

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

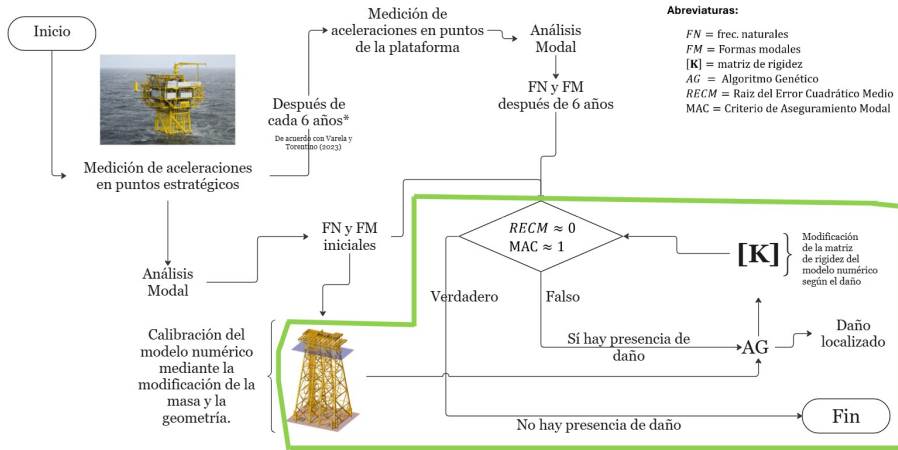


Figura: Flujo de identificación en plataformas reales.

Metodología Propuesta (2/3): Esquema Computacional

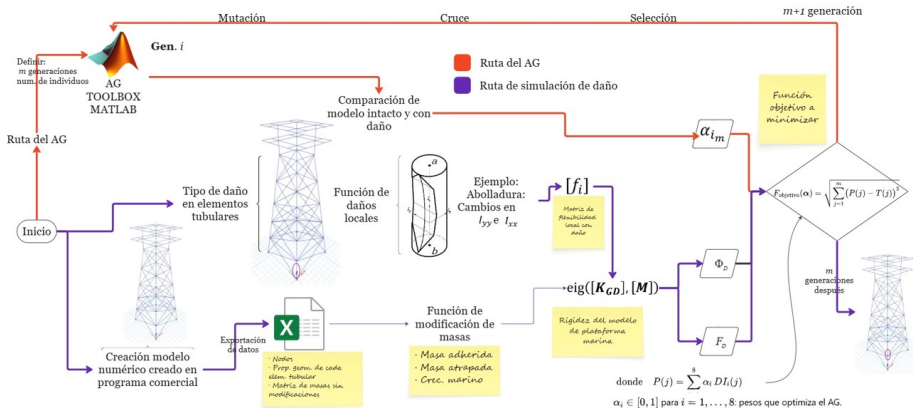
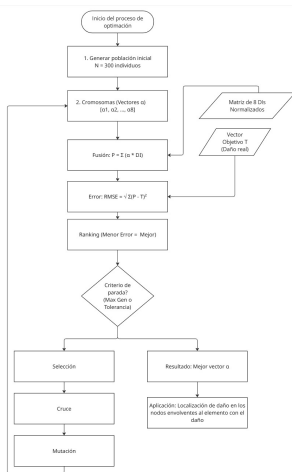


Figura: Esquema computacional del AG.

Metodología Propuesta (3/3): El Algoritmo Genético



Fusión de Datos: Indicadores Vibratorios (DIs)

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 ($DI_4 - DI_8$)

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

- **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 (2/2)

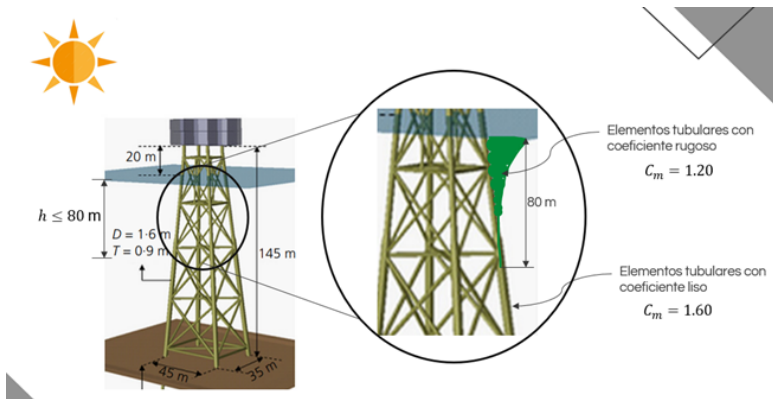


Figura: Modelado del Crecimiento Marino (Biofouling) y coeficientes rugosos.

