

TECNOLOGÍAS AVANZADAS DE AISLAMIENTO ELÉCTRICO Y SELLADO HERMÉTICO EN DUCTOS QUE OPERAN EN ZONAS CLASIFICADAS

Sinopsis

El aseguramiento de la integridad en ductos que operan en zonas clasificadas requiere soluciones que combinen sellado hermético confiable y aislamiento eléctrico estable, con el objetivo de minimizar fugas, pérdidas de protección catódica y riesgos de ignición por arcos eléctricos. Las tecnologías tradicionales basadas en laminados G-10/G-11 han mostrado limitaciones relevantes bajo condiciones severas de operación, como presencia de H_2S , CO_2 , vapor, altas temperaturas y presiones elevadas, donde la permeación, la absorción de humedad y los fenómenos de fluencia reducen su desempeño.

Este trabajo analiza la evolución hacia juntas de aislamiento totalmente encapsuladas, diseñadas para mantener simultáneamente integridad mecánica y aislamiento eléctrico incluso después de pruebas hidrostáticas. Se describen sus principios de diseño, incluyendo núcleos metálicos de alta resistencia, recubrimientos dieléctricos continuos, sellos energizados de PTFE y elementos a prueba de fuego validados mediante ensayos normalizados.

El análisis demuestra que estas tecnologías pueden contribuir a la mitigación de riesgos eléctricos y químicos en zonas clasificadas cuando se integran dentro de un enfoque de gestión de integridad, complementado con dispositivos de desacople eléctrico y monitoreo de condiciones operativas. Como conclusión, se establece que las juntas encapsuladas representan una herramienta de ingeniería efectiva para reducir riesgos de fuga, arcos eléctricos y emisiones fugitivas en sistemas de ductos críticos.

1. Introducción

Las zonas clasificadas en instalaciones de transporte y procesamiento de hidrocarburos, gas, agua industrial y nuevos vectores energéticos como hidrógeno o CO_2 capturado, representan entornos de alto riesgo donde la integridad mecánica y eléctrica de las uniones bridadas es crítica. En estos puntos convergen múltiples amenazas: atmósferas potencialmente explosivas, presencia de medios corrosivos, gradientes eléctricos derivados de sistemas de protección catódica (PC) y exigencias regulatorias cada vez más estrictas en materia de emisiones fugitivas y seguridad operacional.

Históricamente, las juntas de aislamiento han cumplido un rol dual: proporcionar sellado y, al mismo tiempo, interrumpir la continuidad eléctrica para garantizar la efectividad de la PC y evitar corrosión galvánica. Sin embargo, la evolución de las condiciones operativas —mayores presiones, temperaturas más altas y medios más agresivos— ha puesto en evidencia las limitaciones de soluciones tradicionales basadas en laminados no metálicos.

2. Limitaciones de las Tecnologías Tradicionales (Resina Epóxica reforzada con fibra de Vidrio NEMA G-10 / G-11)

Las juntas de aislamiento fabricadas con laminados de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio (GRE en Inglés), comúnmente G-10 o G-11, han sido ampliamente utilizadas en aplicaciones de baja y media severidad. No obstante, en zonas clasificadas y servicios críticos presentan fallas recurrentes asociadas a:

- **Permeación de medios:** gases como H_2S , CO_2 o vapor pueden difundir a través de la matriz del material, generando pérdida de aislamiento eléctrico y degradación mecánica.

- **Absorción de humedad:** posterior a pruebas hidrostáticas, la absorción de agua puede producir falsos positivos o negativos en pruebas de aislamiento.
- **Fluencia y relajación:** bajo cargas elevadas y temperaturas altas, los laminados tienden a perder tensión de asiento, incrementando el riesgo de fugas.
- **Limitaciones térmicas:** rangos típicos de operación ($\approx 150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$) resultan insuficientes para servicios HP/HT o con vapor.

