



Universidad
Tecnológica
de Bolívar

CARTAGENA DE INDIAS



Acreditación Institucional
de Alta Calidad

Renovación, Resolución N° 09794 de 2015
del Ministerio de Educación Nacional

Departamento de ingeniería mecánica

PROYECTO DE GRADO

CARACTERIZACIÓN BIBLIOGRÁFICA DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS OFFSHORE

Autores: Nestor Cuello & Eduardo Lara

Tutor: M. Sc., Ing. Adriana Castro

Cartagena, Colombia
2020

Resumen

La corrosión es un tema muy extenso que se ha estudiado por muchos expertos y que muchos países han tenido que combatir contra él, ya que afecta directamente la integridad de los bienes de muchas industrias. Existe una gran industrialización en las regiones costa afuera del mundo y la corrosión en estas zonas es una problemática relevante costándole al mundo aproximadamente 2.5 billones de dólares cada año. En Colombia existe un gran potencial en las zonas costa afuera por lo que se han realizado inversiones para proyectos offshore de plataformas petroleras y en la industria de embarcaciones, por lo cual la presente investigación realiza una búsqueda exhaustiva en la literatura tanto académica como gris de artículos, libros, reportes y noticias, en distintos motores de búsqueda, sobre la corrosión costa afuera para crear un banco de información enfocado en plataformas petroleras, turbinas eólicas y la industria naval. De esta forma se puede caracterizar la información y analizarla mediante gráficas, y así ver como es el comportamiento de la corrosión en mar abierto en el periodo del 2000 al 2020 y las diferentes estrategias que han usado distintos países para mitigarla, además de crear una base de datos propia. De esta forma, esta investigación es capaz de apoyar futuras investigaciones con metodologías compatibles e idear estrategias para combatir la corrosión offshore en los proyectos que se realizaran en las zonas costa afuera de Colombia.

Palabras clave: corrosión marina, plataforma petrolera, turbina eólica, costa afuera, degradación, estructuras.

Abstract

Corrosion is a very wide topic which had been studied by many experts and a lot of countries had had to fight against this phenomenon because it directly affects the integrity of so many industries assets. There is a great industrialization in offshore regions around the world and corrosion in these zones is a huge problem because of its high economic cost of about 2.5 trillion dollars. Colombia has a great potential in offshore regions and this is why many companies have invested in offshore projects about oil rigs and ship industry, that is why the present study does a comprehensive research based on both academic and grey literature such as articles, books, reports, and news, in different search engines, about offshore corrosion taking into account the creation of an information bank focus on oil rigs, offshore wind turbines and ships. Then, the information was characterized, making possible to analyze it through graphics, having a better perspective of the corrosion behavior in the period from 2000 to 2020, also noting the strategies used by different countries to mitigate it, besides creating an own data base. This study is capable of supporting future research with similar methodologies and make up strategies to mitigate offshore corrosion in projects based on the Colombian offshore regions.

Keywords: marine corrosion, oil rig, wind turbine, offshore, degradation, structure.

Índice general

Resumen.....	1
1. CAPÍTULO I	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Justificación	6
1.4 Objetivo general	1
1.5 Objetivos específicos.....	1
2. CAPÍTULO II.....	2
2.1 Estado del arte.....	2
3. CAPÍTULO III	23
3.1 Metodología	23
3.2 Diagrama de flujo.....	28
4. CAPÍTULO IV	29
4.1 Resultados y análisis	29
5. CAPÍTULO V	68
5.1 Conclusiones	68
5.2 Estudios futuros.....	70
6. REFERENCIAS.....	71
7. ANEXOS	74

Índice de figuras

Figura 1. Zonas externas de una turbina eólica offshore. SED: Sedimento, UWZ: Zona sumergida (Under Water Zone), TWZ: Zona de marea (Tidal Water Zone), SWZ: zona de chapoteo (Splash Water Zone), ATM: Zona atmosférica (Atmosphere). (Kirchgeorg et al., 2018).	40
Figura 2. Tuberías de estructura offshore con corrosión localizada y altas tasas de corrosión. (Barker et al., 2014).....	41
Figura 3. Plataforma petrolera offshore fija. (Starokon, 2020).....	44
Figura 4. Granja eólica offshore de 469 MW Saint-Brieuc Bay, Brittany (Francia). https://www.idom.com/project/saint-brieuc-496-mwe-offshore-wind-farm-on-the-coast-of-french-brittany/#	48
Figura 5. Picaduras profundas en elemento de turbina de viento. (Momber, 2016).	49
Figura 6. Oleoducto bajo los efectos de la corrosión por picaduras o pitting.....	50
Figura 7. Oleoducto después de ser atacado por el agrietamiento por corrosión bajo tensión o SCC. (Popoola et al., 2013).....	53
Figura 8. Destrucción debido a corrosión en plataforma offshore. (Starokon, 2020).	56
Figura 9. (a) Anodos de sacrificio de platino y niobio instalados en el rompehielos atómico “50 years of Victory”. (b) Anodo después de 4 años de operación en condiciones de hielo extremas. (Oryshchenko & Kuzmin, 2015).	58
Figura 10. Recubrimiento instalado en soporte Caisson o Caisson Leg. (Lu et al., 2014)(Rahman et al., 2014).....	59
Figura 11. Probetas (a) antes y (b) después de aplicar inhibidor de corrosión. (Lu et al., 2014).	61
Figura 12. Grietas en uniones soldadas de soportes de tubería principal. (Fernando B. Mainier et al., 2016).....	63
Figura 13. Degradación de material ubicado en zona de chapoteo. (izquierda: Sistema de recubrimiento; derecha: Sistema con imprimación.). (Binder, 2016).....	64
Figura 14. Inspección de embarcación con biofouling en su casco.	66

Índice de graficas

Grafica 1. Número de documentos seleccionados por país.	37
Grafica 2. Número de documentos seleccionados por año de publicación o realización de estudio.	38
Grafica 3. Número de documentos publicados por revistas de literatura académica.	39
Grafica 4. Número de documentos publicados por sitios web, revistas o blog de literatura gris.	40
Grafica 5. Número de documentos referentes a cada elemento analizado en la estructura offshore.	43
Grafica 6. Número de documentos referentes a cada tipo de estructura offshore.	46
Grafica 7. Número de documentos referentes a cada tipo de corrosión.	51
Grafica 8. Variación de la tasa típica de corrosión presentada en los documentos seleccionados.	57
Grafica 9. Número de documentos referentes a cada método de protección.	59
Grafica 10. Número de documentos referentes a la causa identificada de corrosión.	64

Capítulo I

1.1 Introducción

Se puede definir la corrosión como degradación de metales o aleaciones de metal por la presencia de agentes oxidantes mediante reacciones químicas y electroquímicas. Para obtener estos materiales mecánicos, se requiere del procesamiento de minerales y menas, los cuales se encuentran en su estado natural y el objetivo es llevarlos a un estado de mayor energía. El fenómeno de la corrosión ocurre debido a que los materiales siempre tienden a estar en su estado natural o de menor energía.

A nivel mundial, la corrosión representa considerables costos económicos, los cuales son vitales para la renovación de diferentes estructuras, maquinas o tuberías, ya que, si no se asumen estos costos se podrían presentar pérdidas económicas aún más

grandes como paradas industriales por rotura de maquinaria, accidentes en oleoductos o pérdidas de petróleo y hasta de vidas humanas. Según la international measures of prevention, application, and economics of corrosión technologies study (NACE) durante los últimos 50 años, se ha llegado a costos de corrosión de hasta el 5% del PIB de una nación, afectando una gran cantidad de industrias como la petroquímica, marina, del transporte, la construcción etc.

La corrosión en Colombia es un problema que se ha presentado de forma más reciente y cuyos esfuerzos en su mitigación han sido menores relativamente, lo cual representa para el país costos económicos considerables y utilizando las prácticas actualmente disponibles de protección, mantenimiento y monitoreo se pueden reducir entre un 15% y un 35% del costo de la corrosión. Según los indicadores de costos de corrosión en Colombia (Cuervo Tafur, J., Delgado Lastra, J., Herrera, F. J., & Arroyave, C. E. 2016) mediante estudios que se realizaron a 314 empresas de Colombia ubicadas en zonas de la costa y el interior, se ha llegado a la conclusión de que Colombia es un país que está en vía de desarrollo y ha convivido con la corrosión sin programas especializados para tratar esta problemática, y esto es debido al poco acero que se usaba en la industria nacional, ya que, en 1994, Colombia presentaba un costo por corrosión del 1.4% del PIB.

Las zonas del caribe colombiano presentan un gran potencial para la inversión en proyectos offshore para la explotación de petróleo y gas natural, por lo que es necesario un marco teórico basado en estudios sobre diagnosticar, caracterizar y mitigar procesos corrosivos, que sirvan para prever los problemas que puedan presentar los proyectos y se realicen programas más especializados para el control de la corrosión.

Para llevar a cabo este estudio se realizó una revisión de diferentes artículos y otro tipo de referencias sobre el fenómeno de la corrosión y los problemas que esta presenta

en casos más específicos a nivel internacional. Se realizó la caracterización de estos artículos científicos y reportes, para consolidar la información en diferentes graficas que ilustran de una forma más didáctica el panorama de la corrosión a nivel mundial y evidenciando las tendencias en diferentes apartados como las causas de la corrosión, el tipo de protección, las industrias a nivel offshore más relevantes o los elementos más afectados por la corrosión.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente a nivel mundial, la corrosión afecta de forma considerable los recursos más básicos como gran parte de la materia prima y los diferentes equipos que se usan diariamente en las industrias, lo cual merma la productividad de las empresas y que tengan que dedicar una gran cantidad de capital para combatirla. Según la international measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study (NACE) Estudios realizados determinan que a nivel mundial la corrosión supone un costo de 2.5 billones de dólares, que es equivalente al 3.4% del PIB mundial. Este costo tan elevado está relacionado con la mala selección de medidas de protección y falta de conocimiento de métodos más especializados. Es por esto que es vital tener un amplio conocimiento en los fenómenos de la corrosión para el desarrollo de métodos para minimizar los costos asociados con dicho fenómeno, y debido a que la corrosión es un problema inevitable, solo se puede buscar reducir los costos, ya que mediante las técnicas disponibles actualmente se pueden llegar a reducir entre un 15% y 35%, lo cual representa 375 mil y 875 mil millones de dólares anuales al mundo.

Según la WCO (World Corrosion Organization), la ciencia especializada en el control de la corrosión es muy compleja, ya que este fenómeno puede llegar a tomar distintas formas en las que afectan numerosos factores. Por esto las personas encargadas en la mitigación tienen que tener en cuenta cosas como las condiciones ambientales, la exposición a la sal del agua en los diferentes tipos de materiales, incluyendo el tipo de producto utilizado o transportado entre otras. Al tener múltiples variables en formas, causas y métodos de protección, se vuelve una labor muy compleja por la necesidad de experiencia, conocimiento y recursos.

Un elemento que puede llegar a ser muy importante cuando se habla de combatir la corrosión y por ende el entendimiento de la ciencia detrás de la prevención de la corrosión, es el intercambio de conocimientos entre los diferentes países del mundo, ya que un problema de corrosión como la falla de una estructura de soporte por la corrosión pudo haber sido resuelta de una manera muy eficaz en otro lugar del mundo. Debido a esta necesidad se han establecido entidades como la Organización Mundial de Corrosión (WCO) que busca concienciar al público sobre la corrosión, para que se determinen prácticas especializadas, que brinden experiencia y se establezcan estándares globales.

Según los indicadores de costos de corrosión en Colombia (Cuervo Tafur, J., Delgado Lastra, J., Herrera, F. J., & Arroyave, C. E. 2016) en Colombia, los índices en los gastos de la corrosión son relativamente bajos, ya que es un país en vía de desarrollo y el cual tiene una gran actividad agrícola, además es bajo el uso de aceros y, en general, de metales. No se tienen plantas nucleares y escasez de procesos con altas presiones y/o temperaturas, lo que nos lleva a tener un costo del 1.3% del PIB. Como resultado de ciertos indicadores y estudios, se llega a la conclusión de que la industria colombiana convive con la corrosión sin métodos especializados para su prevención, lo cual ha

degenerado en que no existan registros económicos de los daños ni de perjuicios a la infraestructura, siendo esto perjudicial para la autonomía de las empresas.

Sin embargo, esto ha cambiado con el tiempo, hoy en día existen entidades como la asociación colombiana de ingenieros de corrosión, que busca promover el conocimiento acerca de la corrosión y los problemas asociados, mediante el intercambio de información y de investigaciones, además de estar relacionada con la NACE internacional que es una comunidad líder en ingeniería y ciencia de la corrosión. Estas entidades buscan satisfacer la necesidad del conocimiento, debido a que la costa colombiana es una zona con un gran potencial para la inversión en proyectos offshore, ya que Colombia busca reactivar esta industria.

Según una noticia en la sección economía de El Heraldó, el presidente de la asociación colombiana de petróleo (ACP), Francisco Lloreda indica; “Desde hace varios años se viene trabajando en el desarrollo de la industria costa afuera y hay gran expectativa en Barranquilla y la Costa Caribe. Este va a ser un año muy importante”. Se realizarán inversiones en la industria offshore de 260 millones de dólares, y se proyectan perforaciones de dos pozos en la zona del caribe colombiano.

Por la magnitud de los proyectos, la gran inversión que se realizara y teniendo en cuenta los costos asociados a la corrosión los cuales pueden llegar a ser muy elevados si no se tienen los métodos correctos, es inevitable pensar que se requiere de una base de conocimiento del análisis y los procesos corrosivos, que se alimente de la literatura académica, la cual posee información sobre el tipo de corrosión recurrente, los métodos de protección y los sistemas con mayor número de estudios, en otros países. Por lo cual se requiere un marco teórico que permita brindar información acerca de diagnosticar, caracterizar y mitigar los procesos de corrosión que puedan llegar a presentarse en los

futuros proyectos y estudios realizados en la industria offshore de la costa caribe colombiana.

1.3 Justificación

Ante el interés del desarrollo de la industria costa afuera y el potencial que presenta la costa caribe, ya que se han planificado la perforación de dos pozos que se espera que traigan beneficios para la industria del gas y el petróleo y dado que hay una fuerte inversión de hasta mil millones de dólares en estos proyectos lo cual representa un crecimiento de 18% respecto a las inversiones del año 2019, resulta de especial importancia realizar una revisión tanto de la literatura académica como la gris, para conocer como otros países se han enfrentado y han solucionado problemas que tienen que ver con la corrosión en sistemas offshore.

La presente investigación nace de la necesidad de reunir información sobre los procesos corrosivos en sistemas offshore como plataformas de petróleo, buques, sistemas eólicos offshore, entre otros. Se realizó una búsqueda exhaustiva en distintas bases de datos para reunir las referencias de literatura académica y gris para luego ser seleccionada y caracterizada, de tal forma que se pudo realizar diferentes gráficos que permitan analizar las tendencias de los problemas por corrosión.

Esta investigación busca proporcionar información que será útil para determinar diferentes estrategias a la hora de enfrentar la corrosión en los distintos proyectos venideros que se realizaran en la costa caribe.

Debido a que otros países tienen ventaja sobre Colombia a la hora de solucionar problemas causados por la corrosión, el presente trabajo es conveniente para afianzar el conocimiento sobre esta problemática y contribuye a ampliar la información que se tiene

sobre la corrosión de tal forma que se pueda analizar las diferentes variables de esta problemática. Este trabajo tiene una utilidad metodológica ya que se podrán realizar futuras investigaciones que utilizarán metodologías similares. Esta investigación es viable debido a que se dispone de los recursos necesarios para llevarla a cabo.

1.4 Objetivo general

Desarrollar la caracterización y análisis del estado del arte de procesos corrosivos en estructuras offshore con miras a la generación de una base de conocimiento a partir de literatura académica y gris.

1.5 Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología de búsqueda y clasificación de información de literatura académica y gris basada en aspectos técnicos.
- Construir un banco de información (artículos, reportes, documentos y libros) que represente una base de conocimiento útil en el tema de procesos corrosivos off-shore.
- Consolidar la información obtenida de forma sistemática y establecer futuras direcciones de investigación de acuerdo a las características propias del Caribe Colombiano.

Capítulo II

2.1 Estado del arte

Turbinas de viento

La energía eólica, de acuerdo a la literatura disponible, es una de las alternativas más utilizadas para generar energía renovable y la instalación de turbinas de viento offshore se ha visto muy acogida por diversos países a lo largo de los años. La afectación por la corrosión de estas turbinas de viento es muy amplia y diversos elementos son víctimas de este fenómeno identificado por distintas causas. En el caso puntual de una turbina de viento ubicada en el Mar del Norte, cerca de Noruega, con una profundidad de 70 metros, se encuentra que esta sufre de corrosión por fatiga en su Jacket causada por el alto nivel de las cargas de fatiga como también por el gran número de cargas cíclicas causadas por el viento y las olas. En este estudio se realizan aproximaciones para determinar la vida de

la estructura teniendo en cuenta sus concentradores de esfuerzos y una tasa de corrosión típica de 1.2 mmpy, considerando planes de monitoreo y mitigación utilizando tanto protección catódica como recubrimientos (Dong et al., 2012). Como se mencionó anteriormente, la industria del viento costa afuera ha sido identificada como una de las energías sostenibles más utilizadas y esta ha tenido un gran crecimiento en Reino Unido. En un artículo publicado en la revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* se menciona que las estructuras de soporte de los aerogeneradores offshore son, en general, fabricadas a partir de miembros tubulares soldados, similares a los utilizados en las plataformas de extracción de petróleo y gas natural, ya que estas están sometidas a ambientes agresivos con alta carga dinámica. En el artículo se afirma que la manera en que la estructura responde a estas condiciones de operación favorece al crecimiento de grietas y esto disminuye la vida de diseño. La magnitud de la carga aplicada depende del tamaño de la turbina, la profundidad del agua, el tipo de soporte que tenga la estructura y el tipo de suelo en donde este instalada. Esta investigación hace referencia al tipo de corrosión por fatiga, resaltando la diferencia significativa en cuanto a las cargas mecánicas a las que está sometida la estructura y el uso de procesos de fabricación modernos (Adedipe et al., 2016). Otro caso de corrosión causado por cargas mecánicas de fatiga o cíclicas en turbinas de viento se encuentra en Alemania, en un estudio publicado en la revista *Renewable Energy*, pero en este caso la estructura sufre corrosión de tipo Pitting con una tasa de corrosión típica de 2 mmpy. Este artículo reporta acerca de la evaluación de recubrimientos de protección deteriorados y superficies de acero expuestas en esta turbina de viento offshore en el Mar del Norte y en el Mar Báltico. En este estudio se realizó un total de 750 inspecciones y sus resultados son revisados y categorizados. La mayoría de los daños en los revestimientos pueden ser atribuidos al inadecuado diseño y a las cargas mecánicas. Las especificaciones de diseño y los escenarios de prueba para la

evaluación de los revestimientos deben ser actualizados para tener en cuenta casos especiales de esfuerzos además de los esfuerzos por corrosión (Momber, 2016). Por otro lado, se encuentra un experimento de laboratorio realizado en Nigeria y Sudáfrica, publicado en la revista *Energy Procedia*, en el cual se simulan condiciones atmosféricas de salinidad y ambientes offshore, haciendo referencia a los efectos de un extracto de hoja, denominado *Morinda Lucida*, en concreto reforzado con acero en 3.5 % de cloruro de sodio, el cual es un material que se utiliza para construir la torre de una turbina eólica. Para este experimento se utilizaron técnicas electroquímicas de monitoreo para distintas concentraciones del extracto en copias de especímenes de concreto reforzado con acero inmerso parcialmente en el medio corrosivo y se encontró que este extracto mezclado con el concreto mejora la resistencia a la compresión y evita la entrada de cloruro, siendo esta última una causa identificada que contribuye a la corrosión en concretos (Okeniyi et al., 2014).

