

Aplicaciones de drones en la detección de corrosión por hidrógeno: Un enfoque en la identificación de anomalías en infraestructuras industriales.

Autor:

Gessika Alejandra González Santos

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Metalúrgica

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

Doctor en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica

Programa Académico

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Por todo lo bueno, lo malo, lo no tan bueno y lo no tan malo que me acompaño, me busco y me encontró y poco a poco me formo hasta convertirme en lo que soy o lo que algún día soñé ser.

A la vida, al universo, Dios y los ángeles que me acompañaron junto a las oraciones de mis padres día a día, me consolaron ante la constante angustia de mis pensamientos e imposiciones y vieron florecer pequeñas partes en mi interior que cambian, se transforman, se disfrazan, se entrelazan o se reemplazan.

A mi madre Sandra Santos Soto la de cabello azabache y sonrisa radiante, mi más grande consuelo, la que su amor me entrega sin ningún anhelo, me enseña, me abraza, me acompaña, me protege en cada noche de desvelo, por su inmensa paciencia que me arropa como terciopelo.

A mi padre Rommel González Porras mi héroe, mi viejo, mi todo, por su completo sacrificio para mi acomodo, por sus miles de historias de valientes donde siempre fui su fiel creyente, por su inmensurable amor que me ampara por este camino de vida interminable.

A mi hermano Kevin González Santos mi sangre y mi negro, que con sus carcajadas y ocurrencias hacen de mi existir un lugar de complacencia, a mi confidente en las noches oscuras, esas en donde el frío no abandona del que solo aprendo y aprendo mientras poco a poco nuestros sueños van fluyendo.

Y a la vida que me ha dado tanto...

Agradecimientos

A cada una de las personas desde mis familiares, amigos, compañeros, profesores, conocidos, desconocidos o cualquier persona con la me tope en mi camino, que me acompañaron en esta maravillosa travesía por la universidad y estuvieron presentes regalándome un abrazo, una sonrisa, una palabra de aliento, un momento de calma o felicidad cuando sentía que era imposible, que me costaba, que no iba a lograrlo, para todos aquellos infinitas gracias por estar en el momento indicado y obsequiarme las palabras correctas para no rendirme por mis sueños, para levantarme firmemente en la adversidad y demostrarme **que lo que se espera con paciencia se logra.**

A cada uno de los maestros que la vida desde pequeña me ha presentado, todas esas personas de las que he aprendido desde lo más mínimo hasta lo más sofisticado, con su arte, amor, carisma, paciencia, y otros con su serenidad, dureza, indiferencia o apatía que también me enseñaron y hoy en día forman parte como pequeños pedacitos en la mujer que soy y para los próximos que estaré por conocer en este nuevo viaje como ingeniera.

Por último, a mis perritos, mis compañeros fieles que hacen mi día a día más sonriente y llevadero, mis amores bonitos que nunca se casan de mí, que al llegar a la casa me reciben expectantes y solo me entregan su cariño, con sus patitas de colores saltando y aullando ante mi leve existencia.

**Me ha dado el sonido y el abecedario
Con él las palabras que pienso y declaro
Madre, amigo, hermano y luz alumbrando
La ruta del alma del que estoy amando.**

Tabla de Contenido

	Pág.
<u>Introducción.....</u>	<u>13</u>
<u>1. Objetivos.....</u>	<u>15</u>
<u>1.1 Objetivo General.....</u>	<u>15</u>
<u>1.2 Objetivos Específicos.....</u>	<u>15</u>
<u>2. Marco Teórico.....</u>	<u>16</u>
<u>3. Penetración del Hidrógeno.....</u>	<u>18</u>
<u>3.1 Definición.....</u>	<u>18</u>
<u>3.1.1 Fuentes de Penetración de Hidrógeno en Metales</u>	<u>18</u>
<u>3.2 Ataque por Hidrógeno.....</u>	<u>19</u>
<u>3.2.1 Definición.....</u>	<u>19</u>
<u>3.2.2 Etapas y consecuencias</u>	<u>20</u>
<u>3.3 Agrietamiento inducido por el Hidrógeno.....</u>	<u>21</u>
<u>3.3.1 Definición.....</u>	<u>21</u>
<u>3.4 Fragilización por Hidrógeno (FPH).....</u>	<u>22</u>
<u>3.4.1 Definición</u>	<u>22</u>
<u>3.4.2 Condiciones esenciales: Tensión, Concentración y Microestructura.</u>	<u>23</u>
<u>3.5 Prevención de la corrosión estructural.....</u>	<u>25</u>
<u>3.5.1 Monitoreo de la corrosión estructural.....</u>	<u>27</u>
<u>3.5.2 Diferencias entre el monitoreo y la inspección estructural.....</u>	<u>29</u>
<u>3.5.3 Relación entre el monitoreo y la inspección</u>	<u>30</u>
<u>3.5.4 Monitoreo avanzado y mantenimiento predictivo en espacios confinados</u>	<u>31</u>
<u>3.6 Drones para el monitoreo y control de la corrosión</u>	<u>33</u>
<u>3.6.1 Diseño del modelo Dron para el monitoreo.....</u>	<u>37</u>
<u>3.6.2 Procesamiento de datos.....</u>	<u>45</u>

<u>3.6.3 Transmisión de la Información.....</u>	<u>46</u>
<u>3.6.4 Limitaciones en la tecnología del dron.....</u>	<u>48</u>
<u>3.6.5 Restricciones en exteriores y condiciones ambientales adversas.....</u>	<u>48</u>
<u>4. Conclusiones.....</u>	<u>50</u>
<u>5. Recomendaciones.....</u>	<u>51</u>
<u>Referencias Bibliográficas.....</u>	<u>52</u>
<u>Apéndices.....</u>	<u>56</u>

Lista de Figuras

<u>Figura 1. Ampollas producidas en la superficie de una chapa en un ensayo por FIH.....</u>	<u>22</u>
<u>Figura 2. Consecuencias microscópicas producidas por la fragilización FPH</u>	<u>23</u>
<u>Figura 3. Mapa Conceptual comparación de los Tipos de Daño por Hidrógeno</u>	<u>25</u>
<u>Figura 4. Adaptabilidad del Dron en cualquier entorno.....</u>	<u>34</u>
<u>Figura 5. Diagrama Vertical Funcionamiento paso a paso de Dron de monitoreo para la inspección de corrosión por Hidrógeno</u>	<u>36</u>
<u>Figura 6. Procesamiento de imágenes para la inspección de corrosión por Hidrógeno.....</u>	<u>38</u>
<u>Figura 7. Mapeo y trayectoria con SLAM.....</u>	<u>39</u>
<u>Figura 8. Interfaz de Usuario más visualización de Datos en Inspección Aérea.....</u>	<u>41</u>
<u>Figura 9. Aplicación de la Tecnología LiDAR para el análisis de infraestructura en 3D.....</u>	<u>42</u>
<u>Figura 10. Gráfico Tiempo máximo de vuelo del dron en función del peso de la carga útil.....</u>	<u>44</u>
<u>Figura 11. Secuencia del dron en la inspección de corrosión por Hidrógeno.....</u>	<u>46</u>
<u>Figura 12. Flujoograma del Proceso de Transmisión de Información en Dron.....</u>	<u>47</u>

Lista de Tablas

Tabla 1. Influencia de la Localización del Hidrógeno en la Fragilización.....24

Lista de Apéndices

<u>Apéndice A. Especificaciones del Dron.....</u>	<u>56</u>
<u>Apéndice B. Especificaciones del Sistema de cámaras.....</u>	<u>57</u>
<u>Apéndice C. Especificaciones del Sistema de Iluminación.....</u>	<u>58</u>
<u>Apéndice D. Especificaciones del Control Remoto.....</u>	<u>59</u>
<u>Apéndice E. Especificaciones de la Batería Inteligente.....</u>	<u>60</u>
<u>Apéndice F. Imágenes Visuales y Térmicas de la Corrosión por Hidrógeno.....</u>	<u>61</u>

Glosario

Análisis de Imágenes: proceso de examinar y procesar imágenes capturadas por drones para identificar y cuantificar la corrosión.

Cartografía de Corrosión: representación gráfica de la distribución y gravedad de la corrosión en una estructura, obtenida a partir de los datos recopilados por drones.

Control de Corrosión: métodos implementados para monitorear y gestionar la corrosión, como la inspección periódica y el mantenimiento predictivo.

Corrosión: proceso de degradación de un material, generalmente metálico, debido a reacciones químicas con el entorno.

Dron: vehículo aéreo no tripulado que puede ser controlado de forma remota o volar de manera autónoma, utilizado en diversas aplicaciones, incluida la inspección de infraestructuras.

Efecto de Tensiones: estrés mecánico en materiales que puede aumentar la susceptibilidad a la corrosión por hidrógeno.

Electrólisis: proceso que utiliza una corriente eléctrica para descomponer una sustancia, como el agua, produciendo hidrógeno que puede contribuir a la corrosión.

Hidrógeno Atómico: forma del hidrógeno que puede ser absorbida por los metales, a menudo resultante de reacciones químicas o electrolíticas.

Hidrógeno Molecular: forma diatómica (H_2) del hidrógeno, que es menos reactiva que el hidrógeno atómico.

Inspección Aérea: proceso de evaluación visual o mediante sensores de estructuras desde el aire, utilizando drones.

LIDAR (Light Detection and Ranging): tecnología de medición de distancias que utiliza láseres, útil para crear modelos 3D de estructuras y detectar deformaciones causadas por corrosión.

Mantenimiento Predictivo: estrategia que utiliza datos recopilados (como los de drones) para predecir fallos y planificar el mantenimiento antes de que ocurra un problema.

Regulaciones de Vuelo: normativas que regulan el uso de drones, especialmente en áreas industriales y urbanas, que deben ser cumplidas durante las inspecciones.

Rehabilitación Estructural: procesos y técnicas aplicadas para restaurar la integridad de una estructura afectada por la corrosión.

Sensores de Corrosión: dispositivos que miden y monitorean la tasa de corrosión en tiempo real, ayudando a la detección temprana de problemas.

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping): es una técnica que permite a un dron mapear un entorno desconocido y determinar su posición al mismo tiempo.

Resumen

Título: “Aplicaciones de drones en la detección de corrosión por hidrógeno: Un enfoque en la identificación de anomalías en infraestructuras industriales” *

Autor: Gessika Alejandra González Santos*

Palabras Clave: Corrosión, Drones, Detección, Hidrógeno, Infraestructura, Inspección.

Descripción

A luz de las nuevas tecnologías que brindan soluciones ante el problema de la corrosión, se presenta mediante la investigación el análisis y registro de los sistemas aéreos no tripulados más conocidos como drones; que mejoran significativamente la eficiencia y la efectividad de la detección de corrosión por hidrógeno en estructuras industriales o infraestructuras, proporcionando una forma rápida y precisa de inspección, reduciendo costos y minimizando los riesgos de seguridad.

La combinación de la tipología de imágenes y la integración de los datos recopilados con sistemas de gestión de activos y mantenimiento predictivo facilita la planificación de actividades de mantenimiento de forma más eficiente entregando un diagnóstico o evaluación de las afectaciones, permitiendo detectar discontinuidades antes de que se conviertan en fallas, lo que ayuda a prevenir daños mayores en el metal y la vida útil de los equipos, reduciendo los gastos por ejemplo asociados con paradas no programadas, debido a que los drones tiene la capacidad para acceder a zonas peligrosas o inaccesibles para los operadores humanos.

De este modo, que los avances, indagación y búsqueda resultantes de este proyecto logren apoyar información valiosa sobre la efectividad del uso de drones en la industria para el monitoreo de estructuras y a su vez determinar prácticas para la aplicación de esta tecnología en entornos reales impulsando la creciente necesidad de técnicas de inspección no destructivas y eficientes para mantener la integridad de las infraestructuras críticas.

***Trabajo de Grado**

****Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.**

Director: Darío Yesid Peña Ballesteros Doctor en Corrosión

Abstract

Title: “Drone applications in hydrogen corrosion detection: A focus on identifying anomalies in industrial infrastructures” *

Author: Gessika Alejandra González Santos**

Keywords: Corrosion, Drones, Detection, Hydrogen, Infrastructure, Inspection.

Description

In light of new technologies that provide solutions to the problem of corrosion, this research presents the analysis and registration of unmanned aerial systems better known as drones, which significantly improve the efficiency and effectiveness of hydrogen corrosion detection in industrial structures or infrastructure, providing a fast and accurate way of inspection, reducing costs and minimizing safety risks.

The combination of images typology and the integration of the data collected with asset management and predictive maintenance systems facilitates the planning of maintenance activities more efficiently by delivering a diagnosis or assessment of the affectations, allowing to detect discontinuities before they become failures, which helps to prevent further damage to metal and equipment life, reducing expenses for example associated with unscheduled shutdowns, because drones have the ability to access dangerous or inaccessible areas for human operators.