Estas limitaciones se traducen en eventos de fuga, cortocircuitos eléctricos no deseados y, en casos extremos, riesgos de ignición en áreas clasificadas.

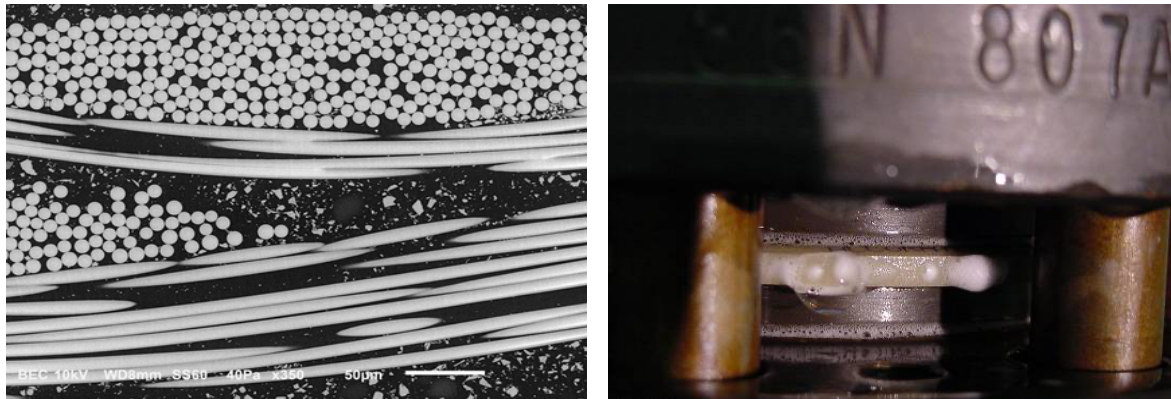


Figura 1. Corte transversal G10 y Permeación en GRE.

3. Requerimientos en Zonas Clasificadas

Las zonas clasificadas exigen soluciones que aborden simultáneamente múltiples criterios:

1. **Sellado hermético confiable**, incluso bajo ciclos térmicos y de presión.
2. **Aislamiento eléctrico estable**, compatible con sistemas de Protección Catódica (PC) e instrumentación sensible.
3. **Resistencia química**, frente a medios ácidos, sulfurosos o con alta presión parcial de gases.
4. **A prueba de fuego**, capaz de mantener integridad mínima durante y después de un evento de fuego.
5. **Bajas emisiones fugitivas**, alineadas con normativas ambientales y de seguridad.

Cumplir estos requisitos con una única solución tecnológica reduce la complejidad del diseño, la probabilidad de error en campo y el costo total del ciclo de vida.

4. Juntas de Aislamiento Totalmente Encapsuladas: Principios de Diseño

Las juntas de aislamiento de nueva generación incorporan un enfoque totalmente encapsulado que elimina los caminos de permeación y exposición directa de materiales sensibles. Sus principios clave incluyen:

- **Núcleo metálico (SS316L) de alta resistencia**, que soporta cargas elevadas sin deformación.
- **Encapsulado dieléctrico continuo**, con alta rigidez dieléctrica, que evita el contacto del medio con el núcleo y entre núcleo y sello de Inconel
- **Sellos energizados de PTFE Reestructurado**, capaces de adaptarse a variaciones de presión y temperatura, manteniendo contacto efectivo.
- **Elementos a prueba de fuego**, como anillo C de Inconel 718, que aseguran sellado residual tras la degradación de sellos poliméricos en un incendio.

Este enfoque elimina la dependencia de laminados expuestos y proporciona un comportamiento predecible incluso en condiciones extremas.