Otro caso muy interesante en Reino Unido, hace referencia a la presencia de corrosión de tipo Pitting encontrada en la fundación flotante de una turbina de viento y expone un análisis numérico para determinar el desgaste por fatiga de esta estructura. En este artículo publicado por la revista *Structural Integrity Procedia*, los autores determinan que la causa de la corrosión es debido a las cargas dinámicas de grandes magnitudes durante la operación de la turbina, causadas por el movimiento de las olas ejercido en el sistema de amarre que conecta, por medio de cadenas, a la fundación flotante con el lecho marino. En esta investigación se expone un estudio de elementos finitos para determinar el desgaste luego de que se detecte la grieta y se desarrolló un algoritmo escrito en lenguaje Python para generar los perfiles y dimensiones de las picaduras que se basan en una distribución aleatoria de las mismas. En este caso se utilizó protección catódica como método de protección para mitigar la corrosión por picadura, la cual se caracterizó por

tener una tasa de corrosión típica de 0.4 mmpy (Moghaddam et al., 2019). En China se presentó otro caso de corrosión por picadura en una turbina de viento, más precisamente en su fundación, estructurada por un tubo de acero. Esta investigación fue publicada por la revista *The Open Civil Engineering Journal* y expone que esta fundación se encuentra en un ambiente marino altamente corrosivo, por consiguiente, se debe tener cuidado al momento del diseño para la correcta operación de la turbina de viento. En el artículo se utiliza la fórmula electroquímica de Faraday para promediar el grado de la corrosión localizada y obtener el valor equivalente para la corrosión uniforme. Un resultado importante que arroja este estudio es la disminución del esfuerzo último del tubo con que está construido el soporte de la turbina, el esfuerzo último de las zonas donde se encuentra la corrosión localizada ha disminuido hasta llegar a ser el 65 % de las zonas en donde no se presenta corrosión alguna, es decir, una disminución del 35 % de esta propiedad del material. Esta afectación es bastante significativa para tener en cuenta en los cálculos de diseño e incluir un monitoreo o inspección para evitar una catástrofe (K. Wang et al., 2016). Otra causa de corrosión es la de biofouling, que se define como la presencia o acumulación de microorganismos, plantas, algas o pequeños animales en superficies húmedas o sumergidas que tienen una función mecánica. Esta causa de corrosión se presenta en gran medida en estructuras offshore; el tipo y cantidad depende de las condiciones ambientales, tales como temperatura, composición del agua y la cinemática de esta. En un reporte estadounidense estudian el desempeño de diferentes métodos de protección contra la corrosión causada por biofouling para torres de turbinas de viento mediante ensayos de laboratorio. Estos ensayos fueron desarrollados en revestimientos aplicados en zonas submarinas, intermedias y en zonas de chapoteo, en una estructura de acero previamente sometida a un proceso de sandblasting de acuerdo a la norma ISO 8504-2. En este reporte no solamente se estudió el comportamiento de

revestimientos en distintas zonas de la estructura sino también el comportamiento de zonas sin revestimiento, pero con protección catódica (JPCL, 2009). En una investigación alemana publicada por la revista *Marine Pollution Bulletin*, afirman que el ambiente marino va a cambiar debido al alto crecimiento y acogida de la industria eólica, y por ende, mayor instalación de granjas de viento offshore. Uno de los cambios a los que se va a someter el ambiente marino son las emisiones químicas causadas por productos para proteger las estructuras de la corrosión. Este es un impacto importante, sabiendo que la corrosión es un problema general para las estructuras offshore y por consiguiente es necesario la utilización de productos para la protección en contra la corrosión para el correcto desarrollo de la operación y la integridad de la estructura. Estos sistemas de protección se encuentran comúnmente en contacto directo con el agua de mar y tienen distintos potenciales de emisiones, por ejemplo, los ánodos galvánicos emiten cantidades significativas de metal, los recubrimientos orgánicos deben liberar sustancias orgánicas debido a las condiciones atmosféricas o lixiviación. El objetivo del artículo es evaluar los impactos ambientales de estos sistemas de protección para evitar la contaminación y que la energía eólica siga siendo parte de las energías limpias (Kirchgeorg et al., 2018). En la industria offshore, además de preocuparse por el impacto ambiental que puedan tener algunos tipos de protectores o inhibidores, también se busca encontrar una manera de optimizar los procesos de detección y monitoreo de corrosión para turbinas de viento costa afuera. Debido a la ubicación de estas estructuras es más complicado realizar estos procesos en comparación a una estructura que se encuentre en tierra, como en el caso del monitoreo por medio de ultrasonido, emisiones acústicas y rayos X. En un estudio realizado en el Reino Unido, publicado por la revista *Data In Brief* se afirma que se puede implementar una tecnología de sensores remotos en tiempo real para la detección y el monitoreo autónomo de estas estructuras, dando a conocer información detallada acerca

del proceso de corrosión. Esto es posible de lograr a partir del concepto de internet de las cosas (IoT) por medio de la integración de satélites y la red de comunicación terrestre. Este proyecto fue fundado por Innovate UK y su objetivo es diseñar una red de sensores inalámbricos para detectar y monitorear la corrosión en aerogeneradores offshore. Los resultados de esta investigación arrojaron una base de datos que consiste en parámetros de salida o umbrales de metales específicos utilizados en turbinas de viento offshore, como lo son la torre, la fundación y su caja de transmisión (Ahuir-Torres et al., 2019).

Otro tema importante en la industria de energía eólica offshore es la selección de materiales, ya que el crecimiento exponencial de esta va a depender directamente de las reducciones de los costos de producción y esto se puede cumplir a partir de la eficiencia, la economía y la optimización de las estructuras de soporte de estas turbinas. En un artículo inglés publicado por la revista *Marine Structures* se afirma que para poder hacer que la industria eólica offshore sea de gran acogida se han realizado grandes esfuerzos e investigaciones para optimizar su aplicación y la selección de materiales. Debido a las complicadas condiciones en las que se encuentran estas turbinas de viento offshore se dice que los daños por fatiga y corrosión son los retos más grandes en la actualidad en cuanto a diseño y estimación de la vida de las estructuras de soporte de los aerogeneradores. Este estudio presenta resultados de un ensayo acerca del crecimiento de grieta debido a fatiga en un acero S355 TMCP (Thermo-mechanically Controlled Processed) avanzado en aire y agua de mar, y es comparado con los resultados que se encuentran disponibles en estudios previos de acero S355. Los resultados arrojan que los aceros S355 TMCP se comportan mejor cuando están sometidos a cargas dinámicas o de fatiga en el aire, en comparación con el acero S355 regular, pero en agua de mar no hay diferencia significativa en las tasas de crecimiento de grieta para los aceros considerados en este estudio (Igwemezie et al., 2018). Otro estudio en Alemania confirma la idea

de que la industria de la energía renovable en el mundo está en constante crecimiento, en este país se han estado desarrollando proyectos de granjas de turbinas de viento costa afuera debido al gran éxito conseguido con esta tecnología en tierra. Estos proyectos siempre son un reto debido a las condiciones dañinas asociadas al agua de mar a las que se someten estas estructuras, que incluyen la variación de humedad y los daños debido a impactos por hielo y restos de naufragio flotantes. En este caso se presenta un tipo de corrosión SCC (Stress Corrosion Cracking), la cual no es posible de mitigar con los métodos convencionales de protección que tienen un espesor promedio de 1000 micrómetros para poder alcanzar una esperanza de vida de 25 años. Como resultado de esto, el espesor de varios elementos de construcción debe ser aumentado de antemano para evitar el desgaste del acero. Este artículo presentado por la revista Key Engineering Materials expone un nuevo método de protección para estos casos, el cual se basa en una capa hecha de mortero con un espesor de alrededor 10 milímetros, el cual es suficiente para proteger el acero de este fenómeno. “Esta capa genera una alta resistencia al ingreso de cloruro, a la abrasión y a la congelación” (Lohaus & Weicken, 2011). Por otro lado, en el departamento de energía eólica de la Universidad Técnica de Dinamarca se realizó una investigación correspondiente a la protección catódica, la cual puede ser definida como la acción de prevenir que una superficie metálica se corra haciendo que dicha superficie sea el cátodo de una celda electroquímica. Este artículo hace referencia al procedimiento de la optimización de costos para el método de protección catódica por medio de ánodo galvánico basado en las normas para protección catódica y simulación numérica. Esta optimización es realizada a partir de una aproximación para el número y las dimensiones de los ánodos galvánicos, en donde distribuyen los ánodos optimizados a lo largo del elemento de soporte y al final se evalúa el potencial de protección en la estructura durante su vida de diseño a partir de un software de elementos finitos llamado COMSOL. Los

resultados encontrados en este proyecto muestran que el procedimiento de optimización propuesto por los autores es capaz de reducir el costo de un sistema de protección catódica en alrededor del 70 % comparado con el procedimiento no optimizado para la protección catódica (Sarhadi et al., 2018).

Plataformas petroleras

Por otra parte, las turbinas eólicas no son las únicas estructuras que se instalan costa afuera y, por ende, no son las únicas a las que se le hacen estudios de inspección, control y mitigación de corrosión. En la literatura académica y gris que se encuentra disponible existe un gran número de artículos, reportes, normas, libros, etc. referentes a la corrosión en plataformas offshore de extracción de petróleo y gas natural. En estos se verifica que muchos de sus elementos son propensos a sufrir de este fenómeno y se convierte en un problema poniendo en riesgo el correcto desarrollo de la operación.

En la literatura disponible, se encuentra un caso en el cual es posible predecir de manera empírica las tasas de degradación en una plataforma de extracción de petróleo y gas natural, relacionadas con las fallas de tuberías por corrosión erosiva debido a la presencia de partículas de arena dentro de esta. En este artículo publicado por la revista internacional de la Sociedad de Ingenieros de Petróleo, SPE Journal, se trata la corrosión por erosión, la cual se relaciona de gran manera con la influencia de dióxido de carbono, esto ha sido estudiado extensamente por más de 70 años en la industria petrolera y de gas natural. En esta investigación se tomaron varias secciones de tubería de acero al carbono de una plataforma offshore, en donde se encontró una degradación severa debido a la poca aplicación de inhibidores y a las típicas condiciones atmosféricas que favorecen este fenómeno. En este documento se utilizó un modelo que es capaz de determinar la tasa de pérdida de espesor para dicha tubería de acero al carbono sometida a contenidos de dióxido de carbono y condiciones que favorecen a la corrosión erosiva, como lo es la

presencia de partículas de arena y otro tipo de sólidos dentro de la tubería. Este trabajo presentó una tasa de corrosión típica de 7.5 mmpy y la solución para esto fue mejorar la aplicación de inhibidores (Barker et al., 2014). En este tipo de estructuras se puede evidenciar que también se pueden presentar distintos tipos de corrosión y en distintos elementos de esta, como se presenta en un estudio realizado en Corea del Sur y publicado por la revista *Corrosion Science* que hace referencia a la presencia de corrosión de tipo Pitting en una tubería de una plataforma de extracción y producción de petróleo y gas natural costa afuera. Se sabe que existe una alta demanda de combustibles fósiles para la generación de energía y a medida que transcurre el tiempo esta aumenta, la industria de extracción de petróleo y gas natural se ha visto obligada a investigar y explorar nuevas zonas costa afuera en aguas más profundas y ambientes más dañinos para las estructuras y los equipos. Esto hace que se presenten más daños debido a la corrosión y, por consiguiente, mayores costos de mantenimiento y monitoreo para la correcta operación del proceso. El objetivo de este estudio fue investigar las características del progreso de la corrosión en los oleoductos que se encuentran en aguas profundas y plantear una ecuación en función del tiempo, en la cual se pueda obtener y conocer el desgaste de los mismos. En esta investigación se encontró una tasa de corrosión típica de aproximadamente 0.2 mmpy y se determinó una característica importante por medio de datos estadísticos en cuanto a las diferencias considerables en pérdidas por corrosión entre diferentes zonas de exposición, las cuales están relacionadas directamente con la superficie topográfica (Hairil Mohd & Paik, 2013). Otro caso de corrosión localizada o Pitting en plataformas petroleras y de gas natural fue analizado en China, pero en este caso este fenómeno ocurrió en un elemento de soporte de la plataforma. Este estudio publicado por la revista *Anti-Corrosion Methods And Materials*, hace referencia al proceso de corrosión de un acero D32 ubicado en una zona de chapoteo de la estructura

de soporte. Esta investigación plantea que la zona de chapoteo es el área más corrosiva en el ambiente marino debido a su alta frecuencia de la transición entre mojado y seco, como también el abundante suministro de oxígeno debido a la influencia del viento, de la marea y el agua de mar, contribuyendo con el desgaste de los productos de recubrimiento para contrarrestar la corrosión. Otro punto importante a tener en cuenta en el diseño de estos elementos de soporte en la zona de chapoteo es la alta concentración de sal en la superficie producida por el secado intermitente. Estas razones mencionadas anteriormente argumentan el hecho de que en la zona de chapoteo la tasa de corrosión, en general, es mayor a las zonas sumergidas del elemento de soporte de la estructura. En este caso el método de protección utilizado fue la protección catódica pero no funciona de la mejor manera para evitar este fenómeno como en las otras zonas de la estructura de soporte debido al secado intermitente que caracteriza a la zona de chapoteo (Liu et al., 2016). Un caso parecido al mencionado anteriormente realizado también en China y publicado por la misma revista, muestra varios tipos de corrosión utilizando especímenes para demostrar las pérdidas de espesor antes y después de aplicar inhibidores. Esto se realizó debido a que ha habido varios ataques de corrosión severos en una de las plataformas de almacenamiento flotante en el sur de China. A partir de varios análisis de incidentes por fallos relacionados con la corrosión, se identificaron 88 problemas en las plataformas de producción de petróleo en tan solo un par de años. Estos fallos hacen referencia a dos puntos de fuga que aparecieron en el oleoducto y más de 60 puntos de fuga en las tuberías de suministro de agua. Este estudio arrojó una tasa de corrosión típica de 2.54 mmpy o 1 inpy y la causa identificada fue un aumento en la temperatura y la formación de una capa de FeCO_3 en las superficies afectadas (Lu et al., 2014). Para el estudio de corrosión en estructuras offshore, sobretodo, en plataformas petroleras y de gas natural, cabe resaltar que las tuberías son las arterias de esta industria, siendo estas una de las formas más

económicas de transmitir o transportar petróleo y gas natural desde un punto de entrada en una plataforma costa afuera o una estación de compresión en tierra. Debido al ambiente tan complicado en el que se encuentran estas tuberías, el daño de las tuberías es inevitable y puede resultar en pérdidas no solo económicas sino también en causas de contaminación ambiental. El daño más común en las tuberías que operan en estas estructuras es debido a la corrosión, haciendo que estas disminuyan su capacidad para soportar esfuerzos tanto estáticos como el consecuente a cargas cíclicas. Un estudio realizado en China, indica la capacidad máxima de carga para este tipo de tuberías teniendo en cuenta defectos dimensionales debidos a la corrosión. Los autores proponen un grupo de soluciones generales para estimar la capacidad máxima o última de carga para tuberías que hayan presentado cambios dimensionales y relacionando parámetros como la presión interna, la fuerza axial y el momento flector. En esta investigación se utilizó un método numérico simplificado, el cual considera las características de distintos materiales, para poder obtener soluciones generalizadas que se comparan con datos reales y poder predecir los efectos de la corrosión (Chen et al., 2015). Otra causa de corrosión en plataformas de extracción de petróleo y gas natural es por bacterias sulfato reductoras (SRB), las cuales son las causantes de la producción no deseada de sulfuro de hidrógeno (H₂S) en estas plataformas. Esto es un problema común durante la segunda recuperación de crudo cuando se inyecta agua de mar para producir el petróleo remanente en los reservorios. La producción de sulfuro por las SRB no solamente causa corrosión, también deteriora la calidad del producto, disminuye la permeabilidad de los poros de los reservorios de petróleo, impidiendo que se pueda realizar la segunda recuperación de petróleo por inyección de agua, y además produce tapones en los reservorios (Okoro & Amund, 2015). Otro estudio relacionado con el proceso de recuperación de petróleo en reservorios y la corrosión a partir de bacterias sulfato reductoras, se realizó en México y

fue publicado por la revista *International Biodeterioration and Biodegradation*. Este artículo afirma que el proceso de inundación o inyección de agua utilizada en el proceso de la recuperación de petróleo en reservorios debe cumplir con altos estándares de calidad para evitar fenómenos como la degradación o biocorrosión del crudo durante la operación, siendo esto influenciado por las bacterias sulfato reductoras y bacterias reductoras de hierro (Zapata-Peñasco et al., 2013). En la industria del petróleo offshore es muy común el uso de acero para cada elemento de la estructura, tanto para equipos de extracción como para plataformas de producción, haciendo que estas sean muy susceptibles a sufrir de corrosión interna y externa ocasionada por el ambiente agresivo en el que se encuentran, debido a temperaturas y presiones bastante altas. Un estudio realizado en Nigeria publicado por la revista *Journal of Molecular Liquids*, expone que la corrosión presenta costos millonarios dentro de los proyectos de extracción de petróleo y gas natural, estos costos incluyen nuevas construcciones, inspecciones, evaluación de la integridad de la estructura, mantenimiento de equipo corroído y la corrección de las fallas relacionadas al desgaste por corrosión. Estos costos son del orden de los miles de millones de dólares al año, según la Organización Mundial de Corrosión (WCO). Últimamente, en esta industria un objetivo muy importante es la de disminuir costos relacionados a daños por corrosión y también el de buscar soluciones que no impacten negativamente al medio ambiente, para eso en este estudio los autores se enfocan en discutir varios tipos de inhibidores orgánicos, incluyendo inhibidores sintéticos y naturales (Olajire, 2017).

Otro estudio realizado en Nigeria y publicado por la revista *International Journal of Industrial Chemistry* expone la importancia del conocimiento de los operadores, ingenieros de tuberías y diseñadores de una plataforma de extracción y producción de petróleo y gas natural, acerca de los daños que puede ocasionar la corrosión y los errores

de mantenimiento e inspección. La reducción de costos de mantenimiento y de mitigación se ve reflejada al momento de tomar las decisiones correctas, es decir, contando con personal altamente calificado que sea capaz de realizar un diseño eficiente, teniendo en cuenta la selección de materiales y su comportamiento enfrentando el fenómeno de la corrosión. A partir de este artículo, se recomienda en la industria petrolera offshore que es mejor utilizar inhibidores junto con los recubrimientos protectores, que simplemente el inhibidor. Con las medidas necesarias y el personal calificado es posible ahorrar miles de millones de dólares debido al desgaste por corrosión en plataformas de este tipo (Popoola et al, 2013). Es importante resaltar la importancia del método de la protección catódica, siendo este un método efectivo para combatir la corrosión causada por el agua de mar y las condiciones atmosféricas. Como se mencionó anteriormente, la contratación de personal altamente calificado mejora los procesos del proyecto, ya que, en muchos casos el diseño de los sistemas de protección catódica depende directamente de la experiencia y los conocimientos empíricos adquiridos por el ingeniero en corrosión a cargo. En una investigación realizada en China se utiliza un método de elementos de frontera para simular la corriente en un sistema de protección catódica aplicado en una plataforma petrolera para poder alcanzar el potencial ideal y la distribución de la corriente, y así poder hacer más eficiente y preciso el diseño de sistemas de protección catódica, en cuanto a su ubicación y la cantidad de ánodos con diferentes corrientes, teniendo en cuenta las curvas de polarización de materiales en agua de mar. En este experimento también se construyó un modelo real para comparar con los datos arrojados por el método de elementos de frontera y los resultados fueron consistentes (X. Wang et al., 2014).

