de aplicação mais adequados a cada um.

Característica	FISCO (IEC 60079-27)	Power-i (ABNT IEC/TS 60079-39)
Princípio de limitação	Parâmetros estáticos padronizados de tensão/corrente	Corte dinâmico eletronicamente controlado da centelha
Potência disponível ao campo	Limitada (tipicamente dezenas de mW por dispositivo)	Significativamente maior, permitindo cargas de maior consumo
Aplicação típica	Foundation Fieldbus H1, Profibus PA	Câmeras, atuadores, redes Ethernet intrinsecamente seguras (2-WISE)
Complexidade de cálculo de sistema	Simplificada, com parâmetros pré-definidos de rede	Depende de certificação específica do sistema eletrônico ativo

Tabela 8 — Comparação entre os conceitos FISCO e Power-i para redes de campo intrinsecamente seguras. Fonte: adaptado de IEC 60079-27 (2008) e ABNT IEC/TS 60079-39 (2019).

INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DE INSTALAÇÕES “EX”

A manutenção da condição de segurança de uma instalação Ex i ao longo de sua vida útil depende de um programa sistemático de inspeção e manutenção, tratado pela ABNT NBR IEC 60079-17 (2025), atualmente em sua quarta edição brasileira, destinada a usuários, proprietários e operadores de instalações em áreas classificadas. A norma define três graus de inspeção — visual, apurada e detalhada —, cada qual com escopo e periodicidade distintos:

- Inspeção visual: identifica, sem uso de equipamentos ou abertura de invólucros, defeitos visíveis a olho nu, como danos mecânicos, corrosão, sujidade excessiva ou fixações soltas;
- Inspeção apurada: inclui os itens da inspeção visual e, adicionalmente, aspectos verificáveis sem abertura de invólucros, porém com uso de escadas, ferramentas de acesso e, quando necessário, testes de continuidade de aterramento;
- Inspeção detalhada: inclui os itens anteriores e, adicionalmente, requer a abertura de invólucros, quando necessário, para verificação de conexões internas, torque de parafusos, integridade

de juntas e conformidade com o certificado de origem.

A norma apresenta, em anexo, listas de verificação específicas para cada tipo de proteção “Ex”, incluindo itens próprios de circuitos Ex i, como a verificação da integridade da segregação de cabeamento, da resistência de aterramento das barreiras zener e da ausência de conexões não autorizadas entre circuitos intrinsecamente seguros e não intrinsecamente seguros. A periodicidade das inspeções deve ser definida com base na criticidade da instalação, no histórico de falhas e nas condições ambientais do local (ABNT NBR IEC 60079-17, 2025).

REPARO, REVISÃO E RECUPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS “EX”

Quando um equipamento certificado apresenta falha ou dano, sua recolocação em serviço não pode ser feita de forma discricionária: a ABNT NBR IEC 60079-19 (2020) estabelece os critérios técnicos para os serviços de reparo, revisão, recuperação e modificação de equipamentos “Ex”, de modo a garantir que, após a intervenção, o equipamento mantenha a conformidade com os requisitos do certificado de conformidade original ou das normas técnicas aplicáveis. A norma orienta, entre outros aspectos, sobre o uso de peças de reposição originais ou equivalentes, os métodos aceitáveis de reparo para cada tipo de proteção e a documentação exigida para rastreabilidade do serviço executado.

No Brasil, desde 2009, o mercado consolidou a exigência contratual de que empresas prestadoras de serviços de reparo e recuperação de equipamentos “Ex” sejam certificadas com base nos requisitos da ABNT NBR IEC 60079-19, o que confere maior confiabilidade de que um equipamento reparado permanece efetivamente seguro para reinstalação em área classificada (DE OLIVEIRA et al., 2024). Um circuito Ex i cujo instrumento de campo tenha sido reparado sem observância desses critérios pode ter seus parâmetros de entidade original alterados, invalidando silenciosamente a compatibilidade previamente estabelecida com a barreira instalada.