Thus, that the advances, inquiries and research resulting from this project will support valuable information on the effectiveness of the use of drones in industry for the monitoring of structures and in turn will determine practices for the application of this technology in real environments driving the growing need for non-destructive and efficient inspection techniques to maintain the integrity of critical infrastructures.

***Degree Work**

****Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.**

Director: Darío Yesid Peña Ballesteros. PhD in Corrosion.

Introducción

En la última década, ha habido una tendencia a diseñar y fabricar inteligencia artificial que pueda realizar exploración para ayudar a ampliar los niveles de identificación y entrega de diagnósticos relacionados al comportamiento de la corrosión a través de computadoras integradas de alto rendimiento que son útiles para analizar el comportamiento a largo plazo y prevenir daños, pues se estima que la corrosión cuesta entre el 3% y el 4% del PIB para la mayoría de los países cada año, lo que genera una pérdida significativa de activos.

La detección automatizada de corrosión por hidrógeno desarrolla un sistema inteligente alimentado a partir de imágenes como fotografías o videos que incluyen mayor acceso a ubicaciones remotas, mitigación de riesgos para los inspectores, ahorro de costos y mayor velocidad de monitoreo ofreciendo más versatilidad para la exploración en comparación con el uso de métodos actuales que se ven obstaculizados por la falta de un conjunto de datos disponibles adecuados para condiciones inmediatas, provocando una cantidad de falsos positivos y falsos negativos que proporcionan estimaciones de incertidumbre y no de confianza.

Actualmente garantizar la seguridad de las diferentes infraestructuras industriales sigue siendo un punto central en el seguimiento de la inspección, por ejemplo en los componentes críticos como las conexiones en cimientos industriales esenciales que son susceptibles a peligros naturales y ataques ambientales o de deterioro que alteran por completo las propiedades del material debido a su reacción con el entorno afectando por completo la vida útil o complicando la aplicación generalizada de refuerzo en infraestructura ya envejecida y aunque la extracción de muestras en edades tempranas para detectar la corrosión solo indica la condición de la estructura, no revela la verdadera condición de la armadura.

Cada uno de los métodos que se emplean en la investigación tradicional de la detección de defectos se ha centrado predominantemente en métodos como el golpeteo basado en eco, la emisión acústica, las pruebas ultrasónicas y las pruebas dinámicas, sin embargo, estos métodos tienen una aplicabilidad limitada y enfrentan desafíos en una adopción más amplia. Zhang, J. (2024).

La corrosión por hidrógeno es uno de los problemas más frecuentes en estructuras soldadas, ya que el agrietamiento asociado suele manifestarse algún tiempo después de finalizar el proceso de soldadura, lo que dificulta su detección. Se considera preferible interpretar este tipo de fallas como un caso particular de fragilización por hidrógeno, donde la fuente de hidrógeno no proviene del proceso de fabricación, sino que se genera a partir de un mecanismo corrosivo durante el servicio. (Liu, C., & Birks, N. 2010).

Por otro lado la corrosión por hidrógeno se conoce con un fenómeno ampliamente documentado a nivel experimental, pero que no suele contemplarse en la etapa de diseño (salvo tal vez en aplicaciones con protección catódica u ánodo de sacrificio) y rara vez se toma en consideración en los estudios de fallo de componentes estructurales, como por ejemplo elementos de fijación; Sin embargo, la utilización de elementos de fijación de alta resistencia con recubrimiento de sacrificio (como por ejemplo el zinc) implica un riesgo potencial de sufrir este tipo de fragilización inducida por el medio y debería contemplarse siempre. (Liu, C., & Birks, N. 2010).

1. Objetivos

1.1 Objetivo General:

Realizar una evaluación bibliográfica sobre el uso de drones para detectar la corrosión por hidrógeno en infraestructuras industriales.

1.2 Objetivos Específicos:

Evaluar las tecnologías disponibles en los drones para la detección de corrosión por hidrógeno.

Analizar los beneficios potenciales de utilizar drones en comparación con métodos tradicionales, como inspecciones visuales, pruebas destructivas y pruebas no destructivas manuales.

Investigar los desafíos ambientales y regulatorios asociados con el uso de drones para la detección de corrosión por hidrógeno, como la autonomía de vuelo, la seguridad operativa y la privacidad.

2. Marco Teórico

Los estudios recientes sobre el agrietamiento inducido por hidrógeno son llevados a cabo a partir de diferentes pruebas no destructivas lo suficientemente sensibles para detectar grietas que son una forma común de daño húmedo causado por la propagación de pequeñas fallas similares a las fisuras y puede ocurrir a temperaturas relativamente bajas, como resultado del hidrógeno atómico de las reacciones de corrosión húmedas del H_2S que en lugar de burbujear desde la superficie corroída estos átomos de hidrógeno ingresan a la estructura metálica causando debilidad y corrosión.

En lo que respecta a los mecanismos de daño, el ataque por hidrógeno suele ser, aunque no siempre, bastante inocuo, por lo general, no es dañino hasta que se vuelve extenso y afecta las propiedades del material, con el tiempo, estas grietas tienden a unirse debido a la acumulación de presión interna y posiblemente a campos de tensión locales en las regiones dañadas, propagándose a menudo hacia una soldadura o progresando en la dirección del espesor también conocido como agrietamiento escalonado. (*Prueter, P., 2021*)

En el acero es un problema de riesgo porque los aceros se cargan con hidrógeno en servicio, como en diversos entornos de hidrógeno, como pozos de petróleo, estructuras industriales o plantas de energía, además, los aceros estructurales de alta resistencia que se sueldan están expuestos a una cierta absorción de hidrógeno, lo que significa riesgo de fractura y formación de ampollas debido al ataque por hidrógeno; las interfaces entre estas inclusiones y la matriz de acero proporcionan sumideros (micro huecos) en los que el hidrógeno presente en el acero puede quedar atrapado y puede acumularse presión hidrostática. (*Scully, J. R. 2010*).

El ataque por hidrógeno puede generar fallas catastróficas y repentinas, especialmente cuando la estructura presenta un diseño con temperaturas y presiones excesivamente altas. A pesar de los avances tecnológicos, la inspección de la corrosión en los pernos de puentes de acero sigue careciendo de una metodología confiable que optimice la eficiencia del equipo. En la mayoría de

los casos, la detección se realiza mediante inspección visual convencional, un enfoque subjetivo que carece de criterios de evaluación unificados.

No obstante estos métodos tienen una aplicabilidad limitada y enfrentan desafíos en una adopción más amplia con un mismo objetivo tanto a nivel nacional como internacional, debido a que generalmente solo juzga si la infraestructura o componentes están corroídos o no, sin la capacidad de identificar los niveles de gravedad de la corrosión, para un mantenimiento real de la corrosión en infraestructura los ingenieros no sólo necesitan saber si se ha producido corrosión, sino también su alcance y así para poder implementar las medidas de mantenimiento correspondientes. (*Zhijun Li 2014*).

Sin embargo, algunas normas existentes carecen de clasificaciones unificadas de los niveles de corrosión, lo que da lugar a criterios subjetivos e inconsistentes en la práctica convencional ya que los métodos de detección existentes no pueden satisfacer las demandas del mantenimiento de por ejemplo puentes de acero en cuanto a precisión e identificación del tipo de corrosión por hidrógeno, porque no logran clasificar con precisión la corrosión; Para abordar estos desafíos los sistemas aéreos no tripulados (drones) proporcionan a los expertos en END, procedentes de todos los sectores industriales, una perspectiva aérea única y confiable.

Esta metodología posibilita un fácil acceso a zonas remotas o inaccesibles sin comprometer la seguridad del inspector, proporciona a los expertos una forma rápida y precisa de inspeccionar y, al mismo tiempo, reducir los costos operativos y minimizar los riesgos de seguridad. (*Betsy Kenaston - 29 abril, 2021*), debido a la combinación de la fotografía con la grabación de videos se permite que los expertos de END lleven a cabo una amplia gama de servicios topográficos y de inspección con seguridad y sostenibilidad. (*Betsy Kenaston - 29 abril, 2021*).

De este modo se ha demostrado que por medio del uso de estos equipos y el aprendizaje automático se puede predecir y evaluar el desempeño estructural, identificar las condiciones estructurales e informar para lograr decisiones preventivas y de recuperación mediante la

extracción de patrones de datos recopilados a través de diversas fuentes y medios.

3. Penetración del Hidrógeno

3.1 Definición:

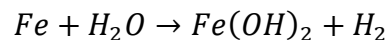
Consiste en el ingreso del hidrogeno en los metales convirtiéndolos en más frágiles, derivando en fallas inesperadas y catastróficas. Este riesgo es especialmente alto en los aceros utilizados en industrias expuestas a ambientes con hidrógeno, donde la interacción con este elemento aumenta la probabilidad de sufrir daños estructurales

El hidrógeno, en su forma atómica o ionizada, puede penetrar la estructura de un metal dentro de una atmósfera gaseosa. Para ello, primero se disocia en átomos, luego se adhiere a la superficie del metal mediante absorción y, finalmente, se incorpora a su estructura interna. Comprender estos procesos es fundamental para prevenir daños en los materiales, ya que su ingreso puede originarse a partir de diversas fuentes, tales como:

3.1.1 Fuentes de Penetración de Hidrógeno en Metales

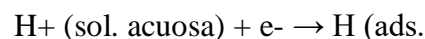
- Electrolito acuoso (H₂O), la más común y la
- Fase gaseosa (hidrógeno molecular)

En términos generales, el hierro en contacto con agua y oxígeno sufre corrosión según la reacción:



Si hay oxígeno presente, la reacción continúa hasta formar óxidos e hidróxidos de hierro

Los átomos de H son ADSORBIDOS sobre la superficie del acero que actúa como cátodo:



En la fase gaseosa (hidrógeno molecular) tenemos las siguientes etapas:

- **Adsorción y disociación sobre la superficie del metal (Quimi-sorción disociativa).**
- **Pasaje del estado adsorbido al absorbido.**
- **Difusión en el metal**

En este caso, la película de óxido puede funcionar como una barrera parcial contra la entrada de hidrógeno. Sin embargo, la presencia de defectos o discontinuidades permite que el hidrógeno atómico se difunda con más facilidad en el material, logrando que la temperatura influya directamente en la solubilidad y movilidad del hidrógeno, y la presión se encargue de determinar la cantidad de hidrógeno disponible para su absorción.

La solubilidad real del hidrógeno en el hierro supera la solubilidad teórica debido a la presencia de trampas en la microestructura del material. A temperaturas superiores a 400 °C, el hidrógeno se disuelve en la red cristalina en estado atómico, ocupando los intersticios del hierro, mientras que, a temperaturas más bajas, además de ubicarse en estos espacios, el hidrógeno se acumula en defectos estructurales como dislocaciones, límites de grano, inclusiones y vacantes, lo que aumenta significativamente su solubilidad aparente

Este comportamiento tiene consecuencias significativas en la fragilización por hidrógeno, dado que, bajo determinadas circunstancias, el hidrógeno atrapado puede liberarse, fomentando la creación de fisuras en estructuras metálicas, esto es particularmente significativo en usos industriales como el aeronáutico y la metalurgia, donde la existencia de hidrógeno en el material puede poner en riesgo su integridad mecánica. (*Quiñonez, E. March 3*).

3.2 Ataque por Hidrógeno

3.2.1 Definición:

Se puede definir como un proceso de deterioro interno del material, caracterizado por la formación y expansión de microcavidades., la nucleación de estas cavidades ocurre en regiones de alta energía, como los bordes de grano y las interfases entre la inclusión y la matriz, regulando su crecimiento y evolución dentro de la estructura del material.

El carbono liberado por la descomposición de los carburos reacciona con el hidrógeno, formando metano (CH_4), que queda atrapado en el material, generando presión interna y

favoreciendo la formación de vacíos, debido a su reducido tamaño, estas microcavidades presentan una alta relación entre superficie y volumen, lo que indica que la energía superficial desempeña un papel clave en la estabilidad y expansión de los núcleos, actuando como una barrera para su crecimiento, pero cuando la presión interna supera la resistencia del material, pueden formarse grietas, lo que incrementa el riesgo de fallas estructurales.

3.2.2 Etapas y consecuencias

El período de incubación es una fase inicial en la que el daño por hidrógeno aún no es detectable mediante métodos convencionales, ya que las microcavidades son demasiado pequeñas para afectar significativamente las propiedades mecánicas del material, la duración de esta etapa depende tanto de la composición del acero como de las condiciones del ambiente (presión y temperatura), en entornos extremos, el daño puede iniciarse en pocas horas, mientras que, en condiciones más benignas, el proceso puede tomar años sin que se observen efectos evidentes.