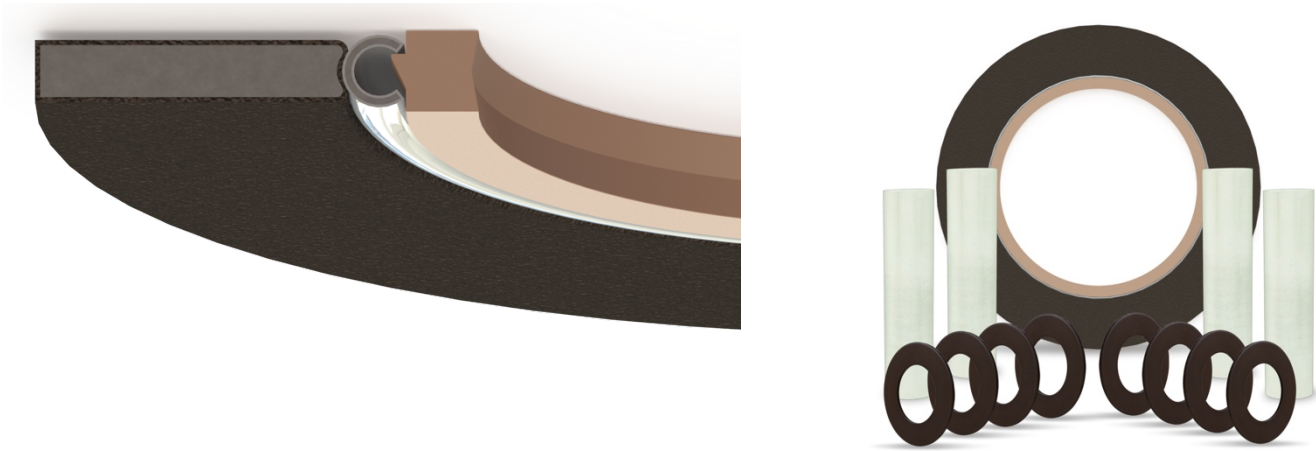


Figura 2. Junta de Aislamiento de núcleo de acero inoxidable 316L encapsulado con revestimiento dieléctrico, sello en diámetro interno de PTFE restructurado, cánulos de G-11 y arandelas de acero inoxidable 316L revestida.

5. Desempeño frente a Pruebas Hidrostáticas

Uno de los desafíos operativos más frecuentes es la pérdida de aislamiento después de pruebas hidrostáticas. En soluciones tradicionales, el agua puede penetrar el cuerpo de la junta, alterando mediciones eléctricas y obligando al reemplazo del kit antes de la puesta en servicio.

Las juntas totalmente encapsuladas mantienen el aislamiento eléctrico después de la prueba, permitiendo:

- Validaciones de integridad sin reemplazos innecesarios.
- Eliminación de falsos diagnósticos en pruebas de PC.
- Reducción de tiempos muertos y costos de mantenimiento.

6. Resistencia a Medios Críticos

Ensayos de laboratorio y experiencia en campo han demostrado que los diseños encapsulados presentan resistencia superior frente a:

- **H₂S y CO₂**, incluso a altas presiones parciales.
- **Vapor y servicios húmedos**, donde la permeación es crítica.
- **Aplicaciones emergentes**, como hidrógeno y captura y almacenamiento de carbono (CCS), donde la compatibilidad y baja permeabilidad son esenciales.

La combinación de PTFE, recubrimientos dieléctricos avanzados y aleaciones especiales permite mantener tanto el sellado como la aislación eléctrica a largo plazo.



Figura 3. Afectaciones en el G10 y G11 por ataque químico.

7. Requerimientos Eléctricos en Zonas Clasificadas (Clase I, División 1 y 2)

Las zonas clasificadas Clase I, División 1 y División 2, definidas en códigos eléctricos como NEC, IECEx y esquemas equivalentes, están asociadas a la presencia de atmósferas potencialmente explosivas debido a gases o vapores inflamables. En estos entornos, los marcos regulatorios no prescriben componentes específicos para cada unión mecánica, pero sí establecen principios fundamentales orientados a la prevención de fuentes de ignición.