MARCAÇÃO E CERTIFICAÇÃO DE EQUIPAMENTOS “EX”

Todo equipamento certificado para uso em área classificada recebe uma marcação normalizada que resume suas características de proteção, conforme os requisitos gerais da ABNT NBR IEC 60079-0 (2020). Um exemplo típico de marcação para um transmissor intrinsecamente seguro é: Ex ia IIC T4 Ga, onde “Ex” indica conformidade com a série IEC/ABNT NBR IEC 60079; “ia”, o nível de proteção; “IIC”, o subgrupo de gases; “T4”, a classe de temperatura; e “Ga”, o Nível de Proteção do Equipamento para atmosferas de gás, compatível com a Zona 0. A certificação, a marcação e a documentação técnica do equipamento constituem a base de referência para todas as etapas subsequentes do ciclo de vida da instalação: seleção em projeto, verificação em inspeções periódicas e critério de conformidade em eventuais serviços de reparo.

No plano internacional, o Sistema IECEx complementa as certificações nacionais ao estabelecer um esquema de reconhecimento mútuo entre países para a certificação de equipamentos, de instalações e, também, de competência pessoal de profissionais que atuam com atmosferas explosivas. Unidades de competência como Ex 001 (aplicação dos princípios básicos de proteção), Ex 004 (manutenção de equipamentos) e Ex 007/Ex 008 (execução de inspeções apuradas e detalhadas) formam a base curricular reconhecida internacionalmente para a qualificação de profissionais responsáveis por projetar, instalar, inspecionar, manter e reparar instalações “Ex”, incluindo circuitos intrinsecamente seguros (CARLETTI et al., 2021).

PANORAMA NORMATIVO DA SEGURANÇA INTRÍNSECA

A Tabela 9 sintetiza o conjunto de normas e especificações técnicas abordadas neste trabalho, organizadas conforme a etapa do ciclo de vida da instalação a que cada uma se aplica mais diretamente, servindo como referência rápida para a etapa seguinte de desenvolvimento do estudo.



Norma	Escopo principal	Etapas do ciclo de vida
ABNT NBR IEC 60079-0	Requisitos gerais de construção, ensaio e marcação de equipamentos “Ex”.	Certificação de equipamento
ABNT NBR IEC 60079-10-1 / 10-2	Classificação de áreas para gases (10-1) e poeiras (10-2), definição de Zonas.	Estudo de área classificada
ABNT NBR IEC 60079-11	Requisitos construtivos e de ensaio para equipamentos Ex i (ia, ib, ic).	Certificação de equipamento
ABNT NBR IEC 60079-14	Projeto elétrico, cabeamento, separação de bornes e montagem de circuitos Ex i.	Projeto e instalação
ABNT NBR IEC 60079-17	Inspeção periódica, testes e manutenção preventiva de circuitos intrínsecos.	Operação e manutenção
ABNT NBR IEC 60079-19	Crítérios para reparo, revisão e recuperação de equipamentos certificados.	Manutenção corretiva
ABNT NBR IEC 60079-25	Projeto, cálculo e validação de malhas e sistemas elétricos intrinsecamente seguros.	Projeto e validação de sistema
ABNT IEC/TS 60079-39	Sistemas Power-i com corte dinâmico de centelha eletronicamente controlada.	Projeto (redes de alta potência)
IEC 60079-27	Conceito FISCO para redes de barramento de campo (Fieldbus e Profibus-PA).	Projeto (redes digitais)
NR-10	Segurança em instalações e serviços em eletricidade, incluindo áreas classificadas.	Segurança do trabalho

Tabela 9 — Panorama normativo da segurança intrínseca ao longo do ciclo de vida da instalação.

Fonte: elaborado pelos autores a partir das normas citadas.

DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Este capítulo aplica a metodologia descrita no Capítulo 2 a um estudo de caso concreto: a etapa de alcoolização (umectação) da nitrocelulose, considerando uma malha de dez transmissores de vazão instalados a até 300 m de distância da barreira de segurança intrínseca que os alimenta.

