




PROYECTO No. 381

INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2 - Cartagena


 Protección Catódica— de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2

DOCUMENTO No.:
PCC-381-II-01-RA


CLIENTE:

A	11/09/2025	Emisión para el Cliente	A.RIVERA NACE CP4	M. DUGARTE Profesor Asociado Uninorte	
REV.	FECHA	DESCRIPCIÓN	ELABORÓ	REVISÓ	APROBÓ

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

ÍNDICE


RESUMEN EJECUTIVO.....	4
Recubrimiento	5
Protección Catódica	5
Electrodos de Referencia	5
Conclusiones Integradas	5
Recomendación Estratégica	6
1 OBJETIVO	7
2 ALCANCE	7
3 NORMATIVIDAD DE REFERENCIA.....	8
3.1.1 1. Normas NACE/AMPP	8
3.2 Definiciones	8
3.3 DOCUMENTOS OBJETO DE ANALISIS.....	10
4 CONTEXTO.....	10
5 Descripción de la Estructura y su Protección	11
5.1 Estructura de tablestacado a proteger.....	11
5.2 Protección típica de tablestacados en ambiente marino	12
5.3 Instalación civil en el proyecto CCCI	12
5.4 Descripción Sistema de Protección Catódica Instalado.....	13
5.4.1 Cantidad y disposición de ánodos en el proyecto	13
5.4.2 Distancia entre ánodos	14
6 Diagnóstico técnico del recubrimiento aplicado.....	14
6.1.1 Alcance del diagnóstico	14
6.1.2 Evidencia de aplicación y calidad (según registros).....	14
6.1.3 Efectos inevitables del hincado y acople entre láminas.....	15
6.1.4 Zona de “splash” (intermareal aireada) y borde de marea	15
6.1.5 Interacción recubrimiento–protección catódica (PC).....	16
6.2 Lectura por zonas con respecto a la protección catódica.....	16
6.3 Diagnóstico general	16
7 Diagnóstico Técnico del Sistema de Protección Catódica	17

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

7.1	Alcance del análisis.....	17
7.2	Configuración instalada.....	17
7.3	Criterios normativos de protección.....	17
7.4	Estimación de la demanda de corriente.....	18
7.4.1	Superficie expuesta (cálculo estimado).....	18
7.4.2	Densidades de corriente adoptadas.....	18
7.4.3	Capacidad anódica instalada y disponible.....	18
7.4.4	Configuración instalada y condiciones de servicio.....	18
7.4.5	Criterios normativos de protección.....	18
7.4.6	Estimación de demanda de corriente.....	19
7.5	Observaciones críticas.....	20
7.5.1	Concepción de diseño.....	20
7.5.2	SPC Lado mar.....	20
7.5.3	SPC Lado tierra.....	20
7.5.4	Geotextil.....	21
7.6	Evidencia de inspección 2024.....	21
7.7	Diagnóstico del Electrodo de Referencia Instalado.....	22
7.7.1	Implicaciones.....	23
7.8	Diagnóstico General SPC.....	23
8	Plan de acción y recomendaciones.....	24
8.1	Alcance técnico de la ingeniería de detalle.....	24
8.2	Monitoreo y puntos de medida.....	25
8.3	Puesta en servicio (commissioning).....	26
8.4	Programa de monitoreo y mantenimiento (conforme normativa).....	26
8.5	Evaluación técnico-económica (TCO).....	27

RESUMEN EJECUTIVO

En el marco del proyecto de **reparación del muro de contención del Centro de Convenciones de Cartagena de Indias**, se instaló en 2022 un sistema de **tablestacado metálico** protegido mediante recubrimiento epóxico de alto espesor y un sistema de **protección catódica galvánica** con ánodos de sacrificio de aluminio .

 Protección Catódica— de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

La revisión técnica efectuada comprende el análisis documental (informes de aplicación, certificados de materiales y reportes finales de obra), contrastado con la normativa internacional aplicable (NACE/AMPP SP0169, prácticas CP4, ISO 15589-1) y con evidencias recientes de inspección en campo.

Recubrimiento

Los registros de obra muestran que el recubrimiento se aplicó conforme a especificaciones, alcanzando espesores ≥ 22 mils, adherencias > 500 psi y reparando discontinuidades detectadas. Sin embargo, se reconoce que el proceso de **hincado de tablestacas** produce inevitablemente abrasión, rayones y microfisuras, particularmente en el **lado tierra** y en las zonas de unión entre láminas.

La **zona de splash**, sometida a ciclos húmedo-seco y alta aireación, representa el punto más crítico: aquí la efectividad de la protección catódica es mínima y el desempeño del recubrimiento resulta determinante para prevenir ataques de corrosión localizada, la solución allí es un monitoreo adecuado.

Protección Catódica

El diseño original contempló la instalación de 13 ánodos de aluminio (10 en lado mar y 3 en lado tierra) soldados directamente a la tablestaca .

Con base en la densidad de corriente normativa (150 mA/m^2 en agua de mar y 40 mA/m^2 en suelo, CP4) y considerando eficiencias de recubrimiento del 60–80 %, el cálculo de demanda para garantizar 10 años de vida útil requería entre **500 y 1000 kg de masa anódica**. No obstante, se instalaron únicamente **~130 kg**, evidenciando un déficit de **74–87 %** respecto a lo necesario.


Como consecuencia, los ánodos del lado mar se encuentran **prácticamente consumidos en menos de dos años de servicio**, confirmando empíricamente la subestimación de diseño y la imposibilidad de alcanzar la vida útil prevista.

Electrodos de Referencia

Se identificó que el electrodo permanente instalado corresponde a un modelo para agua de mar (Ag/AgCl seawater). Su uso en suelo no garantiza lecturas estables ni confiables, comprometiendo la verificación de criterios de protección catódica en el lado tierra. Para este sector se requieren electrodos permanentes de tipo suelo (Ag/AgCl-soil o Cu/CuSO₄), mientras que las mediciones en agua deben realizarse con electrodos portátiles en cada rutina de inspección

Conclusiones Integradas


1. **Recubrimiento:** aplicado con calidad inicial adecuada, pero su efectividad real se reduce en servicio por daños de hincado y condiciones críticas en la zona de splash.
2. **Protección Catódica:** diseño subdimensionado, con masa anódica insuficiente y distribución no uniforme, lo que resultó en consumo prematuro de los ánodos y en la imposibilidad de mantener criterios de protección a mediano plazo.

 Protección Catódica— de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

3. **Monitoreo:** el uso de electrodos de referencia inadecuados compromete la confiabilidad de los registros y limita la evaluación real de la protección.
4. **Riesgo Actual:** el sistema en su estado actual no asegura la integridad a largo plazo del tablestacado, existiendo zonas expuestas a corrosión acelerada y pérdida de sección.

Recomendación Estratégica

Se recomienda desarrollar una **ingeniería de detalle integral** de protección catódica, evaluando alternativas de **corriente impresa y galvánica**, con modelación computacional de distribución de corriente, integración con sectores completos del complejo y la instalación de probetas de corrosión externa para monitoreo. Este plan debe complementarse con un **programa de inspección periódica** bajo normativa NACE/AMPP, incluyendo perfiles de potencial, verificación de IR-free potentials y, cuando se requiera, medición de espesores por ultrasonido.

