

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).



Metodología Propuesta (1/3): Flujo General

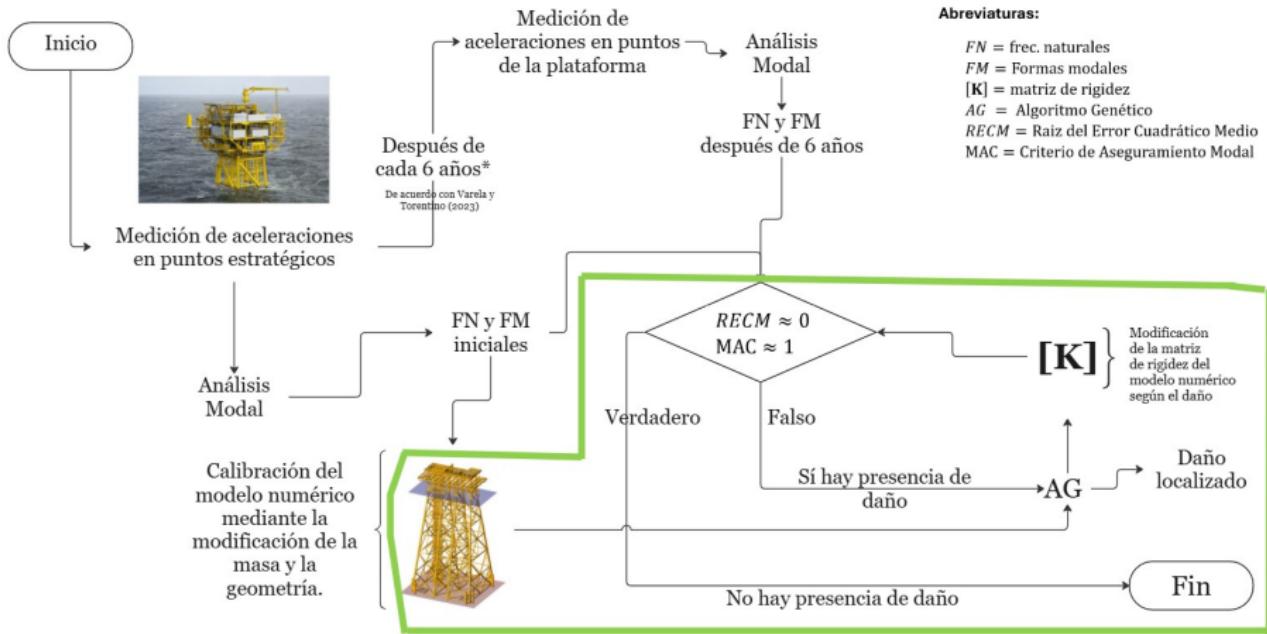


Figura: Flujo de identificación en plataformas reales.