Otro caso importante que se debe tener en cuenta, ya mencionado anteriormente, en las estructuras offshore, pero más precisamente en las tuberías y las máquinas de flujo de las plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural, es el fenómeno de

corrosión por erosión. Teniendo en cuenta la idea de reducir costos, se debe incluir la posibilidad de que ocurra este fenómeno causando daño y desgaste de materiales en tuberías cuando se trata de transportar fluidos con contenido de sólidos o que se presente cavitación. En un estudio realizado en Reino Unido y publicado por la revista holandesa *Wear*, se evidencia la importancia de la selección de material resistente a la erosión para el diseño de máquinas de flujo y resalta las dificultades que estos presentan al momento de ser expuestos en condiciones en donde haya presencia de partículas de arena o se presente cavitación en un medio corrosivo. En este artículo se discute el desempeño de recubrimientos utilizados para combatir la corrosión erosiva, comparando la tasa de pérdida de volumen con el impacto que presenta la arena dentro de los sistemas (Wood, 2006). Además de la presencia de sólidos, las tuberías se ven afectadas también por la velocidad del fluido y la microestructura del material. Otra investigación referente a la corrosión erosiva en la industria petrolera offshore, realizada en Irán, presenta los efectos de estas razones en un acero CK45 de dos fases con diferentes microestructuras. Las microestructuras de las muestras fueron modificadas a partir de tratamientos térmicos y variando la velocidad del fluido. Los resultados arrojaron que aumentando la velocidad del fluido de 5 m/s a 16 m/s la curva de la tasa de corrosión por erosión crece de cuatro a seis veces de forma exponencial dependiendo de la microestructura (Zadeh & Rashidi, 2020). En un reporte de una compañía estadounidense llamada Emerson, muestran un trabajo realizado para una compañía petrolera asiática, en donde aplicaron el método de arenado (Sandblasting), el cual es un método muy efectivo para remover óxido y pintura de superficies metálicas debido a sus características abrasivas, pero una consecuencia no deseada de este método, es cuando por las tuberías fluyen partículas de arena, haciendo que se erosione el interior de las tuberías, válvulas y ajustes, resultando una alta tasa de desgaste y disminución de la vida de servicio. Desafortunadamente, la cantidad de arena

y el tamaño de los granos es imposible de predecir o controlar. La única manera de monitorear este fenómeno es instalando, en un momento determinado, sistemas de monitoreo acústico a la tubería para poder escuchar el característico sonido de la arena fluyendo por la línea. Esto es de mucha ayuda para tener conocimiento de que hay presencia de sólidos dentro de la tubería, pero es imposible cuantificar la pérdida de metal debido a este fenómeno. La única solución que pueden tener los operadores de la línea puede ser la de disminuir la velocidad del fluido al momento que el sensor acústico muestre un alto nivel de presencia de arena para evitar un poco la abrasión superficial de la tubería. Para solucionar este problema, se instalaron sensores de ultrasonido, denominados Rosemount Wireless Permasense, en las partes donde se encuentra el mayor grado de daño por erosión para poder determinar el peor de los casos. Estos sensores toman lecturas del espesor de la tubería y la envían al cuarto de control cada 15 minutos, lo cual le ha sido de gran ayuda a los operadores, ya que pueden caracterizar situaciones en donde la pérdida de metal sea leve, promedio o severa. Como resultado de esta mejora en cuanto a monitoreo del proceso, la plataforma alcanzó un crecimiento significativo en su producción, sin incrementar el riesgo relacionado a corrosión y erosión en sus líneas de tubería (Emerson, 2019).

La caracterización de la corrosión es muy importante para poder hacer efectiva su mitigación y control. En la literatura disponible se encuentra un artículo realizado en Rusia, el cual analiza los factores que causan distintos tipos de corrosión en estructuras de extracción y producción de petróleo, gas natural, carbón y otros minerales, ubicadas en el Mar Negro. El autor calculo las tasas de corrosión para elementos de soporte, de acuerdo a su ubicación en diferentes zonas, por ejemplo, debajo del agua, encima del agua o en su zona de chapoteo, teniendo en cuenta datos extraídos de reportes en diagnósticos técnicos de plataformas offshore ubicados en la región del Mar Negro. Como resultado se obtuvo

que las zonas en donde se encuentra una mayor tasa de corrosión, es cuando la pintura o recubrimiento se encuentra desgastado o tiene poca adhesión a la estructura, también se puede encontrar el caso de la completa ausencia de estos recubrimientos, haciendo aún mayor la tasa de corrosión debido a, por ejemplo, biofouling en los elementos que se encuentran debajo del agua (Starokon, 2020).

Embarcaciones

Otras estructuras que sufren de corrosión son las embarcaciones y demás componentes que hacen parte de la industria naval. Los barcos siempre han estado influenciados por los diferentes tipos de corrosión, por esta razón es muy importante tener en cuenta la selección de materiales en su diseño y construcción, y también realizar los respectivos procesos de monitoreo y control. En un artículo presentado por un profesor polaco de Gdansk Univeristy of Technology, se expone la influencia de la corrosión de tipo pitting en las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para construir los componentes de un casco de una embarcación. Bajo cargas estáticas y cuasi estáticas, el esfuerzo último y el esfuerzo a la tensión de aleaciones de acero se ve afectado debido a la corrosión por picadura. En esta investigación se analizan los diagramas de esfuerzos a tensión y se puede evidenciar que la corrosión de tipo pitting reduce notablemente la carga correspondiente a la resistencia a la fluencia y el esfuerzo último a la tensión se reduce casi a cero, haciendo el metal semejante a un cerámico, reduciendo en gran medida la elongación antes de la fractura (Jakubowski, 2011). El análisis de los problemas de fracturas por esfuerzos debidos a corrosión es de gran importancia en buques. Esto normalmente ocurre cuando las condiciones climáticas son desfavorables, como ocurrió en noviembre de 2007 en el estrecho de Kerch durante una tormenta, en donde muchas embarcaciones que transportaban minerales como oro y carbón se hundieron y otro buque petrolero se rompió en dos partes, ocasionando un gran

impacto ambiental ya que, 1300 toneladas de petróleo y 6800 toneladas de sulfuro cayeron al océano. Además de esto, el hecho de que en las 20 embarcaciones afectadas se enviaran señales de auxilio al mismo tiempo conllevó a que ocurrieran daños graves en los edificios y estructuras cercanas en Sebastopol, Rusia, el cual es el puerto más grande del Mar Negro. Todas estas catástrofes mencionadas fueron causadas por daños por corrosión por fatiga, la cual se puede definir como el defecto y falla de metales bajo la acción de esfuerzos cíclicos en ambientes corrosivos. Para evitar la disminución de la vida de las estructuras, en este caso, el casco de una embarcación, debido a la corrosión por cargas cíclicas, se utiliza la protección catódica y esta no tiene que ser reemplazada durante la vida de la embarcación asegurando una buena protección en contra la corrosión. Otro punto a favor importante de utilizar protección catódica en barcos, es que esta hace disminuir el peso de la estructura ya que no se utiliza un aumento de espesor en las placas debido al desgaste por corrosión (Kramar et al., 2015).

En un artículo desarrollado en Reino Unido se expone que los ambientes marinos incluyen varias zonas, en las cuales los materiales pueden ser expuestos y ser víctimas de la corrosión, como lo pueden ser las superficies atmosféricas, la zona de chapoteo, la zona submarina o la zona en donde se encuentra sedimentada la estructura. En estas condiciones se presentan diferentes factores que favorecen al aumento de la tasa de corrosión, incluyendo la temperatura, los niveles de nutrientes, la velocidad del agua y la profundidad. En esta investigación se utilizan técnicas e instrumentación modernas, para identificar factores influyentes en cada caso de estudio que se menciona en el artículo, como lo es el de corrosión acelerada por bajo nivel de agua (ALWC), que se puede definir como una forma agresiva de corrosión localizada que puede resultar en la falla prematura de la estructura, este fenómeno ocurre comúnmente en superficies metálicas desprotegidas que se encuentren justo en un nivel bajo de agua en ambientes dañinos

(James & Hattingh, 2015). La corrosión es uno de los fenómenos más críticos en cuanto a degradación en las embarcaciones y estructuras offshore. En el caso de las embarcaciones, los cascos colapsan cuando se someten a flexión asemejándose a una viga. El modo de falla más crítico para un barco es cuando su casco colapsa al hundirse, ya que los paneles de la plataforma se someten a cargas de compresión. El desgaste por corrosión hace que la situación empeore debido a que el esfuerzo generado por la flexión aumenta, y el pandeo y la resistencia última de la estructura disminuye. En un estudio realizado en Portugal y publicado por la revista ABS Technical Papers, se establece que, a menudo, la corrosión general se asume que varía linealmente con el tiempo y que los errores presentados en predicciones referentes a la resistencia residual de estructuras corroídas son mayormente dependientes del espesor del elemento (Soares et al., 2005).

Es de sentido común pensar que la vida útil de los materiales utilizados en la industria naval se ve influenciada directamente por su resistencia a la corrosión.

Esto quiere decir que es de vital importancia los métodos de protección en las superficies expuestas a este fenómeno en la construcción de embarcaciones y otras estructuras offshore. En las últimas dos décadas se ha encontrado que los metales de construcción y diseño de embarcaciones deben ser protegidos con recubrimientos especiales como el galvanizado u otros métodos de protección, como la protección catódica mencionada anteriormente. En un artículo desarrollado en Rumania se presenta una investigación comparativa en relación a la resistencia a la corrosión de aceros de baja aleación que se encuentran sin ningún tipo de recubrimiento y de aceros galvanizados. En la investigación se realizó un ensayo basado en exponer dos muestras a un ambiente corrosivo en agua de mar proveniente del Mar Negro, más exactamente en la costa de Mangalia en Rumania. “Los ensayos electroquímicos fueron: potencial de circuito abierto (OCP), resistencia de polarización lineal (R_p), polarización potenciodinámica (PD) y

voltamperometría cíclica. Los resultados obtenidos en el lugar del experimento fueron confirmados por microscopía óptica. Los resultados revelaron una mejora en la resistencia a la corrosión del acero galvanizado en agua de mar en comparación al acero de baja aleación.” (Diaconu et al., 2015).

Otras estructuras

En las condiciones abrasivas del ambiente offshore se presenta corrosión en todo tipo de estructuras y elementos, afectando su correcta operación y generando altos costos de mantenimiento, monitoreo y mitigación. En la literatura académica y gris disponible se puede encontrar estudios de otras estructuras, diferentes a las más comunes, como lo son las turbinas eólicas, las embarcaciones y las plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural. Además de estas mencionadas, también se puede encontrar casos de estudio referentes a la corrosión en sistemas de amarre, puertos, astilleros, vehículos submarinos, equipos para la construcción offshore, entre otras. En el caso de la corrosión en los sistemas de amarre, es muy común encontrar el término tribocorrosion, el cual es un caso importante de falla en metales en aplicaciones offshore debido al efecto sinérgico del desgaste y la corrosividad del agua de mar, que se puede definir como la corrosión causada por el rozamiento entre superficies. En un artículo español, publicado por la revista Tribology International, se analiza el efecto de la temperatura en un caso de tribocorrosión en un sistema de amarre, basándose en un ensayo en el cual se presenta el rozamiento recíproco entre dos metales a dos temperaturas diferentes. En este experimento se cuantificó la pérdida total de material causada por la corrosión en la zona no desgastada y también en la superficie desgastada. A partir de estos ensayos, se confirmó que la temperatura tiene un efecto importante en el comportamiento de la tribocorrosión en metales, ya que se encontró una pérdida mayor de material al momento de someter el metal a una alta temperatura (López-Ortega, Bayón, Arana, et al., 2018).

Un sistema de amarre es muy propenso a sufrir del fenómeno de la tribocorrosión, debido al constante rozamiento entre eslabones de las cadenas y las condiciones atmosféricas que presenta el ambiente offshore. En otro artículo referente a la tribocorrosión en sistemas de amarre presentado por la revista Surface And Coating Technology se expone que el 30 % de fallas en embarcaciones y otros equipos de aplicación offshore son causados por corrosión, lo cual tiene un precio anual de aproximadamente 1.8 billones de dólares. La corrosión en estos ambientes es muy agresiva debido al alto contenido de sal y la baja resistividad del agua de mar. En esta investigación, más que todo, se presenta una evaluación de distintos recubrimientos para combatir la tribocorrosión. Este ensayo se realizó utilizando agua de mar sintética y presentó una tasa de corrosión típica de aproximadamente 0.25 mmpy. Los recubrimientos analizados fueron: recubrimiento de carburo térmicamente rociado con un sello orgánico, recubrimiento de aluminio térmicamente rociado con un sello orgánico y un recubrimiento orgánico epoxídico reforzado con plaquetas cerámicas, los cuales por motivos de simplicidad en el entendimiento del proceso fueron designados C1, C2 y C3, respectivamente. A partir de este ensayo se pudo determinar que los tres recubrimientos lograron una mejora significativa en la resistencia a la corrosión en el metal de prueba. También se encontró que el material mejoró sus propiedades tribológicas disminuyendo el coeficiente de fricción en contacto con el agua de mar.

El menor coeficiente de fricción fue alcanzado utilizando el recubrimiento C2, por consiguiente, la superficie en la cual se aplicó este, es la menos afectada por corrosión debido a deslizamiento o rozamiento (López-Ortega, Bayón, Arana, 2018). El nivel corrosivo de una región aumenta en relación al grado de contaminación que se presenta en el agua de mar. La corrosión y la contaminación se relacionan de manera que muchos desechos, generados por plantas de generación de potencia, las cuales queman

combustibles fósiles, aceleran la corrosión aumentando la presencia de óxidos y sales contaminando los cuerpos de agua. Estos problemas se agravan al momento de llegar a puertos, por ejemplo, generando daños a sus estructuras, equipo, maquinaria e instalaciones. Cada factor de contaminación como características físicas, químicas, biológicas y térmicas, afectan las costas y el proceso de corrosión en ellas, agravando cada mecanismo de este fenómeno (Valdez et al., 2016).

Capítulo III

3.1 Metodología

En este proyecto de grado se utilizó una metodología investigativa haciendo uso de distintos motores y procesadores de búsqueda para obtener referencias tanto académicas como de literatura gris, en idioma inglés. Estas referencias fueron encontradas haciendo uso de palabras clave como “offshore + corrosion + case”, “offshore + corrosion + pdf”, “offshore + corrosion + report”. Estas palabras clave se introdujeron en buscadores académicos como Google Scholar, Microsoft Academic, Scopus y Science Direct para obtener artículos científicos acerca de casos de estudio de corrosión en estructuras offshore, mientras que los documentos pertenecientes a literatura gris fueron encontrados utilizando buscadores regulares como Google para obtener libros, normas, reportes, noticias, artículos, entre otros, que hicieran referencia también a casos de estudio de corrosión en estructuras offshore.

Inicialmente se realizó una búsqueda preliminar de artículos científicos utilizando los motores de búsqueda mencionados anteriormente para este tipo de literatura, los cuales arrojaron un gran número de resultados cada uno, según las palabras clave principales

mencionadas anteriormente. Cuando se busca “offshore + corrosion + case”, Google Scholar encuentra 91300 resultados, Microsoft Academic 151 y ScienceDirect arroja 11481 resultados. Cuando se introduce “offshore + corrosion + pdf”, los buscadores Google Scholar, Microsoft Academic y ScienceDirect arrojan 177000, 334 y 480 resultados, respectivamente. Mientras que cuando se utiliza “offshore + corrosion + report” como criterio de búsqueda, se obtienen 54300 resultados en Google Scholar, 358 en Microsoft Academic y 10205 en ScienceDirect. Para luego clasificar las referencias en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, según su año, tipo de corrosión, material afectado y si el documento contaba con imágenes ilustrando el daño causado por este fenómeno de corrosión. El primer criterio de filtración utilizado fue que el documento hiciera referencia a un caso de estudio o reporte de caso de corrosión en alguna estructura offshore y como se menciona anteriormente, que se defina específicamente que material esta siendo afectado, el tipo de corrosión y si el documento contaba con imágenes. Según lo anterior, se seleccionaron y clasificaron 53 artículos científicos y esta información se ilustra de manera gráfica a partir de diagramas de barra. Luego se realizó otra búsqueda, pero en este caso de literatura gris, en la cual se encontraron utilizando el buscador Google. Este buscador convencional muestra mas de 8 millones de resultados al introducir “offshore + corrosion + case” como criterio de búsqueda, mientras que cuando se utilizan las palabras clave “offshore + corrosion + pdf” Google muestra un poco mas de 7 millones de resultados y 6.7 millones si se introduce “offshore + corrosion + report” como criterio de búsqueda. A partir de lo anterior, se seleccionaron 44 referencias de literatura gris de direcciones web de dominio público, como páginas web de noticias, blogs de opiniones, páginas web de compañías que comparten sus reportes y paginas oficiales de normas, las cuales hacen referencia a los mismos parámetros utilizados para filtrar resultados que para la literatura academica. Paralela a esta búsqueda de literatura

gris se realizó una segunda investigación de literatura académica, en la cual se buscó más a fondo acerca del tema para poder hacer mas filtraciones y a su vez, agregar mas documentos en la revisión, con el objetivo de obtener artículos científicos de mayor relevancia, como, por ejemplo, reviews con gran número de citas. Es importante resaltar que de los artículos encontrados en la segunda búsqueda se filtraron de acuerdo a su fecha de realización o publicación para tener información relativamente reciente, teniendo en cuenta un rango de 20 años, es decir, información publicada entre el año 2000 hasta la actualidad en el año 2020. Esto conllevó al descarte de cierto número de artículos seleccionados en la primera búsqueda realizada.

Para la selección de la información y preferencia de esta, se tuvo en cuenta que los documentos hicieran referencia a partes o elementos en específico de alguna estructura offshore que haya sufrido de algún tipo de corrosión y la especificación del material afectado pasó a un segundo plano, restándole relevancia dentro de la revisión bibliográfica. Lo anterior se determinó a partir de una lectura rápida, por lo general, del título, abstract, introducción, resultados y conclusiones, de cada referencia. Hubo documentos en los cuales fue pertinente la lectura adicional de otros puntos diferentes a los mencionados anteriormente.

Luego de tener la información filtrada de acuerdo a las necesidades que cada referencia debe satisfacer, se procedió a cambiar algunas clasificaciones y se agregaron otras más para tener una caracterización más detallada, organizándolas en una tabla en una hoja de cálculo diferente a la anterior utilizando la herramienta de ofimática Microsoft Excel.

