

Coordinación Académica del Posgrado
Dirección de Desarrollo de Talento

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Trabajo de Investigación de Doctorado

Desarrollo de una metodología para la detección de daño en plataformas marinas fijas por medio de análisis de vibraciones

M. I. Francisco Cisneros

Directores: Dr. Iván Félix González y Dr. Rolando Salgado Estrada

Periodo: Invierno 2025

Introducción y Alcance

- **Contexto:** Avances finales previos a la defensa de tesis (Evaluación de 7º Semestre).
- **Problemática:**
 - Crisis de mantenimiento en infraestructura envejecida.
 - "Data Scarcity": Escasez de datos reales de daño que inviabiliza el uso puro de algoritmos de Deep Learning.
- **Solución Propuesta:**
 - Hibridación de Algoritmos Genéticos (AG) con Modelos de Elemento Finito (FEM).

Flujo General

Metodología Propuesta (1/3): Flujo General

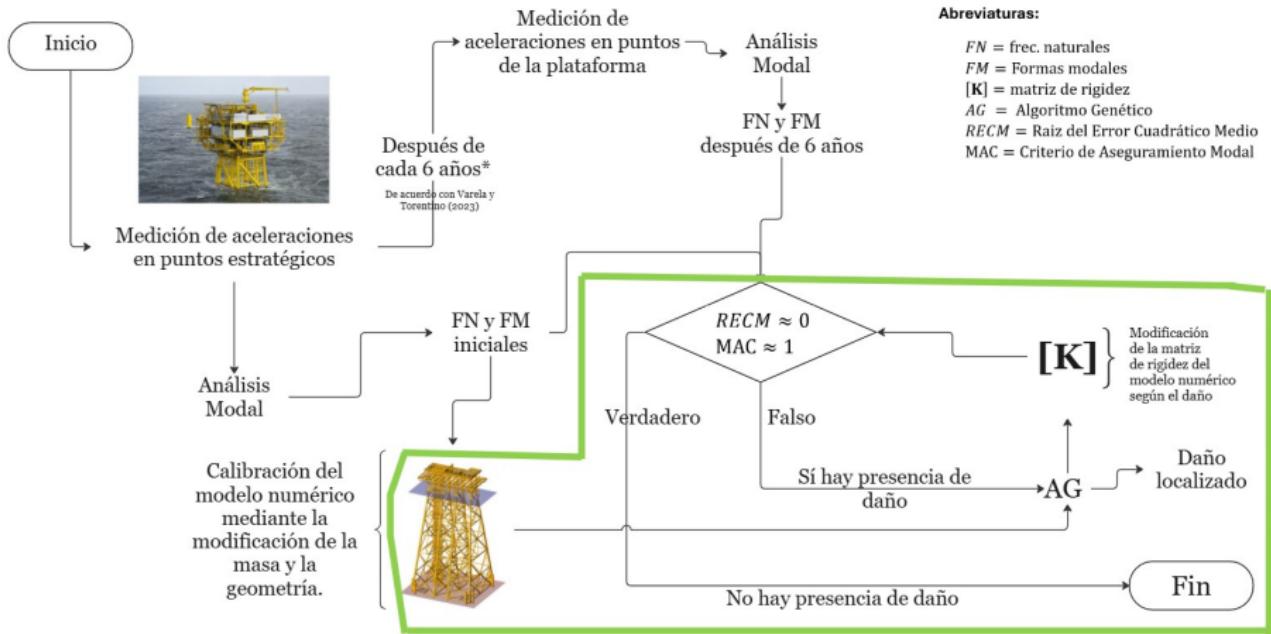


Figura: Flujo de identificación en plataformas reales.