DESCRIÇÃO DO CENÁRIO DE APLICAÇÃO

O cenário de aplicação escolhido corresponde à etapa de alcoolização da nitrocelulose, processo empregado para reduzir a sensibilidade da nitrocelulose ao impacto, ao atrito e à eletricidade estática, tornando-a segura para armazenamento e transporte por meio da umectação do material fibroso com álcool isopropílico (SHREVE; BRINK JR., 1980 apud CÂMPARA, 2024). O álcool isopropílico é classificado como líquido inflamável de Categoria 2, com ponto de fulgor de 12 °C em vaso fechado e limites de inflamabilidade entre aproximadamente 2,0% e 12,7% em volume (QUIMESP, 2024) — o que significa que, mesmo em temperatura ambiente típica de planta industrial brasileira, a mistura ar/vapor de álcool isopropílico pode se encontrar dentro da faixa de inflamabilidade.

Em razão dessa elevada volatilidade, a área ao redor do vaso de alcoolização e das linhas de transferência de álcool isopropílico foi classificada como Zona 1 (atmosfera explosiva provável em operação normal — por exemplo, durante a abertura de bocais de inspeção, amostragem ou transferência de líquido), conforme os critérios da ABNT NBR IEC 60079-10-1 (2019). O interior do vaso fechado de alcoolização, onde a atmosfera explosiva está presente continuamente durante a operação, foi classificado como Zona 0. O álcool isopropílico pertence ao Subgrupo IIA e, considerando sua temperatura de autoignição (aproximadamente 399 °C), adotou-se a Classe de Temperatura T3 (limite de 200 °C, com margem superior a 190 °C) para os equipamentos elétricos instalados na área.

SELEÇÃO DO INSTRUMENTO DE CAMPO E PARÂMETROS DE ENTIDADE

O instrumento de campo considerado é um transmissor de vazão eletromagnético, responsável por medir a vazão de álcool isopropílico (ou da mistura nitrocelulose/álcool) na linha de alimentação do vaso de alcoolização, instalado na tubulação externa ao vaso, em Zona 1. Por se tratar de fluido eletricamente condutivo — a mistura aquo-alcoólica carrega eletrólitos residuais do processo de nitratação —, a medição eletromagnética é a tecnologia mais adequada, por não introduzir



partes móveis em contato com o processo.

Considerando a exigência mínima da Zona 1 (nível “ib”) e a elevada volatilidade do isopropanol, especificou-se um transmissor com certificação Ex ia IIC T4 Ga — nível de proteção mais restritivo que o mínimo normativo, adotado como margem de segurança adicional, e que atende com folga ao Subgrupo IIA e à Classe T3 exigidos pela área. Os parâmetros de entidade declarados no certificado do fabricante são apresentados na Tabela 10.

Parâmetro	Valor de campo (transmissor de vazão)
Ui	30 V
Ii	300 mA
Pi	1.200 mW (1,2 W)
Ci	5 nF
Li	10 µH

Tabela 10 — Parâmetros de entidade do transmissor de vazão eletromagnético (Ex ia IIC T4 Ga).

SELEÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA BARREIRA

A seleção da barreira (zener ou isolador galvânico) deve considerar o nível de proteção exigido pela zona de instalação (“ia” para Zona 0, no mínimo “ib” para Zona 1), o subgrupo de gás ou poeira do local e a compatibilidade dos parâmetros de saída com os parâmetros de entrada do instrumento de campo, conforme a Equação 1 (item 2.8.3). Para esta malha, optou-se por uma barreira zener com nível de proteção “ia” — novamente acima do mínimo exigido pela Zona 1 — e certificação para o Subgrupo IIC, compatível, portanto, com o Subgrupo IIA exigido pela área. Seus parâmetros de saída são apresentados na Tabela 11; o dimensionamento de Co e Lo para os dez transmissores da malha é detalhado no item 3.5.

Parâmetro	Valor de saída da barreira zener “ia”
Uo	28 V
Io	93 mA

Parâmetro	Valor de saída da barreira zener “ia”
Po	650 mW
Co	120 nF
Lo	450 µH

Tabela 11 — Parâmetros de saída da barreira zener selecionada para a malha de dez transmissores.