Algoritmo Genético

Metodología Propuesta (2/3): Esquema Computacional

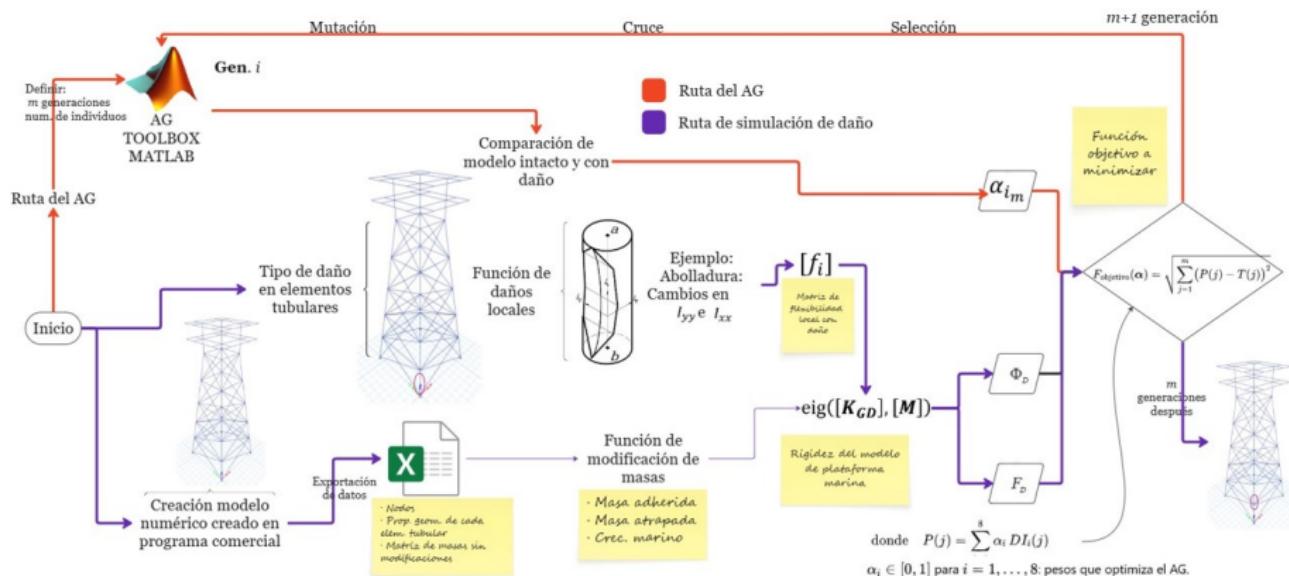


Figura: Esquema computacional del AG.

Metodología Propuesta (3/3): El Algoritmo Genético



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.

Formulación Matemática: Flexibilidad y Estadística (DI₄ – DI₈)

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

- **Diferencia (DI₄):** $|\text{diag}(\mathbf{F}_d) - \text{diag}(\mathbf{F}_u)|$
- **Razón (DI₅):** $\left| \frac{\text{diag}(\mathbf{F}_d)}{\text{diag}(\mathbf{F}_u)+\epsilon} - 1 \right|$
- **Variación % (DI₆):** Versión porcentual de la razón ($DI_5 \times 100$).

Estandarización Estadística (DI₇ y DI₈): 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 Iniciales y Ambientales (1/2)

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

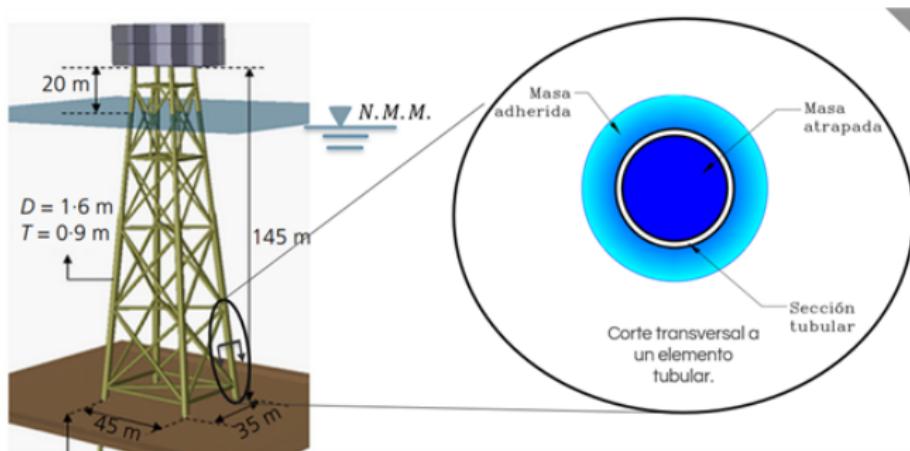


Figura: Detalle de Masa Hidrodinámica (Adherida y Atrapada).

Efectos Iniciales y Ambientales (2/2)