Algoritmo Genético

Metodología Propuesta (2/3): Esquema Computacional

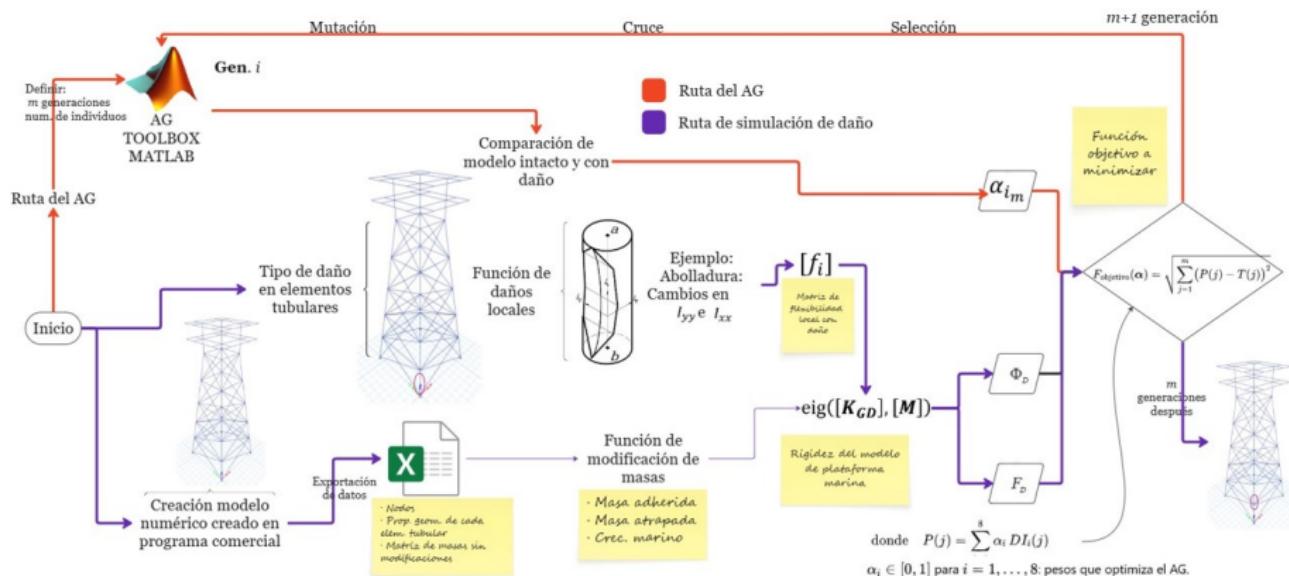


Figura: Esquema computacional del AG.

Algoritmo Genético

Metodología Propuesta (3/3): El Algoritmo Genético

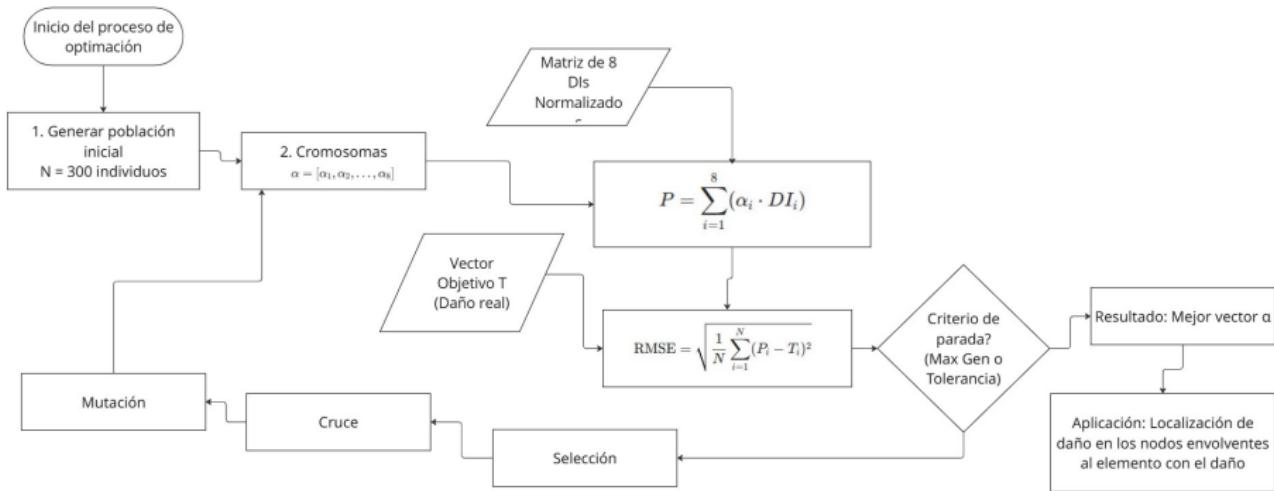


Figura: Mecánica del AG: función objetivo y operadores genéticos.

Indicadores Vibratorios

Fusión de Datos: Indicadores Vibratorios (DI)

Estrategia de Fusión: El AG no evalúa un solo parámetro, sino que optimiza un vector de pesos α para minimizar el error mediante una **suma ponderada** de 8 indicadores distintos:

$$\text{Función Objetivo} \approx \min \sum_{j=1}^8 \alpha_j \cdot DI_j \quad (1)$$

Basados en Modos (ϕ)

- **DI_1 (COMAC):** Correlación de vectores modales.
- **DI_2 (Diff Abs):** Diferencia absoluta de formas modales.
- **DI_3 (Razón Rel):** Relación entre vectores dañados e intactos.