 Protección Catódica de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

1 OBJETIVO

Evaluar integralmente el diseño, instalación, desempeño y mantenibilidad del SPC existente por ánodos galvánicos de aluminio en el tablestacado del proyecto, específicamente en el tramo m 87 – m 127, para verificar su conformidad técnica con las guías de referencia (NACE/AMPP SP0169 para estructuras enterradas o sumergidas, y buenas prácticas complementarias aplicables a CP en ambiente marino), identificar oportunidades de mejora, detectar errores conceptuales y de implementación, y recomendar acciones correctivas y preventivas que optimicen la eficiencia, uniformidad y vida útil del sistema, así como la correcta aplicación y control de la barrera a la corrosión (recubrimiento + CP).

2 ALCANCE

La presente revisión consiste en un análisis integral del sistema de protección catódica implementado en el tablestacado perimetral, específicamente en el tramo comprendido entre los metros 87 y 127 de la estructura. El diagnóstico se realizará tomando como base los lineamientos establecidos en la norma **NACE SP0169 – Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems**, y la información técnica disponible en planos, certificados de calidad, procedimientos constructivos e informes de aplicación de recubrimientos.

El alcance incluye:

1. Revisión documental y técnica

- Análisis detallado de planos, memorias y especificaciones del diseño original.
- Verificación de certificados de calidad de los ánodos de sacrificio y tablestacas instaladas.
- Evaluación de los procedimientos constructivos ejecutados (hincado, soldadura, instalación de ánodos, aplicación de recubrimientos).

2. Análisis de configuración del sistema


- Estudio del tipo de ánodos de sacrificio empleados (aleación, dimensiones, peso nominal y parámetros de diseño).
- Revisión de la ubicación, cantidad y distribución de los ánodos sobre el tablestacado, comparándolos con criterios de diseño NACE/ISO.
- Evaluación de la interacción entre el recubrimiento aplicado (barrera dieléctrica) y el sistema de protección catódica.

3. Evaluación normativa

- Revisión del cumplimiento de los criterios de potenciales de protección establecidos en NACE SP0169 y normativa internacional aplicable.
- Identificación de posibles desviaciones en diseño o instalación que comprometan la eficiencia del sistema.

4. Identificación de debilidades y errores conceptuales

- Análisis de posibles sobreconsumos de ánodos por configuración geométrica o deficiencias en soldadura/conexiones.
- Evaluación de defectos en recubrimientos (adherencia, espesores, discontinuidades) que impacten la vida útil del sistema.
- Identificación de riesgos de interferencias galvánicas, zonas no protegidas o efectos de blindaje por recubrimiento.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

5. Análisis de mejoras y optimización

- Propuesta de ajustes en criterios de selección de ánodos, cantidad y distribución.
- Recomendaciones sobre recubrimientos y esquemas de inspección/mantenimiento que optimicen la durabilidad del sistema.
- Alternativas de mejora en el diseño a futuro (uso de ánodos de mayor eficiencia, refuerzo con sistemas de corriente impresa si aplica, incorporación de puntos de monitoreo permanentes).

6. Recomendaciones a futuro

- Lineamientos para asegurar la correcta aplicación de la barrera anticorrosiva (recubrimiento + protección catódica).
- Plan de mantenimiento y monitoreo periódico para garantizar el cumplimiento de vida útil esperada.
- Acciones correctivas inmediatas y preventivas para futuros proyectos de tablestacado en ambiente marino.

3 NORMATIVIDAD DE REFERENCIA

3.1.1 1. Normas NACE/AMPP

- **NACE SP0169-2013 (AMPP 2169):** *Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.*
- **NACE SP0176 (AMPP 2176):** *Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production.*
- **NACE SP0575:** *Internal Cathodic Protection of Steel Water Tanks.*
- **ISO 15589-2:** *Cathodic protection of pipeline transportation systems — Part 2: Offshore pipelines.*
- **DNV-RP-B401:** *Cathodic Protection Design.*

3.2 Definiciones

Ánodo: El electrodo de una celda electroquímica donde ocurre la oxidación. (Los electrones fluyen fuera del ánodo en el circuito externo, que es normalmente metálico. El ánodo es normalmente el electrodo donde ocurre la corrosión y los iones de metal entran en la solución.

Ánodo Galvánico: Un metal que, a causa de su posición relativa en la serie galvánica, proporciona protección a metal o metales que son más nobles en la serie, cuando son acoplados a un electrolito.

Cátodo: El electrodo de una celda electroquímica donde ocurre la reducción.


Corrosión: El deterioro de un material, usualmente un metal, como resultado de una reacción con el ambiente.

Conductor: Un material disponible para transporte de corriente eléctrica. Este puede ser desnudo o aislado.

Criterio de Protección Catódica: Estándar de valoración de la efectividad de un sistema de protección catódica.

Densidad de Corriente: La corriente para o de una unidad de área de superficie de un electrodo.

Electrolito: Una sustancia química con contenido de iones que emigran en un campo eléctrico. Para el propósito de esta recomendación práctica, el electrolito se refiere al suelo o líquido adyacente y en

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

contacto con sistemas de tuberías metálicas sumergidas o enterradas, incluyendo la humedad y otros químicos contenidos allí dentro.

Electrodo de Referencia: Un electrodo reversible con un potencial que puede ser considerado constante bajo condiciones similares de medición.

Polarización Catódica: El cambio de potencial del electrodo en dirección electronegativa resultante del flujo de corriente entre el electrolito y el electrodo.

Polarización: La desviación de potencial de un electrodo como resultado de un flujo de corriente entre el electrodo y el electrolito.

Potencial de Polarización: El potencial a través de la interfase estructura-electrolito el cual es la suma del potencial de corrosión y la polarización catódica.

Protección Catódica: Técnica para controlar la corrosión de una superficie de metal haciendo esa superficie el cátodo de una celda electroquímica.

Revestimiento: Un material dieléctrico aplicado a una estructura para separarlo del ambiente.

Voltaje: Una fuerza electromotriz o una diferencia de potenciales del electrodo expresada en voltios.

Ánodo de sacrificio: Elemento metálico (en este caso de aleación de aluminio tipo Galvotec III) que se oxida de manera preferencial para proteger catódicamente al acero de las tablestacas.

Aleación Galvotec III: Aleación de aluminio con zinc e indio, diseñada para mantener un potencial electroquímico negativo y evitar pasivación en ambientes marinos .

Catión / Anión: Iones cargados positivamente (catión) o negativamente (anión) que participan en las reacciones electroquímicas de corrosión y en la protección catódica.

Caja de inspección o estación de prueba: Dispositivo que permite monitorear el potencial de protección de la estructura conectada a los ánodos.

Caída óhmica (IR drop): Diferencia de potencial generada por la resistencia del electrolito (agua o suelo), que debe compensarse al interpretar mediciones de potencial de protección.