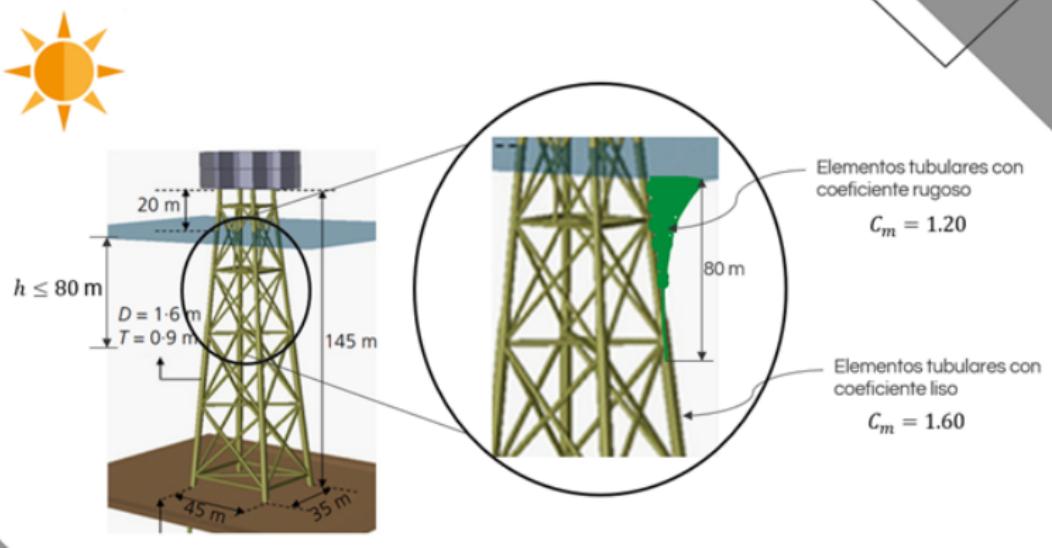


Figura: Modelado del Crecimiento Marino (Biofouling) y coeficientes rugosos.

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*).

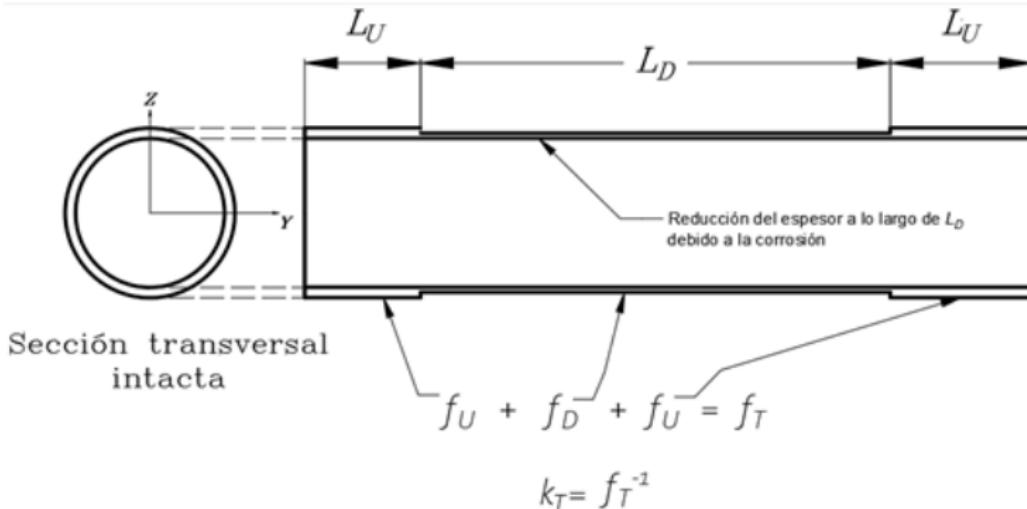


Figura: Perfil de reducción de espesor (t_{loss}) a lo largo del elemento tubular.

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.

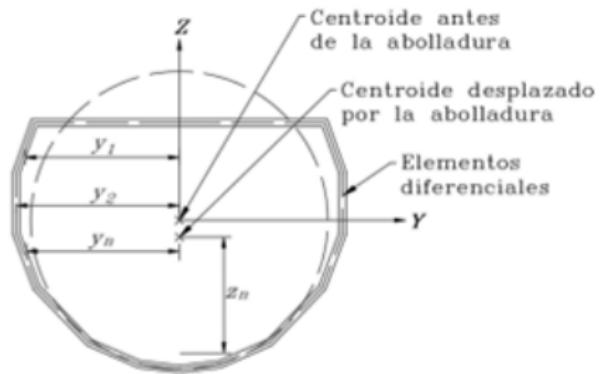


Figura: Representación esquemática del elemento tubular con daño por abolladura.

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.