VERIFICAÇÃO DE CONFORMIDADE DE ENTIDADE

Como os dez transmissores de vazão desta malha compartilham o mesmo par de condutores (barramento multiponto alimentado por uma única barreira), os parâmetros de tensão, corrente e potência da barreira (U_o , I_o , P_o) devem ser comparados individualmente com os parâmetros de entrada (U_i , I_i , P_i) de cada instrumento — todos os dispositivos do barramento estão sujeitos ao mesmo potencial e à mesma corrente de falha, de modo que essas três condições não se somam, apenas se repetem para cada dispositivo. Já os parâmetros reativos (C_o , L_o) precisam acomodar a soma das reatâncias de todos os dispositivos mais a do cabo — verificação apresentada no item 3.5.

Aplicando as três primeiras condições da Equação 1 aos valores das Tabelas 10 e 11: $U_o = 28 \text{ V} \leq U_i = 30 \text{ V}$ (atendido, margem de 2 V); $I_o = 93 \text{ mA} \leq I_i = 300 \text{ mA}$ (atendido, com folga considerável); $P_o = 650 \text{ mW} \leq P_i = 1.200 \text{ mW}$ (atendido, com folga considerável). Como os dez transmissores são idênticos, esses três critérios ficam automaticamente satisfeitos para qualquer um dos dez instrumentos da malha.

$$L_{\text{cabo,máx}} = (L_o - L_i) / L'_{\text{cabo}} \quad C_{\text{cabo,máx}} = (C_o - C_i) / C'_{\text{cabo}}$$

Equação 2 — Comprimento máximo de cabo admissível a partir das reatâncias distribuídas L'_{cabo} e C'_{cabo} (aplicável a um único dispositivo). Fonte: adaptado de ABNT NBR IEC 60079-25 (2021).

A Equação 2 é válida para uma malha com um único dispositivo de campo; para os dez transmissores desta malha, compartilhando o mesmo par de condutores, o cálculo precisa somar a



reatância de todos os dispositivos antes de confrontá-la com C_o e L_o da barreira — é exatamente esse o cálculo de sistema apresentado a seguir.

VERIFICAÇÃO DE SISTEMA E CÁLCULO DE MALHA

Diferentemente de U_o , I_o e P_o — que representam o mesmo potencial elétrico visto por todos os dispositivos de um barramento multiponto e por isso são verificados individualmente —, os parâmetros reativos C_o e L_o da barreira precisam acomodar a soma das capacitâncias e indutâncias de todos os dispositivos da malha, mais a reatância distribuída do próprio cabo, conforme a metodologia de cálculo de sistema da ABNT NBR IEC 60079-25 (2021).

Para a malha em estudo — dez transmissores de vazão idênticos ($C_i = 5 \text{ nF}$ e $L_i = 10 \text{ } \mu\text{H}$ cada, conforme Tabela 10), interligados por 300 m de cabo multipar blindado com capacitância distribuída de 150 pF/m e indutância distribuída de $1 \text{ } \mu\text{H/m}$ —, o cálculo do sistema resulta em:

Grandeza	Cálculo	Resultado
ΣC_i (10 instrumentos)	$10 \times 5 \text{ nF}$	50 nF
C_{cabo} (300 m)	$300 \text{ m} \times 150 \text{ pF/m}$	45 nF
C_o necessário	$\Sigma C_i + C_{\text{cabo}}$	$\geq 95 \text{ nF}$
ΣL_i (10 instrumentos)	$10 \times 10 \text{ } \mu\text{H}$	100 μH
L_{cabo} (300 m)	$300 \text{ m} \times 1 \text{ } \mu\text{H/m}$	300 μH
L_o necessário	$\Sigma L_i + L_{\text{cabo}}$	$\geq 400 \text{ } \mu\text{H}$ (0,4 mH)

Tabela 12 — Cálculo de sistema para a malha de dez transmissores de vazão (300 m de cabo).

Confrontando os totais calculados com os parâmetros de saída da barreira selecionada (Tabela 11): $C_o = 120 \text{ nF} \geq 95 \text{ nF}$ necessários (atendido, margem de 25 nF); $L_o = 450 \text{ } \mu\text{H} \geq 400 \text{ } \mu\text{H}$ necessários (atendido, porém com margem reduzida de apenas 50 μH). O sistema é, portanto, considerado intrinsecamente seguro, ainda que a margem de indutância relativamente estreita recomende cautela quanto à expansão futura da malha — seja pelo acréscimo de novos instrumentos,

seja pela adoção de um cabo com indutância distribuída superior à especificada nesta análise.