Criterio de protección catódica: Valores de potencial que aseguran que el acero está protegido frente a la corrosión. Según NACE SP0169, el más usado es **-850 mV CSE** o **-800 mV Ag/AgCl en agua de mar**.

Discontinuidades (Holiday): Defectos o poros en el recubrimiento dieléctrico que exponen el acero al electrolito, detectables mediante ensayos de alto o bajo voltaje (ASTM D5162 / NACE SP0188).

Espesor de película seca (DFT, por sus siglas en inglés): Espesor final de la capa de recubrimiento una vez curada, medido con equipos magnéticos según SSPC-PA2 .

Electrodo de referencia Ag/AgCl: Electrodo utilizado en ambiente marino para medir potenciales de protección catódica con relación estable y conocida .

Interferencia eléctrica: Alteración en los potenciales de protección causada por corrientes continuas o alternas de sistemas eléctricos o estructuras cercanas.


Perfil de anclaje: Rugosidad generada en la superficie metálica durante la preparación (chorro abrasivo o limpieza mecánica) que permite la adecuada adherencia del recubrimiento.

Recubrimiento Epóxico (Sigmashield 880): Sistema de recubrimiento autoimprimante, bicomponente, epoxi-poliamina, tolerante a superficies húmedas, diseñado para servicio marino y compatible con protección catódica .

Resistividad del medio: Propiedad eléctrica del suelo o agua que influye directamente en la demanda de corriente del sistema de protección catódica.

Tablestacado: Estructura de acero hincada en el terreno o fondo marino, utilizada como muro de contención.

Vida útil de diseño: Tiempo esperado durante el cual los ánodos y el sistema de recubrimiento garantizan la protección contra la corrosión, bajo condiciones de operación definidas.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

3.3 DOCUMENTOS OBJETO DE ANALISIS

- 7.5.8 CERTIFICADO DE CALIDAD ANODOS DE SACRIFICIO
- 7.5.10 ELECTRODO PERMANENTE DE REFERENCIA DE PLATA - CLORURO
- 7.5.1.1 CERTIFICADO DE CALIDAD TABLESTACADO AZ17-700-DOUBLE
- 7.2.6 BSGI-PT06-OT06-22 MONTAJE E HINCADO DE TABLESTACAS Rev. 1
- 7.4.1 ESPECIFICACIÓN TECNICA PREPARACIÓN Y APLICACIÓN RECUBRIMIENTO
- 7.4.5 BSGI-PT06-F01-OT06-22 REGISTRO INSPECCIÓN, LIMPIEZA, REVESTIMIENTO Y PINTURA
- 7.2.7 BSGI-PT07-OT06-22 INSTALACIÓN DE ANODOS DE SACRIFICIO EN TABLESTACAS Rev.1
- 7.4.6 INFORME TECNICO APLICACION DE RECUBRIMIENTO
- Copia de 7.4.6 INFORME TECNICO APLICACION DE RECUBRIMIENTO
- 7.0 BUZ-INF-CCCI-033-2022-0 INFORME FINAL Rev. 0

4 CONTEXTO


El presente diagnóstico se orienta a la evaluación del sistema de protección catódica (SPC) mediante ánodos de sacrificio de aluminio instalado en la estructura de tablestacado que conforma parte del muro de contención del Centro de Convenciones de Cartagena de Indias (CCCI), en el tramo comprendido entre los metros 87 y 127 de la línea perimetral.

El proyecto de reparación del muro de contención respondió a condiciones críticas de colapso parcial y socavación en la estructura existente, lo cual exigió la instalación de nuevas tablestacas de acero tipo AZ17-700 y GU14N S430GP, reforzadas con un sistema de recubrimiento epóxico marino (Sigmashield 880) y complementadas con un esquema de protección catódica a través de ánodos galvánicos de aluminio

Dentro de la documentación suministrada para este análisis se incluyen certificados de calidad de materiales (ánodos y tablestacas), procedimientos de instalación, informes técnicos de aplicación de recubrimientos, registros de inspección y el informe final de obra. No obstante, se resalta que no se allegó un documento de diseño específico del sistema de protección catódica. Es decir, no se dispone de memorias de cálculo que incluyan criterios de densidad de corriente de diseño, resistividad del medio, balance de masa anódica o estimación de vida útil bajo condiciones operativas.

Esta limitación impide realizar una validación directa de los criterios de diseño frente a normas internacionales (p. ej., NACE SP0169, DNV-RP-B401, ISO 15589-2). Sin embargo, a partir de la evidencia disponible de instalación, registros fotográficos, inspecciones QA/QC y la documentación técnica asociada, es posible llevar a cabo un análisis consistente sobre:

- La configuración del sistema instalado (tipo, cantidad y ubicación de ánodos).
- La compatibilidad entre el recubrimiento aplicado y el esquema de protección catódica.
- El cumplimiento general de criterios de protección establecidos en normas de referencia.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- La identificación de posibles debilidades, errores conceptuales o de implementación.
- La formulación de recomendaciones técnicas orientadas a la optimización y mantenimiento futuro del sistema.

De esta manera, el análisis que se presenta en este informe no busca sustituir un diseño detallado, sino evaluar la protección instalada en campo con base en la evidencia documental disponible, contrastándola con las mejores prácticas y normas internacionales aplicables.

Este contexto permite comprender que el análisis a desarrollar no se limita a la verificación del cumplimiento documental, sino que busca identificar posibles debilidades en el concepto de diseño, errores de implementación, interacciones entre recubrimiento y protección catódica, y proponer mejoras y recomendaciones a futuro para asegurar la integridad a largo plazo de la estructura.

En síntesis, este informe se convierte en una herramienta crítica para:

- Validar que el sistema actual se encuentra correctamente diseñado frente a normas de referencia.
- Detectar áreas de oportunidad para optimizar la eficiencia y uniformidad de la protección.
- Generar lineamientos de monitoreo y mantenimiento que aseguren el cumplimiento de la vida útil esperada de la estructura de tablestacado en ambiente marino.

5 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y SU PROTECCIÓN

5.1 Estructura de tablestacado a proteger


La estructura objeto de este diagnóstico corresponde al **muro de contención perimetral del Centro de Convenciones de Cartagena de Indias (CCCI)**, en el tramo comprendido entre los **metros 87 y 127**.

De acuerdo con el **Informe Final BUZ-INF-CCCI-033-2022-0** y los certificados de materiales, el muro está conformado por tablestacas de acero al carbono laminado en caliente, de tipo:

- **AZ 17-700 S430GP**, con profundidad de hincapié promedio de 14 m.
- **GU 14N S430GP**, con profundidad de hincapié promedio de 12 m, usadas en aletas de confinamiento.
- En total se instalaron aproximadamente **40 m lineales de tablestacado**, incluyendo la sección principal y los laterales de confinamiento.

Las tablestacas cumplen con el estándar **EN 10248-1/2** para perfiles laminados en caliente, con resistencia mecánica mínima de 430 MPa. Su sección tipo “Z” otorga alta rigidez a flexión, requerida para resistir cargas laterales del terreno y la presión hidrostática de la bahía.