Las referencias se clasificaron de acuerdo a las siguientes categorías:

- Autor
- País

- Año
- Revista/Journal
- Elemento analizado
- Tipo de estructura offshore
- Tipo de corrosión
- Tasa de corrosión típica
- Método de protección
- Causa identificada

Es importante tener en cuenta que no todos los documentos encontrados y seleccionados hacen referencia a casos de estudio de corrosión en una parte o elemento específico de una estructura offshore, pero se tuvo en cuenta ya que muchos son procesos experimentales desarrollados en laboratorios, en los cuales se puede evidenciar más a fondo la reacción de corrosión o el ensayo de su método de protección. Al finalizar esta segunda etapa de búsqueda se filtraron 86 documentos de literatura académica y 44 de literatura gris.

Después de tener la información de las referencias organizada y clasificada en la tabla mencionada anteriormente, se decidió uniformar varios resultados ya que estos fueron presentados por los distintos documentos de manera diferente, pero en realidad hacían referencia a la misma idea o afirmación, esto con el objetivo de presentar la información de manera gráfica para cada clasificación de la tabla y evitar tener un gran número de categorías de resultados dentro de cada clasificación que se prestara para redundancia y errores dentro del estudio. Para el caso en el cual la información necesaria no se encuentre en un documento de manera específica y no poder presentarlo dentro de una clasificación se destinó la palabra “Indeterminado”.

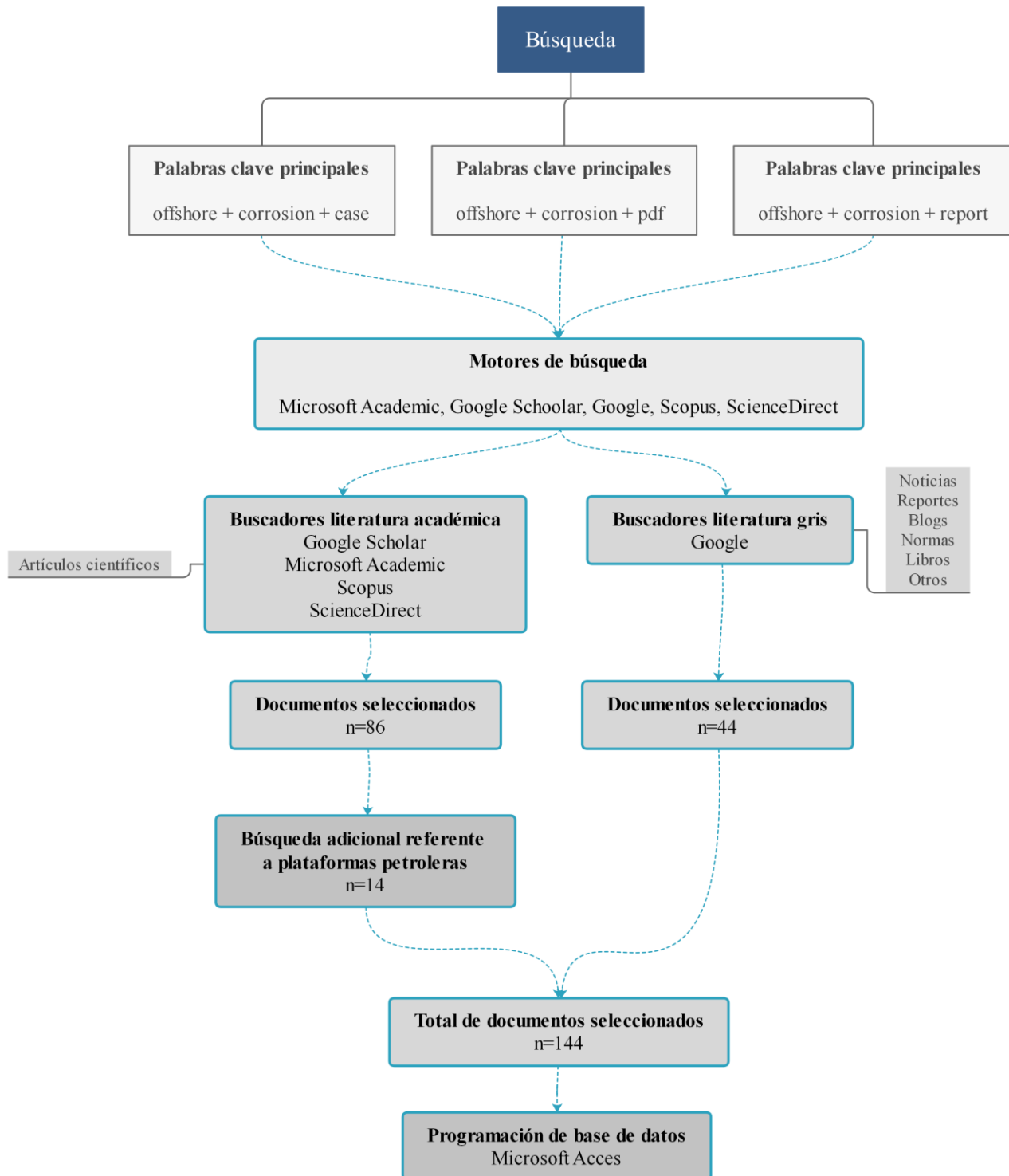
Gracias a la representación gráfica de cada criterio mencionado anteriormente se pudo tener un mejor conteo de las categorías de la información y simplificar la identificación de las respectivas conclusiones que se tendrán en cuanto al ámbito de la corrosión en estructuras offshore. Se encontraron distintos tipos de estructuras offshore, pero se hizo énfasis en las referentes a turbinas de viento o aerogeneradores, plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural, y en la industria naval. En la literatura seleccionada también se encuentran documentos referentes a otro tipo de estructuras, pero se incluyeron como una categoría más general denominada “Otros”.

Nombre	Descripción
Indeterminado	La información necesaria no se encuentra en el documento de manera específica
Varios	Se presentan varias categorías en un mismo documento
Otros	Reune los casos que se presentan una única vez

Tabla 1. Convención de categorías especiales.

A partir de los resultados obtenidos se decidió realizar una tercera y última búsqueda y revisión de artículos científicos, específicamente relacionados con la corrosión en plataformas de producción y extracción de petróleo y gas natural, debido a que son las estructuras offshore con mayor número de estudios a nivel mundial en cuanto a corrosión. Se seleccionaron, de acuerdo a su relevancia, un adicional de 14 artículos científicos, para un total de 100 referencias de literatura académica y 44 de literatura gris. Todas las referencias seleccionadas se almacenaron en una nube de Google Drive, organizadas en diferentes carpetas de acuerdo al tipo de documento (Artículos, Libros, Noticias, Reportes y Otros).

3.2 Diagrama de flujo



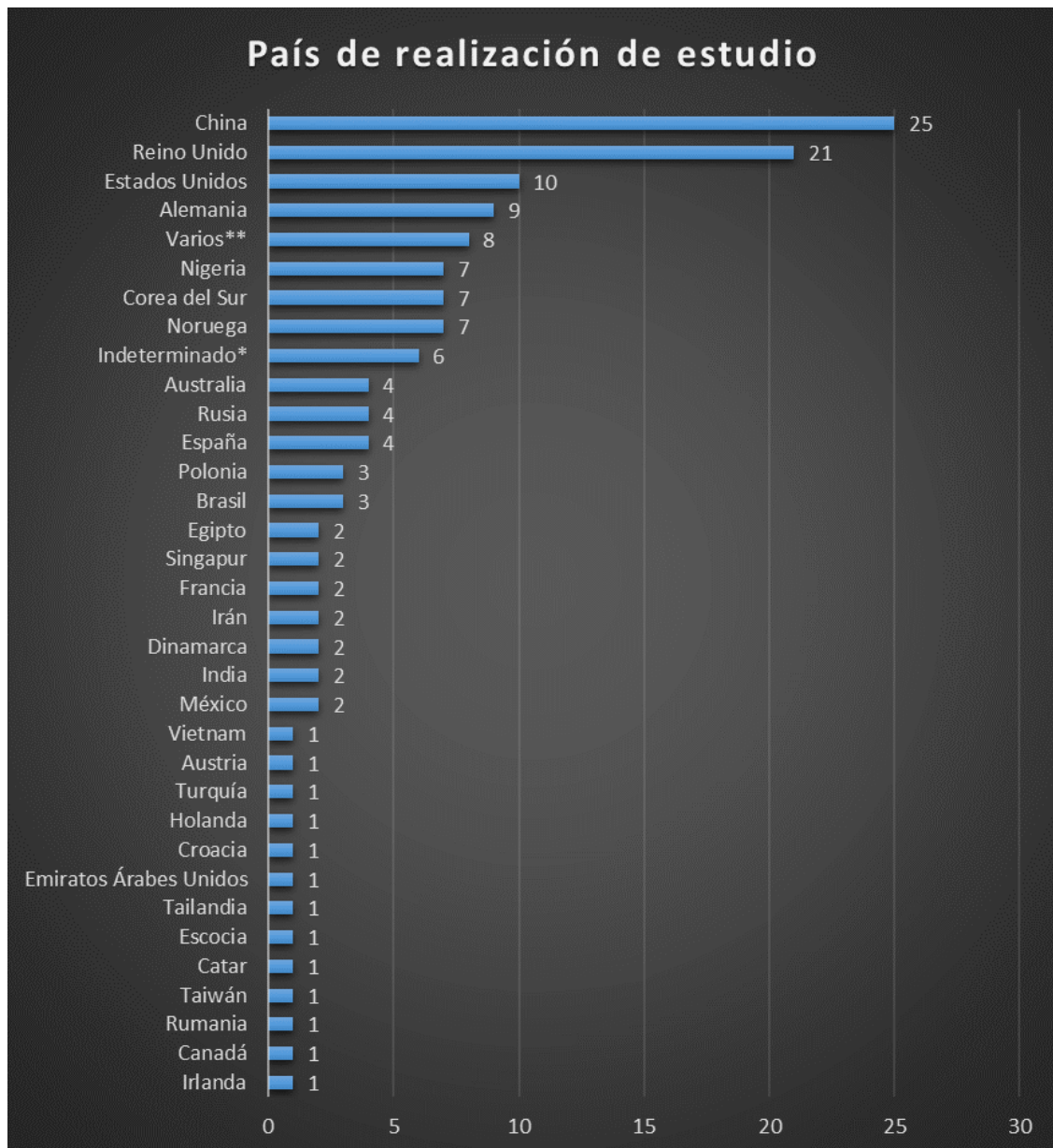
Capítulo IV

4.1 Resultados y análisis

A partir de la revisión bibliográfica realizada en este proyecto de grado se pudo encontrar que los casos de estudio o ensayos de laboratorio referentes a la corrosión en estructuras offshore que se encuentran disponibles y fueron seleccionados, se realizaron, en su mayoría, en países europeos y asiáticos. Cabe resaltar la presencia de países de América Latina como México y Brasil, los cuales aportan información relevante en cuanto a la corrosión en plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural. Estos estudios mencionados anteriormente pueden ser de gran utilidad al momento de emplear proyectos offshore en las costas colombianas, debido a las similares condiciones atmosféricas que se presentan en esos países, es decir, son los estudios más cercanos a las condiciones del caribe colombiano y por consiguiente se tendrá una mejor aproximación en cuanto al fenómeno de corrosión. Esto para evitar inconsistencias y errores que se verán reflejados, muy posiblemente, en grandes pérdidas al momento de tener como

referencia un estudio o ensayo europeo o asiático. También se encontró que Nigeria es el país africano que más aportó, cuantitativamente, a esta recopilación de estudios y a su vez uno de los que más realiza investigaciones referentes a este fenómeno en estructuras offshore, tales como plataformas petroleras y turbinas eólicas, después de potencias mundiales como China, Reino Unido, Estados Unidos y Alemania.

De acuerdo a la información recopilada en este proyecto de grado, se encontró que China es el país que más reporta casos de estudio y realiza prácticas experimentales de laboratorio, referente a la corrosión a nivel mundial. Es posible afirmar que China tiene un amplio campo de información en cuanto a corrosión y es un país en donde se realizan diferentes tipos de proyectos offshore debido a su alto avance tecnológico y su fuerte economía. Sin embargo, esto no los hace inmunes a los altos costos económicos a los que se enfrentan cuando ocurren daños por corrosión en las estructuras offshore. Diversos estudios afirman que el costo de la corrosión en China es de USD \$310 mil millones, aproximadamente el 3.34% del PIB de dicho país. Una de las razones por las que China invierte de manera considerable en estudios referentes a la corrosión es para disminuir este alto costo estando a la vanguardia en cuanto a mitigación, monitoreo y planes de mantenimiento para controlar este fenómeno en la mayor medida posible.



Grafica 1. Número de documentos seleccionados por país.

* Indeterminado: No se especifica el país.

** Varios: Realizado o estudiado en varios países.

En cuanto a los años de publicación de la bibliografía revisada, como se mencionó anteriormente en la Metodología, se determinó un rango de 20 años, es decir, del año 2000 hasta la actualidad en 2020 para contar con información relativamente reciente. En la Gráfica 2 se puede evidenciar que, de los documentos seleccionados debido a su relevancia, la mayoría fueron publicados o realizados en los años 2015 y 2018, ambos

años aportan 17 documentos cada uno. Otro punto importante para mencionar es que se evidencia un alto crecimiento en número de investigaciones a partir del año 2014 hasta la actualidad. También cabe resaltar la importancia del año actual, ya que esta revisión se realizó en el primer semestre del 2020 y fueron seleccionados 10 documentos debido a su relevancia, es decir que en medio año en la actualidad ya se habían realizado más investigaciones que en cualquier otro año entre 2000 y 2013. A partir de esta estadística se puede concluir que la industria científica y el campo ingenieril a nivel mundial va por buen camino en cuanto a reportes de casos de estudio e investigaciones de ensayos de laboratorio referentes a la corrosión en estructuras offshore, teniendo altas expectativas en las mejoras y optimización de la mitigación, el control y la planeación de mantenimiento en los próximos años.



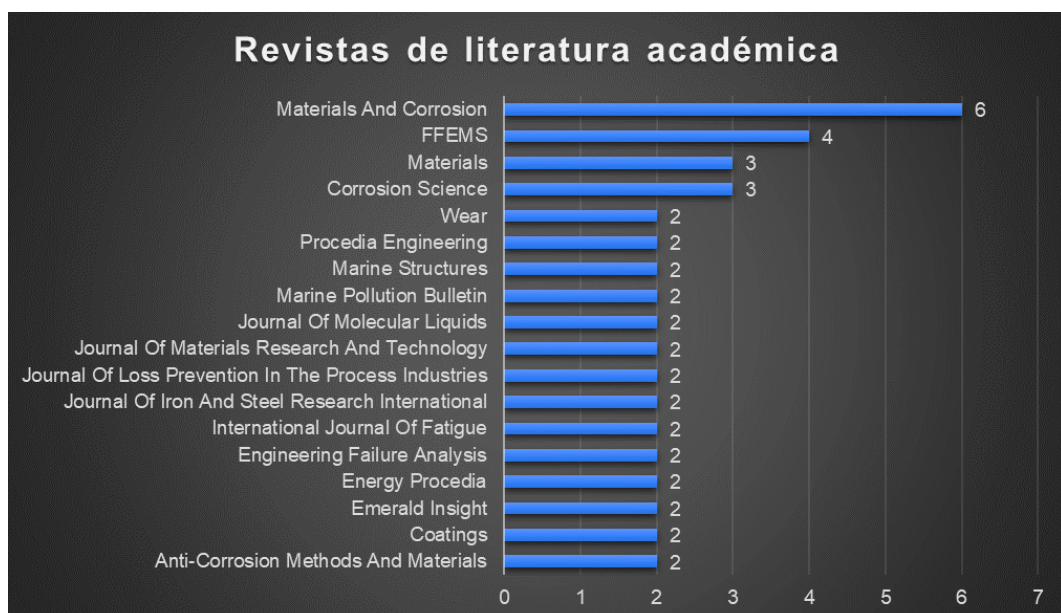
Grafica 2. Número de documentos seleccionados por año de publicación o realización de estudio.

* Indeterminado: Documento en el cual no se especifica año de realización o publicación.

Gracias a la clasificación según las revistas o sitios web en donde se publicaron estos documentos tanto de literatura académica como de literatura gris, se pudo encontrar una gran variedad de estas de diferentes países de origen. Para esta clasificación se

desarrollaron dos gráficas diferentes para revistas de literatura académica y sitios web, blogs, etc para literatura gris, respectivamente.

En el caso de la literatura académica se puede evidenciar en la Gráfica 3 una gran diferencia entre la categoría Otros y las demás revistas debido a que en esta categoría se incluyen las revistas que simplemente aportan un artículo a esta revisión de literatura. En la revisión de literatura desarrollada en este proyecto de grado no es relevante mencionar cada único caso, simplemente determinar las revistas más influyentes en el ámbito de la corrosión en las estructuras offshore. Se evidencia que Materials And Corrosion es la revista que publicó el mayor número de artículos científicos seleccionados debido a su relevancia en esta revisión bibliográfica acerca de la corrosión en estructuras offshore. Esta revista europea es líder internacional en el campo de la corrosión, cubriendo de manera rápida y comprensiva los temas y reportes estudiados a nivel mundial referentes a este fenómeno. Materials And Corrosion se caracteriza por hacer énfasis en la importancia de la investigación de la corrosión y su prevención. En cada edición se presentan artículos de alta calidad revisados por reconocidos pares académicos que hacen referencia a todos los aspectos del comportamiento de los materiales en ambientes corrosivos y también ensayos de métodos de protección.



Grafica 3. Número de documentos publicados por revistas de literatura académica.