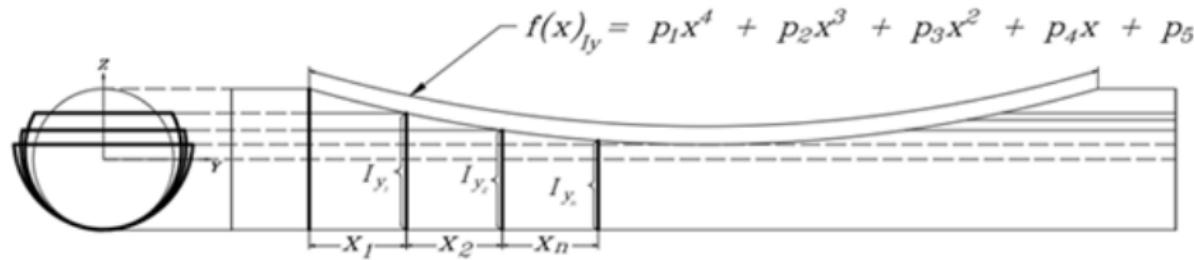


Figura: Interpolación de la reducción de inercia mediante polinomios de 4º grado.

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 ($\alpha = 0.1$).

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

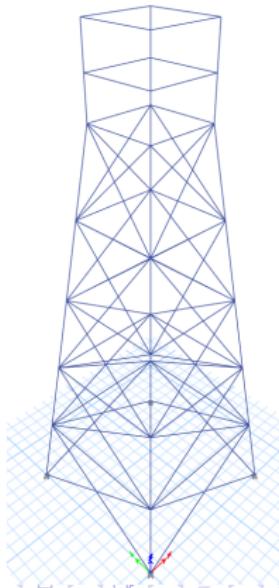
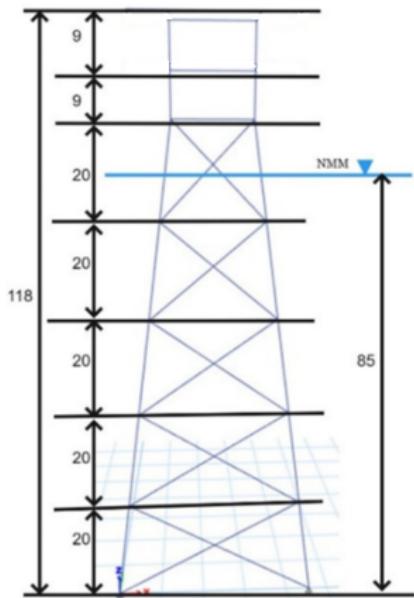
3. Penalización (P_{FP})

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

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

Caso de Estudio: Plataforma Tipo Jacket

- Plataforma marina fija discretizada mediante elementos viga.



Abolladura

Resultados: Detección de Abolladura (1/2)

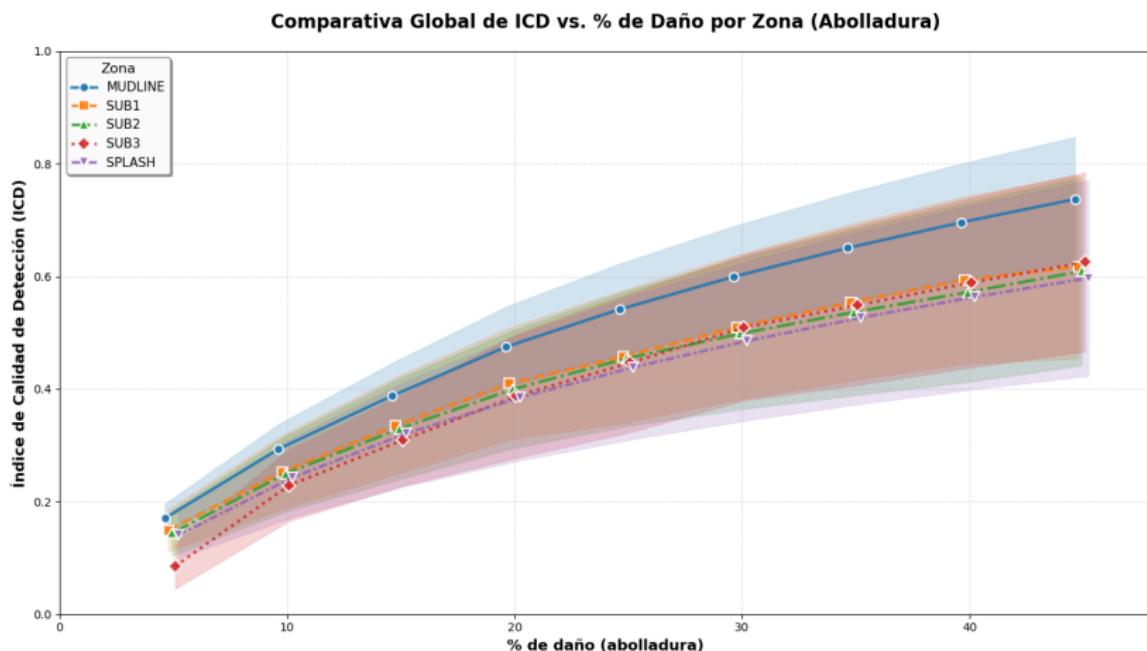


Figura: Comparativa Global ICD vs Daño

Abolladura

Resultados: Detección de Abolladura (2/2)