El área expuesta a protección catódica corresponde a las caras sumergidas de las tablestacas, desde el nivel de marea hasta la profundidad de hincapié (12–14 m), con condiciones de **agua de mar altamente salina, oxigenada y con presencia de sólidos en suspensión**, factores que incrementan la agresividad corrosiva.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

5.2 Protección típica de tablestacados en ambiente marino

La práctica internacional (NACE SP0169, DNV-RP-B401) establece que las estructuras de tablestacado expuestas al agua de mar requieren **sistemas de control de corrosión combinados**, dado el ambiente severo:

- **Recubrimiento anticorrosivo:** normalmente un epoxi de alto espesor (300–600 μm , equivalentes a 12–24 mils), aplicado tras preparación de superficie a grado SSPC-SP10 (chorro abrasivo metal casi blanco) o, en casos de mantenimiento, SSPC-SP11 (limpieza mecánica).
- **Protección catódica galvánica:** instalación de **ánodos de sacrificio de aleación de aluminio o zinc**, soldados directamente a las tablestacas en la zona sumergida. Los ánodos se distribuyen a lo largo del perímetro, con peso y espaciamiento calculados según densidad de corriente requerida (normalmente 100–250 mA/m^2 en zonas de inmersión).
- **Monitoreo:** puntos de prueba y electrodos de referencia Ag/AgCl para verificar potenciales de protección en operación.

El procedimiento constructivo general consiste en:

1. **Preparación de la superficie metálica** de las tablestacas en taller o en sitio.
2. **Aplicación del recubrimiento** bajo condiciones controladas.
3. **Hincado de tablestacas** en el lecho marino, mediante grúa y plantilla guía.
4. **Instalación de ánodos galvánicos**, generalmente trapezoidales o cilíndricos, soldados mediante electrodo revestido o MIG, tanto en superficie (en tierra o sobre plataforma) como con cuadrillas de buzos.
5. **Pruebas de QA/QC:** espesores de recubrimiento, adherencia, discontinuidad, inspección de soldaduras y continuidad eléctrica.

5.3 Instalación civil en el proyecto CCCI


De acuerdo con la documentación revisada :

- **Preparación de superficie y recubrimiento:**

Se realizó limpieza mecánica SSPC-SP11 a los primeros 5 m de inmersión y en toda la longitud de las aletas de confinamiento. Se aplicó recubrimiento Sigmashield 880 a un espesor promedio de 22–30 mils, con controles de espesor (SSPC-PA2), adherencia (ASTM D4541, valores >500 psi) y pruebas de discontinuidad (ASTM D5162). Algunas discontinuidades fueron reparadas durante la inspección .

- **Hincado de tablestacas:**

El hincado se ejecutó con grúa montada sobre barcaza, utilizando plantilla guía para mantener alineación y verticalidad. La trazabilidad quedó registrada en los formatos de control de hinca

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- **Instalación de ánodos de sacrificio:**

Se instalaron 13 ánodos trapezoidales de aluminio de 21–22 lb, certificados bajo aleación Galvotec III . De estos, 10 se dispusieron en el lado marino y 3 en el lado interno.

- Los ánodos en superficie fueron soldados mediante electrodo E7018, con limpieza previa de las zonas de contacto.
- Los ánodos en zona sumergida fueron instalados por cuadrillas de buzos, siguiendo procedimientos de buceo comercial (ADC).
- Cada unión soldada fue inspeccionada visualmente por QA/QC, con registro fotográfico
-

- **Monitoreo:**

Se instaló una **caja de inspección** (estación de prueba) para el seguimiento del sistema de protección catódica .

5.4 Descripción Sistema de Protección Catódica Instalado

Los ánodos utilizados corresponden a ánodos galvánicos de aluminio tipo trapezoidal de 21–22 lb, fabricados por Galvotec Alloys, Inc., bajo la designación Galvotec III.

Composición química (peso %):

- **Aluminio (Al):** Balance
- **Zinc (Zn):** 3.9 – 4.4 %
- **Indio (In):** 0.01 – 0.015 %
- **Otros elementos (Fe, Si, Cu, etc.):** ≤ 0.10 %

Propiedades electroquímicas:


- Potencial en agua de mar: $\approx -1,050$ mV vs. Ag/AgCl
- Capacidad de corriente: 2,500 Ah/kg (aprox.)
- Factor de eficiencia: ≥ 90 %

Esta aleación se selecciona porque no se pasiva en agua de mar y mantiene un potencial más negativo que el acero, garantizando la protección catódica de la estructura.

5.4.1 Cantidad y disposición de ánodos en el proyecto

Según el Informe Final del proyecto y el procedimiento de instalación de ánodos :

- Se instalaron 13 ánodos en total.
 - 10 ánodos en el lado marino (costado externo del tablestacado).
 - 3 ánodos en el lado tierra (costado interno del tablestacado).

 Protección Catódica— de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- La instalación se realizó soldando los ánodos directamente a las tablestacas con electrodo revestido E7018, previa limpieza de la zona de contacto.
- En el lado marino, parte de los ánodos fueron instalados mediante trabajo submarino con buzos calificados, y el resto desde plataforma superficial.
- En el lado tierra, los ánodos fueron instalados desde superficie mediante andamios y plataformas de trabajo.

5.4.2 Distancia entre ánodos

- El informe y los procedimientos no especifican una distancia exacta en metros entre ánodos, pero dado que se instalaron 10 ánodos distribuidos en aproximadamente 40 m lineales de tablestacado en el lado marino, se infiere un espaciamiento promedio de ~4 m por ánodo en ese costado.
- En el lado tierra, con 3 ánodos para la misma longitud, el espaciamiento promedio es de ~13 m por ánodo, lo que evidencia una menor densidad de protección en esa cara.

6 DIAGNÓSTICO TÉCNICO DEL RECUBRIMIENTO APLICADO

6.1.1 Alcance del diagnóstico


El análisis corresponde a una evaluación documental de la capacidad protectora real del recubrimiento aplicado a las tablestacas, sin pruebas de campo adicionales. Se parte del supuesto de que el contratista ejecutó la aplicación siguiendo estrictamente las especificaciones del fabricante (PPG), incluyendo preparación de superficie, mezcla y aplicación, tiempos de repinte, control de condiciones ambientales, verificación de espesores de película seca (DFT), ensayos de adherencia y pruebas de discontinuidad (*holiday*), conforme los registros allegados para el análisis y los procedimientos listados en el dossier de calidad.

6.1.2 Evidencia de aplicación y calidad (según registros)

- **Producto y esquema:** se aplicó un recubrimiento epóxico de alto espesor, tipo Sigmashield 880, auto imprimante, con resultados de DFT en el rango de 20–30+ mils y valores de adherencia superiores a 500 psi.
- **Pruebas de discontinuidad:** se identificaron y repararon defectos puntuales, de modo que las superficies quedaron libres de “holiday” antes del hincado.
- **Condiciones de aplicación:** se registraron controles de temperatura, humedad y punto de rocío, y la preparación de superficie se realizó bajo estándares SSPC, con respaldo en reportes fotográficos.