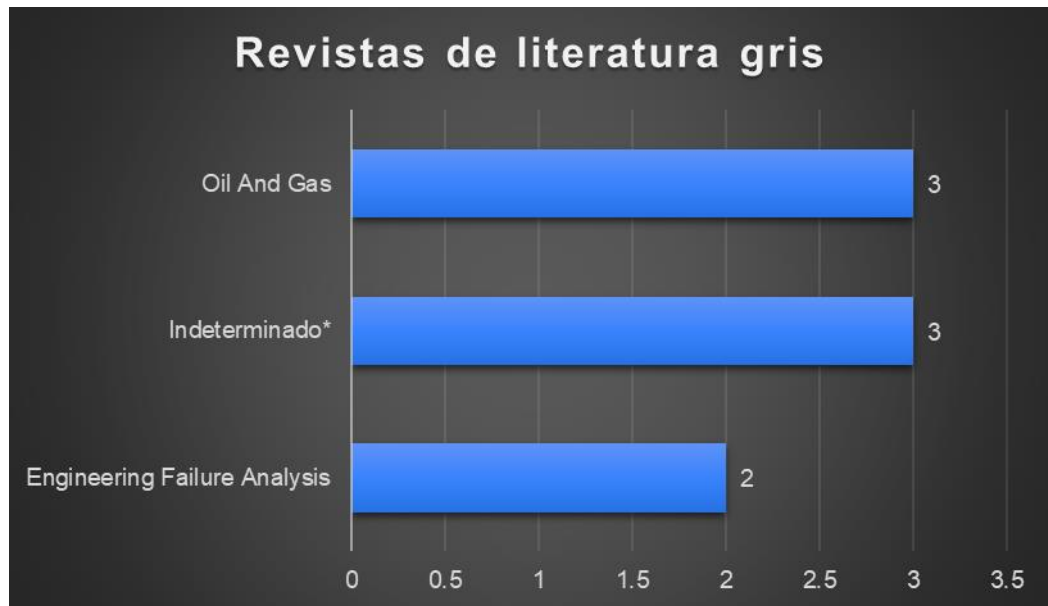
A continuación, se listan las revistas académicas, de las cuales solamente se selecciono un documento:

- ABS Technical Papers, Advances in Mechanical Engineering, Applied Ocean Research
- Blackwell Publishing Ltd.
- Bulletin of Engineering
- Case Studies in Fire Safety
- China Ocean Engineering
- Condition Assessment of Aged Structures
- Corrosion
- Corrosion Problems in Petroleum Industry
- Data in Brief
- Defence Technology
- Egyptian Journal of Petroleum
- Energies
- GRAĐEVINAR
- Hindawi Publishing Corporation
- Inorganic Materials: Applied Research
- International Biodeterioration & Biodegradation
- Intl Journal of Adhesion and Adhesives
- Intl Journal of Refractory Metals and Hard Materials
- IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science
- J Ind Microbiol Biotechnol
- Journal of Marine Science and Engineering
- Journal of Loss Prevention

- Journal of Materials Science and Engineering, Journal of Mechanical Science and Technology
- Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering
- Journal of Physics: Conference Series
- Journal of Wuhan University of Technology-Mater
- Key Engineering Materials
- Metallurgy Materials Engineering
- Neural Computing and Application
- Ocean Engineering
- Oxidation Communications
- Petroleum Science and Technology
- Polish Maritime Research
- Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore mechanics and arctic engineering
- Procedia Structural Integrity
- Proceedings of the ASME 2010 International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering
- Process Safety and Environmental Protection
- Reliability Engineering and System Safety
- Renewable and Sustainable Energy Reviews
- Renewable Energy
- Results In Materials
- Ships and Offshore Structures
- SPE Journal
- Structural Safety

- Surface & Coatings Technology
- Surface and Coating Technology
- Technical University of Denmark, Department of Wind Energy
- The Open Civil Engineering Journal
- Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies
- Tribology International
- Wind Energy
- WIT Transactions on Modelling and Simulation

Por otro lado, en cuanto a los sitios web, revistas o blogs donde se encontraron los documentos de literatura gris, tales como reportes, normas, libros, noticias, entre otros; se puede evidenciar en la Gráfica 4 una gran diferencia entre la categoría Otros, la cual incluye sitios web, revistas o blogs, de donde solo fue seleccionado un documento de acuerdo a su relevancia. En esta clasificación se incluye una categoría denominada Indeterminado debido a que estos documentos no fueron encontrados en sitios web de alta relevancia o simplemente se encontró el archivo directamente en el motor de búsqueda Google. De acuerdo a la Gráfica 4 se nota que el sitio web del cual se seleccionó más información es Oil And Gas, en donde se reportan muchos casos de presencia de corrosión en plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural. Este sitio web del Medio Oriente contiene información relevante referente a proyectos, inversiones y contratos que se desarrollan en esta amplia y millonaria industria. Se puede evidenciar que la revista Engineering Failure Analysis se encuentra tanto en la lista de revistas de literatura académica como de literatura gris, pero la diferencia en cuanto a la clasificación de estos documentos hace referencia al motor de búsqueda utilizado al momento de encontrarlos.



Grafica 4. Número de documentos publicados por sitios web, revistas o blogs de literatura gris.

* Indeterminado: No se especifica el sitio web, revista o blog al que pertenece.

A continuación, se encuentran listados los sitios web, revistas o blogs de literatura gris de donde simplemente se seleccionó un documento:

- Wear
- Bioelectrochemistry
- COMSOL
- Construction and Building Materials
- Corrosion
- Corrosion and Cathodic Protection in Steel Offshore Structures CH3
- Corrosion Behaviour of Aluminium in Marine Environments
- Corrosion Protection for Offshore Wind Structures. Part 3: Applications of Coating Systems
- Corrosion Protection for Offshore Wind Structures. Part 4: Cathodic Protection
- Corrosion Science Section

- DNV Technical Report
- Emerald Insight
- Energy Procedia
- Force Technology
- Health and Safety Executive
- Honor Research Project
- International Journal of Electrochemical Science
- Intl Journal of Industrial Chemistry
- Journal of Biotechnology
- Journal of Marine Engineering and Technology
- JPCL
- KEMA
- Materials and Corrosion
- Materials Performance
- Materials Science
- Normas ISO para pinturas
- North Sea Solutions for Innovation in Corrosion for Energy
- Norwegian University of Science and Technology
- Noticia Riviera
- NPJ Materials Degradation
- Offshore
- Polish Maritime Research
- Reliability Engineering and System Safety
- RSC Advances
- University of Nebraska - Lincoln

- US Department Of Transportation

En esta revisión bibliográfica se encontró como resultado que las tuberías son los elementos que más sufren del fenómeno de corrosión en las estructuras offshore, ya que estas transportan diversos tipos de fluidos para diversos fines. Las tuberías en estructuras offshore se encuentran expuestas a distintos ambientes corrosivos, ya que secciones de estas se pueden encontrar debajo del agua, en la zona de chapoteo o arriba del nivel del agua.

De acuerdo a la zona en donde se encuentre la sección de tubería, se pueden presentar diversos tipos de corrosión externa. En el caso de la zona debajo del agua, la sección de tubería está sometida a cargas fluctuantes ocasionadas por la corriente de agua y por consiguiente a sufrir corrosión por fatiga, también puede presentar corrosión ocasionada por el fenómeno de biofouling debido a la presencia de microorganismos como bacterias y algas, lo cual conlleva al tipo de corrosión por bacterias sulfato reductoras, por ejemplo. Cuando la sección de tubería se encuentra en la zona de chapoteo, la degradación de esta se acelera debido al constante secado y mojado de la sección, además de tener mayor presencia de oxígeno que en la zona debajo del agua. La abrasión por parte de las olas también induce a la erosión de los metales componentes de las tuberías, lo que ocasiona el deterioro de la superficie expuesta y un aumento en la velocidad de corrosión. Cuando la sección de la tubería se encuentra por encima del nivel del agua se presentan cargas mecánicas ocasionadas por el viento ocasionando esfuerzos de fatiga induciendo a la corrosión-fatiga.

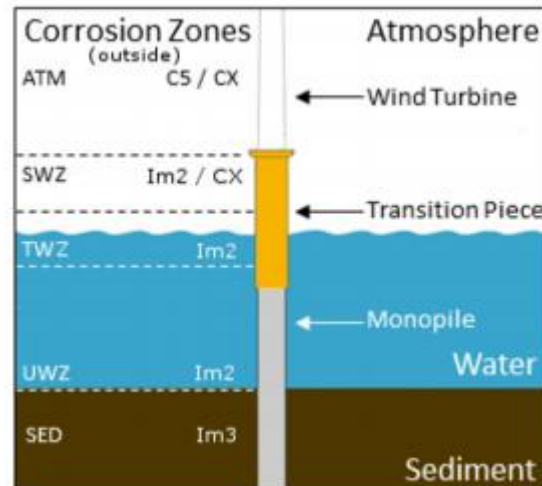


Figura 1. Zonas externas de una turbina eólica offshore. SED: Sedimento, UWZ: Zona sumergida (Under Water Zone), TWZ: Zona de marea (Tidal Water Zone), SWZ: zona de chapoteo (Splash Water Zone), ATM: Zona atmosférica (Atmosphere). (Kirchgeorg et al., 2018).

Las tuberías además de sufrir de corrosión externa debido a las condiciones atmosféricas offshore, cabe resaltar que estos elementos son más propensos a presentar este fenómeno en sus secciones interiores debido al transporte de diversos tipos de fluidos para distintos fines. En las plataformas petroleras se realizan distintos tratamientos de agua de mar, la cual tiene un alto grado de cloruro y posiblemente presencia de partículas sólidas, como arena, ocasionando corrosión por erosión en el interior del sistema de tubería. En los oleoductos se presenta corrosión de tipo pitting y se ha determinado que las picaduras van desde el interior hacia el exterior debido al contacto con el agua de mar. Un caso muy delicado e interesante para mencionar es el del fenómeno de la cavitación en tuberías, el cual se define como la presencia de cavidades dentro del fluido, que son básicamente burbujas de vapor que se originan debido a una caída de presión del fluido de trabajo por debajo de su presión de saturación o de vapor, es decir, la presión a la cual se presenta un cambio de fase de estado líquido a gaseoso. Las burbujas de cavitación al explotar presentan severos daños en las máquinas de flujo como turbinas y bombas, pero también en las tuberías, ocasionando erosión, picaduras en la superficie y falla por fatiga

generando la destrucción eventual del sistema. En el peor de los casos que no se pueda evitar la cavitación, se debe minimizar su efecto, ya que este fenómeno, además de dañar los equipos y las líneas de tubería, reduce el rendimiento y genera vibraciones y ruidos molestos, los cuales son muy característicos para poder tomar acciones a tiempo.

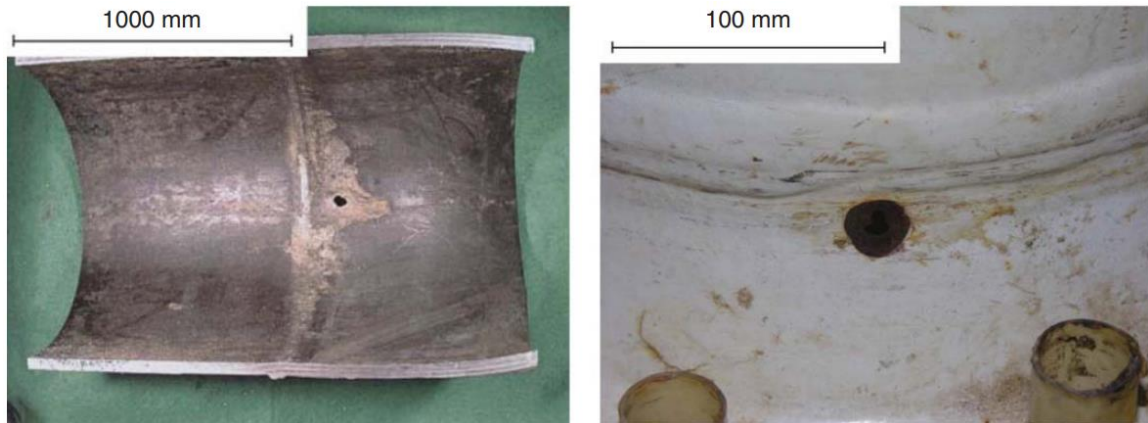
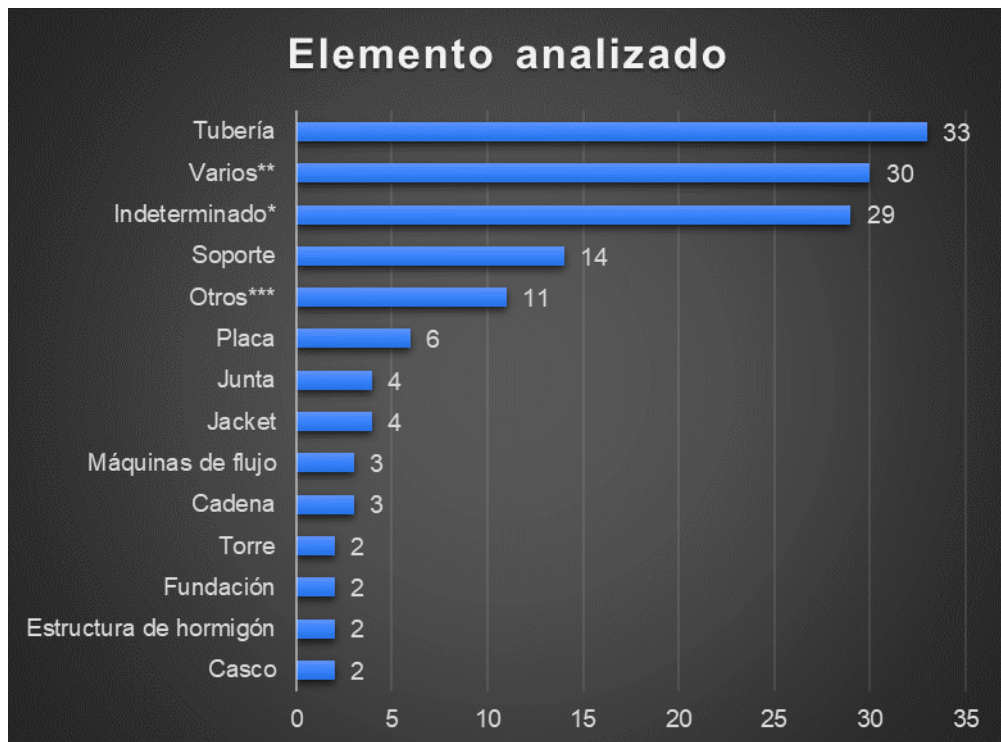


Figura 2. Tuberías de estructura offshore con corrosión localizada y altas tasas de corrosión. (Barker et al., 2014)

En la Gráfica 5 se puede evidenciar que la segunda categoría con más documentos seleccionados en esta revisión bibliográfica hace referencia a varios elementos analizados, es decir, en este tipo de documentos se reportan casos de estudios de diversos elementos en la misma o en diferentes estructuras offshore. Por otro lado, en esta clasificación de acuerdo al elemento analizado se encuentra una categoría indeterminada que incluye los documentos en los cuales no se especifica el elemento que sufre de corrosión en la estructura offshore. En varios documentos simplemente se habla de los tipos de corrosión, causas identificadas de corrosión o en el comportamiento de ciertas aleaciones expuestas al ambiente marino, en general, sin hacer énfasis en un elemento específico.



Grafica 5. Número de documentos referentes a cada elemento analizado en la estructura offshore.

* Indeterminado: No se especifica el elemento analizado en el documento.

** Varios: En el documento se hace referencia a varios elementos.

*** Otros: Únicos documentos presentando estudio en cierto elemento.

En cuanto al tipo de estructura offshore, a partir de esta significativa revisión bibliográfica, se decidió enfocar la caracterización principalmente en plataformas petroleras, barcos y turbinas eólicas offshore. En esta clasificación se incluyó una categoría denominada otros, en la cual se encuentran documentos referentes a sistemas de amarre, elementos de puertos y astilleros, sistemas de almacenamiento, instalaciones de perforación marina, entre otros y también documentos en los cuales se reportan casos de corrosión en varios de los mencionados anteriormente.

De los documentos seleccionados debido a su relevancia, se encontró a través de la Gráfica 6, que las estructuras offshore con las que más cuenta este conjunto de documentos hacen referencia a las plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural.



Gráfica 6. Número de documentos referentes a cada tipo de estructura offshore.

* Indeterminado: Documentos que no especifican el tipo de estructura offshore.

*** Otros: Documentos que presentan estructuras offshore diferentes a plataformas petroleras, turbinas de viento o embarcaciones.

Plataformas petroleras

La industria de combustibles fósiles incluye procesos a nivel mundial de exploración, extracción, refinado, transporte (normalmente por medio de barcos petroleros y oleoductos) y comercialización de productos del petróleo. Los productos de mayor volumen en la industria son combustibles o fueloil y gasolina. El petróleo es la materia prima de muchos productos químicos incluyendo productos plásticos, pesticidas, disolventes, fertilizantes y farmacéuticos. Esto conlleva a que el petróleo sea un producto esencial para muchas de las industrias a nivel global, siendo de vital importancia para el mantenimiento de la civilización industrial. Los combustibles fósiles todavía hacen parte

de un porcentaje bastante alto en cuanto a generación de energía eléctrica a nivel mundial. En el caso de países europeos y asiáticos, por lo menos el 32% de la energía consumida es generada a partir de combustibles fósiles.



Figura 3. Plataforma petrolera offshore fija. (Starokon, 2020).

En el Medio Oriente este tipo de generación de energía ocupa el 52%, mientras que países de Suramérica y Centroamérica, Norteamérica y África tienen unos porcentajes de 44%, 40% y 41%, respectivamente. Siendo estos porcentajes significativos para suplir la demanda de energía eléctrica en cada lugar del mundo. Todo el proceso del petróleo, desde su extracción hasta su comercialización, es la industria más valorada del mundo, de acuerdo a su precio en dólares.

Según el periódico colombiano, Portafolio, el país puede estar tranquilo en cuanto a autosuficiencia petrolera debido a que en el lecho de las aguas del mar Caribe se estima que se encuentran grandes volúmenes en reservas de hidrocarburos. En el país se tiene una excelente respectividad en materia de gas natural, para las cuencas Guajira Offshore y Sinú Offshore, pero la verdadera “mina de oro” está localizada a unos cuantos

kilómetros al norte, en la cuenca Colombia, cuyas reservas de hidrocarburos podrían ser tres veces en volumen las dos mencionadas anteriormente. Esta atractividad ha llamado la atención de las empresas petroleras más grandes del mundo con gran experiencia en la exploración y producción de gas natural y petróleo, las cuales han averiguado en la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) si se encuentran bloques disponibles para el desarrollo de estas actividades. El presidente de la ANH señala que la cuenca Colombia posee un potencial geológico bastante interesante de combustibles fósiles por extraer en este yacimiento convencional, y desde varios meses atrás, empresas petroleras de talla mundial han mostrado su interés en la exploración y explotación de las aguas ultra profundas de esta zona marina.

El departamento de Geociencias de la Universidad Nacional realizó un estudio evaluando el volumen total de hidrocarburos en el subsuelo y su capacidad de explotación; este arrojó como resultado que en la cuenca Colombia, en un escenario promedio, las reservas de petróleo superan los 3000 millones de barriles y los remanentes de gas natural crecen aproximadamente a 1.25 trillones de metros cúbicos. Este volumen sorprende cuando se resalta que las cuencas Sinú Offshore y Guajira Offshore, en conjunto, suman 754 millones de barriles de petróleo y aproximadamente 0.045 trillones de metros cúbicos de gas natural. A pesar del gran interés por parte de las empresas petroleras, esta actividad sigue siendo inviable debido a que los precios del barril que arroja el mercado internacional no son convenientes teniendo en cuenta los costos de operación. Otro punto importante también es la desaceleración de estos proyectos debido a la pandemia del nuevo coronavirus, el cual afectó a toda la operación petrolera a nivel mundial.

Además de esta nueva cuenca Colombia que se encuentra en etapa de proyección y exploración, la gran petrolera Shell firmó contratos para la exploración offshore en el

mar Caribe, demostrando interés y confianza en invertir en Colombia por parte de grandes firmas internacionales con gran recorrido en la industria petrolera a nivel mundial. Shell inició el contrato con tres bloques en el caribe colombiano, pero al ver el gran atractivo en estas reservas, se asoció con Ecopetrol para incluir en su proyecto dos bloques más, es decir, Shell estará desarrollando los bloques COL-3, GUA OFF-3, Fuerte Sur, Purple Angel y COL-5, estas tres últimas localizadas frente a las costas de los departamentos de Sucre y Córdoba. Este acuerdo entre Shell y Ecopetrol reúne el conocimiento de la región por parte de la empresa colombiana y la gran experiencia de la multinacional holandesa en exploración de aguas profundas y soluciones integrales de Gas Natural. Cabe resaltar que solo la primera etapa de este proyecto supera una inversión de US \$100 millones.

Lo mencionado anteriormente demuestra la alta demanda del caribe colombiano en cuanto a explotación y producción petrolera y de gas natural, que sin información acerca de la corrosión de la región, se provocan altos costos en mantenimiento, monitoreo y control de este fenómeno, lo cual afectaría económicamente en gran medida a estos millonarios proyectos.