Basados en Flexibilidad (F)

- **DI_4 (Diff Flex):** Cambio en la diagonal de la matriz.
- **DI_5 (Razón Flex):** Relación de flexibilidades.
- **DI_6 (Var %):** Porcentaje de variación.
- **DI_7 (Z-Score):** Estandarización estadística.
- **DI_8 (Probabilidad):** T. Gaussiana

Formulación Matemática: Indicadores Modales ($DI_1 - DI_3$)

1. COMAC (DI_1): Evalúa la correlación punto a punto de los modos. (1 = Correlación perfecta, 0 = Sin correlación).

$$DI_1(j) = 1 - \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^{N_m} |\phi_{u,ij}| |\phi_{d,ij}|\right)^2}{\sum_{i=1}^{N_m} \phi_{u,ij}^2 \sum_{i=1}^{N_m} \phi_{d,ij}^2}} \quad (2)$$

2. Diferencia Absoluta (DI_2) y Razón Relativa (DI_3): Cuantifican el desplazamiento de los vectores modales ϕ .

$$DI_2(j) = \mathcal{R}_j \left(\sum_{i=1}^{N_m} |\phi_{u,i} - \phi_{d,i}| \right) \quad (3)$$

$$DI_3(j) = \mathcal{R}_j \left(\sum_{i=1}^{N_m} \left| \frac{\phi_{d,i}}{\phi_{u,i} + \epsilon} - 1 \right| \right) \quad (4)$$

*Donde u es estado intacto, d dañado y ϵ es un factor de regularización.

Indicadores Vibratorios

Formulación Matemática: Flexibilidad y Estadística ($DI_4 - DI_8$)

Basados en la Matriz de Flexibilidad ($\mathbf{F} \approx \Phi\Omega^{-2}\Phi^T$):

- **Diferencia (DI_4):** $|\text{diag}(\mathbf{F}_d) - \text{diag}(\mathbf{F}_u)|$
- **Razón (DI_5):** $\left| \frac{\text{diag}(\mathbf{F}_d)}{\text{diag}(\mathbf{F}_u) + \epsilon} - 1 \right|$
- **Variación % (DI_6):** Versión porcentual de la razón ($DI_5 \times 100$).

Estandarización Estadística (DI_7 y DI_8): Normalizan el daño asumiendo una distribución Gaussiana para resaltar anomalías (outliers).

$$DI_7(j) = \frac{\Delta F_j - \mu_{\Delta F}}{\sigma_{\Delta F}} \quad \rightarrow \quad DI_8(j) = 1 - 2(1 - \Phi_{\text{cdf}}(|DI_7|)) \quad (5)$$

Efectos Inerciales y Ambientales (1/2)

Consideraciones: Inclusión de masa añadida hidrodinámica y crecimiento marino (biofouling).

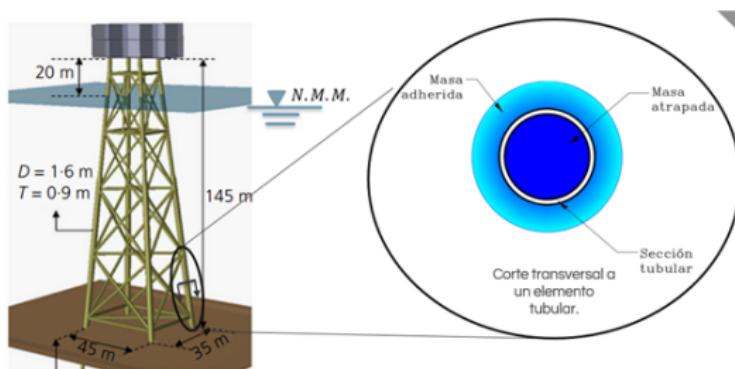


Figura: Detalle de Masa Hidrodinámica (Adherida y Atrapada).

Efectos Iniciales y Ambientales (2/2)

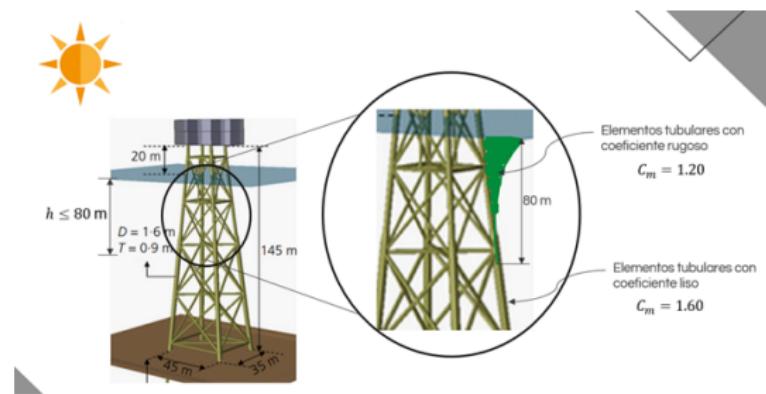


Figura: Modelado del Crecimiento Marino (Biofouling) y coeficientes rugosos.