Desde la perspectiva de integridad de ductos y protección contra la corrosión, estos principios pueden resumirse en los siguientes requerimientos funcionales:

- Eliminación o control de arcos eléctricos y chispas.
- Control de diferencias de potencial eléctrico entre componentes metálicos accesibles.
- Manejo seguro de corrientes transitorias, fallas eléctricas y descargas atmosféricas.
- Compatibilidad con sistemas de protección catódica sin comprometer la seguridad eléctrica.

En sistemas de ductos metálicos protegidos catódicamente, la ausencia de un aislamiento eléctrico controlado en conexiones bridadas puede dar lugar a corrientes errantes, desbalance de potenciales y transferencia no deseada de energía eléctrica hacia equipos, instrumentación o estructuras adyacentes ubicadas dentro de zonas clasificadas. Estas condiciones incrementan el riesgo de ignición por arco eléctrico, especialmente durante eventos transitorios.

7.1 Instalaciones clasificadas de petróleo y gas e interacción con sistemas de protección catódica

Las operaciones petroleras y gasíferas incluyen numerosas instalaciones que, de acuerdo con códigos eléctricos y prácticas recomendadas de la industria, son consideradas zonas clasificadas debido a la presencia potencial de hidrocarburos inflamables. En estas mismas instalaciones, la protección catódica es ampliamente utilizada para el control de corrosión externa en ductos enterrados o parcialmente enterrados. La coexistencia de atmósferas clasificadas y sistemas de protección catódica genera una interacción directa entre integridad mecánica, desempeño eléctrico y seguridad operacional.

En puntos de transición entre ductos protegidos catódicamente y equipos superficiales ubicados en áreas clasificadas —como cabezales de pozo, estaciones de compresión o trampas de scrapers— pueden desarrollarse gradientes de potencial, corrientes errantes y eventos transitorios que incrementan el riesgo de ignición si no se implementan medidas de control adecuadas. Por esta razón, el aislamiento eléctrico controlado y el uso de dispositivos de desacople se consideran prácticas de ingeniería reconocidas para

mitigar dichos riesgos, en alineación con las recomendaciones de AMPP y los objetivos funcionales de los códigos eléctricos aplicables.

Tabla 1 – Zonas operativas clasificadas en Oil & Gas y su relación con protección catódica

Instalación Operación	Clasificación típica	Referencias normativas	Relación con protección catódica y aislamiento
Cabezal de pozo \ Árbol de Navidad	Clase I, Div. 1 (equipo) / Div. 2 (perímetro)	API RP 500; NEC Art. 500	Transición ducto enterrado–equipo superficial; uso común de aislamiento eléctrico y control de PC
Línea de flujo	Clase I, Div. 2	API RP 500; IEC 60079-10-1	PC aplicada a ductos enterrados; aislamiento para segmentación eléctrica
Estaciones de compresión	Clase I, Div. 1 / 2	API RP 500; NEC Art. 501	Gradientes de potencial; integración de juntas aislantes y desacopladores
Estaciones de medición / transferencia de custodio	Clase I, Div. 2	API RP 500; IEC 60079	Aislamiento para evitar interferencias eléctricas y pérdida de PC
Trampas de chanchos de limpieza/ inspección	Clase I, Div. 1 (operación) / Div. 2	API RP 500	Punto típico de aislamiento entre ductos enterrados y sistemas superficiales
Unidades de proceso (refinería)	Clase I, Div. 1 / 2	API RP 500; IEC 60079	Interacción PC–estructuras; mitigación de corrosión galvánica
Tanques de almacenamiento	Clase I, Div. 1 (sellos) / Div. 2 (perímetro)	API RP 500; NFPA 30	PC en fondos y líneas enterradas; aislamiento para control de corrientes
Terminales y puertos	Clase I, Div. 1 / 2	API RP 500; IEC 60079	PC marina agresiva; aislamiento eléctrico crítico
Plataformas offshore / FPSO	Clase I, Div. 1 / 2	API RP 14F; IEC 60079	PC estructural; control de potencial mediante aislamiento y bonding
Hidrógeno y CCS	Clase I, Div. 2	IEC 60079; ASME B31.12; ISO 14687	Alta permeabilidad y PC requerida; aislamiento eléctrico y sellado robusto