Conclusión parcial: la aplicación inicial alcanzó la efectividad teórica para la cual fue diseñado el esquema:

- Espesores dentro de rango \Rightarrow barrera continua frente a oxígeno, agua y cloruros.
- Adherencia suficiente \Rightarrow baja probabilidad de delaminación inicial.
- Reparación de defectos \Rightarrow reducción de puntos anódicos antes del montaje.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

6.1.3 Efectos inevitables del hincado y acople entre láminas

El hincado modifica sustancialmente la condición real del recubrimiento. El contacto con suelo y con las propias secciones de tablestaca produce:

- **Raspado en el lado tierra y en la penetración en suelo:** abrasión con finos, grava y bordes granulares que generan rayas y pérdida local de espesor, con micro astillamientos en aristas y cordones.
- **Rozamiento entre locks y traslapes:** contacto acero-acero que provoca rayones lineales y desgaste localizado, exponiendo parcialmente el sustrato.
- **Vibraciones e impactos durante hınca:** inducción de micro fisuras no visibles, relevantes en condiciones de inmersión parcial e intermareal.

Impacto neto: el sistema pasa de una película continua a una barrera heterogénea, con defectos dispersos. Estos sitios acortan el tiempo a corrosión y, en rayas longitudinales, favorecen la formación de celdas bajo película, ya que el área recubierta circundante actúa como cátodo frente al acero expuesto. En este sentido el uso de la protección catódica es fundamental a nivel de complemento para el control de la corrosión electroquímica.


6.1.4 Zona de “splash” (intermareal aireada) y borde de marea

La franja de *splash* o zona intermareal representa el sector más severo para la corrosión de tablestacas expuestas a ambientes marinos. A diferencia de las zonas permanentemente sumergidas —donde el recubrimiento se encuentra en contacto estable con el electrolito y la protección catódica puede actuar con relativa eficiencia— o de las zonas enterradas, donde las condiciones son más constantes, la franja de salpicadura está sometida a condiciones altamente dinámicas y agresivas.

En esta zona concurren simultáneamente varios factores críticos:

- **Humectación intermitente:** el acero se moja y se seca en ciclos rápidos, lo que propicia procesos de oxidación acelerados y dificulta que la protección catódica mantenga una polarización constante.
- **Alta oxigenación:** la acción del oleaje y la exposición al aire incrementan la disponibilidad de oxígeno, potenciando la formación de celdas anódicas.
- **Depósitos salinos y cloruros concentrados:** durante el secado, las sales disueltas se cristalizan en la superficie, generando ambientes de elevada higroscopicidad que mantienen condiciones de humedad local incluso en ausencia visible de agua.
- **Radiación solar y variaciones térmicas:** la expansión y contracción de la película de recubrimiento inducen tensiones mecánicas que favorecen micro fisuración o pérdida de adherencia.
- **Impacto mecánico:** la acción de olas, partículas en suspensión e incluso objetos flotantes puede erosionar o dañar mecánicamente la película de recubrimiento.

La consecuencia directa es que el recubrimiento aplicado en la zona de *splash* tiene una importancia muy superior respecto a otras áreas. Allí, aun pequeños defectos generados durante el hincado o por

 Protección Catódica— de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

abrasión en servicio se convierten en puntos críticos de inicio de picaduras o corrosión localizada. El papel de la protección catódica se ve además limitado: al no existir un electrolito continuo y homogéneo, la corriente de los ánodos no siempre logra establecer una película protectora estable en toda la superficie metálica.

En síntesis, la zona de *splash* un punto crítico del sistema: es el sector donde el recubrimiento cumple un papel insustituible ya que no cuenta con el complemento de la protección catódica.

6.1.5 Interacción recubrimiento–protección catódica (PC)

El comportamiento combinado de ambos sistemas es el siguiente:


- **Demanda de corriente:** los daños multiplican el área expuesta, incrementando la corriente necesaria para mantener el criterio de protección ($\leq -0,80$ V vs Ag/AgCl).
- **Distribución y geometría:** los defectos y la complejidad geométrica (locks, pliegues, rincones) generan gradientes de potencial y zonas con menor densidad de corriente, comprometiendo la uniformidad de la polarización.
- **Criterios de PC:** con recubrimiento íntegro, la PC opera a baja densidad de corriente; con daños, redistribuye su corriente y puede cumplir los criterios, pero con mayor consumo anódico y riesgo de subprotección localizada.
- **Efecto práctico:** el cumplimiento del criterio de potencial sigue siendo posible, siempre que haya corriente suficiente y adecuada geometría de instalación para cubrir uniformemente el área expuesta.

6.2 Lectura por zonas con respecto a la protección catódica

- **Cara mar (inmersión parcial e intermareal):** buena efectividad donde el recubrimiento permanece intacto; los defectos derivados de hincas elevan la demanda local de PC, especialmente en el límite de la splash.
- **Cara tierra (relleno granular y transición suelo-agua):** el raspado es más severo durante hincas; los sitios expuestos en contacto con humedad y cloruros del relleno actúan como sumideros de corriente de PC.
- **Sección enterrada:** cuando está íntegro, reduce corrientes de fuga; en presencia de cortes/raspados, aumenta la corriente consumida y se potencia el riesgo de corrosión bajo película.

6.3 Diagnóstico general

1. La aplicación inicial del recubrimiento fue conforme a especificaciones, con valores de DFT, adherencia y *holiday* satisfactorios \Rightarrow **alta efectividad teórica**.
2. El hincado deteriora inevitablemente la película protectora \Rightarrow **efectividad reducida en servicio**.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

3. La **zona splash** es el sector más crítico: los daños en esta franja representan un **alto riesgo de corrosión localizada**, dado que la PC tiene capacidad limitada para compensar en condiciones intermareales.
4. La PC sí compensa defectos en inmersión y enterrado, siempre que exista corriente suficiente y buena geometría de instalación \Rightarrow **criterios de protección alcanzables**, pero con mayor corriente requerida y riesgo de gradientes.
5. A nivel global, el sistema combinado (recubrimiento + PC) puede cumplir los criterios de protección, pero la demanda de corriente y la distribución de potencial quedan altamente condicionadas por los daños post-hinca y por la exposición en splash.

7 DIAGNÓSTICO TÉCNICO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

7.1 Alcance del análisis

El presente diagnóstico corresponde a la evaluación del sistema de protección catódica (SPC) instalado en el tablestacado perimetral entre los metros 87 y 127. El análisis se realiza con base en la documentación técnica disponible, contrastada con los lineamientos de NACE/AMPP SP0169 (AMPP 2169), ISO 15589-2 y DNV-RP-B401, sin realizar pruebas de campo adicionales.