Turbinas de viento

Por otro lado, omitiendo la categoría Indeterminado, la cual hace referencia a los documentos en los cuales no se especifica en qué tipo de estructura offshore está ocurriendo el fenómeno de corrosión; se tiene que el segundo tipo de estructuras offshore que más se presenta en esta selección bibliográfica son las turbinas eólicas o aerogeneradores offshore.

La energía eólica es un tipo de energía renovable que aprovecha el movimiento de las masas de aire para generar energía eléctrica a partir de una turbina o aerogenerador. Esta alternativa de generación de energía por medio del viento ha tenido gran acogida a lo

largo de los años por parte de muchos países, tanto así que se ha pasado de instalar esta tecnología de la tierra a alta mar, en donde se presenta una mejor eficiencia debido a la inexistencia de cambios en el relieve que hace cambiar la velocidad del viento de acuerdo a la ubicación de la turbina. Las turbinas eólicas offshore se instalan sobre el lecho marino y están diseñadas con las últimas innovaciones técnicas para tener una mayor eficiencia y el máximo aprovechamiento del viento en alta mar. En promedio se puede afirmar que el recurso eólico que se encuentra en alta mar es el doble del que se puede encontrar en la tierra. Una de las desventajas de la energía eólica instalada en parques terrestres es la contaminación visual y auditiva, pero en las granjas eólicas offshore esto no es un problema debido a su ubicación, haciendo que se pueda instalar una mayor cantidad de aerogeneradores marinos y obtener una mayor potencia en conjunto.

Actualmente las turbinas eólicas offshore se encuentran instaladas en aguas no muy profundas, máximo de 60 metros de calado y se ubican alejadas de las costas, del tráfico de embarcaciones, de zonas de interés ecológico y de instalaciones estratégicas navales. En Europa los parques eólicos se encuentran instalados a una profundidad media de 27.1 metros y a una distancia promedio de 33 kilómetros de la costa. A partir de la revisión bibliográfica realizada en este proyecto, se encontró que el país con mayor capacidad instalada de turbinas eólicas offshore es el Reino Unido. En Europa, el Reino Unido aporta el 44% de la capacidad instalada y le siguen países como Alemania, Dinamarca, Bélgica y Holanda, con un 34%, 7%, 6.4% y 6%, respectivamente.

Sin embargo, el nivel de tecnología que manejan los diferentes parques eólicos offshore alrededor del mundo no los protege contra la corrosión, siendo esto un factor muy importante, ya que como en cualquier otro proyecto offshore se necesitan incluir costos de mantenimiento, monitoreo, mitigación y control de corrosión para evitar pérdidas en cuanto a eficiencia y economía.



Figura 4. Granja eólica offshore de 469 MW Saint-Brieuc Bay, Brittany (Francia).
<https://www.idom.com/project/saint-brieuc-496-mwe-offshore-wind-farm-on-the-coast-of-french-brittany/#>

En cuanto al tipo de corrosión encontrado en cada documento luego de la amplia revisión bibliográfica, se pudo notar que existe una gran diversidad en la forma de actuar de este fenómeno para la degradación de las estructuras. Muchos documentos seleccionados debido a su relevancia no especifican qué tipo de corrosión es la que está sufriendo la estructura offshore, mientras que, en otros, exponen distintos tipos de corrosión en un mismo reporte o ensayo de laboratorio. De los documentos revisados y seleccionados en este trabajo de grado se puede evidenciar, a partir de la Gráfica 7, que el tipo de corrosión que más se presenta es la de tipo Pitting o por picaduras, que se define como una forma localizada de corrosión, la cual produce orificios o cavidades en el material afectado. Este tipo de corrosión es causada por la despasivación de una superficie pequeña del material, que se convierte en ánodo mientras que un área grande y desconocida, pero con alto potencial se convierte en cátodo, llevando a cabo la corrosión galvánica específicamente localizada. Este fenómeno penetra la masa del material con una limitada difusión de iones.

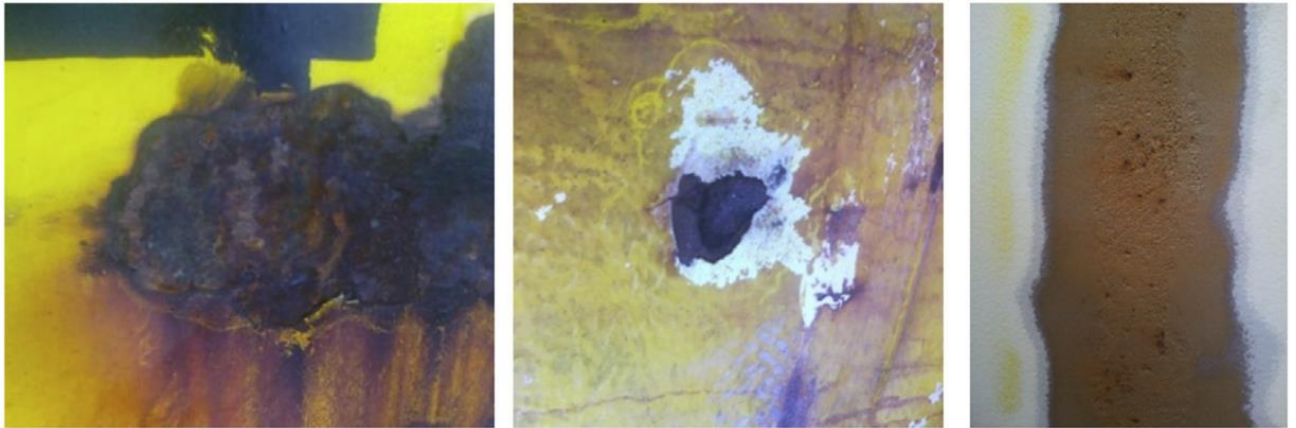
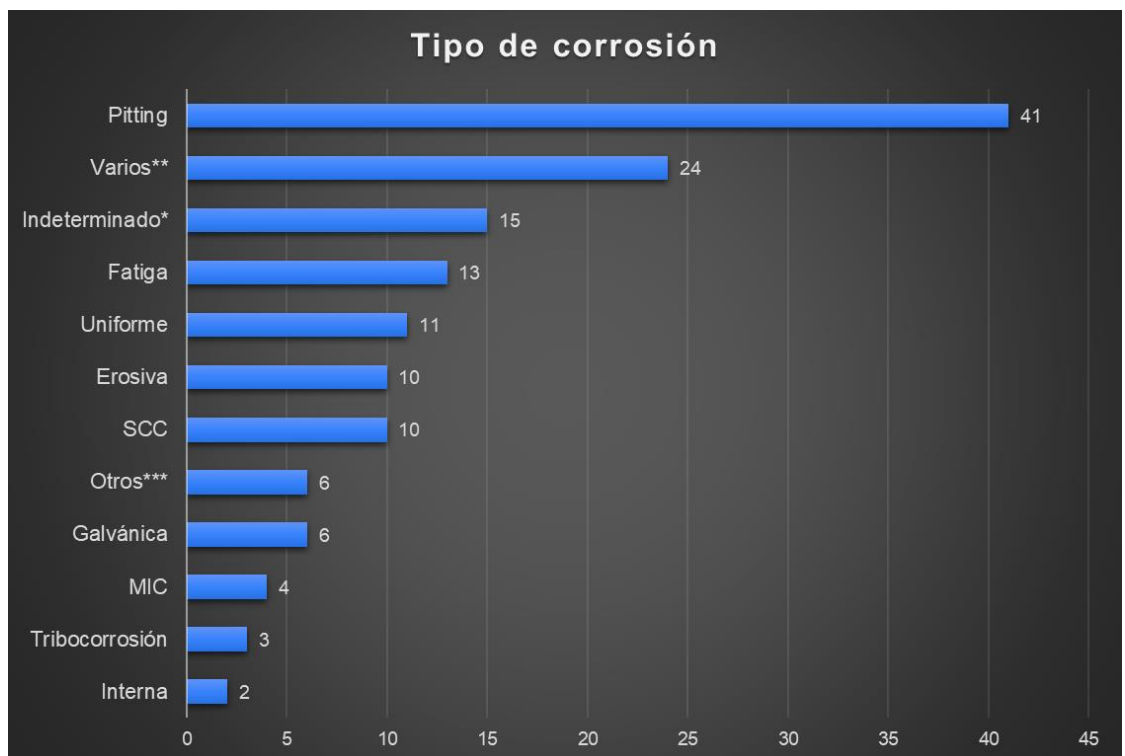


Figura 5. Picaduras profundas en elemento de turbina de viento. (Momber, 2016).



Grafica 7. Número de documentos referentes a cada tipo de corrosión.

* Indeterminado: Documentos que no especifican el tipo de corrosión.

** Varios: Documentos que presentan varios tipos de corrosión.

*** Otros: Documentos que exponen tipos de corrosión que se presentan una única vez dentro de la revisión bibliográfica

La corrosión de tipo pitting en aceros empieza en etapas tempranas de la exposición en ambientes marinos. Según estudios anteriores revisados en este proyecto, se afirma que primero aparecen cavidades con radios entre 100 y 200 micrómetros y luego a medida que pasa el tiempo estas se vuelven más anchas y profundas. Las

picaduras causadas por este tipo de corrosión se pueden modelar como una variable estocástica dependiente del tiempo, ya que estas cavidades son creadas continuamente mientras que las iniciales crecen de manera exponencial. Para poder seguir de manera más detallada el comportamiento de la corrosión por picaduras se han definido técnicas estadísticas, en las cuales se define la distribución de la profundidad de las cavidades o picaduras a lo largo del tiempo. Esta técnica también es capaz de predecir la distribución de la profundidad de las cavidades cuando estas son medidas en una superficie pequeña, haciendo que sea más difícil de ignorar posibles picaduras de tamaño considerable. Además de la pérdida localizada de espesor, la corrosión de tipo pitting también actúa de forma negativa en las estructuras, de manera en que los orificios o cavidades se convierten en concentradores de esfuerzos, haciéndolas mucho más frágiles y propensas a fallar por fatiga o por esfuerzos menores a los de diseño. Estos concentradores de esfuerzos son directamente proporcionales a las dimensiones de las cavidades o picaduras.



Figura 6. Oléoducto bajo los efectos de la corrosión por picaduras o pitting.

(Popoola et al., 2013)

Además de los documentos seleccionados que hacen referencia a varios tipos de corrosión y a los que no determinan qué tipo de corrosión ocurre sobre la estructura, la que más se presenta en esta revisión bibliográfica después de la corrosión por picaduras, según la Gráfica 7, es la corrosión-fatiga, que se define como la fatiga en un ambiente corrosivo y conlleva a la degradación mecánica de un material bajo la acción conjunta de la corrosión y las cargas cíclicas a las que está sometida la estructura. Las estructuras offshore están siempre expuestas al sometimiento de cargas cíclicas ocasionadas por el viento o por la marea, de acuerdo a la ubicación del elemento de la estructura. Cabe resaltar que este tipo de corrosión no se refiere a la fatiga causada por la corrosión ni a la corrosión causada por la fatiga, estos fenómenos no están relacionados entre sí, en cuanto a causas y consecuencias, es decir, son factores independientes que de manera conjunta actúan en contra al material y provocan su degradación de una manera más dañina que, por ejemplo, el simple sometimiento a cargas cíclicas en un ambiente no corrosivo.

En las estructuras offshore también es muy común encontrar el fenómeno de corrosión de tipo uniforme o general, el cual es el más conocido y más fácil de prever debido a que es posible detectarlo por medio de inspección visual. No es usual que la corrosión uniforme cause daños o pérdidas desastrosas en la estructura, pero tampoco es adecuado afirmar que sea imposible. El problema de la corrosión uniforme o general es más que todo estético, ya que esta actúa simplemente en la superficie del metal. En el ambiente offshore la superficie de los materiales se degrada y permite la formación de una capa de óxido de hierro que se vuelve más gruesa a medida que avanza el tiempo, hasta el punto en el que se desprende y se empieza a formar una nueva capa, ocasionando pérdida en el espesor del elemento y disminuyendo la resistencia mecánica del material. De acuerdo a lo anterior se puede afirmar que la corrosión uniforme o generalizada es la que menos compromete el funcionamiento de la estructura offshore debido a su fácil

detección y por ende rápida acción para mitigar este fenómeno, disminuyendo la velocidad de corrosión y evitando al máximo la pérdida de espesor.

Otro tipo de corrosión que afecta de manera considerable elementos en las estructuras offshore es la corrosión erosión o corrosión por erosión, la cual se define como la degradación de la superficie del material debido a acciones mecánicas ocasionadas, generalmente, por el choque de un fluido a gran velocidad en fase líquida, semilíquida o gaseosa que posiblemente contiene partículas sólidas o burbujas de cavitación. Esta también se puede conocer como la aceleración de ataque corrosivo en el metal ocasionada al movimiento relativo entre la superficie del metal y el fluido corrosivo. La velocidad del fluido corrosivo es directamente proporcional a la severidad del desgaste mecánico y a la abrasión del material. La característica de los daños causados por la corrosión erosiva es la aparición de agujeros, valles o surcos en la superficie del material en dirección al avance del fluido corrosivo. Este tipo de corrosión es muy común en elementos como tuberías, sobre todo de plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural, ya que en estas se realizan distintos procesos en los que involucran el transporte de agua de mar, la cual contiene partículas sólidas como arena y su alta concentración de sales minerales. Es muy común identificar este tipo de corrosión por el sonido que se genera con el movimiento del fluido, pero también existen planes de monitoreo en los cuales se utilizan sistemas de ultrasonido para determinar pérdidas de espesor o presencia de surcos o valles en el interior de las tuberías.

Otro tipo de corrosión encontrada en los documentos seleccionados por su relevancia en la revisión bibliográfica, reportaban casos de estudio en los que se presenta agrietamiento por corrosión bajo tensión o SCC por sus siglas en inglés para Stress Corrosion Cracking. Este tipo de corrosión se produce cuando el material está expuesto a esfuerzos de tensión en un ambiente corrosivo a altas temperaturas, por lo general, por

encima de 60 grados Celsius. Este tipo de corrosión es peligroso porque provoca una falla por fractura inesperada en metales dúctiles cuando se someten a esfuerzos menores que la resistencia a la tensión del material. Es muy común encontrar este tipo de corrosión en medios que contengan cloruros, es decir, las estructuras offshore son propensas a sufrir de este fenómeno y esta la posibilidad aumenta cuando se trata de aceros inoxidable austeníticos. El agrietamiento por corrosión bajo tensión o SCC no puede ser confundido con la corrosión-fatiga, ya que la SCC es corrosión bajo tensión constante, y la corrosión-fatiga se propicia por una picadura de corrosión mientras la estructura está sometida a cargas cíclicas.

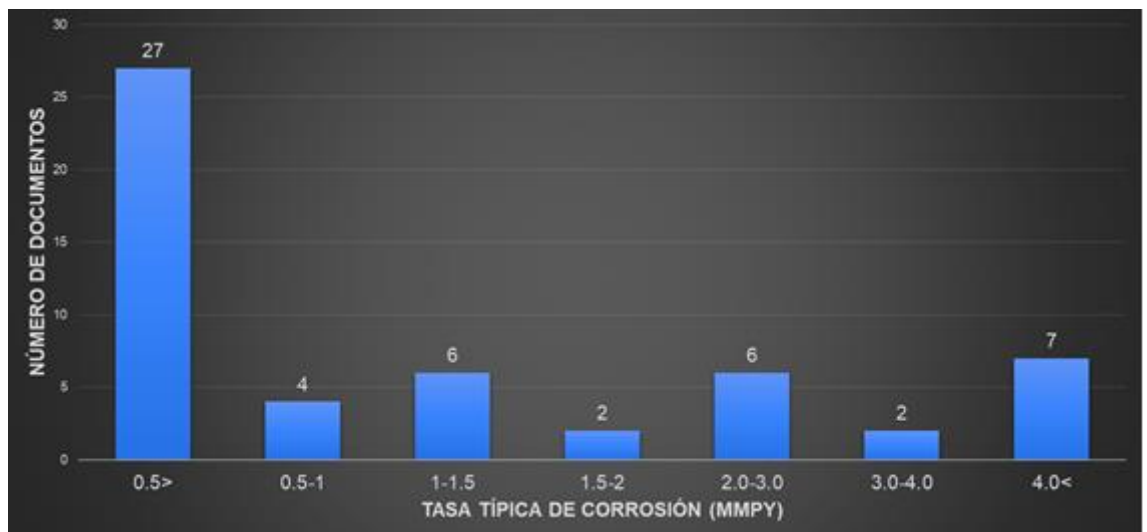


Figura 7. Oléoducto después de ser atacado por el agrietamiento por corrosión bajo tensión o SCC. (Popoola et al., 2013)

Cuando se estudia la corrosión es importante tener medidas para referenciar cuantitativamente este fenómeno en las estructuras. La medida más utilizada para determinar la gravedad de un proceso de corrosión es la velocidad o tasa típica de corrosión, que determina cuánto espesor de material es consumido por unidad de tiempo y se expresa, generalmente, en milímetros por año (mmpy) o pulgadas por año (inpy). Algunos reportes revisados en este estudio presentan las tasas típicas de corrosión en unidades de micrómetros por año (μ mpy) y otros en pulgadas por año, pero por motivos

de homogeneización de resultados se realizaron las respectivas conversiones para tener todos los valores en milímetros por año y realizar comparaciones de una manera más sencilla para disminuir la incertidumbre y el error dentro del estudio.

En cuanto a estas magnitudes, a partir de la revisión bibliográfica, se encontró que una parte de los documentos seleccionados no la específica, pero en aquellos que sí, se pueden identificar valores que se encuentran en un rango entre 0.0008 hasta 24 mmpy. Para esta clasificación se tuvo en cuenta valores promedio en algunos documentos, mientras que en otros se tuvo en cuenta el más crítico. Esto se realizó debido a la diversa manera de presentar datos por parte de los autores.



Grafica 8. Variación de la tasa típica de corrosión en milímetros por año (mmpy) presentada en los documentos seleccionados.

La magnitud de la tasa típica de corrosión depende de las propiedades del material utilizado, de la salinidad del fluido que se encuentra en contacto con el material y de la temperatura ambiente. Esta es la razón por la cual en esta revisión bibliográfica se presentan diversos datos que no se encuentran interrelacionados. Muchos documentos seleccionados en esta investigación no mencionan la velocidad de corrosión que ocurre en el caso de estudio o ensayo de laboratorio debido a que el objetivo de dicho artículo no es precisar este tipo de datos tan específicos sino simplemente reportar los tipos de

corrosión que sufre la estructura y expresar su componente teórico, mientras que en otros prevalece la importancia de presentar causas y consecuencias de este fenómeno corrosivo de acuerdo a las condiciones en que se encuentre la estructura.

Algunos artículos presentan la mejora del material en cuanto a su comportamiento en contra de la corrosión al utilizar diversos métodos de protección o planes de mitigación, control y mantenimiento, y para confirmar que fue eficiente es necesario comparar valores numéricos, de los cuales sea posible emitir conclusiones relevantes y determinar la utilidad de las acciones realizadas.