8. Aislamiento Eléctrico, Prevención de Chispas y Dispositivos de Desacople

Bajo el enfoque de gestión de riesgo promovido por AMPP, el aislamiento eléctrico en puntos estratégicos del sistema de ductos constituye una medida de mitigación clave para cumplir los objetivos de seguridad eléctrica en zonas clasificadas. Las juntas de aislamiento de alto desempeño permiten segmentar eléctricamente el sistema, controlando la distribución de corrientes de protección catódica y reduciendo gradientes de potencial.

No obstante, el aislamiento eléctrico por sí solo no resulta suficiente en entornos Clase I, División 1 o 2. Para evitar la acumulación de energía eléctrica y la formación de arcos durante sobretensiones, resulta necesario integrar dispositivos de desacople eléctrico (decouplers), diseñados para:

- Bloquear el paso de corriente continua asociada a la protección catódica.
- Conducir de manera controlada corrientes alternas, sobretensiones y descargas transitorias.
- Mantener la equipotencialidad durante eventos anómalos sin comprometer el aislamiento en condiciones normales de operación.

La combinación de juntas de aislamiento totalmente encapsuladas con dispositivos de desacople permite cumplir simultáneamente con los objetivos de integridad del sistema de protección catódica y los requerimientos de seguridad eléctrica exigidos en zonas clasificadas, reduciendo de forma significativa el riesgo de ignición por arco eléctrico.



Figura 4. Desacoplador de estado sólido en conexión bridada.

9. Diseño para Zonas Clasificadas vs. Certificación Formal de Equipos

Desde el punto de vista normativo y de gestión de integridad, es fundamental distinguir entre **equipos diseñados y construidos para operar en zonas clasificadas** y **equipos formalmente certificados por un organismo regulador** (UL, ATEX, IECEx u otros). Esta distinción es ampliamente reconocida en la práctica industrial y resulta particularmente relevante en sistemas de protección catódica, instrumentación y equipos auxiliares asociados a ductos.

En muchos proyectos, los equipos eléctricos —como rectificadores, gabinetes de instrumentación o dispositivos de monitoreo— son **fabricados conforme a los requerimientos constructivos** de una zona Clase I, División 2 (por ejemplo, gabinetes NEMA 4/4X, componentes internos adecuados y accesorios certificados), pero el conjunto completo no cuenta con una certificación formal de tipo emitida por un organismo externo. Esta aproximación responde a consideraciones técnicas, económicas y de plazo, ya que la certificación integral de equipos especiales puede implicar procesos prolongados y costos significativos.

Bajo el enfoque AMPP, esta práctica no invalida la seguridad del sistema siempre que:

- El diseño esté alineado con los principios de prevención de ignición establecidos en los códigos aplicables.
- Los componentes críticos cuenten con clasificaciones y materiales adecuados para el entorno.
- Se implementen medidas de mitigación de riesgo complementarias, como aislamiento eléctrico controlado y manejo de sobretensiones.

- Se contemple, cuando aplique, la inspección en campo por terceros como parte del proceso de aceptación del proyecto.

10. Implicaciones para Juntas de Aislamiento, Desacopladores y Monitoreo

Esta distinción entre diseño y certificación formal es igualmente aplicable a las juntas de aislamiento y a los dispositivos asociados. Las juntas de aislamiento no son equipos eléctricos activos y, por lo tanto, no están sujetas a esquemas de certificación Ex tradicionales. Sin embargo, su desempeño eléctrico y mecánico influye directamente en la seguridad de instalaciones ubicadas en zonas clasificadas.