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*).

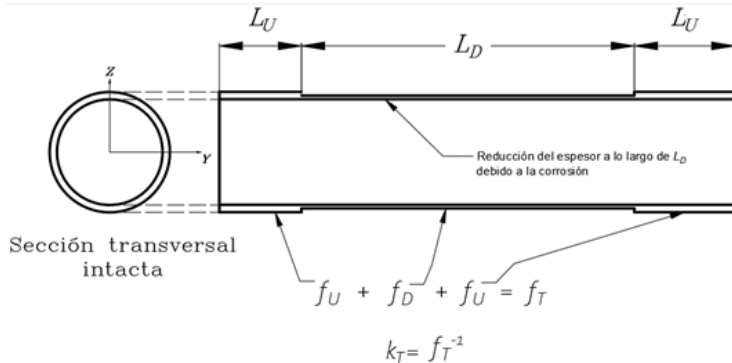


Figura: Perfil de reducción de espesor (t_{loss}) a lo largo del elemento tubular.

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.

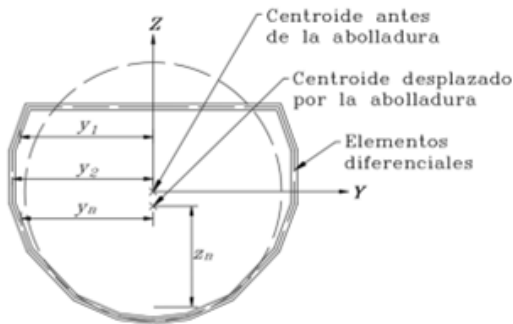


Figura: Representación esquemática del elemento tubular con daño por abolladura

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.

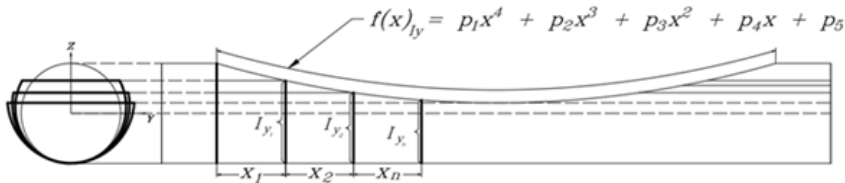


Figura: Interpolación de la reducción de inercia mediante polinomios de 4º grado.

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 (Datos Forenses HSE)

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)

Formulación Matemática del ICD

Ecuación General

El ICD se define como el producto de tres factores normalizados:

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

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 ($\alpha = 0.1$).

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

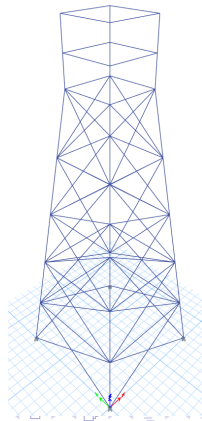
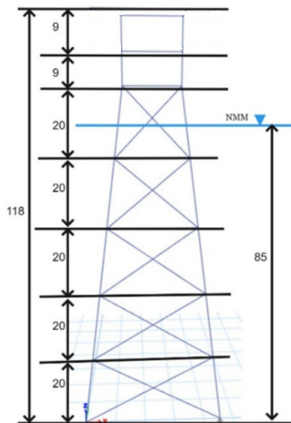
3. Penalización (P_{FP})

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

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

Caso de Estudio: Plataforma Tipo Jacket

- Plataforma marina fija discretizada mediante elementos viga.



Resultados: Detección de Abolladura (1/2)

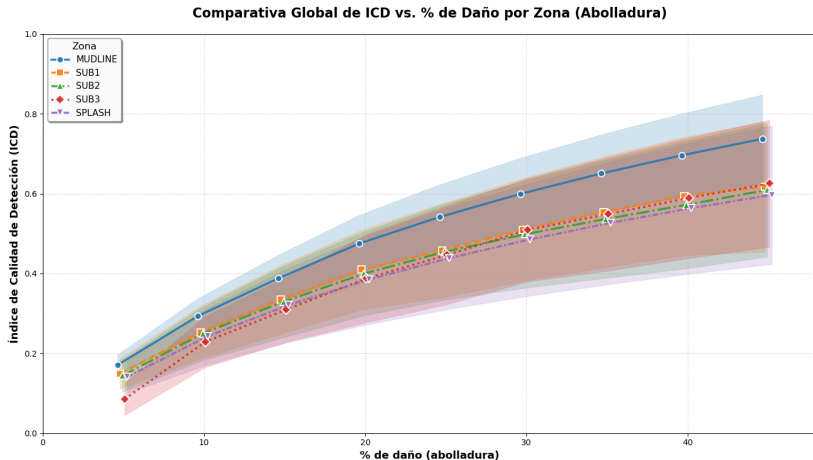


Figura: Comparativa Global ICD vs. Daño

Resultados: Detección de Abolladura (2/2)