Muchos de estos artículos seleccionados presentan los datos de velocidad de corrosión en gráficas y los clasifican de acuerdo a la exposición a ciertos factores que aceleran este fenómeno y la ubicación específica del elemento en la estructura offshore. Como se mencionó anteriormente, este valor depende del material y sus propiedades, y cabe resaltar que una estructura offshore no está construida o diseñada a partir de un solo material, este varía de acuerdo a la ubicación y a las funciones que cumplan los distintos elementos, haciendo muy complejo tener un valor global o promedio para la tasa de corrosión típica que se adecue para cada elemento. Debido a lo anterior, en esta revisión bibliográfica se seleccionaron los valores más críticos para tener mejor conocimiento cuantitativo en cuanto al desarrollo de este fenómeno de la corrosión en las distintas estructuras offshore analizadas en esta investigación. En otros documentos, en donde se especifica de mejor manera el elemento de la estructura offshore en cuestión, los valores de velocidad de corrosión se presentaron en rangos no muy amplios, en los que fue prudente, para un mejor análisis de datos, calcular los respectivos promedios y contar con datos de mayor relevancia para el estudio.

Algunos documentos seleccionados presentan mediciones de la velocidad de corrosión en un elemento específico de la estructura antes y después de utilizar diversos

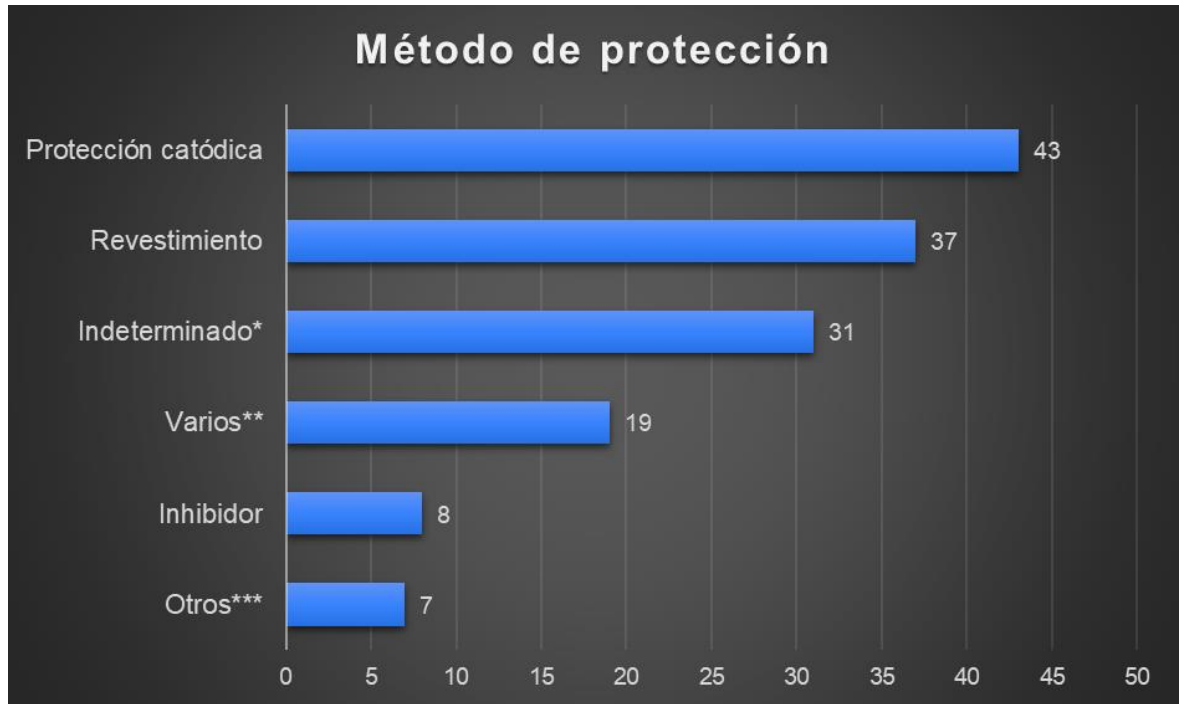
métodos de protección para medir su eficiencia en cuanto al control de la corrosión. En este caso, se determinó la tasa típica de corrosión de la estructura offshore como la velocidad de corrosión antes de aplicar el método de protección debido a que el objetivo de este estudio es conocer el alcance destructivo de este fenómeno. En otro tipo de documentos, en los que se reportan ensayos de laboratorio para exponer métodos de protección, únicamente miden la velocidad de corrosión luego de aplicar el método en cuestión y denominar este dato como velocidad de corrosión admisible o tasa de corrosión típica admisible.



Figura 8. Destrucción debido a corrosión en plataforma offshore. (Starokon, 2020).

Otra clasificación relevante realizada en esta revisión bibliográfica hace referencia al método de protección utilizado en las estructuras offshore. En este proyecto de grado se encontró una gran diversidad en cuanto métodos para evitar o mitigar la corrosión, pero estos fueron homogeneizados de acuerdo a sus respectivas equivalencias para evitar redundancias e incertidumbre dentro del estudio. Se puede evidenciar en la Gráfica 9 la

presencia de categorías como Indeterminado, Varios y Otros, las cuales se definen, respectivamente, como los documentos que no especifican qué método de protección es utilizado o en donde no se utilizó ningún método en lo absoluto; los documentos en los cuales se utilizó más de un método diferente de protección y en los que se utilizan métodos de protección únicos dentro de la revisión bibliográfica.



Gráfica 9. Número de documentos referentes a cada método de protección.

- * Indeterminado: Documentos que no especifican el método de protección utilizado.
- ** Varios: Documentos que exponen varios métodos de protección en un mismo caso.
- *** Otros: Documentos que presentan métodos de protección encontrados una única vez en la revisión bibliográfica.

A partir de la Gráfica 9 se puede evidenciar que el método de protección más utilizado en los reportes seleccionados de acuerdo a su relevancia es la protección catódica, que se define como una técnica para controlar el fenómeno de la corrosión en una superficie de material metálico convirtiéndolo en el cátodo de una celda electroquímica, es decir, se induce a que el material que se desea proteger se comporte como un cátodo a partir del suministro de electrones. Para que esto sea posible, se instala otro metal en contacto con el que se desea proteger y se denomina ánodo de sacrificio. Para que la protección catódica sea efectiva, los ánodos de sacrificio deben ser metales

con electronegatividad mucho mayor al del metal protegido, ya que cuando dos sistemas o materiales se ponen en contacto eléctrico, el que cuenta con mayor electronegatividad se oxida debido a la cedencia de electrones al material menos electronegativo. En este caso, el metal que cumple la función de ánodo de sacrificio cede todos los electrones de la reacción de corrosión y se va corroyendo a lo largo del tiempo hasta su destrucción, es decir, que se necesita sustituir el ánodo de sacrificio cada cierto tiempo para seguir protegiendo el material de interés. Este método es muy utilizado en las estructuras offshore, por lo general, cubiertas de barcos y muchos elementos de plataformas petroleras y de turbinas eólicas. Los ánodos de sacrificio más utilizados en este método de protección son Zinc, Magnesio y Aluminio.

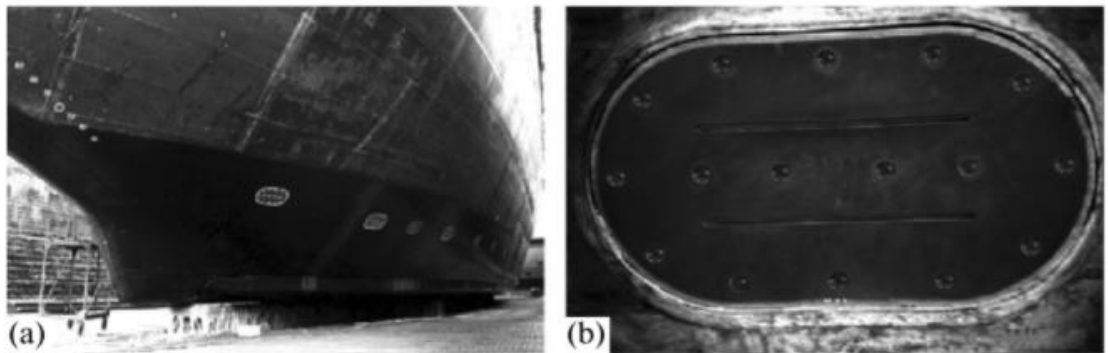


Figura 9. (a) Ánodos de sacrificio de platino y niobio instalados en el rompehielos atómico “50 years of Victory”. (b) Ánodo después de 4 años de operación en condiciones de hielo extremas. (Oryshchenko & Kuzmin, 2015).

Después de la protección catódica, en la Gráfica 9 se visualiza que los revestimientos o recubrimientos son los métodos de protección más utilizados en los documentos revisados en esta investigación. Estos consisten en crear o instalar una capa en la superficie del material con el objetivo de aislarlo del entorno. Básicamente, es la solución más evidente para evitar daños por corrosión, ya que simplemente se cubre el material a proteger con una capa de alguna sustancia que no se oxide y así evitar que el material entre en exposición al oxígeno y a la humedad.



Figura 10. Recubrimiento instalado en soporte Caisson o Caisson Leg. (Rahman et al., 2014)

Los recubrimientos o revestimientos se pueden clasificar en metálicos y no metálicos. En los recubrimientos no metálicos se encuentran las pinturas, barnices, plásticos, esmaltes y cerámicos. Las pinturas y barnices son las alternativas más económicas y sencillas que se utilizan para proteger las estructuras offshore en contra de la corrosión, estas aseguran que la superficie del material que se desea proteger se encuentre sin óxido ni grasas. La pintura más empleada como recubrimiento es el minio, compuesta por óxido de plomo. Otra alternativa utilizada en los recubrimientos es el uso de materiales plásticos, los cuales tienen la ventaja de ser muy resistentes a la oxidación y son muy flexibles, pero tienen el inconveniente de tener una baja resistencia a esfuerzos térmicos. El plástico más utilizado en este método es el policloruro de vinilo (PVC). Los esmaltes y cerámicos también se utilizan frecuentemente como revestimientos o recubrimientos en las estructuras offshore debido a que tienen la capacidad de resistir altas temperaturas y responden de manera positiva ante el rozamiento. En cuanto a los recubrimientos metálicos, se distinguen de acuerdo a la manera de instalación o depósito de la capa protectora. Dentro de esta clasificación se pueden encontrar la protección por capa química, la inmersión y la electrodeposición. En la protección por capa química se

induce la reacción de los materiales con un agente químico que permita formar un pequeño espesor en su superficie, creando una capa protectora, que puede ser una película de óxido de cromo o una capa de fosfatos metálicos sobre el material metálico. La inmersión se define como el baño del material que se desea proteger en otro metal fundido. Cuando el metal a proteger es sacado del baño, éste sale con una fina película protectora ocasionada por la solidificación del metal fundido. Los metales más utilizados en este procedimiento son el plomo, el aluminio, el zinc y el estaño. En la electrodeposición se induce una corriente eléctrica entre dos materiales metálicos diferentes que se encuentran sumergidos en un líquido que actúa como electrolito. El metal que se desea proteger cumple la función de cátodo y el otro metal será el ánodo. Cuando pasa la corriente eléctrica sobre el metal catódico se crea una película protectora. A partir de este método se realiza el niquelado o cromado de distintos materiales metálicos.

Dentro del presente proyecto cabe resaltar también la presencia de inhibidores de corrosión como un método de protección. Un inhibidor de corrosión se define como un aditivo químico que es aplicado en pequeñas cantidades sobre superficies de metales, creando una capa protectora que evita su degradación. Estas sustancias químicas pueden minimizar, evitar o mitigar los efectos de la corrosión en tuberías, maquinaria industrial, estructuras de acero y herramientas. Un inhibidor de corrosión actúa de la misma manera que un recubrimiento, ya que los inhibidores recubren la superficie de los materiales metálicos creando una película o capa protectora que evita la exposición del material con humedad y el oxígeno. En la actualidad se cuenta con distintos tipos de inhibidores, como pueden ser los orgánicos o inorgánicos. En los inhibidores inorgánicos se incluyen los molibdatos, las sales de cromato y los fosfatos. En este tipo de sustancias, los responsables de la reducción en la velocidad o tasa típica de corrosión en el metal son los

aniones. Los inhibidores orgánicos son comúnmente encontrados y aplicados en sistemas de enfriamiento y, por lo general, son de tipo aniónico como el sulfato de sodio, fosfonatos y mercaptobenzotiazol. También se pueden encontrar inhibidores de absorción, los cuales forman una película protectora o inhibidores denominados barrederos, los cuales simplemente eliminan el oxígeno de la superficie a proteger.

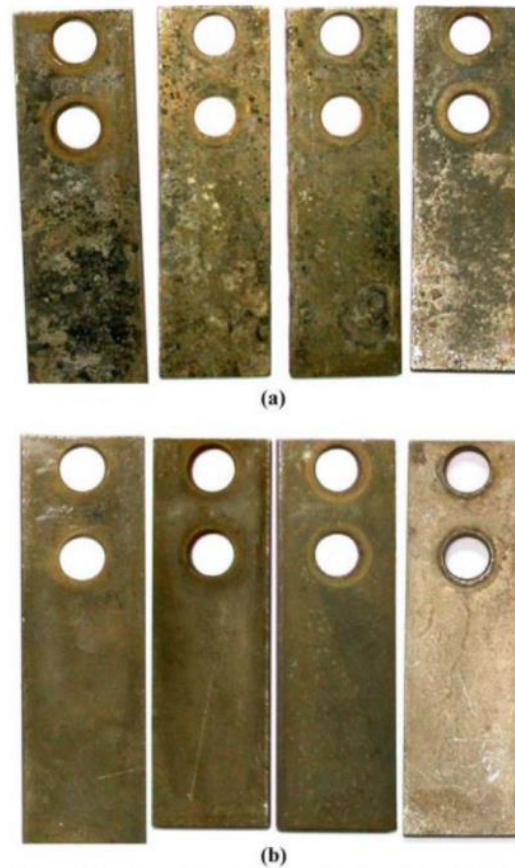
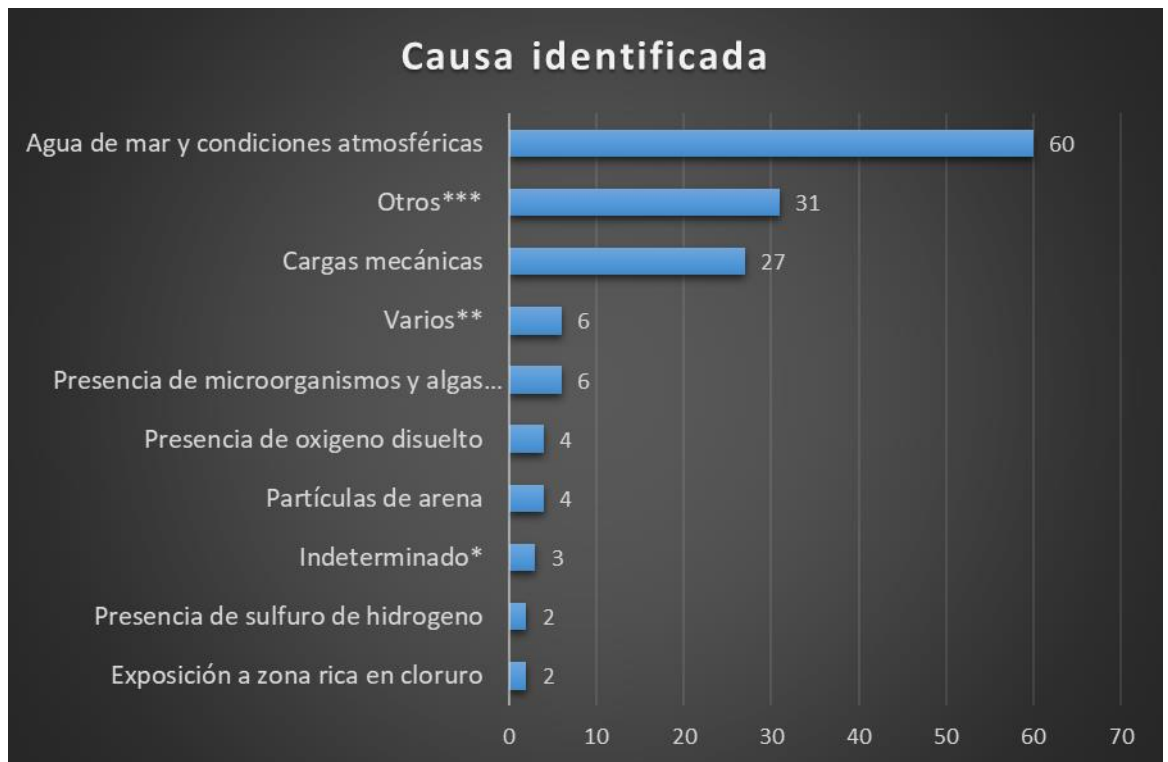


Figura 11. Probetas (a) antes y (b) después de aplicar inhibidor de corrosión. (Lu et al., 2014).

En esta revisión bibliográfica se encuentran muchos inhibidores naturales como extractos de plantas y es el caso de un artículo en particular, realizado en Nigeria, en el cual utilizaron y estudiaron los efectos de un extracto de planta denominado *Morinda Lucida* para disminuir los efectos de la corrosión en la torre de una turbina de viento, construida con concreto reforzado por acero y que sufrió de corrosión debido a la entrada de cloruro al concreto.

Para poder contar con planes eficientes de mantenimiento, control y mitigación de corrosión es muy importante tener conocimiento acerca de las causas de este fenómeno para elegir el mejor método para mitigar o minimizar los efectos destructivos y por consiguiente disminuir los sobrecostos del proyecto. Por esta razón, los documentos seleccionados de acuerdo a su relevancia en esta revisión bibliográfica, se clasificaron de acuerdo a las causas de corrosión que se identificaron en los respectivos casos de estudio y ensayos de laboratorio. Se encontró una gran diversidad de causas identificadas y se expresaron de forma gráfica, como se muestra en la Gráfica 10.



Gráfica 10. Número de documentos referentes a la causa identificada de corrosión.

* Indeterminado: Documentos que no especifican la causa identificada de corrosión.

** Varios: Documentos que identifican varias causas de corrosión.

*** Otros: Documentos que identifican una causa de corrosión que no se repite dentro de la revisión bibliográfica.

En esta clasificación también se realizó la respectiva homogeneización de resultados para obtener una mejor calidad de datos, evitando la redundancia y la incertidumbre con el objetivo de generar conclusiones válidas.

A partir de la Gráfica 10 se puede evidenciar que la mayor causa identificada de corrosión en las estructuras offshore estudiadas en el presente proyecto, fue el simple hecho de estar en exposición al agua de mar y a sus condiciones atmosféricas. Se ha observado que los iones de cloruro, en conjunto con los iones de sulfato, es la principal causa de corrosión, por lo general, de tipo pitting o picaduras y por eso, es conveniente afirmar que en la clasificación de tipos de corrosión se encuentre en primer lugar la corrosión localizada. Afirmar que la causa identificada de corrosión es el agua de mar y sus condiciones atmosféricas es una idea muy general, pero fue conveniente utilizar esta categoría debido a que la mayoría de la bibliografía seleccionada utilizó este término sin especificar exactamente la causa de la corrosión en la estructura offshore. Otros reportes y artículos presentaron de una manera más específica la causa identificada de corrosión, lo cual ayuda a contar con una mejor consolidación de la información en la base de datos.



Figura 12. Grietas en uniones soldadas de soportes de tubería principal. (Fernando B. Mainier et al., 2016).