Fuente: American Petroleum Institute. (2014). *Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms - working stress design*. Washington, Estados Unidos.

Modelado de Daño: Corrosión Longitudinal

Caracterización Geométrica: Se modela como una reducción uniforme del espesor de pared (t) aplicada en tramos discretos del elemento, simulando la pérdida de material en zonas críticas (ej. *Splash Zone*).

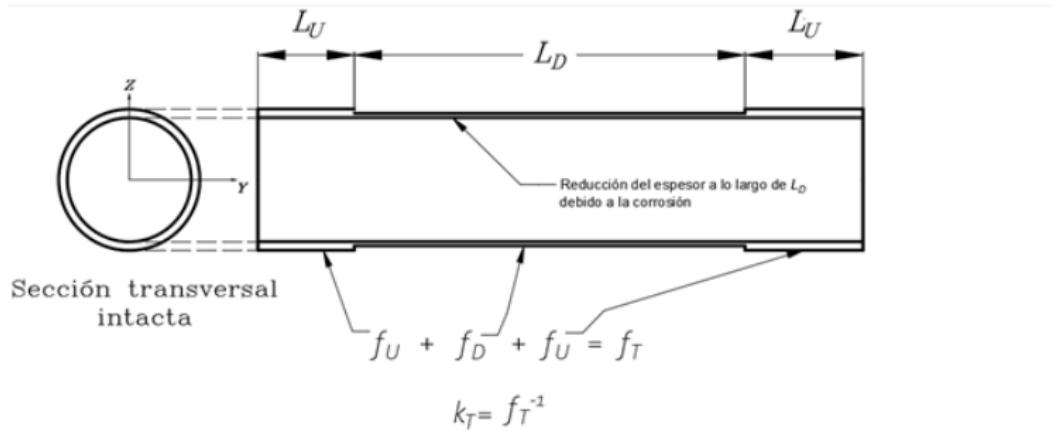


Figura: Perfil de reducción de espesor (t_{loss}) a lo largo del elemento tubular.

Modelado de Daño: Abolladura

Caracterización Geométrica: Se modela como una imperfección geométrica local definida por la profundidad (d/D) y la longitud del daño, alterando la inercia local del elemento.

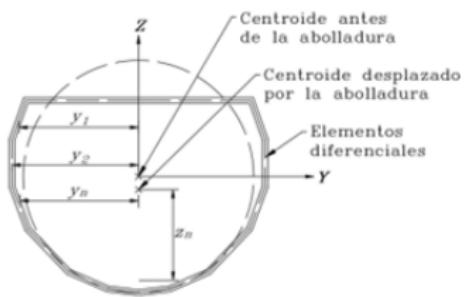


Figura: Representación esquemática del elemento tubular con daño por abolladura.

Modelado de Daño: Interpolación Longitudinal (Abolladura)

Continuidad Numérica: Para evitar discontinuidades abruptas en la matriz de rigidez global, la variación del momento de inercia (I) a lo largo de la zona dañada se suaviza matemáticamente.

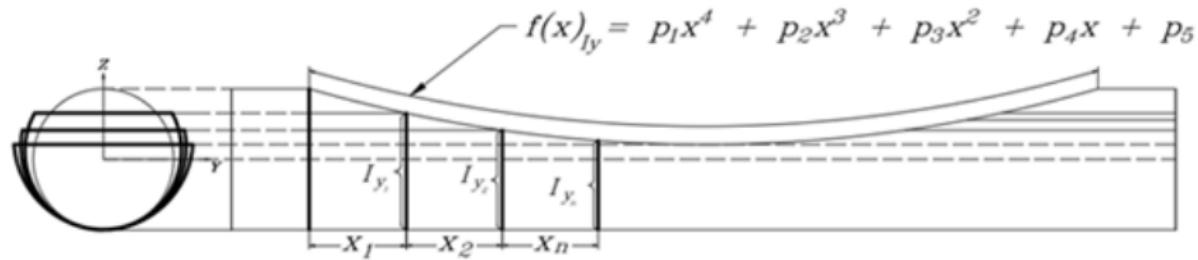


Figura: Interpolación de la reducción de inercia mediante polinomios de 4º grado.

Justificación de Daños: Fenomenología Zonal (1/2)

¿Por qué modelar Corrosión Uniforme? Aunque la corrosión puede ser local, para efectos de rigidez global (EI) en estructuras Jacket, la normativa (API/ISO) valida el modelo de **reducción uniforme de espesor** (t_{loss}) como el mecanismo que gobierna la pérdida de capacidad de carga.