7.2 Configuración instalada


- **Ánodos galvánicos:** aleación Al-Zn-In (Galvotec III), masa unitaria \approx 10 kg (21–22 lb).
- **Cantidad:** 13 ánodos \rightarrow 10 en el lado mar (\sim 100 kg) y 3 en el lado tierra (\sim 30 kg).
- **Instalación:** soldados directamente al acero, sin cables ni backfill.
- **Geometría:** distribución irregular; espaciamiento promedio 4 m en lado mar y 13 m en lado tierra.
- **Geotextil:** colocado en el relleno del lado tierra, cuya naturaleza dieléctrica/no dieléctrica debe validarse por posible apantallamiento.
- **Sección enterrada:** \sim 3 m de los 12 m de hinca permanecen en suelo; \sim 9 m en agua de mar.

7.3 Criterios normativos de protección

En ambiente marino, los potenciales deben medirse con **electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)**:

- **-0,80 V vs Ag/AgCl:** valor mínimo para considerar la estructura protegida.
- **-1,10 V vs Ag/AgCl:** límite superior para evitar sobreprotección.

El uso de electrodos Cu/CuSO₄ no es aplicable en agua de mar debido a la interacción con cloruros y a la inestabilidad del electrodo.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

7.4 Estimación de la demanda de corriente

7.4.1 Superficie expuesta (cálculo estimado)

Zona	Dimensión (m)	Área (m ²)
Lado mar sumergido	40 × 9	360
Lado mar enterrado	40 × 3	120
Lado tierra enterrado	40 × 3	120
Total estimado	600	

7.4.2 Densidades de corriente adoptadas

- Zona agua (inmersión + splash): 150 mA/m².
- Zona enterrada (mar y tierra): 40 mA/m².

7.4.3 Capacidad anódica instalada y disponible

- **Masa instalada:** 130 kg.
- **Capacidad electroquímica de Al-Zn-In (90 % utilizable):** ≈ 2 250 Ah/kg.
- **Capacidad total:** 130 × 2 250 = **292 500 Ah.**
- **Corriente media disponible a 10 años (87 600 h):**


$$292\,500 / 87\,600 \approx \mathbf{3,34\,A.}$$

7.4.4 Configuración instalada y condiciones de servicio

- **Ánodos:** de aleación Al-Zn-In, soldados directamente a las tablestacas.
- **Cantidad / masa total:** 13 unidades (≈ 130 kg en total), de los cuales 10 en lado mar (~100 kg) y 3 en lado tierra (~30 kg).
- **Instalación:** sin cables ni backfill, geometría no uniforme (espaciamientos irregulares).
- **Sección expuesta:** hincas total de 12 m, con 9 m en agua y 3 m en enterramiento. El lado tierra también presenta 3 m enterrados.
- **Geotextil:** instalado como confinamiento del relleno, posible comportamiento dieléctrico que incrementa la resistencia de paso iónico.
- **Fecha de instalación:** año 2022

7.4.5 Criterios normativos de protección

- **Electrodo de referencia:** en ambiente marino se debe usar **Ag/AgCl (seawater)**.
- **Potencial de protección:**
 - ≤ -0,80 V vs Ag/AgCl: estructura protegida.
 - Límite superior: -1,10 V vs Ag/AgCl, para evitar sobreprotección y desprendimiento de hidrógeno.

 Protección Catódica de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- El uso de Cu/CuSO_4 **no es aplicable** en agua de mar por inestabilidad en cloruros.

7.4.6 Estimación de demanda de corriente

7.4.6.1 Parámetros de cálculo

- **Áreas:**
 - Lado mar (agua): 360 m².
 - Lado mar enterrado: 120 m².
 - Lado tierra enterrado: 120 m².
 - **Total:** 600 m².
- **Densidades de corriente (CP4):**
 - Agua de mar: 150 mA/m² (dentro del rango CP4: 54–269 mA/m²).
 - Enterrado (suelos húmedos): 40 mA/m² (rango CP4: 27–65 mA/m²).
- **Eficiencia de recubrimiento (η):** 80 % → fracción expuesta = 20 %.
- **Capacidad electroquímica Al–Zn–In utilizable:** 2 250 Ah/kg.
- **Vida objetivo:** 10 años (87 600 h).

7.4.6.2 Cálculo de corriente requerida

- **Lado mar (agua):** $0,150 \times 360 \times 0,20 = 10,8 \text{ A}$.
- **Enterrado (mar + tierra):** $0,040 \times 240 \times 0,20 = 1,92 \text{ A}$.
- **Total demanda:** **12,72 A**.

7.4.6.3 Masa anódica necesaria


- Carga a 10 años = $12,72 \times 87\,600 = 1\,114\,272 \text{ Ah}$.
- Masa requerida = $1\,114\,272 / 2\,250 \approx 495 \text{ kg}$.

7.4.6.4 Capacidad instalada

- Masa instalada: 130 kg → 292 500 Ah.
- Corriente media disponible a 10 años = $292\,500 / 87\,600 = 3,34 \text{ A}$.
- **Déficit:** 130 kg (instalados) frente a 495 kg (requeridos) → solo **26 %** de lo necesario.

7.4.6.5 Vida útil real estimada

Vida efectiva $\approx 292\,500 / (12,72 \times 8\,760) \approx 2,6 \text{ años}$.

 Protección Catódica de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

7.5 Observaciones críticas

7.5.1 Concepción de diseño

El cálculo de corriente subestimó la fracción expuesta del recubrimiento y la agresividad de la zona splash/intermareal. El sistema partió con una masa anódica 3 a 4 veces menor a la requerida para 10 años.

7.5.2 SPC Lado mar

- Solo 100 kg instalados para 480 m² expuestos.
- Con 80 % de eficiencia del recubrimiento, se requerían ~495 kg.
- El déficit estructural anticipa un agotamiento prematuro de los ánodos en <3 años.

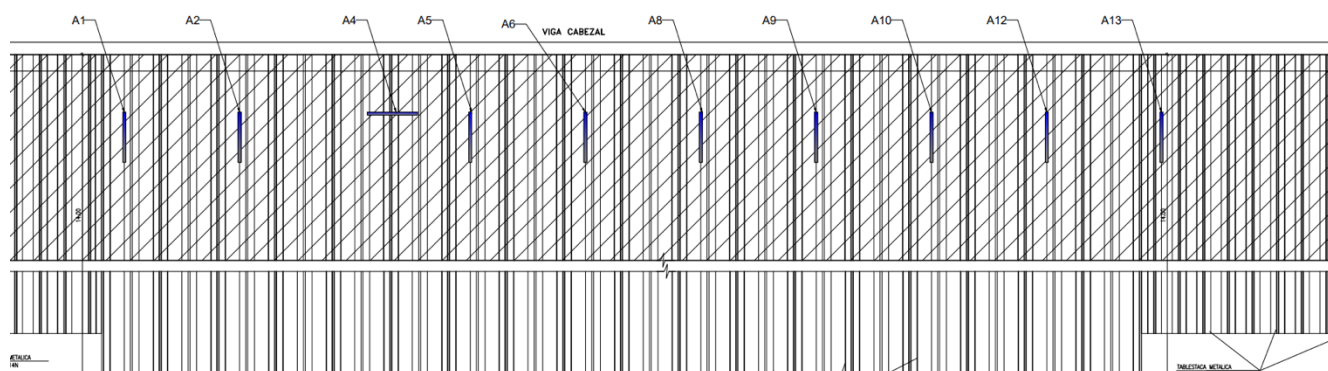


Ilustración 1 Esquema instalación ánodos lado mar

7.5.3 SPC Lado tierra

- Uso de ánodos de aluminio sin backfill en suelo: error conceptual.
- El aluminio tiende a pasivarse en enterramiento y no entrega corriente sostenida.
- La masa (30 kg) es mínima frente a 120 m² de acero enterrado.
- Solo 3 ánodos (~30 kg), aleación de aluminio y sin backfill.
- El aluminio no es adecuado para enterramiento directo
- La masa anódica es insignificante frente al área (120 m²).
- La expectativa de protección efectiva es nula o marginal.