Cabe ressaltar que essa verificação garante exclusivamente a segurança intrínseca do sistema; a viabilidade de alimentação simultânea dos dez transmissores (orçamento de tensão e corrente mínimas de operação em cada dispositivo ao longo dos 300 m de cabo) constitui verificação de engenharia elétrica convencional, complementar e independente dos critérios de segurança intrínseca tratados neste estudo.

DIAGRAMA DE INTERLIGAÇÃO

A Figura 1 apresenta o esquema conceitual de interligação entre a área classificada e a área segura, evidenciando a posição da barreira na fronteira entre as duas regiões e o aterramento de referência dedicado, exigido no caso de barreiras zener. Na malha em estudo, os dez transmissores de vazão compartilham o mesmo barramento até a barreira.

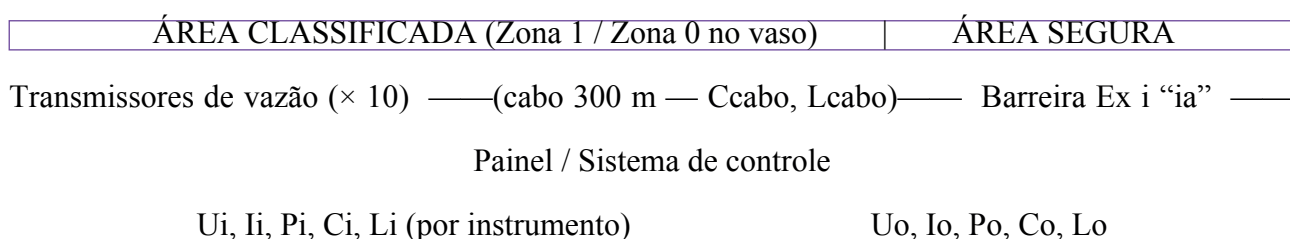


Figura 1 — Diagrama conceitual de interligação da malha multiponto de dez transmissores de vazão.

PROJETO DE INSTALAÇÃO, CABEAMENTO E ATERRAMENTO

A instalação de circuitos intrinsecamente seguros deve seguir a segregação física entre cabos Ex i e cabos convencionais, conforme a ABNT NBR IEC 60079-14 (2021), evitando o roteamento conjunto em eletrodutos ou bandejas não segregadas, de modo a prevenir indução de tensões espúrias que possam violar os parâmetros certificados. Barreiras zener devem ser aterradas por condutor

dedicado, de seção e comprimento conforme especificação do fabricante, com resistência de aterramento tipicamente inferior a $1\ \Omega$.

Para esta malha, adotou-se cabo multipar blindado, com capacitância distribuída de 150 pF/m e indutância distribuída de 1 μ H/m, em percurso único de 300 m entre a sala de controle (área segura) e os dez transmissores de vazão instalados ao longo da linha de alcoolização (Zona 1). O traçado segue eletroduto dedicado exclusivamente a circuitos Ex i, com identificação em azul-claro em toda a extensão, fisicamente segregado dos circuitos convencionais de potência e instrumentação não intrinsecamente segura da planta, conforme exigido pela ABNT NBR IEC 60079-14 (2021). A barreira zener é aterrada por condutor dedicado e redundante, com resistência de aterramento medida e registrada previamente à energização da malha.

PLANO DE INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO

Com base na ABNT NBR IEC 60079-17 (2025), definiu-se para esta malha uma periodicidade combinada: inspeção visual trimestral, dada a natureza agressiva do processo de alcoolização — vapores de álcool isopropílico favorecem corrosão e sujidade acelerada sobre conexões e invólucros, justificando um intervalo mais curto que o usual para essa etapa. Já as inspeções apurada e detalhada foram vinculadas a eventos de atualização e manutenção dos equipamentos (transmissores e barreira), em vez de periodicidade fixa por calendário — ou seja, executadas sempre que o fabricante emitir boletim de atualização de firmware/hardware, sempre que houver intervenção de manutenção corretiva relevante ou, no limite, conforme o intervalo máximo recomendado pelo fabricante. Essa estratégia híbrida — periodicidade fixa e mais curta para a inspeção visual, periodicidade orientada a eventos para as inspeções apurada e detalhada — é admitida pela ABNT NBR IEC 60079-17 (2025), que permite ajustar os intervalos de inspeção com base na criticidade da instalação e no histórico de manutenção dos equipamentos.