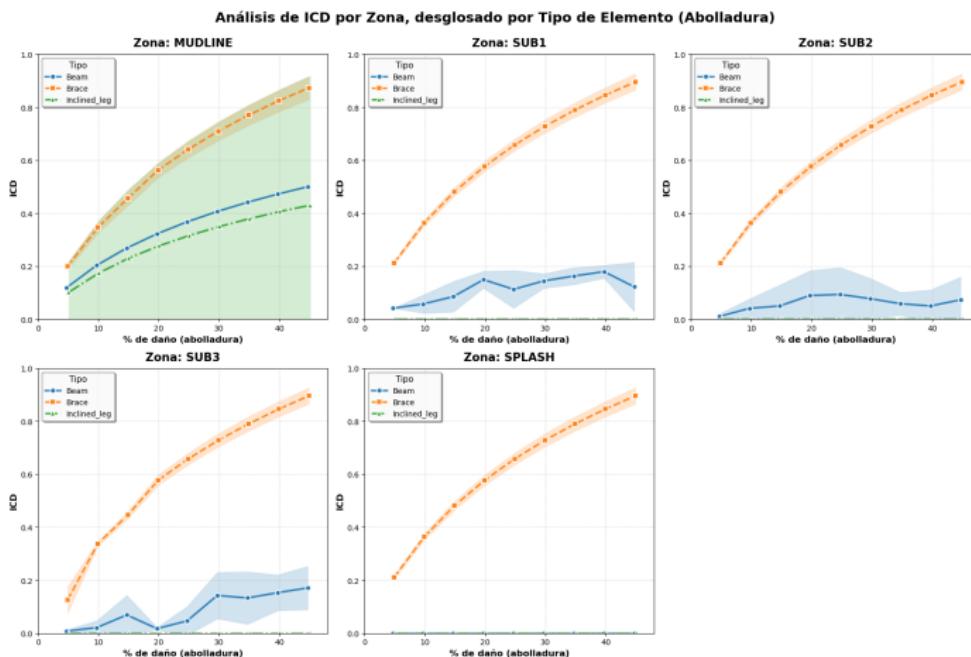


Figura: Desglose por Zona y Tipo de Elemento

Corrosión

Resultados: Detección de Corrosión (1/2)