Durante la fase inicial, el proceso de nucleación es reversible porque las microcavidades aún son pequeñas y la energía superficial actúa como una barrera que impide su crecimiento, sin embargo, cuando alcanzan un tamaño crítico, la energía libre asociada al volumen de la cavidad supera la energía superficial, lo que reduce la energía total del sistema y hace que las cavidades crezcan de manera irreversible. (*Loniuk, B. P.1996*).

Después del período de incubación, la formación de cavidades se acelera considerablemente hasta alcanzar un estado de saturación, donde la densidad de cavidades se estabiliza, factores como altas temperaturas, tensiones elevadas, alta presión parcial de hidrógeno y deformación plástica previa reducen el tiempo de incubación y aumentan la cantidad total de cavidades formadas en el material, a medida que las cavidades crecen, comienzan a fusionarse (coalescencia), lo que eventualmente lleva a la formación de fisuras en los límites de grano, además este proceso también provoca una descarburización casi total, afectando gravemente las

propiedades mecánicas del acero y como resultado, el material pierde resistencia mecánica, tenacidad al impacto y densidad, volviéndose frágil y susceptible a fallas catastróficas, lo que representa un problema crítico en aplicaciones industriales. (*Loniuk, B. P.1996*).

3.3 Agrietamiento Inducido por el Hidrógeno

3.3.1 Definición:

Es cuando el hidrógeno atómico difunde a través de la matriz del acero y, al recombinarse en forma molecular en zonas de baja cohesión, genera presiones internas que superan la resistencia del material, provocando deformaciones localizadas y, eventualmente, fallas estructurales.

El Agrietamiento Inducido por Hidrógeno HIC afecta principalmente a aceros de baja resistencia mecánica, en los cuales la recombinación del hidrógeno molecular genera ampollas visibles a escala macroscópica, para aceros de mayor resistencia, el fenómeno se manifiesta de manera diferente, con la formación de pequeñas ampollas microscópicas que pueden evolucionar en fisuras orientadas perpendicularmente a la dirección de la tensión máxima. (*Alessandro Campari, (2023)*).

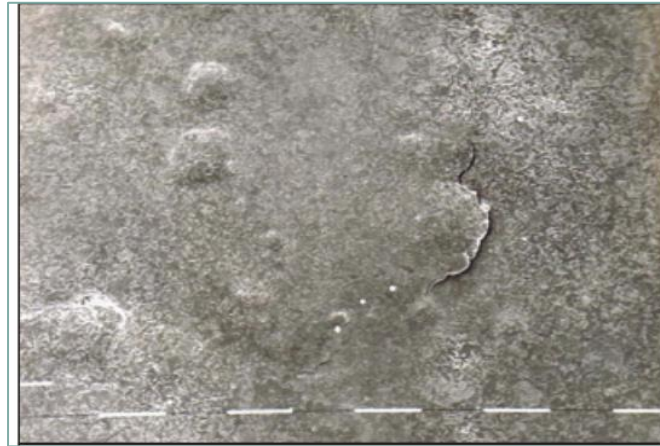
Este comportamiento diferenciado indica que la resistencia del material afecta la interacción del hidrógeno con su microestructura en aceros de alta resistencia, aunque la difusión del hidrógeno persiste, la propagación del daño tiende a ser más localizada y ocurre bajo condiciones específicas de tensión, si bien el Agrietamiento Inducido por Hidrógeno no suele provocar fallas catastróficas de inmediato, su impacto económico y operativo es considerable debido a la necesidad de realizar reparaciones y reemplazos de grandes componentes en infraestructura crítica. (*Alessandro Campari, 2023*).

El ampollado, al ser detectable mediante inspección visual y ultrasonido, permite una identificación temprana del problema, lo que facilita la implementación de medidas preventivas antes de que se produzcan daños estructurales graves. Su alto potencial para comprometer la

integridad de los sistemas industriales ha impulsado significativos esfuerzos en la comprensión de sus mecanismos y en el desarrollo de estrategias destinadas a minimizar su ocurrencia, como la utilización de sistemas aéreos.

Figura 1

De cómo el átomo más chico puede causar un daño grande.



Nota. La figura representa las ampollas producidas en la superficie de una chapa en un ensayo por FIH. Tomado de: Ovejero García, J. (2013).

Entre las soluciones más estudiadas se encuentran herramientas como la detección del daño mediante un vehículo aéreo no tripulado (Drones), la selección de materiales más resistentes al hidrógeno, la aplicación de recubrimientos protectores, la reducción de la permeación del hidrógeno mediante tratamientos térmicos y el control de las condiciones ambientales para limitar su ingreso al material y a diferencia de otros mecanismos de fragilización por hidrógeno, la HIC se manifiesta a temperatura ambiente y no requiere la presencia de tensiones externas o internas para su desarrollo, lo que la distingue de otras formas de daño inducido por hidrógeno.

3.4 Fragilización por Hidrógeno (FPH)

3.4.1 Definición:

Es una de las formas más críticas de daño inducido por hidrógeno en materiales metálicos, se caracteriza por la degradación progresiva de las propiedades mecánicas del material, en particular

una reducción significativa de la ductilidad y la tenacidad, lo que puede derivar en una fractura catastrófica bajo cargas normales.

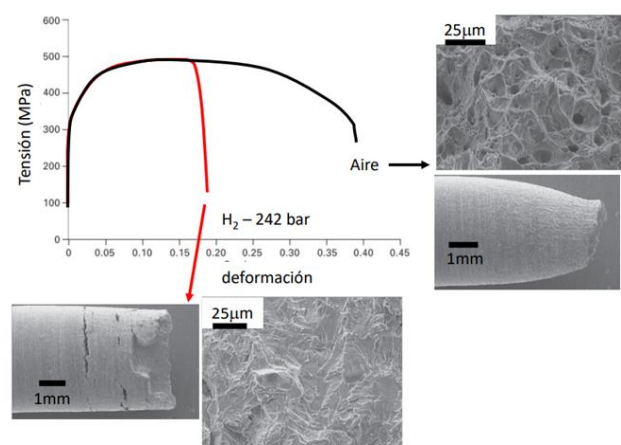
Se produce cuando se cumplen las tres **Condiciones esenciales: Tensión, Concentración y Microestructura.**

1. **Concentración crítica de hidrógeno:** Debe existir una cantidad mínima de hidrógeno disuelto en el material, lo cual puede ser resultado de procesos como la corrosión, la fabricación o la exposición a ambientes agresivos durante el servicio.
2. **Tensión crítica:** Es necesario que haya una tensión mínima, ya sea aplicada o interna (tensiones residuales), dentro del rango elástico del material, que facilite la nucleación y propagación de fisuras inducidas por hidrógeno.
3. **Microestructura susceptible:** La susceptibilidad está vinculada con la microestructura del material, siendo más pronunciada en aceros de alta resistencia, donde las características como la densidad de dislocaciones, los bordes de grano o las inclusiones pueden servir como puntos de concentración del hidrógeno.

La fragilización por hidrógeno también reduce la ductilidad y resistencia del acero debido a la difusión y acumulación de hidrógeno en su microestructura, como se representa en la **Figura**

Figura 2

"Consecuencias microscópicas producidas por la fragilización FPH".



Nota. La figura muestra el impacto del hidrógeno en la curva tensión-deformación del material, evidenciando una disminución drástica en su capacidad de deformación cuando está expuesto a H₂ a alta presión. Tomado de Pérez, T. E., & Kappes, M. A. (2020).

Otra característica es que este fenómeno es potencialmente reversible, es decir, si se detecta a tiempo y se implementan los tratamientos adecuados, como desorción de hidrógeno o recocido, las propiedades mecánicas del material pueden restaurarse parcialmente, sin embargo, su reversibilidad no elimina el riesgo asociado a su presencia, ya que este fenómeno es extremadamente difícil de detectar mediante métodos no destructivos, debido a que las fisuras inducidas pueden ser microscópicas y no siempre evidentes en una fase temprana, uno de los aspectos más peligrosos es que, en componentes inicialmente libres de tensiones residuales o tensiones externas, la fragilización por hidrógeno puede ocurrir posteriormente, al ser sometido el componente a tensiones durante el servicio, como ocurre en las pruebas de carga o la puesta en servicio de equipos. (*Cab Cauich, 2019*). En cuanto a la complejidad de las interacciones a nivel microscópico, la **tabla 1** resume los resultados potenciales de cómo el hidrógeno puede afectar diversos componentes microestructurales.

Tabla 1

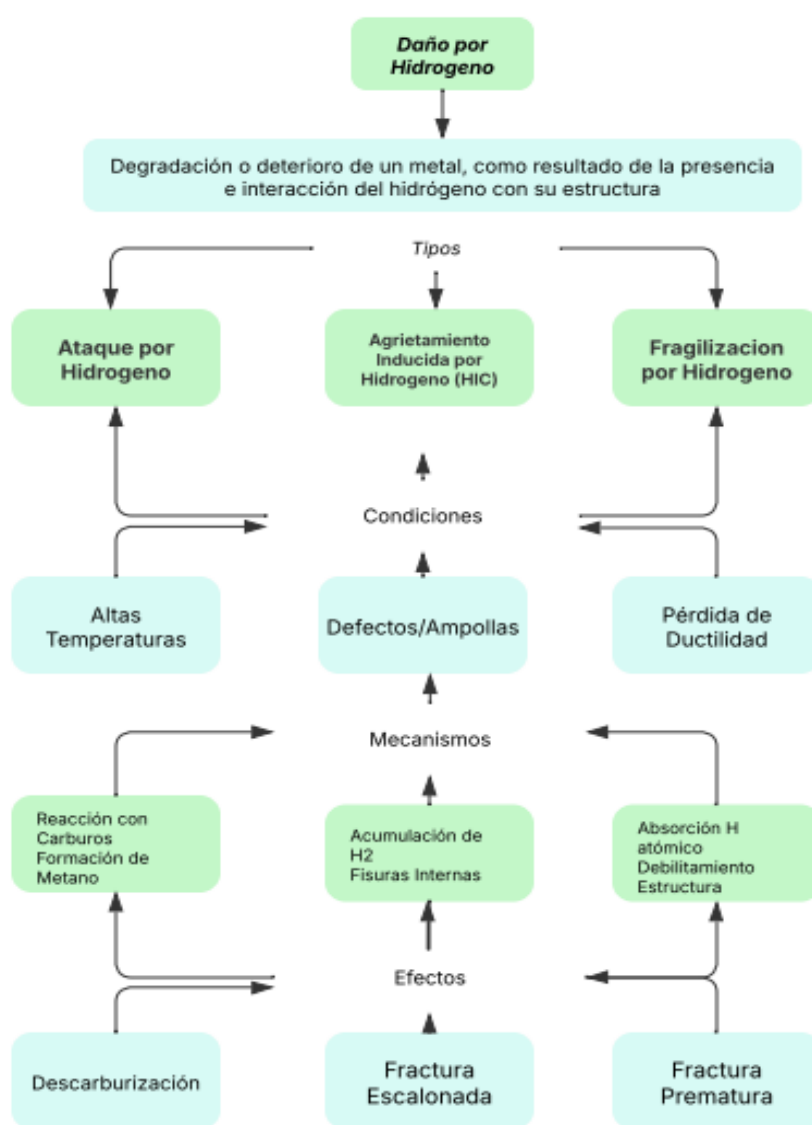
Influencia de la Localización del Hidrógeno en la Fragilización.

Ubicación del Hidrógeno en la Microestructura	Tipos de Fractura	Mecanismo de Fragilización
Intersticial	Clivaje, Intergranular	Debilitamiento de enlaces atómicos
Juntas de Grano	Intergranular	Reducción de la cohesión intergranular
Precipitados	Clivaje	Concentración de tensiones locales
Dislocaciones	Clivaje, Intergranular	Interacción hidrógeno-dislocación
Poros y Rechupes	Clivaje	Acumulación de hidrógeno gaseoso
Precipitados Coherentes	Dúctil	Formación de hidruros localizados

El siguiente **mapa conceptual** ilustra los tipos de daño por hidrógeno, presentando las condiciones, mecanismos y efectos asociados a cada tipo de daño, destacando la importancia de su prevención en aplicaciones industriales críticas, como la aeronáutica, la estructura civil y petroquímica.

Figura 3

Mapa Conceptual comparación de los Tipos de Daño por Hidrógeno



3.5 Prevención de la corrosión estructural

La implementación de drones en el ámbito de la inspección de la corrosión ha transformado notablemente la capacidad de identificación temprana de defectos, mejorando así la eficacia de las

estrategias de mantenimiento predictivo, los métodos tradicionales de inspección manual, que son susceptibles a riesgos como las caídas y la exposición a condiciones adversas, se han complementado con tecnologías autónomas que facilitan evaluaciones más exhaustivas y frecuentes.

La utilización de drones y robots ha logrado que las inspecciones sean significativamente más seguras, rápidas y precisas, lo que a su vez permite tomar decisiones de mantenimiento mejor informadas.