En este contexto, el uso de juntas de aislamiento totalmente encapsuladas, combinadas con dispositivos de desacople eléctrico y sistemas de monitoreo, debe interpretarse como una **medida de ingeniería orientada a cumplir los objetivos funcionales de seguridad**, más que como un requisito de certificación formal. Este enfoque permite:

- Reducir la probabilidad de arcos eléctricos en conexiones bridadas.
- Controlar diferencias de potencial bajo operación normal y eventos transitorios.
- Facilitar la aceptación del sistema mediante inspecciones en sitio, cuando así lo requiera el proyecto.

La aplicación de estas tecnologías se alinea con la filosofía de AMPP de priorizar la mitigación de riesgos, la integridad a largo plazo y la confiabilidad operacional, incluso en escenarios donde la certificación formal de todos los componentes no resulta práctica o económicamente viable.

11. Monitoreo de Condiciones Eléctricas e Integridad del Aislamiento

Las prácticas modernas de gestión de integridad promueven la verificación continua del desempeño de los sistemas críticos. En el contexto de zonas clasificadas, el monitoreo permanente del aislamiento eléctrico y de los parámetros de operación aporta beneficios adicionales en términos de seguridad y confiabilidad operacional.

Los sistemas de monitoreo permiten:

- Confirmar en tiempo real la continuidad del aislamiento eléctrico después de pruebas hidrostáticas y durante la operación.
- Detectar de manera temprana la degradación del aislamiento por ingreso de humedad, daño mecánico o envejecimiento de materiales.
- Verificar la correcta operación de los dispositivos de desacople eléctrico.
- Reducir intervenciones manuales en áreas clasificadas, minimizando la exposición del personal.

La integración de juntas de aislamiento totalmente encapsuladas, dispositivos de desacople y sistemas de monitoreo eléctrico constituye un enfoque coherente y alineado con la filosofía de AMPP para la mitigación de riesgos eléctricos y la protección de activos en zonas clasificadas.

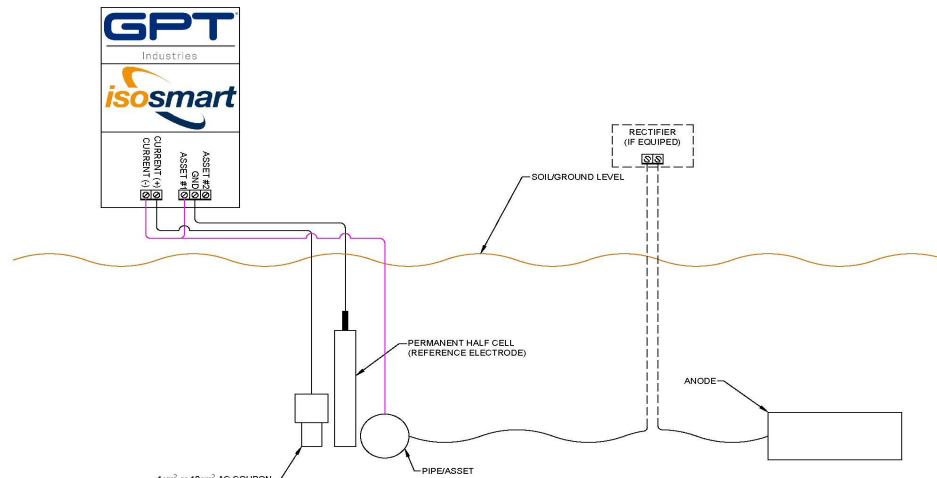


Figura 5. Diagrama de monitoreo de protección catódica.

Conclusiones

La operación de ductos en zonas clasificadas requiere abordar de manera simultánea fenómenos de naturaleza mecánica, eléctrica y química que interactúan entre sí. Bajo condiciones severas de servicio —incluyendo altas presiones parciales de gases, presencia de medios húmedos o sulfurosos, ciclos térmicos y sistemas de protección catódica activos— los mecanismos de permeación, absorción de humedad y relajación mecánica asociados a laminados G-10/G-11 pueden comprometer tanto el sellado como la continuidad del aislamiento eléctrico.