Análisis de ICD por Zona, desglosado por Tipo de Elemento (Abolladura)

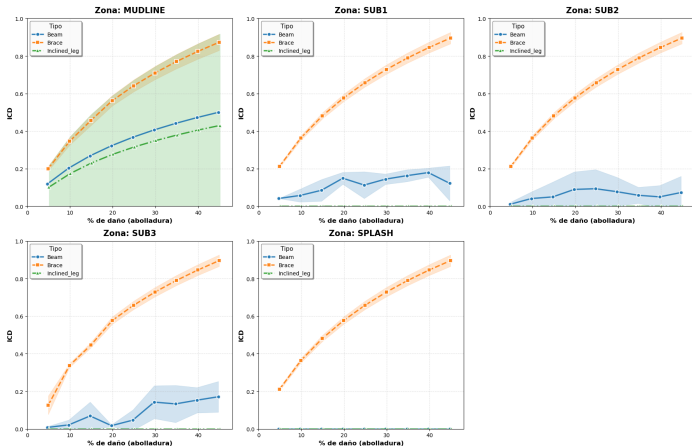


Figura: Desglose por Zona y Tipo de Elemento

Resultados: Detección de Corrosión (1/2)

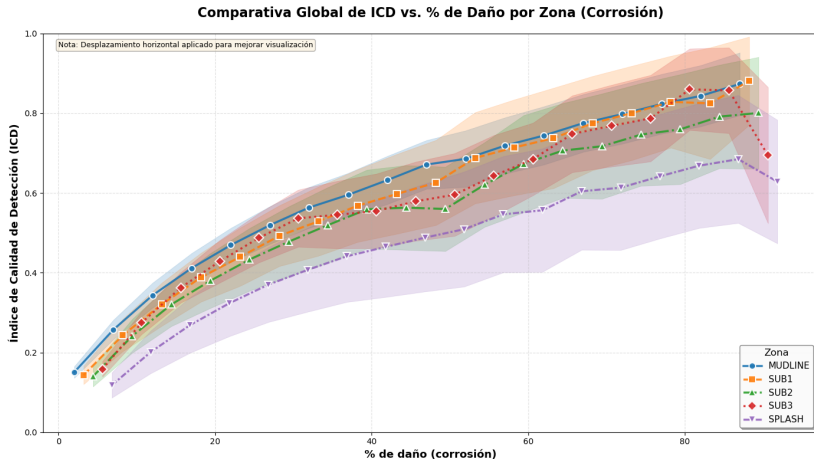


Figura: Comparativa Global ICD vs Corrosión

Resultados: Detección de Corrosión (2/2)

Análisis de ICD por Zona, desglosado por Tipo de Elemento (Corrosión)

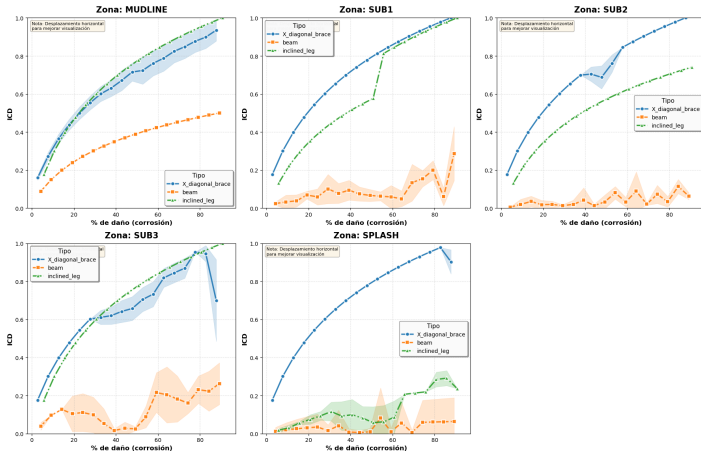


Figura: Desglose por Zona

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 Sigüientes 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.