	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	



Ilustración 2 Ánodos de sacrificio lado tierra instalados

7.5.4 Geotextil

De ser dieléctrico, actúa como apantallamiento parcial, limitando la difusión iónica y reduciendo la efectividad de la PC en zonas enterradas del lado tierra. Se debe tener en cuenta también para futuras implementaciones.

7.6 Evidencia de inspección 2024

Durante inspección reciente (2024), se constató que los ánodos del lado mar se encuentran prácticamente consumidos, apenas dos años después de la instalación (2022).

Este hallazgo corrobora en campo lo que mostraban los cálculos:

- La masa anódica fue insuficiente desde el diseño.
- La vida útil real del sistema es de 2–3 años, muy por debajo de los 10 años requeridos.
- La estructura ya ha perdido la capacidad de mantener potenciales de protección en varias zonas críticas.



 Protección Catódica— de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	



Ilustración 3 Ánodos lado mar consumidos en 2024

7.7 Diagnóstico del Electrodo de Referencia Instalado

Durante la revisión documental y la inspección en sitio se identificó que el electrodo permanente de referencia instalado corresponde a un modelo diseñado para servicio en agua de mar (Ag/AgCl – seawater).

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- Este tipo de electrodos está formulado para operar inmerso en agua de mar, donde el electrolito es líquido y de baja resistividad.
- En enterramiento en suelo o relleno granular, la respuesta de un electrodo marino es inadecuada: puede presentar potenciales erráticos, inestabilidad a largo plazo y falsas lecturas debido a la falta de contacto iónico apropiado.
- Para monitoreo en lado tierra o zonas enterradas, se requieren electrodos permanentes de referencia diseñados para suelo, normalmente de Ag/AgCl para suelo o Cu/CuSO₄ (cuando el medio es netamente terrígeno y no agua de mar).



Ilustración 4 Electrodo de referencia instalado en lado tierra, en la caja de inspección

7.7.1 Implicaciones


- La instalación de un electrodo de tipo marino en suelo impide contar con datos confiables de potencial en el lado tierra, limitando la verificación de cumplimiento de criterios de NACE/AMPP SP0169.
- la instrumentación para monitoreo no es la adecuada para la confiabilidad de la data

Para lado tierra / enterrado: se deben asegurar electrodos permanentes de referencia para suelo (Ag/AgCl-soil). Estos permiten un monitoreo confiable de potencial a largo plazo en condiciones de enterramiento.

Para lado mar / sumergido: las mediciones de potencial deben realizarse con un electrodo portátil Ag/AgCl (seawater) en cada rutina de inspección, colocado en contacto directo con el agua de mar en el punto de interés

7.8 Diagnóstico General SPC

1. El sistema presenta un déficit estructural de diseño: 130 kg instalados
2. La vida útil real es de apenas 2,6 años, confirmado por el consumo casi total de los ánodos del lado mar en 2024.

 Protección Catódica de Colombia	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

3. El lado tierra prácticamente no está protegido debido a la selección incorrecta de ánodos de sacrificio
4. No se cuenta con una distribución geométrica adecuada en cuanto a la ubicación de los ánodos, se está dejando sin considerar la zona enterrada de la tablestaca y por lo tanto el alcance se prevé limitado

8 PLAN DE ACCIÓN Y RECOMENDACIONES

El principal plan de acción se debe enfocar en desarrollar una ingeniería de detalle del sistema de protección catódica (PC) para el tablestacado, considerando dos alternativas técnicas (galvánica e ICCP) y su evaluación técnico-económica, con enfoque de integración por sectores del complejo (no solo tramos aislados), para garantizar uniformidad de polarización, minimizar interferencias y optimizar el costo total de ciclo de vida.