Equipados con cámaras de alta definición y sensores avanzados, los drones son capaces de acceder a estructuras, capturando imágenes intrincadas de lugares a los que antes era difícil o peligroso ingresar, estas imágenes se analizan posteriormente mediante algoritmos de inteligencia artificial expertos en detectar patrones y anomalías o indicativos de la presencia de corrosión, se prevé que, en un futuro próximo, los drones proporcionarán una evaluación temprana y precisa de las condiciones de los activos, ayudando así a prevenir las interrupciones de la producción y a garantizar la seguridad operativa de las instalaciones, lo que posteriormente facilitará la planificación del mantenimiento y las reparaciones, contribuyendo a la preservación de la integridad del sistema eléctrico y mitigará el riesgo de fallas o interrupciones del servicio.

Cada vez son más las empresas que se suman al salto tecnológico que supone el uso de drones porque entregan de forma más eficiente un diagnóstico o evaluación de las afectaciones, permitiendo detectar discontinuidades antes de que se conviertan en fallas, lo que ayuda a prevenir daños mayores en el metal y la vida útil de los equipos, reduciendo los costos asociados con paradas no programadas, debido a que estos tienen la capacidad para acceder a zonas peligrosas o inaccesibles para los operadores humanos. (*Ochoa Restrepo, A.2024*).

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de software capaz de determinar la concentración atómica de hidrógeno en aceros, evaluar la presión interna del gas en las trampas del material y estimar la susceptibilidad del acero a daños por hidrógeno a baja concentración

proporcionando criterios para el tratamiento térmico posterior a la soldadura y el precalentamiento, además la combinación con algoritmos avanzados entregan soluciones que optimizan los tiempos de inspección y reducen costos, mejorando la seguridad de los inspectores y minimizar la necesidad de evaluaciones en entornos de alto riesgo.

El proceso de trabajo general del dron se divide en tres categorías principales: adquisición del sitio, planificación de la ruta de vuelo y análisis posterior, antes de inspeccionar la estructura de interés, los trabajadores deben verificar que el entorno cerca del área de inspección se encuentre despejado para garantizar una operación segura, su capacidad de acceso y funcionamiento en entornos de difícil alcance o poco seguros lo convierte en un activo idóneo para aplicaciones de inspección que presentan espacios reducidos, depósitos, una variedad de escalas de temperatura y un alcance visual nulo. (*Ochoa Restrepo, A.2024*).

3.5.1 Monitoreo de la corrosión estructural

La inspección de fallas (por ejemplo, corrosión por hidrógeno) es un problema importante en estructuras industriales como techos de edificios, estructuras, placas, puentes y torres de telecomunicaciones (*Fang, Li, Gu, Zhu y Lim, 2020*). se trata de un servicio vital para varios sectores industriales, especialmente el manufacturero, en donde las estructuras que están sujetas a corrosión debido a su exposición al clima o servicios críticos sufren exponencialmente de este ataque sin prevención.

La corrosión no es simplemente un costo financiero si no se atiende; el peligro de vidas también puede ser un riesgo real, si no adoptan las últimas soluciones impulsadas por IA, las empresas están perdiendo millones en tiempo y dinero para identificar la corrosión utilizando métodos que han cambiado poco y que dependen en gran medida del juicio humano; la detección oportuna y precisa de la corrosión es una forma clave de mejorar la eficiencia de la economía al iniciar procesos de mantenimiento gestionados adecuadamente que también protegerán vidas.

Si se identifica la presencia de corrosión en un componente de un activo, como una estructura o una placa, es crucial implementar un sistema de monitoreo sistemático para evaluar la progresión del deterioro, este seguimiento debe incluir mediciones periódicas de variables clave, como la tasa de pérdida de espesor, cambios en la composición química, presencia de productos de corrosión y factores ambientales que puedan influir en su desarrollo, como humedad, temperatura y exposición a agentes corrosivos.

Un proceso de inspección rápido y confiable para detectar la corrosión puede garantizar que los activos industriales se mantengan a tiempo para evitar infracciones regulatorias, interrupciones o desastres catastróficos, en la mayoría de los casos, las inspecciones de dichos activos se realizan manualmente, lo que puede ser lento, peligroso, costoso e impreciso; Recientemente, los drones han demostrado ser una solución viable y más segura para realizar dichas inspecciones en muchas condiciones adversas al volar cerca de las estructuras y tomar una gran cantidad de imágenes de alta resolución desde múltiples ángulos (*Nash, W., Zheng, L., & Birbilis, N.2022*). Las imágenes adquiridas a través de dicho proceso se almacenan y luego son revisadas manualmente por ingenieros expertos que deciden sobre las acciones posteriores, sin embargo, no se puede dejar de lado que esto puede causar un gran problema para los ingenieros altamente calificados que identifican manualmente la corrosión a partir de las imágenes obtenidas por el dron porque pueden conducir a un alto nivel de error humano, inconsistencias, tiempos de entrega elevados y altos costos en términos de horas-hombre.

El análisis de estos datos permite caracterizar la cinética de la corrosión y determinar si el fenómeno está avanzando de manera uniforme o localizada, lo que facilita la identificación de mecanismos como el verdadero tipo de corrosión y su avance con base en la información recopilada, logrando establecer criterios de intervención, optimizar estrategias de mantenimiento predictivo y definir acciones de mitigación adecuadas, pues este enfoque basado en monitoreo y análisis predictivo es esencial para garantizar la integridad estructural del activo, minimizar riesgos

operacionales y optimizar los costos asociados al mantenimiento y la vida útil del material.

3.5.2 Diferencias entre el monitoreo y la inspección estructural

El monitoreo y la inspección son dos procesos diferenciados dentro del mantenimiento industrial, aunque en ciertos casos pueden llevarse a cabo de manera complementaria, ambos desempeñan un papel clave en la gestión de la integridad estructural y operativa de los activos industriales, pero su enfoque, metodología y frecuencia de aplicación son distintos.

El monitoreo consiste en la recopilación sistemática y periódica de datos en áreas específicas de un activo con el objetivo de evaluar la progresión de ciertos mecanismos de degradación, como la corrosión o cambios en las propiedades físicas y químicas del material, se trata de un proceso continuo o recurrente que emplea técnicas instrumentadas para la medición de parámetros críticos, centrándose en puntos estratégicos previamente identificados como críticos, ya sea por modelado predictivo, experiencia operativa o resultados de inspecciones previas, su propósito es proporcionar datos en tiempo real o en intervalos regulares, lo que permite detectar tendencias y anticipar fallas antes de que se produzcan eventos de daño severo. (*Sherwin, D. J. 1990*).

Por el contrario, una inspección representa una evaluación exhaustiva del activo en su conjunto y, por lo general, se lleva a cabo con menos frecuencia que las actividades de monitoreo, el objetivo principal de este proceso es identificar irregularidades, fallas o indicadores de degradación en cualquier segmento del sistema, sin concentrarse únicamente en áreas particulares.

Un examen minucioso puede revelar la presencia de corrosión u otras formas de deterioro que no se habían identificado anteriormente, en tales casos, los resultados del examen pueden requerir el establecimiento de un programa de monitoreo en las áreas afectadas para evaluar con mayor precisión la progresión del daño. (*Sherwin, D. J. 1990*).

3.5.3 Relación entre el monitoreo y la inspección

Los enfoques existentes para identificar la corrosión estructural a partir de imágenes se basan en visión artificial (*Fernández-Isla, Navarro y Alcover, 2013*) o en técnicas de aprendizaje profundo que relacionan el monitoreo y la inspección (*Atha y Jahanshahi, Cha et al., 2018*). Las técnicas recientes requieren conocimientos previos no triviales y un considerable esfuerzo humano para diseñar características de corrosión de alta calidad a partir de imágenes. La precisión en el monitoreo de la corrosión depende en gran medida de la correcta identificación de dichas características; si esto falla, el rendimiento se ve afectado, comparado con la inspección, el procesamiento de imágenes, la visión por computadora y los enfoques tradicionales de aprendizaje automático (*Son, Hwang, Kim y Kim, 2014*), son métodos basados en aprendizaje profundo, especialmente en redes neuronales convolucionales (*Gu et al., 2018; Jayaraman et al., 2020*), demostrando la capacidad de aprender automáticamente por características clave. Ambas técnicas han superado los enfoques de visión de última generación (*Atha y Jahanshahi; Cha et al.; Hoskere et al., 2018*), alcanzando una precisión comparable al nivel humano.

Si bien la inspección es una actividad global y puntual, y el monitoreo es localizado y frecuente, ambas estrategias son complementarias dentro de un plan de mantenimiento basado en condición; Una inspección puede identificar la necesidad de monitorear un área específica, mientras que los datos obtenidos a través del monitoreo pueden respaldar la toma de decisiones sobre la programación de inspecciones futuras o la implementación de medidas correctivas o preventivas juntas, estos procesos optimizan la fiabilidad y seguridad operativa de los activos industriales. (*Atha y Jahanshahi, Cha et al, Hoskere et al., 2018*)

Aunque las normativas en la mayoría de los países establecen que las inspecciones deben realizarse cada 3 a 5 años, dependiendo del tipo de activo, el monitoreo puede implementarse con una frecuencia mayor cuando se detecta una degradación acelerada en un área específica; por ejemplo, si en una sección de la pared de una estructura se observa un aumento significativo en la

tasa de corrosión, la frecuencia del monitoreo puede ajustarse de trimestral a mensual para evaluar más de cerca la evolución del deterioro y garantizar que se tomen medidas oportunas.

Si la corrosión persiste o se intensifica, el monitoreo proporcionará datos que respalden una recomendación técnica para la aplicación de medidas correctivas, como la reparación de la zona afectada, la modificación de condiciones operativas o, en casos extremos, la sustitución del material comprometido.

3.5.4 Monitoreo avanzado y mantenimiento predictivo en espacios confinados

Uno de los mayores beneficios del uso de drones para el chequeo de la corrosión (por ejemplo, corrosión por hidrógeno) es su habilidad para reunir datos visuales de alta resolución y precisión, lo que permite hacer un registro digital claro del estado del daño en un punto exacto en el tiempo, aun cuando en casos donde los inspectores pueden entrar físicamente al interior de la estructura a ver. La cantidad de datos visuales que se consigue por inspección manual con cámaras pequeñas es mucho más reducida que lo que puede atrapar un dron; esto es debido a que un dron tiene una movilidad mejor dentro del área, lo que le da la chance a inspeccionar lugares difíciles sin límites en visibilidad o posición; asegurando así una cobertura completa de las superficies adentro con los cuidados del ambiente

Además de facilitar el estudio detallado del impacto de la corrosión a lo largo del tiempo, los datos recopilados mediante visualización con drones también constituyen una valiosa fuente para estudiar la eficacia de las operaciones de mantenimiento, por ejemplo, al registrar visualmente todos los incidentes actuales, se puede realizar una corrección, como la aplicación de recubrimientos anticorrosivos, parches metálicos o nuevas reparaciones estructurales en paredes internas, lo que permite determinar con precisión si la corrosión ya existía y si el daño se ha restaurado a su estado funcional deseado. (Zavarce, A. 2023).

Desde un punto de vista técnico, los drones equipados con sensores avanzados y sistemas

de fotogrametría pueden generar modelos tridimensionales del activo inspeccionado. Estas representaciones digitales permiten:

- **Cuantificar la progresión de la corrosión** con mediciones precisas.
- **Detectar variaciones en la superficie metálica** mediante modelos de nubes de puntos generados con tecnología **LIDAR**.
- **Analizar datos de corrosión a nivel microscópico**, utilizando imágenes de ultra alta resolución con zoom digital avanzado.
- **Geolocalizar con precisión centimétrica** los puntos críticos de corrosión para facilitar su monitoreo en futuras inspecciones.

Este primer paso de estrategia de mantenimiento basado en riesgos, que involucra la evaluación del riesgo de falla de la estructura en comparación con el costo del mantenimiento está sujeto no solo del dron, sino además de la evaluación humana, lo que puede introducir posibilidades de error, sin embargo, se debe resaltar que el uso de drones para capturar imágenes puede complicarse por la presencia de ruidos de fondo que dificultan la interpretación clara de los datos y afectan la precisión de la evaluación. (*Zavarce, A.2023*).

Hasta hace poco, la capacidad de generar modelos tridimensionales precisos del interior de activos industriales como estaba limitada por restricciones tecnológicas y condiciones ambientales adversas, factores como la iluminación insuficiente, la presencia de polvo, reflejos en superficies metálicas y la falta de puntos de referencia visuales dentro de los espacios confinados dificultaban la recopilación de datos suficientes para construir un modelo 3D completo y preciso de la estructura interna del activo. Sin embargo, el dron para inspección en interiores ha revolucionado este proceso mediante la integración de un sensor LiDAR de precisión centimétrica, gracias a esta tecnología, el dron puede generar mapas tridimensionales en tiempo real de activos industriales, incluso en entornos de difícil acceso donde las técnicas convencionales de fotogrametría o imágenes de alta resolución presentan limitaciones.