Luego de los documentos referentes a la corrosión causada por agua de mar y condiciones atmosféricas y otros, se encuentra un número considerable de literatura que hace referencia a las cargas mecánicas como la causa de la corrosión en la estructura offshore en cuestión. Las cargas mecánicas afectan de manera diferente a la estructura, dependiendo de la ubicación del elemento y si estas son cíclicas o constantes. Se debe tener en cuenta que los elementos de cualquier estructura offshore no solamente están sometidos a las cargas mecánicas de diseño, también se someten a cargas constantes y cíclicas externas, generadas por el viento, la marea y las corrientes submarinas. Los elementos que se encuentran sumergidos en el agua se someten a cargas generadas por las corrientes submarinas, en la zona de chapoteo las cargas son generadas por la marea y los elementos que se encuentran por encima del nivel del agua están sometidos a cargas generadas por el viento. Estas cargas externas además de sumarse a lo que debe resistir el elemento, inducen a la corrosión de diferentes maneras, siendo una causa importante de la degradación de los materiales. Como se mencionó anteriormente, si las cargas son generadas de manera cíclica, se induce en la corrosión-fatiga y si son constantes, la estructura puede sufrir de agrietamiento por corrosión bajo tensión, generando concentradores de esfuerzos y haciendo muy probable la fractura del elemento.

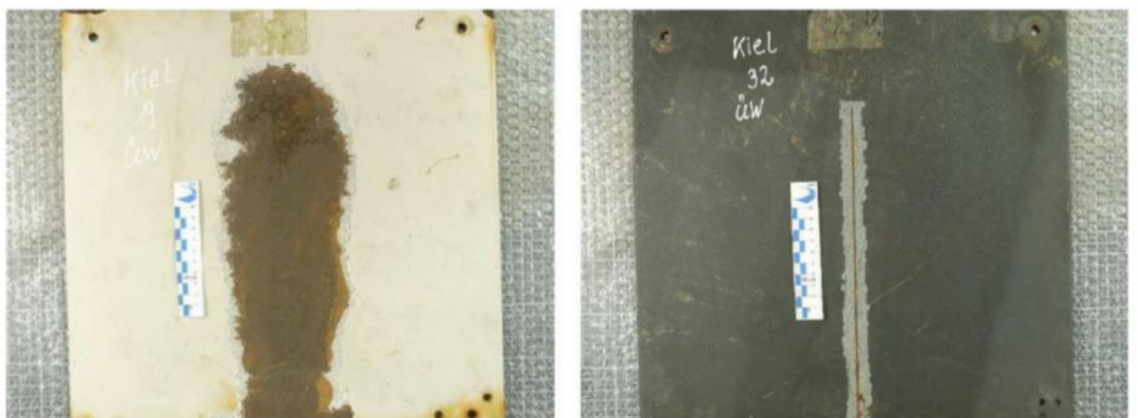


Figura 13. Degradación de material ubicado en zona de chapoteo. (izquierda: Sistema de recubrimiento; derecha: Sistema con imprimación.). (Binder, 2016).

Otro factor importante causante de la corrosión en estructuras offshore es la presencia de microorganismos o algas. Este fenómeno es más conocido como biofouling y se define como la acumulación de microorganismos, plantas, algas o pequeños animales en superficies húmedas que cumplen funciones mecánicas, causando deficiencias estructurales. Los gobiernos y las industrias invierten billones de dólares cada año para prevenir y controlar este fenómeno marino. El Biofouling afecta económicamente más que todo a las embarcaciones debido a la acumulación de microorganismos, algas, etc. en el casco y sistema de propulsión de un barco generando el aumento de la fuerza de arrastre, disminuyendo su desempeño hidrodinámico y por ende aumentando el consumo de combustible. En la literatura se ha encontrado que el biofouling en una embarcación aumenta la fuerza de arrastre hasta un 60%, que conlleva a una disminución en un 10% de la velocidad y un aumento del 40% en el consumo de combustible. En la industria el biofouling lleva a una gran pérdida económica y de eficiencia en sus operaciones, por esto es necesario invertir en planes de mantenimiento, mitigación y control de este fenómeno. El biofouling también afecta los sistemas de tuberías induciendo a la corrosión influenciada por bacterias o microorganismos, generando pérdidas estructurales y económicas en estructuras offshore como plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural. Dentro de estas pérdidas se encuentran las fracturas de los oleoductos submarinos generando no solo pérdidas económicas sino también un gran impacto negativo para el medio ambiente.



Figura 14. Inspección de embarcación con biofouling en su casco.

<https://phys.org/news/2016-10-barnacle-ship-biofouling.html>

Base de datos

Teniendo toda la información correctamente caracterizada se procedió a la creación y organización de la base de datos utilizando la herramienta computacional Microsoft Access, en la cual a cada referencia se le asignó su respectivo enlace web que dirige a la vista del documento en la nube de Google Drive, teniendo la opción de descargar.

Esta herramienta permitió diseñar un menú en el que las personas que ingresen a la base de datos puedan buscar la información de su interés acerca de corrosión offshore, de esta forma si alguien quiere buscar un artículo científico a cerca de corrosión en el cual el tipo de corrosión de su interés sea pitting, por ejemplo, podrá buscarlo mediante las consultas accesibles en el menú.

También se agregaron tres botones para acceder a los artículos que estudian la corrosión en los sectores en los que nos hemos enfocado los cuales son: sistemas eólicos, barcos y plataformas petroleras, y también un botón para acceder a la base de datos completa, de esta forma navegar y buscar artículos de interés sobre corrosión offshore se

convierte en una tarea sencilla y practica utilizando nuestra base de datos. También se programó una ventana para iniciar sesión para que las personas que tengan un usuario y contraseña puedan acceder a ella, esto permite proteger la base de datos de personas malintencionadas que no tengan el propósito de aprender sobre este tema no puedan entrar.

Capítulo V

5.1 Conclusiones

Para el presente trabajo de investigación se desarrolló una metodología que hizo eficaz la búsqueda y clasificación de la información de literatura académica y gris, utilizando las palabras claves en las bases de datos. Siempre se enfocó en conseguir artículos que presentaran un reporte de un caso de corrosión, de esta forma se pudo obtener los datos más relevantes del artículo como lo son la tasa de corrosión, el tipo de corrosión, el elemento estudiado, el tipo de estructura offshore, la causa de la corrosión, el tipo de protección etc.

Se construyó un banco de información mediante una base de datos en Access en la que se organizó, clasificó y caracterizó los datos más relevantes dichos anteriormente de tal forma que brinde el conocimiento necesario para los procesos corrosivos en sistemas offshore que puedan presentarse en futuros proyectos del Caribe colombiano.

Se consolidó la información obtenida mediante graficas estadísticas de tal forma que se represente de forma gráfica los datos, esto permitió determinar cuáles son los casos que más se repiten en función del tipo de corrosión, elemento analizado, tipo de estructura offshore, tasa de corrosión típica, metodo de protección y causa identificada.

A traves de la información recolectada se puede concluir que a partir del año 2014 se presento un incremento considerable en cuanto a estudios y reportes acerca de la corrosión en estructuras offshore en las diferentes revistas pertenecientes a la literatura academica y los distintos sitios de literatura gris. Se concluye que el país que mas presenta estudios que conciernen a la corrosión offshore es China, demostrando un alto desarrollo en la explotación de la ingeniería costa afuera. Según estos resultados se determina que la estructura offshore que mas se ha estudiado por ser victima de este fenómeno de la corrosión son las plataformas de extracción y producción de petróleo y gas natural, esto se debe a que son las estructuras mas complejas estructuralmente y las que llevan mas años operando en este ambiente, en comparación con las turbinas eólicas offshore.

El tipo de corrosión mas presentado en esta revisión bibliográfica hace referencia al pitting o corrosión por picaduras, siendo uno de los mas graves ataques para una estructura debido a la creación de concentradores de esfuerzos que disminuyen la resistencia y vida útil de dicha estructura. La causa de corrosión que mas se presenta en estos documentos es el simple hecho de estar en contacto con el agua de mar y en exposición a las condiciones atmosféricas de las zonas costa afuera. Se resalta la importancia de la protección catódica, ya que es el método de protección mas utilizado a lo largo de los años para combatir con este fenómeno de la corrosión y para las estructuras offshore no es la excepción, ya que gran parte de los documentos

seleccionados en esta revisión bibliografía utilizan este método para evitar la degradación de las estructuras.

En futuras investigaciones de este tema para las condiciones del caribe colombiano se podrá utilizar metodologías similares que ayudaran a combatir la corrosión en los proyectos venideros.

5.2 Estudios futuros

Si bien a nivel mundial distintos países se han enfrentado a la corrosión en sistemas offshore y han avanzado en recopilar información e idear estrategias para combatirlo, es un tema del que todavía se puede aprender y descubrir más, esto da a este proyecto de investigación el poder ser actualizable, el poder seguir nutriéndose de la información que pueda ir saliendo a cerca de la corrosión offshore, nutriéndose de los artículos científicos más nuevos sobre este tema, de tal forma que pueda llegar a ser una gran enciclopedia sobre la corrosión offshore. Los profesores pueden presentar la base de datos diseñada en Access a sus alumnos para que ellos entren en esta metodología de investigación de tal forma que recopilen futura información para que se actualice la base de datos.

Este proyecto de investigación también abre una ventana para futuros estudios sobre los métodos de control para la corrosión, como lo son la protección catódica, los tipos de recubrimientos, inhibidores etc. De esta forma se puede realizar una clasificación detallada de la gran cantidad de métodos de control, ya que cada uno de estos contiene mucha información. Saber más acerca de los métodos de control permitirá desarrollar condiciones óptimas de trabajo y seguridad ya sea en barcos, sistemas eólicos o plataformas petroleras durante un periodo más largo al del posible.

Referencias

- Adedipe, O., Brennan, F., & Kolios, A. (2016). Review of corrosion fatigue in offshore structures: Present status and challenges in the offshore wind sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.017>
- Ahuir-Torres, J. I., Bausch, N., Farrar, A., Webb, S., Simandjuntak, S., Nash, A., Thomas, B., Muna, J., Jonsson, C., & Mathew, D. (2019). Benchmarking parameters for remote electrochemical corrosion detection and monitoring of offshore wind turbine structures. *Wind Energy*, 22(6), 857–876. <https://doi.org/10.1002/we.2324>
- Barker, R. J., Hu, X., Neville, A., & Cushnaghan, S. (2014). Empirical Prediction of Carbon-Steel Degradation Rates on an Offshore Oil and Gas Facility: Predicting CO₂ Erosion-Corrosion Pipeline Failures Before They Occur. *SPE Journal*, 19(03), 425–436. <https://doi.org/10.2118/163143-PA>
- Chen, Y., Zhang, J., Zhang, H., Liu, X., Li, X., Zhou, J., & Cao, J. (2015). Ultimate load capacity of offshore pipeline with arbitrary shape corrosion defects. *China Ocean Engineering*, 29(2), 241–252. <https://doi.org/10.1007/s13344-015-0017-z>
- Diaconu, A., Solomon, C., & Benea, L. (2015). CORROSION RESISTANCE OF ZINC COATED STEEL IN SEA WATER ENVIRONMENT. 3, 7.
- Dong, W., Moan, T., & Gao, Z. (2012). Fatigue reliability analysis of the jacket support structure for offshore wind turbine considering the effect of corrosion and inspection. *Reliability Engineering & System Safety*, 106, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.06.011>
- Hairil Mohd, M., & Paik, J. K. (2013). Investigation of the corrosion progress characteristics of offshore subsea oil well tubes. *Corrosion Science*, 67, 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.10.008>
- Igwemezie, V., Mehmanparast, A., & Kolios, A. (2018). Materials selection for XL wind turbine support structures: A corrosion-fatigue perspective. *Marine Structures*, 61, 381–397. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.06.008>
- Jakubowski, M. (2011). Influence of pitting corrosion on strength of steel ships and offshore structures. *Polish Maritime Research*, 18(4). <https://doi.org/10.2478/v10012-011-0027-6>

- James, M. N., & Hattingh, D. G. (2015). Case studies in marine concentrated corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 47, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.08.013>
- Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M. J., & Brockmeyer, B. (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 136, 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058>
- Kramar, V., Dushko, V., Rodkina, A., & Zaiets, A. (2015). Influence of Stress-corrosion Fractures on Potential of Ship-building Metals in the Sea Water. *Procedia Engineering*, 100, 1068–1074. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.468>
- Liu, J., Li, Z., Li, Y., & Hou, B. (2016). Corrosion process of D32 steel used for offshore oil platform in splash zone. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 63(1), 56–64. <https://doi.org/10.1108/ACMM-06-2014-1396>
- Lohaus, L., & Weicken, H. (2011). Polymer-Modified Mortars for Corrosion Protection at Offshore Wind Energy Converters. *Key Engineering Materials*, 466, 151–157. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.466.151>
- López-Ortega, A., Bayón, R., & Arana, J. L. (2018). Evaluation of protective coatings for offshore applications. Corrosion and tribocorrosion behavior in synthetic seawater. *Surface and Coatings Technology*, 349, 1083–1097. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.06.089>
- López-Ortega, A., Bayón, R., Arana, J. L., Arredondo, A., & Igartua, A. (2018). Influence of temperature on the corrosion and tribocorrosion behaviour of High-Strength Low-Alloy steels used in offshore applications. *Tribology International*, 121, 341–352. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.049>
- Lu, Y., Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, Y., Wang, C., & Guo, H. (2014). Corrosion control in CO₂/H₂S-produced water of offshore oil fields. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, 61(3), 166–171. <https://doi.org/10.1108/ACMM-02-2013-1240>
- Moghaddam, B. T., Hamedany, A. M., Mehmanparast, A., Brennan, F., Nikbin, K., & Davies, C. M. (2019). Numerical analysis of pitting corrosion fatigue in floating offshore wind turbine foundations. *Procedia Structural Integrity*, 17, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.08.010>
- Momber, A. W. (2016). Quantitative performance assessment of corrosion protection systems for offshore wind power transmission platforms. *Renewable Energy*, 94, 314–327. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.059>
- Okoro, C. C., & Amund, O. (2015). Souring and Corrosion Potentials of Onshore and Offshore Oil-producing Facilities in the Nigerian Oil-rich Niger Delta. *Petroleum Science and Technology*, 33(17–18), 1563–1570. <https://doi.org/10.1080/10916466.2015.1072559>
- Olajire, A. A. (2017). Corrosion inhibition of offshore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors—A review. *Journal of Molecular Liquids*, 248, 775–808. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2017.10.097>
- Sarhadi, A., Abrahamsen, A. B., & Stolpe, M. (2018). Optimal Design of Galvanic Corrosion Protection Systems for Offshore Wind Turbine Support Structures. *CORROSION*, 74(7), 829–841. <https://doi.org/10.5006/2688>
- Soares, C. G., Garbatov, Y., Zayed, A., & Wang, G. (2005). Non-linear Corrosion Model for Immersed Steel Plates Accounting for Environmental Factors. 20.
- Starokon, I. V. (2020). Rating of corrosion factors determining its speed for stationary offshore platforms for oil, gas, coal and other minerals. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515, 032032. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/3/032032>

- Valdez, B., Ramirez, J., Eliezer, A., Schorr, M., Ramos, R., & Salinas, R. (2016). Corrosion assessment of infrastructure assets in coastal seas. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 15(3), 124–134. <https://doi.org/10.1080/20464177.2016.1247635>
- Wang, K., Li, Z., & Zhao, M. (2016). Mechanism of Localized Corrosion of Steel Pipe Pile Foundation for Offshore Wind Turbines and Corrosive Action. *The Open Civil Engineering Journal*, 10(1), 685–694. <https://doi.org/10.2174/1874149501610010685>
- Wang, X., Hou, B., & Lan, Z. (2014). Boundary element method application for the impressed current cathodic protection of an offshore platform. 113–120. <https://doi.org/10.2495/BE370101>
- Wood, R. J. K. (2006). Erosion–corrosion interactions and their effect on marine and offshore materials. *Wear*, 261(9), 1012–1023. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.03.033>
- Zadeh, S. akramian, & Rashidi, P. (2020). The effect of fluid velocity and microstructure on erosion corrosion of two-phase CK45 steel. *Results in Materials*, 6, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100077>
- Zapata-Peñasco, I., Salazar-Coria, L., Saucedo-García, M., Villa-Tanaka, L., & Hernández-Rodríguez, C. (2013). Bisulfite reductase and nitrogenase genes retrieved from biocorrosive bacteria in saline produced waters of offshore oil recovery facilities. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 81, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.07.005>
- Cuervo Tafur, J., Delgado Lastra, J., Herrera, F. J., & Arroyave, C. E. (2016). INDICADORES DE LOS COSTOS DE LA CORROSIÓN EN COLOMBIA. *Contaduría Universidad De Antioquia*, (33), 95-132. Recuperado a partir de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/cont/article/view/25545>

Anexos

Instrucciones de uso de la base de datos

A) Acceder a la base de datos.

1. Ingresar el nombre de usuario y la contraseña, luego dar click en el boton aceptar para ingresar al menu.



- En el menú dar click en el botón “base de datos completa” para acceder a la base de datos.



- Base de datos.

Base de datos1

Jueves, 12 de noviembre de 2020
5:23:40 p. m.

Id	Autor	Año	Revista/Journal	Elemento	Estructura offshore	País	Tipo de carro
1	Ahuir-Torres	2019	Wind Energy	Varios	Turbina de viento	Reino Unido	Pitting
2	Adedipe	2016	Renewable And Sustainable Energy Reviews	Soporte	Turbina de viento	Reino Unido	Fatiga
3	Barker	2014	SPE Journal	Tubería	Plataforma petrolera	Reino Unido	Erosiva
4	Chen	2015	China Ocean Engineering	Tubería	Plataforma petrolera	China	Uniforme
5	Dong	2012	Reliability Engineering And System Safety	Jacket	Turbina de viento	Noruega	Fatiga

B) Consultar artículos con especificaciones.

1. En el menú puede consultar artículos según el país, el tipo de corrosión y el elemento afectado, y según los sectores en el que se ha enfocado esta investigación: plataformas petroleras, sistemas eólicos y barcos. Dar click en el botón tipo de corrosión.



2. Escribir el tipo de corrosión de interés, ingresando la palabra en español y luego dar click en aceptar.



3. Resultados.

Autor	Año	Revista/journal	Elemento	Estructura offshore	Pais	Tipo de cor
Barker	2014	SPE Journal	Tuberia	Plataforma petrolera	Reino Unido	Erosiva
Hu	2011	Wear	Tuberia	Plataforma petrolera	Reino Unido	Erosiva
Mahadi	2013	International Journal of Electrochemical Science	Junta	Plataforma petrolera	Catar	Erosiva
Meng	2007	Wear	Maquinas de flujo	Indeterminado	Reino Unido	Erosiva
Wood	2006	Wear	Maquinas de flujo	Plataforma petrolera	Reino Unido	Erosiva
Zadeh	2020	Results In Materials	Indeterminado	Plataforma petrolera	Iran	Erosiva
singh	2019	Metallurgy Materials Engineering	Tuberia	Instalacion de perforaci	Noruega	Erosiva
Emerson	2019	Oil And Gas	Varios	Plataforma petrolera	China	Erosiva
Barker	2012	Corrosion	Tuberia	Plataforma petrolera	Reino Unido	Erosiva
Ratnayake	2010	Proceedings of the ASME 2010 International Conference	Varios	Plataforma petrolera	Noruega	Erosiva
*						

C) Ingresar datos a la base de datos.

1. En el menú, dar click derecho en la esquina superior izquierda en donde dice “MENUBASE” y luego dar click en “Vista Diseño”.



2. En la lista de tablas del lado izquierdo dar doble click en “Base de datos 1”.



3. Ingresar los datos del documento o artículo sobre corrosión en cada una de las celdas.