Distribución Vertical de la Severidad: La pérdida de espesor **no es constante** en toda la altura. Se concentra drásticamente en la zona de humectación y secado (Splash Zone).

Fuentes Normativas:

- ISO 19902:2007: *Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures.* (Sec. 16.3 Structural Integrity).
- API RP 2A-WSD: *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms.*

Justificación de Daños: Fenomenología Zonal (2/2)

Evidencia Forense: Tasas de corrosión medidas en campo.

Tabla: Tasas de Pérdida de Espesor por Zona

Zona Vertical	Tasa Real ($mm/año$)	Riesgo Estructural
Splash Zone	0.8 - 1.2	CRÍTICO (Máx Δt)
Marea (Tidal)	0.4 - 0.6	Alto
Atmosférica	0.1 - 0.3	Medio
Sumergida	< 0.1	Bajo (Controlado por CP)

Fuente: Health and Safety Executive (HSE). *Offshore installations: Guidance on design, construction and certification*. Reino Unido.

Justificación de Daños: Etiología y Severidad

Caracterización Forense: El origen del impacto (etiología) define la morfología del daño.

Tabla: Clasificación de Daños por Causa Raíz

Causa Raíz	Morfología del Daño	Ubicación Típica
Colisión Buque	Abolladura Alargada	Splash Zone ($\pm 10m$)
Objetos Caídos	Abolladura Aguda	Miembros Horizontales*
Instalación	Abolladura Interna	Piernas / Elem. diagonales**

* Ubicación de mayor incidencia estadística reportada.

** Incidencia significativa, aunque menor respecto a los miembros horizontales.

Fuentes de Datos: WOAD: Worldwide Offshore Accident Databank; HSE: Health and Safety Executive.

Aportación Novedosa: Formulación Matemática del ICD

Contribución Metodológica: Ecuación General

Se propone una **métrica inédita** que integra tres factores normalizados para evaluar la calidad de la solución:

$$\text{ICD} = D \times C_{\text{norm}}(\delta) \times P_{\text{FP}}(N_{\text{FP}}) \quad (6)$$

Interpretación: $\text{ICD} \in [0, 1]$ (Donde 1.0 = Detección perfecta).

1. Éxito (D)

- **1.0:** Exacta.
- **0.5:** Adyacente.
- **0.0:** Fallo.

2. Confianza (C_{norm})

- Escalamiento logarítmico ($\alpha = 0.1$).

$$\frac{\ln(1 + \alpha\delta)}{\ln(1 + \alpha\delta_{\text{máx}})}$$

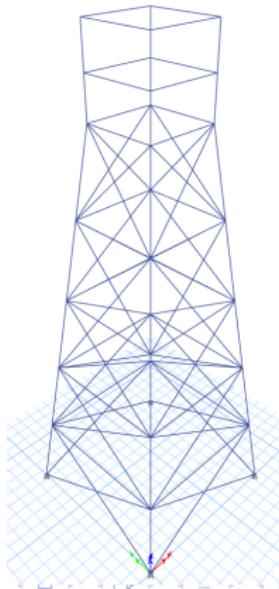
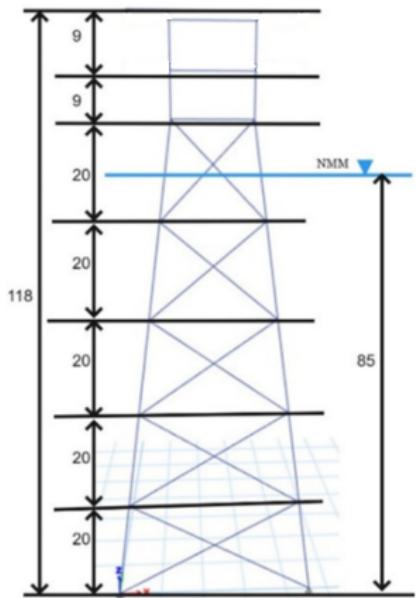
3. Penalización (P_{FP})

- Decaimiento exp. ($\beta = 0.15$).

$$e^{-\beta N_{\text{FP}}}$$

Caso de Estudio: Plataforma Tipo Jacket

- Plataforma marina fija discretizada mediante elementos viga.