Estos modelos tridimensionales no solo facilitan una visualización compleja de la geometría interna del activo, sino que también sirven como referencia de registro digital para la evaluación de la corrosión por hidrógeno y la degradación estructural, produciendo imágenes fijas y vídeos de alta resolución como los mapas tridimensionales generados que se emplean para evaluar la progresión de los daños, discernir los patrones de deterioro y comparar los distintos estados del activo a lo largo del tiempo, mejorando así los procesos de toma de decisiones en el mantenimiento predictivo y basado en el estado.

3.6 Drones para el monitoreo y control de la corrosión

Los drones desempeñan un papel fundamental en la recopilación de información visual detallada sobre la corrosión en activos industriales, proporcionando datos precisos y de alta resolución. Un dron de inspección avanzado puede capturar imágenes de alta calidad de las áreas afectadas, permitiendo documentar la progresión de la corrosión y del óxido con un nivel de detalle que facilita el análisis comparativo a lo largo del tiempo, además, la geolocalización precisa de los puntos de corrosión garantiza que la información pueda ser archivada y referenciada en futuras inspecciones para evaluar la evolución del daño. (*Zavarce, A.2023*).

Los modelos más recientes están diseñados específicamente para inspecciones en entornos de difícil acceso, ampliando la capacidad del inspector para evaluar más áreas dentro de un activo, dependiendo del tamaño del área en cuestión, los drones pueden capturar imágenes individuales o mapear zonas extensas mediante fotogrametría, los datos visuales obtenidos tienen una precisión extremadamente alta, lo que permite mediciones exactas de las áreas afectadas. (*Zavarce, A. 2023*).

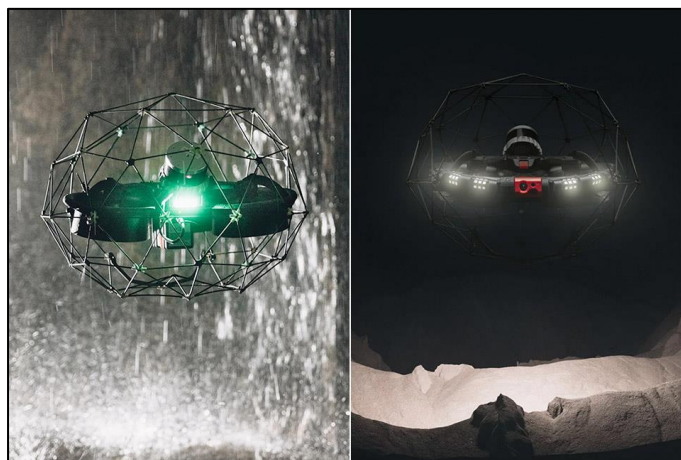
El dron de inspección (**Ver figura 4**) está equipado con una carga útil LiDAR que cuenta con una precisión de centímetros, lo que permite la geolocalización precisa de los puntos de corrosión por Hidrógeno identificados por el operador; en consecuencia, después de la inspección, se genera una nube de puntos tridimensional que abarca las coordenadas exactas de cada anomalía

detectada, esta tecnología avanzada promueve el monitoreo incesante de las regiones críticas, lo que permite que en el futuro las inspecciones se dirijan a puntos idénticos con un mínimo de error, en otras palabras los drones no solo mejoran la eficiencia de las inspecciones al cubrir grandes superficies de manera rápida y segura, sino que también proporcionan una documentación visual y espacial extremadamente precisa, optimizando la planificación del mantenimiento, reduciendo costos operativos y mejorando la capacidad de respuesta ante el avance de la corrosión.

En los casos en que los inspectores utilicen un aparato de inspección visual remota, como una cámara en lugar de un avión no tripulado de inspección, para evaluar la corrosión o determinar la existencia de óxido en una estructura metálica, su capacidad de evaluación se limitará a las regiones accesibles a través de los puntos de entrada existentes de la estructura; a pesar de que las cámaras facilitan la orientación remota y el control de aproximación, sus capacidades de zoom óptico son limitadas y carecen de instrumentos integrados para adquirir medidas dimensionales, lo que hace que la cuantificación precisa de la gravedad de la corrosión y el avance de la degradación estructural sean un desafío. (Zavarce, A.2023).

Figura 4

“Adaptabilidad del Dron en cualquier entorno”.



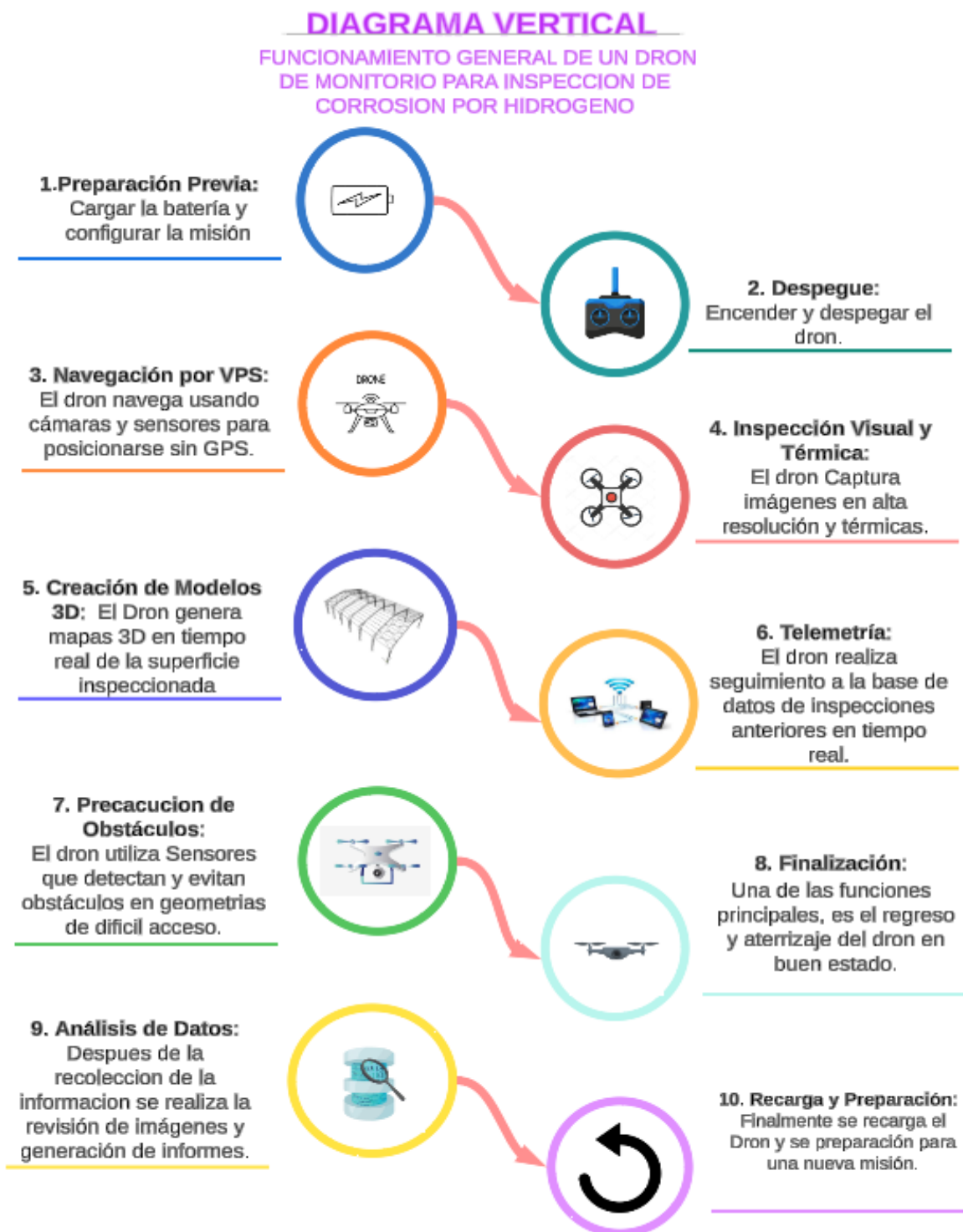
Nota. La figura expone al dron como medidor de espesor ultrasónico para inspecciones en espacios confinados Tomado de Aeroscan. (2019). Flyability Elios 3

En contraste, un dron especializado ofrece una capacidad de inspección superior, ya que puede desplazarse libremente dentro de la estructura sin depender de accesos fijos, permitiendo una cobertura más amplia de la superficie interna, gracias a su sistema de LiDAR de precisión centimétrica puede realizar mediciones con un margen de error de solo ± 1 cm en una longitud de 2,4 metros, proporcionando datos cuantificables y altamente precisos sobre la topografía y el deterioro del material inspeccionado. En resumen, los drones con LiDAR no solo mejoran la precisión y la eficiencia de las inspecciones, sino que también permiten una recopilación de datos más completa, facilitando la toma de decisiones informadas sobre el mantenimiento y la seguridad estructural.

El siguiente diagrama (**Ver Figura 5**) presenta el flujo operativo de un dron utilizado en la inspección de corrosión por hidrógeno, abarcando desde la preparación y despegue hasta la captura de imágenes de alta resolución para la detección de anomalías junto a las especificaciones técnicas del dron, incluyendo el sistema de cámaras, iluminación, control remoto y baterías, que se detallan en los **apéndices** de este documento.

Figura 5

Diagrama Vertical Funcionamiento paso a paso de Dron de monitoreo para la inspección de corrosión por Hidrógeno



3.6.1 Diseño del modelo Dron para el monitoreo.

Un Dron de monitoreo equipado con tecnología LiDAR aerotransportable y generación de nubes de puntos en tiempo real, representa un avance significativo en la evaluación de estructuras metálicas en entornos de difícil acceso, como placas, tuberías y tanques de almacenamiento, ofreciendo una alternativa innovadora para evaluar el estado de componentes metálicos sin necesidad de intervención humana directa, mejorando la detección de fallas y optimizando la seguridad, eficiencia y costos dentro de procesos industriales críticos.

Según el cofundador de Flyability una empresa dedicada a la fabricación de Drones especializados en la inspección y CEO Patrick Thévoz. *"Esta tecnología tiene una de las mejores estabilizaciones del mundo, una carga útil modular, la capacidad de crear modelos 3D en tiempo real mientras está en vuelo, y allana el camino hacia un futuro cada vez más autónomo", "Para las inspecciones industriales, es un habilitador clave de la Industria, que presenta una solución de inspección que puede hacer que las inspecciones sean más seguras, más eficientes y menos costosas que nunca".*

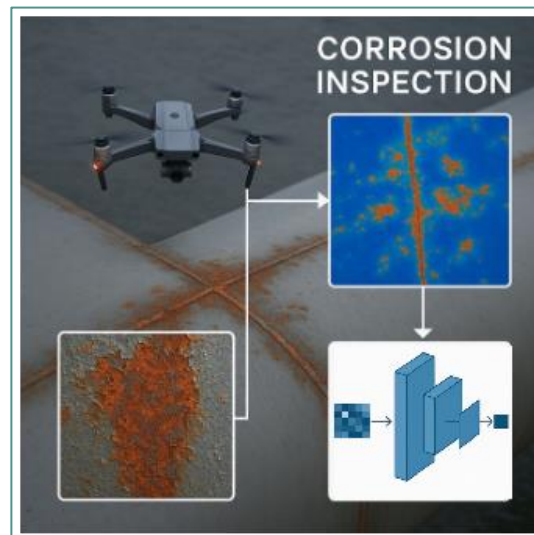
El CTO de Flyability, Adrien Briod dijo: *"Si piensas en el dron como tu teléfono plegable clásico, diseñado solo para hacer llamadas telefónicas, el dron es el teléfono inteligente, está diseñado para personalizarse según las demandas específicas de cada usuario, lo que le permite adjuntar la carga útil que necesita para que pueda usar la herramienta como desee y le permite crecer y mejorar con el tiempo con nuevas cargas útiles o soluciones de software."*

El dron no es sólo un sistema de captura visual aérea, sino también una herramienta avanzada de recopilación y procesamiento de datos de inspección de espacios cerrados, equipado con tecnología de mapeo, visualización digital de alta precisión y múltiples especificaciones, (**Ver Apéndice A**) que pueden generar modelos tridimensionales en tiempo real y optimizar la evaluación estructural de la corrosión por hidrógeno (**Ver figura 6**) sin afectar la seguridad de los operadores, con un preciso sistema de navegación y transmisión intuitiva de informes facilitando

las inspecciones en entornos industriales inaccesibles, reduciendo los riesgos laborales y mejorando la eficiencia en la toma de decisiones.

Figura 6

Procesamiento de imágenes para la inspección de corrosión por Hidrógeno



Nota. La imagen refleja la Inspección de corrosion por hidrogeno con el dron usando visión por computadora e imágenes térmicas. Tomado de Guo, Z., Li, Y., & Chen, H. (2021).