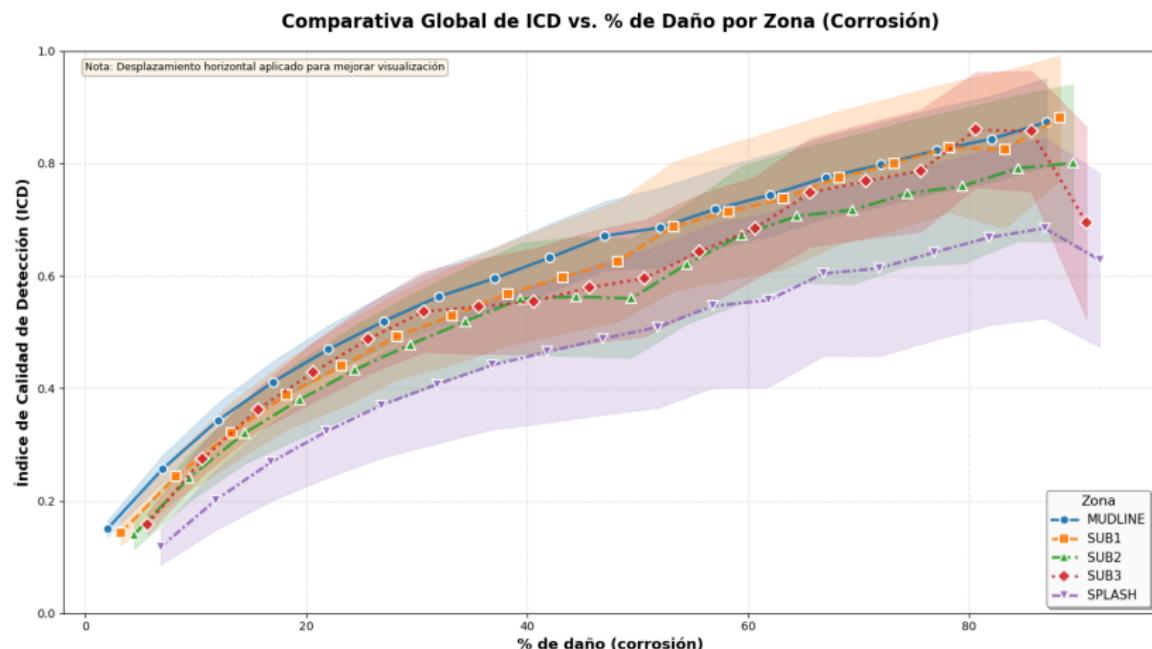


Figura: Comparativa Global ICD vs Corrosión

Corrosión

Resultados: Detección de Corrosión (2/2)

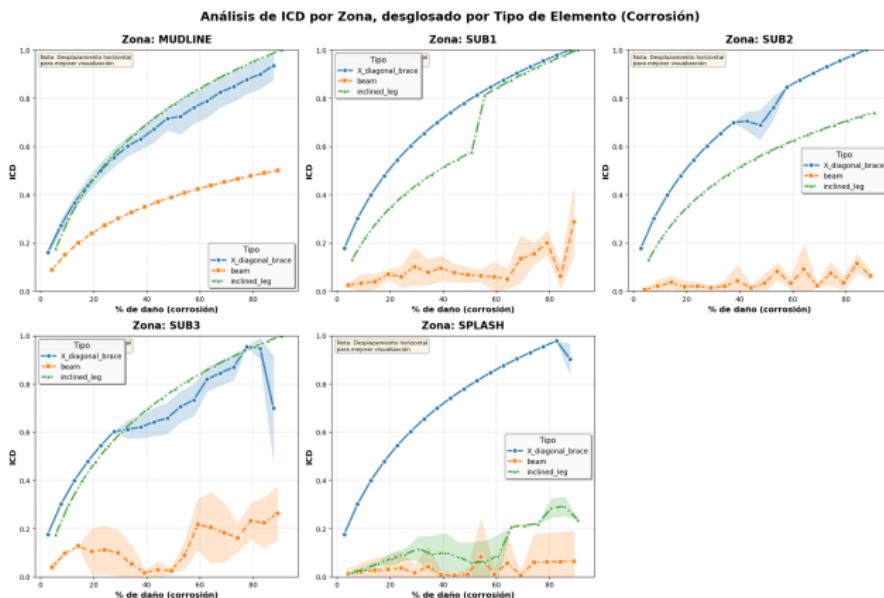


Figura: Desglose por Zona

Estatus de Publicación JCR (Journal Citation Reports)

- **Título Tentativo:**

"Proposal of a Detection Quality Index (DQI) for Damage Identification in Jacket Platforms Using Genetic Algorithms."

- **Revista Objetivo:**

Journal of Civil Structural Health Monitoring (Q1 - JCR).

- **Estatus Actual:**

- Resultados del ICD consolidados.
- Artículo en proceso de redacción y formato.
- Requisito obligatorio para la graduación.

- **Antecedentes y Perspectiva:**

El manuscrito inicial fue rechazado en la revista *Ocean Engineering*. Sin embargo, dicha versión carecía de la validación robusta actual. La integración del nuevo **Índice de Calidad de Detección (ICD)** subsana las limitaciones previas y fortalece la contribución científica, asegurando una propuesta sólida para este nuevo envío.

Comentarios Finales y Siguientes Pasos

① **Validación:** El modelo simplificado de daño (abolladura/corrosión) demuestra ser computacionalmente eficiente y representativo.

② **Ruta Crítica (8º Semestre):**

- Envío y revisión del artículo JCR.
- Escritura final de la tesis.
- Defensa de grado.
- Profundizar en el estudio, generación y análisis de resultados para daños por grietas en la base (fatiga) y deflexiones excesivas, aplicando la misma metodología.