Grau de inspeção	Periodicidade adotada	Principais itens verificados
Visual	Trimestral (a cada 3 meses)	Danos mecânicos, corrosão, sujeira, identificação dos circuitos Ex i
Apurada	Conforme atualização/manutenção do equipamento	Continuidade de aterramento, fixações, torque acessível
Detalhada	Conforme atualização/manutenção do equipamento	Conexões internas, integridade da barreira, conformidade com certificado

Tabela 13 — Plano de inspeção periódica adotado para a malha de dez transmissores de vazão.

DIRETRIZES PARA REPARO E RECERTIFICAÇÃO

Caso o instrumento de campo ou a barreira apresentem falha, o reparo deve seguir os critérios da ABNT NBR IEC 60079-19 (2020), preferencialmente executado por empresa certificada nesta norma, utilizando peças de reposição originais ou equivalentes reconhecidas pelo fabricante ou pelo organismo certificador. Após qualquer reparo, os parâmetros de entidade do equipamento devem ser reconferidos frente à Tabela 10 e à Equação 1, garantindo que a compatibilidade do sistema permaneça válida antes da recolocação em serviço. [Inserir aqui os registros de reparo aplicáveis: empresa certificada responsável, peças substituídas e resultado da reconferência de parâmetros de entidade pós-reparo.]

Recomenda-se, ainda, que toda intervenção de reparo seja documentada em um registro específico de rastreabilidade, vinculado ao número de série do equipamento, contendo a data do serviço, o certificado da empresa executante, as peças substituídas, os ensaios realizados e a conclusão quanto à manutenção ou não da certificação original — documentação exigida tanto pela ABNT NBR IEC 60079-19 (2020) quanto, em auditorias periódicas, pela própria ABNT NBR IEC 60079-17 (2025), que verifica a conformidade histórica dos equipamentos instalados frente aos seus certificados de origem.

CONSIDERAÇÕES SOBRE REDES DE CAMPO DIGITAIS

Caso o projeto em questão adote instrumentação em rede digital (Foundation Fieldbus H1 ou Profibus PA), recomenda-se avaliar a aplicabilidade do conceito FISCO (IEC 60079-27, 2008), que simplifica a verificação de compatibilidade de sistema ao padronizar os parâmetros da fonte de alimentação, do cabo e dos dispositivos de campo. Para aplicações que demandem maior disponibilidade de potência aos dispositivos de campo — por exemplo, atuadores motorizados ou equipamentos de vídeo —, pode-se avaliar a adoção do conceito Power-i (ABNT IEC/TS 60079-39, 2019), que permite maior transferência de energia sem comprometer o nível de segurança intrínseca do sistema.

CONCLUSÃO

A segurança intrínseca se consolida como uma das técnicas de proteção mais eficazes, seguras e economicamente viáveis para a instrumentação de campo em atmosferas explosivas, por atuar diretamente na eliminação da fonte de ignição, em vez de apenas conter seus efeitos. A aplicação correta da técnica, contudo, não se limita ao projeto do circuito: depende do domínio simultâneo de múltiplos conceitos normativos ao longo de todo o ciclo de vida da instalação — classificação de áreas para gases e poeiras, grupos, classes de temperatura e níveis de proteção do equipamento, o conceito de entidade e de sistema que relaciona os parâmetros de campo e de barreira, as regras de projeto elétrico e cabeamento, as particularidades de redes de campo digitais e, por fim, os requisitos de inspeção periódica, manutenção preventiva e reparo de equipamentos certificados. A verificação sistemática dessas etapas, apoiada nas normas ABNT NBR IEC 60079-0, 60079-10-1, 60079-10-2, 60079-11, 60079-14, 60079-17, 60079-19 e 60079-25, bem como nas especificações técnicas IEC 60079-27 (FISCO) e ABNT IEC/TS 60079-39 (Power-i), constitui a garantia técnica de que a energia disponibilizada ao circuito de campo permanecerá sempre abaixo da energia mínima de ignição da