La tecnología LiDAR (Light Detección y Rango) puede medir distancias con precisión emitiendo pulsos láser y detectando el tiempo de retorno de la señal reflejada, generando una nube de puntos ambientales mediante un escaneo láser aéreo que combina el movimiento longitudinal determinado por la trayectoria del avión y el movimiento lateral generado por un espejo oscilante que desvía el rayo láser.

La determinación de las coordenadas de la nube de puntos requiere la integración de múltiples sistemas como el posicionamiento del sensor que se obtiene mediante un GPS diferencial de alta precisión y la orientación angular del espejo que se registra como un sistema de navegación inercial. Con estos datos y la medición de la distancia sensor-superficie mediante un distanciómetro láser, logra calcular con precisión la ubicación de cada punto en el espacio, este proceso permite la generación de modelos tridimensionales con una densidad de decenas de miles de puntos por

segundo, proporcionando una representación detallada y altamente precisa del entorno inspeccionado.

El software de vuelo desarrollado integra algoritmos avanzados de procesamiento de datos con tecnología LiDAR optimizada por la unidad de procesamiento gráfico permitiendo una visualización digital en tiempo real, mediante un sistema de posicionamiento similar a un GPS con calibración milimétrica para entornos interiores, generando mapas tridimensionales instantáneos, que facilitan la detección precisa de obstáculos y la estructuración del entorno circundante. “(Yuan, F., Swadzba 2009).

Esta capacidad se traduce en una estabilidad superior, lograda mediante un control remoto descrito en el **Apéndice D** de posicionamiento de alta precisión basado en la fusión de datos de sensores inerciales y sistemas LIDAR de autonomía operativa combinada con la capacidad de navegar en entornos confinados, prometiendo avances significativos en la automatización de la inspección industrial, permitiendo explorar espacios complejos de forma segura y eficiente sin intervención humana directa.

Figura 7

“Mapeo y trayectoria con SLAM”.



Nota. La imagen indica el funcionamiento del motor SLAM, mostrando la trayectoria de un dron mientras genera un mapa 3D del entorno. Tomado de Aeroscan. (2019). Flyability Elios 3.

El dron cuenta con un sistema de estabilización implementado basado en el avanzado algoritmo SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) (**Ver figura 7**), que garantiza una estabilidad robusta y precisa en cualquier condición de operación, este algoritmo de corrección dinámica detecta y compensa la más mínima perturbación en la trayectoria del dron, enviando ajustes en tiempo real al controlador de vuelo para mantener su posición altamente precisa.

La tecnología integrada ejecuta un escaneo continuo del entorno mediante barridos láser de alta frecuencia, generando una nube de puntos densa y detallada, esta información se procesa en tiempo real y se visualiza en aplicaciones como por ejemplo Cockpit, proporcionando un modelo tridimensional preciso de la zona de operación: la integración de la vista 3D en tiempo real con la trayectoria del dron permite a los operadores una localización exacta y la recopilación de datos estructurales críticos, optimizando la inspección y la generación de informes en modelos tridimensionales de alta fidelidad. (*Rieke, M., Foerster, T., Geipel, J. 2012*).

El sistema de posicionamiento del dron garantiza una ubicación precisa en todo momento, permitiendo un control total sobre su trayectoria, esta capacidad proporciona al operador la información necesaria para planificar de manera eficiente la mejor ruta de retorno, optimizando la autonomía del dron durante la operación, por otro lado el procesamiento de los datos de mapeo acumulados permite la generación de una visualización detallada del entorno inspeccionado, (**Ver figura 8**) facilitando la evaluación precisa del alcance de la inspección en cualquier momento, proporcionando a los analistas una representación espacial completa para el análisis estructural, la planificación de intervenciones y la optimización de futuras misiones de reconocimiento.

Además de generar nubes de puntos de alta precisión, el sistema del dron captura y procesa conjuntos densos de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional (X, Y, Z), en donde cada punto registrado representa una medición exacta de la superficie externa de un objeto o entorno, obtenida a partir del tiempo de vuelo del pulso láser reflejado. (*Rieke, M., Foerster, T., Geipel, J. (2012)*).

Figura 8

“Interfaz de Usuario más visualización de Datos en Inspección Aérea”



Nota. La imagen entrega el sistema de navegación tridimensional basado en tecnología de percepción espacial, empleando sensores LIDAR y algoritmos avanzados de visión por computadora. Tomado de Aeroscan. (2019). Flyability Elios 3.

Los datos que son procesados pueden reconstruir modelos digitales 3D con resolución centimétrica, facilitando análisis estructurales avanzados y mediciones geométricas detalladas que se integran con un software de modelado o simulación junto con las nubes de puntos resultantes para inspección técnica, detección de anomalías y generación de mapas espaciales, con aplicaciones en ingeniería, mantenimiento predictivo y análisis de integridad estructural.

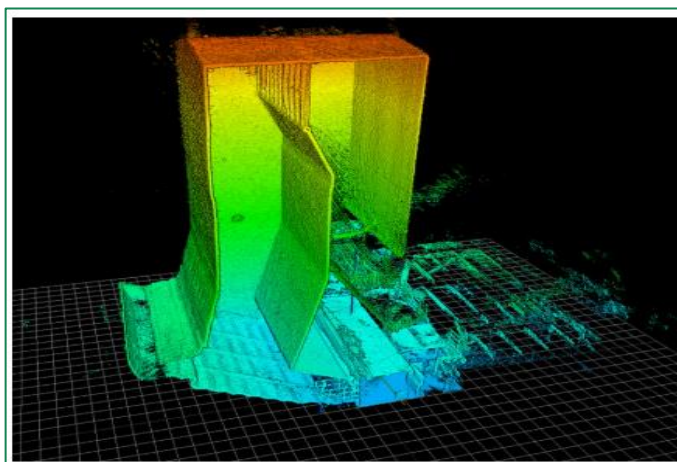
La integración de drones con el software SLAM permite el procesamiento avanzado de datos para producir modelos tridimensionales de alta precisión (**Ver figura 9**) que pueden ayudar a mapear instalaciones interiores de difícil acceso, esta capacidad es fundamental para las inspecciones técnicas avanzadas, ya que proporciona a los topógrafos las herramientas para reconstruir estructuras en detalle en entornos restringidos y situaciones de alta complejidad industrial. Desde el punto de vista del diseño, el dron es un sistema robusto con resistencia a colisiones, optimizado para operaciones en condiciones extremas, su arquitectura incorpora una jaula de protección esférica de alta resistencia y motores de inversión exclusivos, permitiéndole

recuperar

su estabilidad incluso después de realizar un giro completo de 360°, sin desviaciones en su trayectoria, contando con certificación que garantiza operabilidad en entornos industriales adversos, proporcionando resistencia a la humedad, salpicaduras y partículas en suspensión, lo que lo convierte en una herramienta ideal para inspecciones en espacios con presencia de polvo, gases o líquidos, sin comprometer la integridad del sistema ni la calidad de los datos recopilados.

Figura 9

“Aplicación de la Tecnología LiDAR para el análisis de infraestructura en 3D”.



Nota. La imagen revela el modelo 3D obtenido por escaneo láser, con colores indicando profundidad y precisión en la captura, probablemente usando tecnología LIDAR. Tomado de Aeroscan. (2019). Flyability Elios 3.

Para optimizar la calidad de los datos obtenidos durante la inspección, el dron ha sido diseñado con una carga útil estática como se especifica en el **Apéndice E** que incorpora un campo de visión ampliado de 180°, completamente libre de obstrucciones, este sistema avanzado integra una cámara 4K de alta resolución, una cámara térmica para la detección de variaciones de temperatura y un sensor de distancia de alta precisión, permitiendo un análisis detallado de estructuras en entornos industriales de difícil acceso. (Na, W. S., & Baek, J. 2016).

El sistema de iluminación del dron ha sido diseñado desde su base para proporcionar una experiencia lumínica optimizada, garantizando visibilidad en condiciones extremas, su tecnología de iluminación antipolvo y oblicua detallada en el **Apéndice C**, líder en el sector, permite la exploración eficiente de espacios confinados como minas, pozos, grietas y acumulaciones rocosas, simulando la funcionalidad de una fuente de luz portátil de alta intensidad; Gracias a estas innovaciones, la carga útil del dron ofrece una calidad de imagen excepcional, con una consistencia uniforme incluso en entornos con baja o nula iluminación, esto mejora significativamente la capacidad del dron para realizar inspecciones de alta precisión, asegurando la recopilación de datos visuales detallados y facilitando la toma de decisiones en operaciones de mantenimiento e ingeniería estructural. (*Flyability 2019*).

Para garantizar la máxima precisión en las operaciones de inspección, el dron está equipado con un sistema de captura de datos avanzado que combina una cámara 4K de alta resolución con un sensor de distancia de 0,18 mm/px explicada en el **Apéndice B** proporcionando una visualización detallada de las superficies inspeccionadas, su diseño optimizado incluye un campo de visión de 180° sin obstrucciones, lo que permite una cobertura amplia y sin interferencias durante la exploración de entornos confinados, contando con una cámara térmica integrada para la detección de anomalías de temperatura, facilitando la identificación de problemas estructurales y fallos en componentes industriales.

El sistema de iluminación ha sido desarrollado para mejorar la visibilidad en condiciones adversas, debido a que su sistema de iluminación oblicua permite la detección eficiente de defectos superficiales como picaduras, grietas y acumulaciones de residuos, optimizando el análisis estructural, con una potencia de 16.000 lúmenes y un diseño a prueba de polvo, el dron de inspección es capaz de operar en ambientes contaminados sin comprometer la calidad de la imagen, garantizando un rendimiento óptimo en inspecciones de alta exigencia técnica. (*Flyability 2019*).

La autonomía de vuelo del dron ha mejorado significativamente respecto a generaciones anteriores, optimizando la eficiencia en las tareas de inspección. Según la relación entre el peso de carga útil y el tiempo de vuelo presentada en la **Figura 10**, en condiciones sin carga, el dron de inspección puede operar hasta 12,5 minutos, lo que facilita la exploración de espacios confinados en una sola operación y cuando el sistema LIDAR se incorpora como carga útil, la autonomía de vuelo se reduce a 9,1 minutos, manteniendo un equilibrio óptimo entre rendimiento y capacidad de inspección.

Figura 10

Gráfico Tiempo máximo de vuelo del dron en función del peso de la carga útil.



Nota. La imagen muestra que a medida que aumenta la carga útil, el tiempo de vuelo disminuye, lo que es crucial para optimizar la eficiencia en la inspección con drones. Tomado de Aeroscan. (2019). Flyability Elios 3.

En condiciones de carga máxima, el dron alcanza un tiempo operativo de hasta 8,2 minutos, asegurando un desempeño confiable en entornos industriales exigentes, además, el dron cuenta con un mecanismo de batería de acople y cierre optimizado para un manejo rápido y seguro, lo que minimiza los tiempos de inactividad y permite una rápida sustitución de energía en operaciones

continuas, esta característica refuerza su utilidad en inspecciones prolongadas y misiones críticas donde la eficiencia y la autonomía son factores determinantes. (*Flyability 2019*).