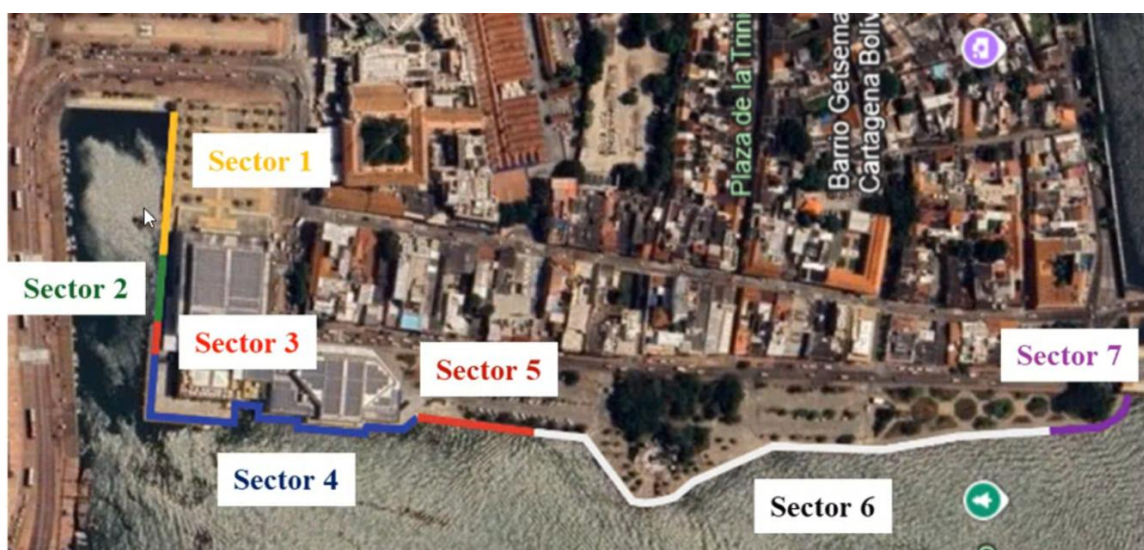



Ilustración 5 Sectores de barrera de contención CCCI

8.1 Alcance técnico de la ingeniería de detalle


1. **Base de diseño:**
 - Densidades de corriente por ambiente (mar/enterrado) y **fracción expuesta** derivadas del estado real del recubrimiento.
 - Criterios de potencial con **Ag/AgCl (seawater)** en mar; control de IR-drop (instant-off/depolarización).
 - Vida de diseño **15–30 años** (definir escenario), con márgenes de corriente $\geq 25\text{--}40\%$.
2. **Alternativa 1 – Galvánica (ánodos de sacrificio):**
 - **Lado mar:** diseño por masa/corriente/vida con aleaciones Al-Zn-In o Zn marino; distribución **uniforme** y refuerzo en **zona splash** y en uniones/locks.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- **Lado tierra (enterrado): ánodos preempacados de Zn** en suelo/arena húmeda con cloruros (evitar Mg en estos suelos salvo justificación), **siempre con backfill**; espaciamientos calculados para cubrir toda la espalda del muro.
- Revisión del **geotextil**: si es **dieléctrico**, considerar ventanas/conductos iónicos o ánodos ubicados de manera que eviten **apantallamiento**.
- 3. **Alternativa 2 – Corriente impresa (ICCP):**
 - **Ánodos marinos** (MMO/Ti en “sleds” o distribuidos) con **fuentes (rectificadores)**, control de voltaje/corriente.
 - **Suelos/espalda del muro**: lechos anódicos distribuidos con **backfill conductivo** (coque calcinado, bentonita/yesso según diseño), alejados de la estructura para uniformidad.
 - **Interferencias**: estudio de **interacción eléctrica** con drenajes, equipos cercanos, puesta a tierra, embarcaderos y otras estructuras metálicas del complejo; definir **bonds** y drenajes si aplica.
 - **Protecciones de cableado** (HMWPE/HALAR o HMWPE/Kynar) en enterrado, cajas de prueba, sellos y pasamuros.
- 4. **Integración por sectores del complejo:**
 - Definir **macro-zonas** eléctricamente coherentes (muelles, pantalanes, muros contiguos, cruces metálicos), para un diseño **holístico** que evite “islas” de PC, **interferencias** y sobrecostos posteriores.
 - Documentar **expansiones futuras** (capacidad de ampliación de masa anódica o capacidad de ICCP).
- 5. **Modelación computacional (obligatoria):**
 - **BEM/FEM** (método de elementos de frontera o finitos) para predecir **distribución de potencial y densidad de corriente**, factor de **uniformidad (UI)**, efectos de **sombreo** (locks, aristas) y del **geotextil**.
 - Entregables: mapas de **potencial (Ag/AgCl)**, **corriente anódica**, **gradientes IR**, y **cobertura** por escenarios (mareas, resistividad, degradación del recubrimiento con el tiempo).
 - Criterio de aceptación: ≥ 95 % del área dentro del rango objetivo de potencial en condiciones de diseño (y ≥ 90 % en escenarios de punta).
- 6. **Correcciones de fondo (selección/ubicación/ cantidad):**
 - **Reemplazar** ánodos agotados del lado mar y **normalizar espaciamientos**.
 - **Eliminar** ánodos de **Al** en suelo; instalar **Zn preempacado** (o Mg preempacado solo si el estudio lo justifica).
 - **Rediseñar** la malla anódica (galvánica o ICCP) para cubrir **zona splash, enterrados y distales**.
 - **Revisar el geotextil**: si es dieléctrico, **diseñar bypass** iónico o acomodo de ánodos y puntos de medida que lo mitiguen.

8.2 Monitoreo y puntos de medida

1. **Electrodos permanentes de referencia (lado tierra):**
 - **Ag/AgCl para suelo** (o Cu/CuSO₄ si el medio es estrictamente terrígeno), instalados a profundidad y distancia de la estructura que minimice IR.

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- **En mar:** medición de rutina con **Ag/AgCl (seawater) portátil** en cada campaña; considerar electrodos permanentes marinos si se justifica (pilas/profundidades críticas).
- 2. **Probetas de corrosión y testigos:**
 - **Cupones ER/LPR** (según disponibilidad) y **cupones de acero** equivalentes al sustrato, conectados/desconectables, ubicados en **splash**, inmersión y enterrado.
 - **Cupones de polarización** para medir **instant-off** local y validar criterios libres de IR.
- 3. **Cajas de prueba y cableado:**
 - Estaciones con bornes para lecturas de potencial, corriente anódica, cupones, bonds e interferencias.
 - **Cables** HMWPE/HALAR o HMWPE/Kynar para enterrado/ambientes con cloruros.

8.3 Puesta en servicio (commissioning)

- **Galvánica:** verificación de **potenciales** (Ag/AgCl), corrientes anódicas y **uniformidad**, con registro inicial “línea base”.
- **ICCP:** puesta en marcha por etapas (**ramp-up de voltaje**), curvas de **polarización**, **instant-off** y pruebas de **depolarización** (24–48 h) en puntos clave.
- **Criterios de aceptación:** porcentaje de área en criterio, gradientes IR aceptables, corrientes por ánodo/fuente dentro de ventanas de diseño.


8.4 Programa de monitoreo y mantenimiento (conforme normativa)

Frecuencias sugeridas (puedes listarlas como “mínimos” en el plan):

- **Mensual (ICCP):** registro de **rectificadores** (V, I), alarmas, consumo y revisión visual básica (accesos/daños).
- **Trimestral (galvánica/ICCP):** perfiles de **potencial Ag/AgCl** por tramos (splash, inmersión, enterrado), lectura de **cupones** y **electrodos permanentes**; revisión fotográfica de **ánodos** expuestos.
- **Semestral:** **instant-off** en puntos críticos; **depolarización** selectiva (≥ 100 mV donde aplique) para confirmar protección efectiva.
- **Anual:** levantamiento **integral de potenciales** (perfil completo del sector/sector integrado del complejo), **balance de corriente** (por ánodo/fuente), **inspección de recubrimiento** en *splash* y **mediciones de espesores por ultrasonido (UT)** en puntos testigo.
- **Cada 2–3 años:** evaluación detallada con **modelación actualizada** (BEM/FEM), recalibración de parámetros (resistividad, fracción expuesta), y **plan de reposición de ánodos** o ajuste de set-points (ICCP).

KPIs/criterios de desempeño:

- ≥ 95 % del área protegida dentro del criterio de potencial objetivo; **ninguna** bolsa sistemática de subprotección (según mapas de potencial).
- **Consumos anódicos** acordes a la curva de vida (galvánica)

	INFORME DE INGENIERIA	
	INFORME DIAGNOSTICO SISTEMA DE PROTECCION CATODICA TABLESTACA CENTRO DE CONVENCIONES SECTOR 2	

- **Alertas:** caída de potencial sostenida, crecimiento anómalo de corriente, drift de electrodos permanentes.

8.5 Evaluación técnico-económica (TCO)

- **Comparar:**
 - **Opción galvánica** (CAPEX moderado, OPEX bajo, mayor masa y reemplazos periódicos, sensibilidad a splash).
 - **Opción ICCP** (CAPEX mayor, OPEX de energía/inspección, **control activo y ajustable**, mejor cobertura en geometrías complejas/splash).
- Incluir **costo de ciclo de vida** (15–30 años), **riesgos** (interferencias, accesos, clima, expansión), **ventanas de parada** y **costos de reposición**.