Desglose de Ejecuciones del AG

Desglose del número total de ejecuciones del Algoritmo Genético (AG):

Total de ejecuciones = 120 elementos × 18 niveles de daño = 2160

Donde los niveles de daño corresponden a:

Niveles de daño = {5 %, 10 %, 15 %, ..., 90 %}

⇒ 18 niveles en incrementos de 5 %

Desglose de Ejecuciones: Caso de Abolladura

Desglose del número total de ejecuciones del AG para Abolladura:

Total de ejecuciones = 120 elementos × 10 niveles de daño = 1200

Donde los niveles de daño corresponden a:

Niveles de daño = {5 %, 10 %, 15 %, . . . , 50 %}

⇒ 10 niveles en incrementos de 5 %

Abolladura

Resultados: Detección de Abolladura (1/2)

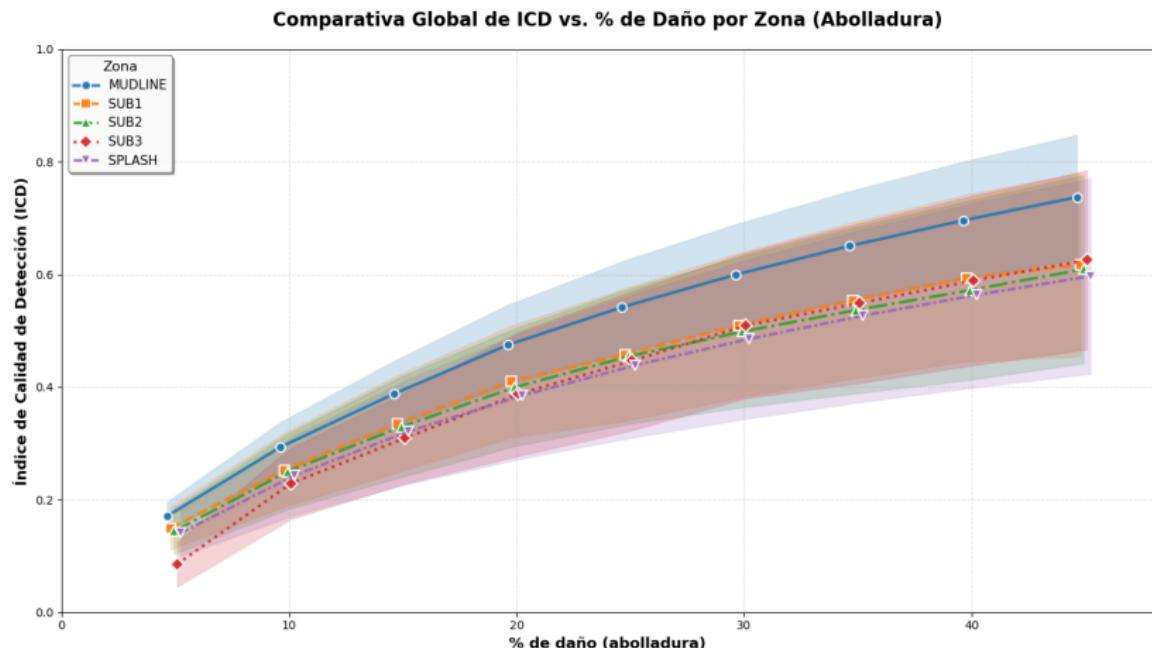


Figura: Comparativa Global ICD vs Daño

Abolladura

Resultados: Detección de Abolladura (2/2)

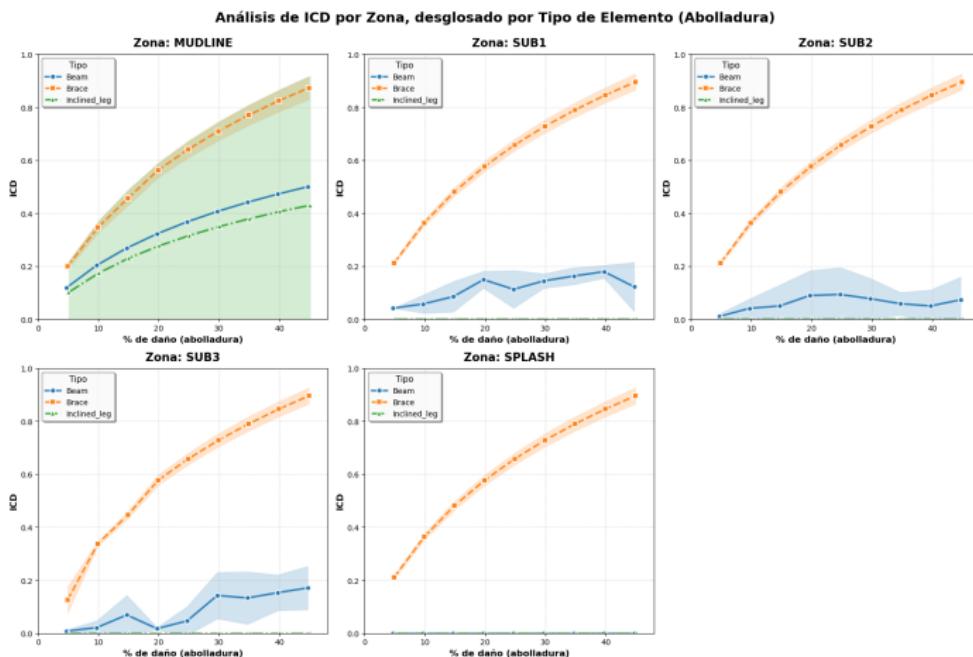


Figura: Desglose por Zona y Tipo de Elemento

Corrosión

Resultados: Detección de Corrosión (1/2)