3.6.2 Procesamiento de Datos

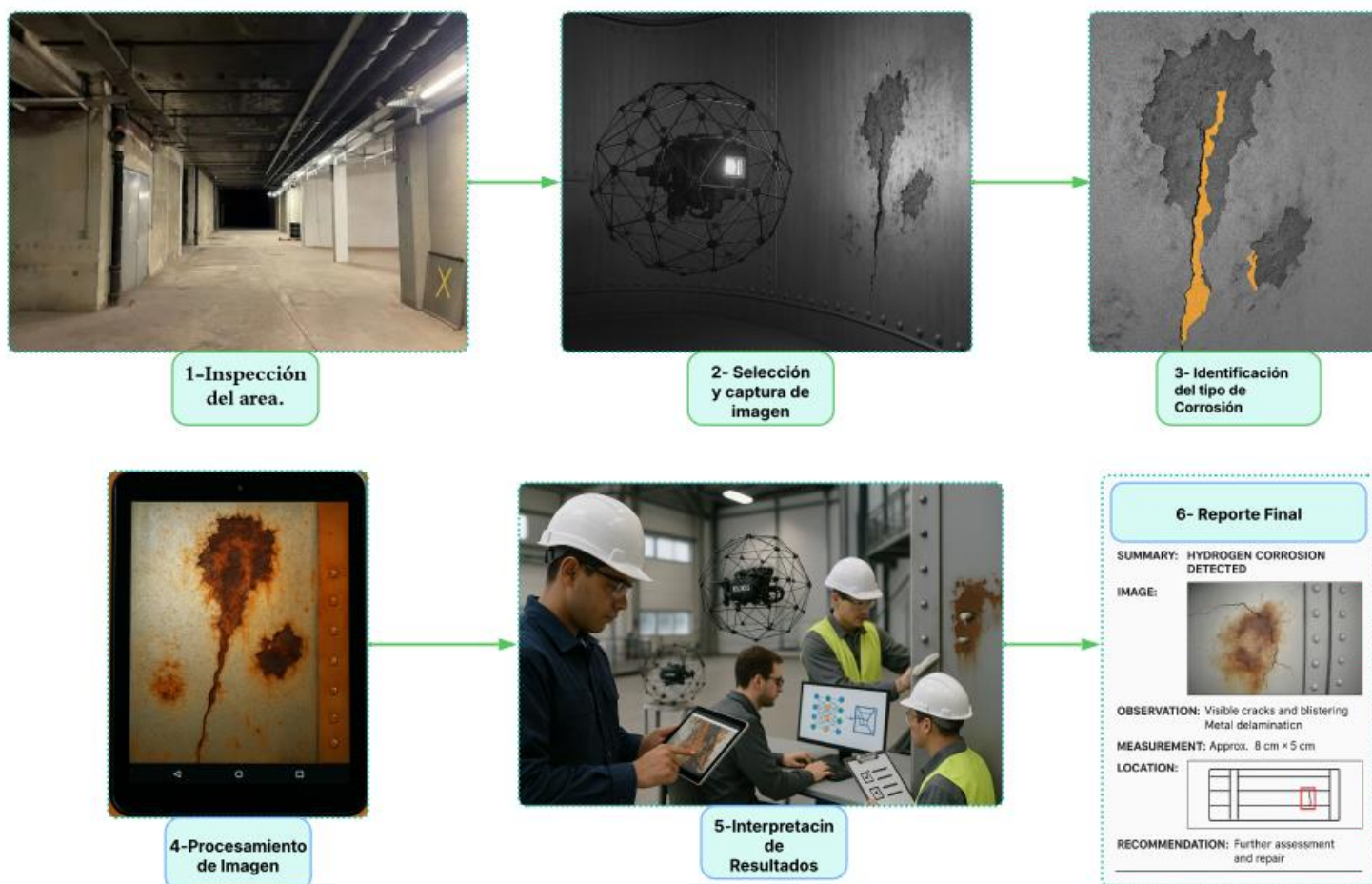
El dron de inspección es capaz de capturar hasta 40 imágenes en alta resolución por vuelo, combinando datos visuales y térmicos para ofrecer una visión integral del estado de las superficies inspeccionadas como por ejemplo las del **Apéndice F**, pero evalúa únicamente cuatro imágenes, estas son estratégicamente seleccionadas durante el recorrido en puntos críticos o de interés estructural, estas imágenes, en combinación con la nube de puntos 3D generada por el sensor LiDAR y, en algunos casos, datos térmicos, permiten detectar y diferenciar la presencia de corrosión mediante el análisis de patrones visuales y geométricos. El daño de corrosión por hidrógeno no siempre presenta evidencia visible en la superficie, ya que se manifiesta mediante microgrietas internas o delaminaciones que pueden comprometer la integridad estructural del material, no obstante, el dron permite identificar estas irregularidades mediante la nube de puntos generada por el sensor LiDAR y en cuanto a la diferenciación de la corrosión la realiza mediante la comparación de las imágenes capturadas con modelos de referencia o bases de datos previamente entrenados, a través del software de análisis, empleando algoritmos de detección de defectos por visión por computadora, que permiten reconocer texturas, bordes irregulares, zonas con cambios de color o forma, y clasificarlas como posibles áreas con corrosión. (*Inspenet. (2025)*).

Paralelamente, las imágenes térmicas capturadas pueden revelar diferencias de temperatura localizadas, asociadas a zonas con daño interno, como fisuras o separación de capas, típicas de los tipos de daño por hidrógeno, siendo posible automatizar la detección de patrones de daño, clasificar los hallazgos y jerarquizar su criticidad, en casos más avanzados, se integra inteligencia artificial en función de características morfológicas específicas observadas en las imágenes, así, incluso con un número limitado de imágenes, el sistema puede generar una alerta temprana mediante informes

y recomendar una inspección detallada en áreas con mayor probabilidad de afectación de corrosión por hidrógeno, toda esta secuencia de trabajo mencionada es representada paso a paso en la **Figura 11**.

Figura 11

“Secuencia del dron en la inspección de corrosión por Hidrógeno”.



Nota. La imagen representa el proceso de inspección de corrosión por hidrógeno, desde captura y análisis hasta reporte final. Tomado de OpenAI. (2025).

3.6.3 Transmisión de la Información

La integración en los drones proporciona una solución avanzada para la supervisión y el mantenimiento industrial, permitiendo la optimización del proceso de inspección en cada una de sus etapas, desde la captura de datos hasta la toma de decisiones estratégicas, garantizando la

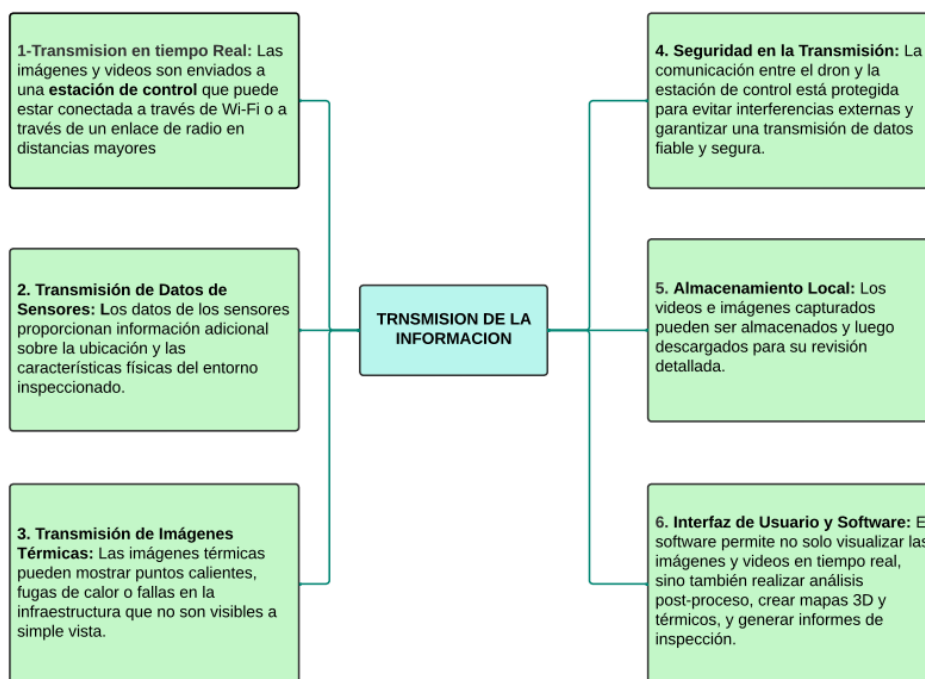
continuidad operativa y mejorando la eficiencia en la evaluación de infraestructuras complejas.

La incorporación de tecnología en el dron permite la reconstrucción tridimensional de instalaciones interiores con una precisión milimétrica, facilitando la identificación de áreas críticas que requieren intervención y la transmisión de informes se realiza de manera intuitiva mediante modelos 3D interactivos, asegurando un acceso rápido y centralizado a la información clave capturada durante la operación, adicionalmente, la generación de nubes de puntos de alta densidad optimiza la precisión en la localización de datos, permitiendo un análisis detallado y fiable de las condiciones estructurales, logrando un procesamiento eficiente de la información y proporcionando una base sólida para la planificación y ejecución de estrategias de mantenimiento preventivo y correctivo en entornos industriales de alta exigencia. *(Flyability 2019)*.

El esquema de transmisión de información en la **Figura 12**, garantiza la eficiencia en la entrega de datos, desde la obtención de imágenes y lecturas de sensores, hasta su análisis y presentación al usuario final. *(Flyability 2019)*.

Figura 12

Flujograma del Proceso de Transmisión de Información en Dron



3.6.4 Limitaciones en la tecnología del dron

A pesar de su alta precisión y capacidad de mapeo tridimensional, la tecnología del dron de inspección presenta ciertas limitaciones que deben considerarse para garantizar la fiabilidad de los datos recopilados y la integridad del sistema, estas son: (*Flyability 2019*).

1. Impacto de colisiones en el mapeo: En los modos de vuelo las colisiones leves no generan alteraciones significativas en la reconstrucción del entorno, sin embargo, impactos fuertes pueden provocar errores en la generación del modelo 3D, manifestándose en la aparición de divergencias, estructuras duplicadas o incluso una completa desorientación del modelo digital.

2. Sensibilidad de la carga útil: A pesar de estar protegida por la jaula de seguridad del dron, la unidad es altamente sensible a golpes e impactos, una colisión violenta puede comprometer su funcionalidad, afectando la precisión de los datos capturados.

3.6.5 Restricciones en exteriores y condiciones ambientales adversas

Entornos sin características diferenciables: La capacidad de mapeo del dron se ve afectada en espacios abiertos sin puntos de referencia estructurales, lo que puede reducir la precisión en la localización del dron.

Influencia de la luz solar: La exposición directa a fuentes de luz ambiental intensa disminuye el alcance efectivo del sensor, reduciendo la calidad de la nube de puntos generada.

Efecto del viento en el rendimiento del dron: El rendimiento del sistema y la precisión en la generación de modelos 3D pueden verse afectados significativamente en entornos con alta concentración de partículas en suspensión, como nubes de polvo generadas en minas, túneles o instalaciones industriales. (*Flyability 2019*).

Generación de ruido en la nube de puntos Cuando el dron permanece demasiado tiempo dentro de una nube de polvo, el sistema puede registrar falsos puntos en la reconstrucción digital, lo que puede distorsionar la geometría del modelo 3D, esto ocurre porque el sensor detecta las

partículas en suspensión como si fueran superficies físicas, generando errores en la visualización.

Las restricciones regulatorias Como las certificaciones, las autoridades de aviación imponen regulaciones estrictas sobre el despliegue de vehículos aéreos no tripulados, particularmente en centros urbanos, aeropuertos y alrededor de zonas designadas de exclusión aérea. Dichas regulaciones regulan el alcance de las operaciones con drones, limitando su uso a áreas de beneficio potencial, estas reglas son necesarias para garantizar la seguridad y la privacidad, pero pueden obstaculizar la adopción generalizada de inspecciones aéreas. (*Flyability 2019*).

Se debe trabajar con los reguladores y promover un marco claro y coherente para crear condiciones favorables para ampliar las inspecciones con drones.

Demanda de datos Todos los datos generados por drones requieren un análisis experto para interpretarlos de manera efectiva y aunque los avances en los algoritmos de aprendizaje automático y el software de mapeo se están perfeccionando para analizar con mayor precisión grandes conjuntos de datos, convirtiendo información compleja en conocimientos prácticos, aun no se alcanza a operar con toda la información obtenida y en algunos casos se pasan por alto o se ignora información lo que conlleva a que no se aprovechen al máximo las grandes cantidades de datos extraídos mediante inspecciones aéreas. (*Energy Robotics.2020*).

Condicionantes tecnológicos: En particular la incapacidad de los vehículos aéreos no tripulados para detectar anomalías diminutas o intrincadas que un inspector humano competente podría identificar fácilmente, agravan los desafíos asociados con la eficacia operativa de las inspecciones de vehículos aéreos no tripulados, en este contexto, es necesario que la integración de la supervisión humana y los instrumentos tecnológicos logren un equilibrio óptimo, facilitando una interacción sinérgica entre las sofisticadas funcionalidades de los drones y el discernimiento del juicio humano. Estos avances continuos en las tecnologías de detección, incluidos, entre otros, el LiDAR y la termografía, ofrecen la promesa de una mejora gradual segura de limitaciones tecnológicas. (*Energy Robotics. 2020*).

4. Conclusiones

Se realizó una revisión bibliográfica sobre el uso de drones en la detección de corrosión, a partir de la cual se concluye que esta tecnología representa una evolución significativa en las prácticas de mantenimiento e inspección de infraestructuras. Gracias a su capacidad para mejorar la seguridad, reducir costos y proporcionar datos de alta calidad, los drones se consolidan como una herramienta clave en la gestión de activos a largo plazo, esto es posible gracias a sus sensores y cámaras avanzados, la integración de tecnologías emergentes como las cámaras termográficas y la posibilidad de realizar operaciones automatizadas.

Al evaluar las tecnologías disponibles en los drones para la detección de corrosión por hidrógeno se encontró que las inspecciones realizadas con drones se han convertido en una herramienta fundamental para las industrias que buscan soluciones modernas, eficientes y seguras en comparación con los métodos tradicionales de inspección como los ensayos no destructivos, pues estos dispositivos aéreos no solo están transformando las prácticas de mantenimiento, sino que las están innovando al ofrecer una combinación de recolección de datos visuales de alta calidad mediante tecnologías avanzadas de sensores y termografía, en donde la precisión y la seguridad son prioritarias con nuevos estándares en seguridad, rentabilidad y reducción del tiempo de inactividad operativo.