atmosfera — do projeto inicial ao reparo eventual de um equipamento —, contribuindo diretamente para a segurança operacional, a integridade das pessoas e a conformidade legal das instalações industriais ao longo de toda a sua vida útil.

Por fim, cabe destacar que a evolução tecnológica da própria técnica — representada pela consolidação de conceitos como FISCO para redes de campo digitais e Power-i para aplicações de maior potência — amplia continuamente o alcance da segurança intrínseca para além da instrumentação analógica tradicional, alcançando redes de automação industrial, sistemas de vídeo e dispositivos de maior consumo em áreas classificadas. Esse movimento reforça a relevância contínua do tema para a formação de engenheiros eletricitas e de automação, e justifica a permanente atualização profissional frente às revisões normativas periódicas da série ABNT NBR IEC 60079, como as recentemente publicadas edições da ABNT NBR IEC 60079-17 (2025) e da ABNT NBR IEC 60079-11, cuja nova edição, alinhada à IEC 60079-11:2023, foi publicada em novembro de 2025.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-0:2020 — Atmosferas explosivas — Parte 0: Equipamentos — Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-10-1:2019 — Atmosferas explosivas — Parte 10-1: Classificação de áreas — Atmosferas explosivas de gás. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-10-2:2016 — Atmosferas explosivas — Parte 10-2: Classificação de áreas — Atmosferas de poeiras explosivas. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-11:2013 — Atmosferas explosivas — Parte 11: Proteção de equipamento por segurança intrínseca “i”. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Nota: em novembro de 2025 foi publicada nova edição desta norma, alinhada à IEC 60079-11:2023.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-14:2021 — Atmosferas explosivas — Parte 14: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-17:2025 — Atmosferas explosivas — Parte 17: Inspeção e manutenção de instalações elétricas. 4. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-19:2020 — Atmosferas explosivas — Parte 19: Reparo, revisão e recuperação de equipamentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR IEC 60079-25:2021 — Atmosferas explosivas — Parte 25: Sistemas elétricos intrinsecamente seguros. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT IEC/TS 60079-39:2019 — Atmosferas explosivas — Parte 39: Sistemas intrinsecamente seguros com limitação de duração de centelha eletronicamente controlada “Power-i”. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR-10 — Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Portaria SEPRT nº 915, de 30 de julho de 2019 (texto em vigor); nova redação aprovada pela Portaria MTE nº 737, de 29 de maio de 2026, com vigência a partir de 1º de junho de 2027. Brasília: MTE, 2026.

CÂMPARA, C. V. A indústria de explosivos no contexto da nitrocelulose. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, 2024.

CARLETTI, R.; BULGARELLI, R.; SILVA, R. G. da; RAUSCH, S. M. Segurança de equipamentos e instalações elétricas em áreas classificadas. [S. l.]: Vesper, 2021.

DE OLIVEIRA, D. H.; BORGES, G. H.; ROSSIT, R.; BULGARELLI, R. Segurança intrínseca — Equipamentos e instalações em atmosferas explosivas. São Paulo: Blucher, 2024.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60079-0:2017 — Explosive atmospheres — Part 0: Equipment — General requirements. Geneva: IEC, 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60079-11:2023 — Explosive atmospheres — Part 11: Equipment protection by intrinsic safety “i”. 7. ed. Geneva: IEC, 2023.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60079-27:2008 — Explosive atmospheres — Part 27: Fieldbus intrinsically safe concept (FISCO). 2. ed. Geneva: IEC, 2008.

NEIVA DE OLIVEIRA, P. A. Revisão de classificação de áreas. 2020. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

QUIMESP. Ficha de Dados de Segurança — Álcool Isopropílico. São Paulo: Quimesp Química, 2024.