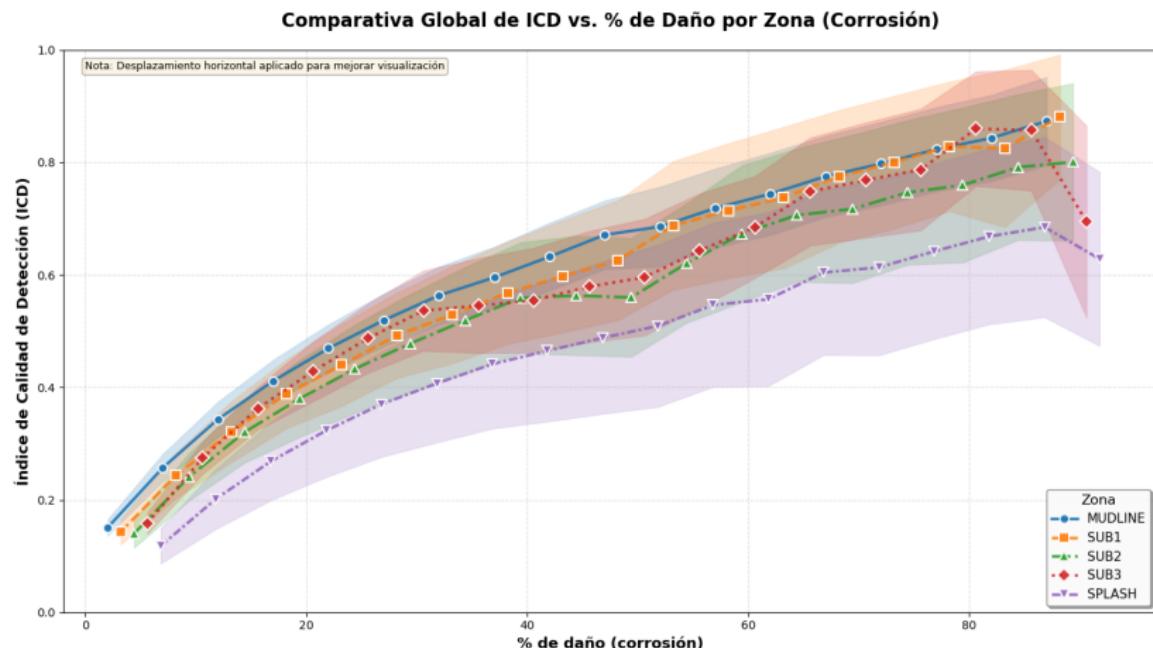


Figura: Comparativa Global ICD vs Corrosión

Corrosión

Resultados: Detección de Corrosión (2/2)

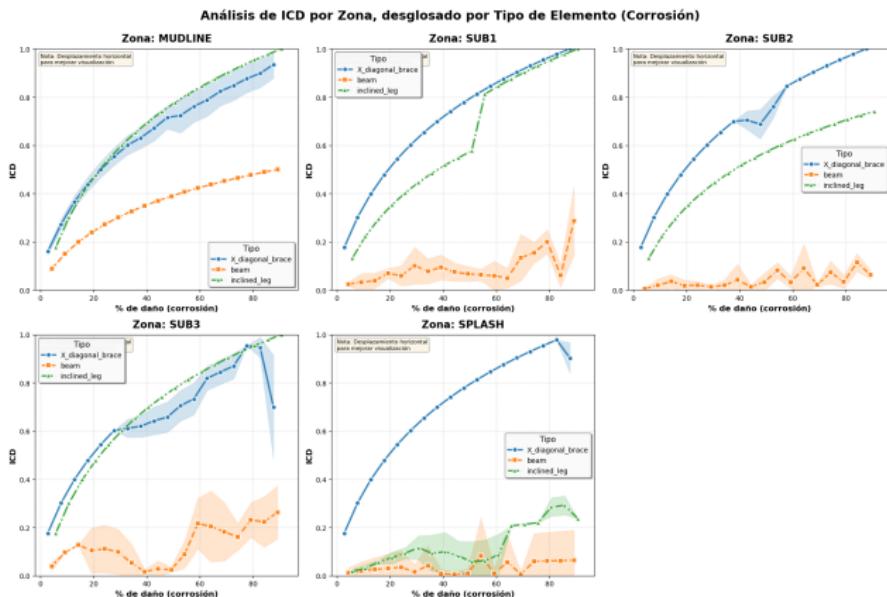


Figura: Desglose por Zona

Conclusiones Preliminares (1/4): Enfoque Metodológico

Eficacia de la Optimización Inversa

La investigación valida al ICD como una métrica robusta para el monitoreo de salud estructural (SHM).