El análisis presentado sugiere que las juntas de aislamiento totalmente encapsuladas, al incorporar núcleos metálicos estructurales, barreras dieléctricas continuas y sellos energizados de alta estabilidad química, permiten desacoplar los modos de falla típicos observados en soluciones tradicionales. Este diseño reduce la exposición directa del medio al material aislante, limita la degradación dieléctrica y mejora la estabilidad frente a cargas de asiento elevadas y variaciones térmicas, contribuyendo a mantener el desempeño eléctrico incluso después de pruebas hidrostáticas.

Cuando estas juntas se integran dentro de una arquitectura que incluye dispositivos de desacople eléctrico y prácticas adecuadas de control de potencial, es posible gestionar de forma más predecible la distribución de corrientes de protección catódica, minimizar gradientes eléctricos no deseados y disminuir la probabilidad de eventos de arco en áreas con atmósferas potencialmente explosivas.

Desde una perspectiva de gestión de integridad alineada con AMPP, este enfoque representa una estrategia de mitigación basada en ingeniería que busca controlar mecanismos de degradación identificables, más que depender exclusivamente de certificaciones prescriptivas. La selección e implementación de estas tecnologías debe realizarse considerando los códigos eléctricos y mecánicos aplicables, el análisis de riesgos específico del activo y los criterios del propietario y de la autoridad competente.

Bibliografía

1. AMPP SP0169, *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems*, AMPP.
2. AMPP SP0286, *Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines*, AMPP.
3. AMPP, *Pipeline Integrity Management Systems*, AMPP Publications.
4. NEC (NFPA 70), *National Electrical Code*, Articles related to Class I, Division 1 and Division 2 locations.
5. IEC 60079, *Explosive Atmospheres – Equipment Protection by Flameproof Enclosures and Intrinsic Safety*.
6. API 6FB, *Fire Test for Valves*, American Petroleum Institute.
7. ASME PCC-1, *Guidelines for Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly*, ASME.
8. ASME B16.5 / B16.47, *Pipe Flanges and Flanged Fittings*, ASME.
9. ISO 14687, *Hydrogen Fuel Quality – Product Specification*.
10. NACE Publication 35101, *Stray Current Corrosion*, NACE International.
11. Revie, R. W. (Ed.), *Uhlig's Corrosion Handbook*, Wiley.
12. Fontana, M. G., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill.

Nota de Ingeniería – Diseño para Áreas Clasificadas vs. Certificación Formal

Las tecnologías y configuraciones analizadas en este documento se presentan desde una perspectiva de ingeniería para la mitigación de riesgos y tienen como objetivo abordar los requisitos funcionales asociados con la seguridad eléctrica, el control de la corrosión y la integridad del sellado en áreas clasificadas (p. ej., Clase I, División 1 y División 2).

Si bien los códigos eléctricos y de seguridad aplicables establecen objetivos relacionados con la prevención de ignición, el control de la energía eléctrica y la operación segura en atmósferas peligrosas, no necesariamente exigen el uso de componentes con certificación formal para cada elemento pasivo dentro de un sistema de tuberías. En la práctica, muchos componentes relacionados con tuberías se diseñan y construyen para su uso en entornos clasificados sin someterse a una certificación completa de terceros para áreas peligrosas, debido a limitaciones de costo, plazo y específicas del proyecto.

Por lo tanto, el uso de juntas de aislamiento, dispositivos de desacoplamiento y sistemas de monitoreo descritos en este documento debe entenderse como medidas de ingeniería destinadas a reducir el riesgo eléctrico y químico, más que como equipos certificados a prueba de explosiones. La determinación final de idoneidad, cumplimiento y aceptación sigue siendo responsabilidad del propietario del proyecto, el contratista de ingeniería y la autoridad competente y puede incluir inspección o verificación de campo como parte del proceso de puesta en servicio.