- **Independencia del Modelo Base:** A diferencia de la actualización de modelo tradicional (*Model Updating*), esta estrategia basada en optimización estocástica (AG) no requiere un modelo de elementos finitos perfectamente calibrado desde el origen.
- **Eficiencia:** Al centrarse en cambios relativos de patrones modales, reduce significativamente la carga computacional asociada a la identificación de parámetros físicos exactos.

Conclusiones Preliminares (2/4): Robustez y Hallazgos

Penalización de Falsos Positivos

La formulación matemática del ICD penaliza severamente las soluciones que generan residuos distribuidos, favoreciendo la localización precisa y evitando **falsas alarmas** costosas.

Hallazgo: Sensibilidad Diferencial

Los resultados revelan una jerarquía clara en la detectabilidad del daño:

- **Diagonales ("Fusibles"):** Elementos de alta sensibilidad. El sistema detecta reducciones de rigidez a partir del **30 % de severidad**.
- **Piernas Principales:** Alta redundancia estructural. Requieren daños severos ($> 50 \%$) para ser identificados mediante vibraciones globales.

Conclusiones Preliminares (3/4): Implicación Operativa

Propuesta de Estrategia Híbrida

La disparidad de sensibilidad detectada sugiere un cambio de paradigma en la gestión de integridad:

- **Monitoreo Remoto (Vibraciones):** Ideal para la vigilancia continua de las diagonales, donde el riesgo de impacto de buques es alto.
- **Inspección Visual (ROV/Buzos):** Debe enfocarse prioritariamente en **vigas y piernas principales**, ya que el monitoreo global es ciego a daños incipientes en estos elementos masivos.

Conclusiones Preliminares (4/4): Validación Forense

El desempeño del algoritmo coincide con las zonas de mayor riesgo estadístico reportadas en la industria (HSE/WOAD), validando su utilidad práctica:

1. Coherencia en Corrosión

- **Realidad:** La *Splash Zone* sufre la corrosión más agresiva (0.8–1.2 mm/año) según HSE.
- **AG:** El ICD mostró su **máxima sensibilidad** precisamente en esta zona, garantizando detección temprana donde el riesgo crítico es mayor.

2. Coherencia en Abolladuras

- **Realidad:** Las diagonales en la zona de marea son estadísticamente vulnerables a colisiones de buques (WOAD).
- **AG:** Al identificar a las diagonales como fusibles altamente detectables, el sistema cubre el riesgo de impacto accidental.

Conclusión: El algoritmo prioriza correctamente las amenazas físicas reales.

Estatus de Publicación y Solicitud de Prórroga

- **Estatus de Publicación (7º Semestre):**

- Se realizó el envío del manuscrito a la revista *Ocean Engineering* a mediados del semestre.
- **Resultado:** El artículo fue rechazado.
- **Acción Inmediata:** Se realizó un análisis detallado de los comentarios de los revisores para identificar las áreas de mejora críticas.
- **Nueva Opción:** Se ha seleccionado a la revista *Applied Ocean Research* como el nuevo objetivo de publicación.

- **Necesidad de Prórroga:**

Ajuste de Cronograma de Graduación

Debido a los tiempos de gestión editorial para el nuevo envío a *Applied Ocean Research* y la escritura final, se solicitará una extensión de tiempo.

- **Ventana Estimada de Defensa:** Octubre – Diciembre 2026.

Redefinición de Alcances y Estrategia Técnica

Recorte de Alcances

Para viabilizar la nueva fecha de defensa y garantizar la calidad de la publicación, se proponen transferir los análisis de **grietas por fatiga** y **deflexiones excesivas** a *Trabajo Futuro*. El 8º Semestre se dedicará 100 % a Escritura y Validación.

Fortalecimiento del ICD (Estrategia de Aceptación)

En respuesta al rechazo previo, se implementarán 5 mejoras para blindar el artículo:

- ① **Estabilidad del AG:** Reporte del vector α óptimo y su dispersión.
- ② **Benchmark:** Comparativa (Mejor DI individual vs. ICD Fusionado).
- ③ **Robustez:** Simulación de ruido experimental.
- ④ **Métricas:** Análisis de Verdaderos Positivos / Falsos Positivos.