A pesar de los beneficios de las inspecciones con drones, existen limitaciones que restringen su potencial en la gestión y el mantenimiento de activos y aunque estimulan la búsqueda de soluciones innovadoras, deben considerarse cuidadosamente por las industrias que deseen adoptar esta tecnología; en primer lugar, las limitaciones regulatorias, dado que hay muchos lugares de interés para las inspecciones sujetos a restricciones de vuelo debido a la presencia de zonas críticas y por otro lado la susceptibilidad a el cambio climático limitando su operatividad, generando un desafío el desarrollar drones con una mayor resistencia a las condiciones climáticas adversas para que puedan operar de manera confiable incluso en entornos climáticos cambiantes.

5. Recomendaciones

A partir de los hallazgos de esta investigación, se recomienda considerar los avances significativos en las prácticas de inspección mediante la integración de drones de inspección, los cuales demuestran su capacidad para realizar operaciones más automatizadas, mejorando la eficacia en la recolección y análisis de datos, permitiendo una gestión de datos más eficiente en la toma de decisiones, incrementando continuamente la precisión y exactitud de los resultados, pues las tareas que previamente requerían mucho tiempo se llevarán a cabo de manera más rápida con drones capaces de explorar áreas de difícil acceso o extensas, garantizando inspecciones completas sin intervención humana, de este modo, el potencial para reducir costos, junto con una mayor cobertura y precisión en los datos, posiciona a los drones no solo como herramientas, sino como elementos fundamentales en las actividades de inspección en la industria.

Referencias Bibliográficas

Alessandro Campari, Federico Ustolin, Antonio Alvaro, Nicola Paltrinieri, (2023), “A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 90.

Atha y Jahanshahi, Cha et al, Hoskere et al., 2021. AMCD: an accurate deep learning-based metallic corrosion detector for MAV-based real-time visual inspection.

Bai, J., Wu, D., Shelley, T., Schubel, P., Twine, D., Russell, J., Zeng, X., & Zhang, J. (2024). A comprehensive survey on machine learning driven material defect detection: Challenges, solutions, and future prospects.

Betsy Kenaston - 29 abril, 2021, Ultrasonic Drone Inspections Take NDT Safety to New Heights. *e-Journal of Nondestructive Testing*.

Cab Cauich, C. A., Martín Medina, I. R., & Rivadeneyra Gutiérrez, G. (2019). Mecanismos de almacenamiento de hidrógeno en materiales nanoestructurados para aplicaciones en vehículos de transporte. *Ingeniería*

Dong, X., Taylor, C. J., & Cootes, T. F. (2021). Inspección automática de soldaduras aeroespaciales mediante aprendizaje profundo de características locales no supervisado. *Sistemas basados en el conocimiento*

Energy Robotics. (2024, June 4). Drone Inspections: A comprehensive guide. *Energy Robotics*. Retrieved April 5, 2025, from <https://www.energy-robotics.com/post/drone-inspections-a-comprehensive-guide>

En J. Dy & A. Krause (Eds.), *Proceedings of the 35th International Conference on Machine Learning*.

Fernández-Isla, C., Navarro, P. J., & Alcover, P. M. (2013). Automated visual inspection of ship hull surfaces using the wavelet transform. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013.

Flyability. (April 5, 2019). *Elios 3: Digitalizando lo inaccesible*. Flyability. Retrieved from

<https://www.flyability.com/es/elios-3>

Gu et al., 2018, Jayaraman et al., 2020. CorrDetector: A framework for structural corrosion detection from drone images using ensemble deep learning.

Hansson, C. M. (2011). The impact of corrosion on society. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42, 2952–2962.

Inspenet. (2025). Predicción Inteligente de Fallas por Corrosión mediante IA. <https://inspenet.com/articulo/prediccion-inteligente-fallas-por-corrosion/>

Jin, Q., & Chen, L. (2022). Un estudio sobre la detección de defectos superficiales en productos industriales basado en una pequeña cantidad de datos etiquetados.

Khan, M. E., et al. (2018). Fast and scalable Bayesian deep learning by weight-perturbation in Adam.

Liu, C., & Birks, N. (2010). "Hydrogen Embrittlement of Materials." *Corrosion Science*, 52(5), 1343-1353.

Na, W. S., & Baek, J. (2016). Impedance-based non-destructive testing method combined with unmanned aerial vehicle for structural health monitoring of civil infrastructures. *Applied Sciences*.

Nash, W., Zheng, L., & Birbilis, N. (2022). Deep learning corrosion detection with confidence. *npj Materials Degradation*, 6, Article 26. <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00232-6>.

Nguyen, T. T., et al. (2023). Un método para el monitoreo y evaluación automatizados del aflojamiento de pernos utilizando técnica de impedancia y aprendizaje profundo. *Desarrollar. Entorno Construido*.

Nykyforchyn, H. M., Student, O. Z., & Loniuk, B. P. (1994). Sensitivity of fatigue crack growth in a reactor steel to thermomechanical ageing in hydrogen environment. In *Fatigue under Thermal and Mechanical Loading: Mechanisms, Mechanics, and Modelling* (pp. 215–220).

Ochoa Restrepo, A. (2024, January 12). Impacto de la tecnología de drones en la seguridad: perspectivas y desafíos.

Prueter, P. (2021). Damage control: Wet H₂S damage detection. *Inspectioning Journal*, 27(5), 45-52.

Quiñonez, E. (March 3). Fragilización por hidrógeno: ¿Cómo debilita los materiales? Inspenet. from <https://inspenet.com/articulo/fragilizacion-por-hidrogeno-en-materiales/>

Rieke, M., Foerster, T., Geipel, J., & Prinz, T. (2012). High-precision positioning and real-time data processing of UAV-systems. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 119-124.

Sherwin, D. J. (1990). Inspect or Monitor? *Engineering Cost and Economic Analysis*, 18(No 3), 223-231.

Son, H., et al. (2014). Rapid and automated determination of rusted surface areas of a steel bridge for robotic maintenance systems. *Automation in Construction*.

Scully, J. R. (2010). "Hydrogen Embrittlement: Advances in Understanding." *Corrosion Reviews*, 28(3), 1-36.

Usamentiaga, R., Lema, D. G., Pedrayes, O. D., & García, D. F. (2022). Detección automatizada de defectos superficiales en metales: Una revisión comparativa de la detección de objetos y la segmentación semántica utilizando aprendizaje profundo. *Transacciones IEEE sobre aplicaciones industriales*, 58(3).

Wallace, R., Ong, P.-W., Bederson, B., & Schwartz, E. (1994). Space variant image processing. *International Journal of Computer Vision*, 13(1), 71–90.

Wu, X., et al. (1992). Use of neural networks in detection of structural damage. *Computers & Structures*.

Yang, J., Li, S., Wang, Z., Dong, H., Wang, J., & Tang, S. (2020). Uso del aprendizaje profundo para detectar defectos en la fabricación: Un estudio exhaustivo y desafíos actuales.

Materiales, 13(24), 5755.

Yuan, F., Swadzba, A., Philippsen, R., Engin, O., Hanheide, M., & Wachsmuth, S. (2009). Navegación basada en láser mejorada con datos de tiempo de vuelo 3D. *Informática Aplicada*, Universidad de Bielefeld.

Zavarce, A. (2023, June 9). La robótica en la inspección de la corrosión. Inspecnet. <https://inspenet.com/articulo/la-robotica-en-la-inspeccion-de-la-corrosion/>

Zeng, N., Wu, P., Wang, Z., Li, H., Liu, W., & Liu, X. (2022). Un enfoque de fusión de características multiescala orientado a la detección de objetos de tamaño pequeño con aplicación en la detección de defectos. *Transacciones IEEE sobre instrumentación y medición*.

Zhang, S.-y., Spiriyagin, M., Lin, Q., Ding, H.-h., Wu, Q., Guo, J., Liu, Q.-y., & Wang, W.-j. (2022). Estudio sobre el comportamiento del desgaste y la fatiga por contacto de rodadura de carriles defectuosos en diferentes condiciones de relación de deslizamiento y tensión de contacto. *Tribología Internacional*.

Zhao, Z., Hu, B., Feng, Y., Zhao, B., Yang, C., Hong, Z., & Tan, J. (2023). Detección de defectos en múltiples superficies para cojinetes de juntas universales mediante características multimodales y aprendizaje por transferencia profunda. *Revista Internacional de Investigación en Producción*.

Zhijun Li (2024 April) "Optimized deep learning for steel bridge bolt corrosion detection and classification *Journal of Constructional Steel Research*." □

Apéndices

Apéndice A Especificaciones de la Dron

ESPECIFICACIONES DEL DRON	
Configuración	Cuadricóptero con ventilador Canalizado
Interfaz de Datos	Puerto USB-C usando inspector (Requiere que el dron sea encendido por su bateador)
Dimensiones	18.9" Ancho 13.8" Altura
Sensores de Control de Vuelo	IMU, magnetómetro, barómetro, lidar, 3 cámaras de visión artificial y sensor de distancia ToF
Modos de Vuelo	Asistencia: modo estabilizado ATTI- Modo Altitud Sport- Modo Sport
Tiempo de Vuelo (E3 Base)	>12min 30sg
Tiempo de Vuelo (E3 Base+Lidar)	>9min
Protección de Ingreso	Plataforma base + carga útil de inspección básicas y diseño resistente, equivalente a IP44 Carga Útil Lidar: IP68
Materiales	Fibra de carbono: compuestos de kevlar, aleación de magnesio, aluminio de grado aeronáutico, termoplástico de alta calidad.
Tipo de Motor	4 motores eléctricos sin escobillas de marcha atrás rápida
Nivel de Ruido	83dB(A) con Lidar
Computadora Abordo	Nvidia Xavier NX ordenador de a bordo con sistema operativo linux personalizado
Temperatura de Funcionamiento	32° F a 122° F (0° C a 50°C)
Vida útil de la Hélice	10 horas
Hélices	4 hélices, 5 pulgadas
Carga Útil LIDAR	
Sensor LIDAR	Sensor Ouster OSO-32

Fuente: *Flyability. (April 5, 2019).*

Apéndice B Especificaciones del Sistema de cámaras

SISTEMA DE CÁMARAS	
Modos de Control	Modo automático con compensación EV manual
Almacenamiento de Archivos	Memoria MicroSD (a bordo del avión) Capacidad Máxima: 128GB
Distancia de Muestra de Tierras	Mínimo 0.18mm/pix a 30cm
Lente	2.71 mm distancia focal fija
Película FOV	114° horizontal, 131° diagonal
Formatos de Foto	JPG
Foto FOV	119° horizontal, 149° diagonal
Resolución de Grabación de Fotos	4000 x 3000, hasta 40 imágenes durante el vuelo
Sensor	½.3" CMOS Píxeles efectivos: 12.3M Sensibilidad: Optimizado para un rendimiento con poca luz
Sistema de archivos compatible	FAT32 para tarjetas de hasta 32 GB, exFAT para tarjetas de más de 32GB Tamaño de tarjeta de hasta 128 GB
Campo de visión vertical total	Aproximadamente 244° Incluyendo la inclinación de la cámara Incluyendo 180° sin obstrucciones
Formatos de Video	MOV
Resolución de grabación de video	4K Ultra HD:3840 x 2160 a 30 fps FHD: 1920 x 1080 a 30 fps
Resolución de Transmisión de video	FHD: 1920 x 1080 a 30 fps
Cámara Térmica	
Lente	FOV 56° x 42°, Profundidad de campo 15 cm hasta el infinito
Sensibilidad (NEdT)	<50 mK
Sensor	Lepton 3.5 FLIR
Resolución de Grabación de Video	160 x 120 a 9 fps
Longitud de onda (LWIR)	8-14 μm

Fuente: *Flyability. (April 5, 2019).*

Apéndice C Especificaciones del Sistema de Iluminación

SISTEMA DE ILUMINACIÓN	
Control	Desde el control remoto, el haz de a luz adaptable se controla mediante el paso de la cámara
Modos	Modo Normal (<i>4x panels usados</i>) Iluminación a prueba de polvo (<i>2x paneles exteriores usados solamente</i>) Iluminación selectiva/oblicua (<i>Solo lado izquierdo o derecho</i>)
Tipos	N/A

Fuente: *Flyability. (April 5, 2019).*

Apéndice D Especificaciones del Control Remoto

CONTROL REMOTO	
Batería	6700 Mah 15
Voltaje del cargador de batería y amp; Entrada de alimentación	12V/24W
Rango de temperatura de carga de la batería	10°C a 35°C
Tiempo de Vida de la Batería	300 ciclos
Controles	Ajuste de control y carga útil de la aeronave
Temperatura de funcionamiento	-10°C a 45°C
Opciones	Control Remoto Opcional (Operador de cámara) con recepción de transmisión de video en pantalla secundaria y control dual de la configuración de la cámara
Puerto de Salida	USB-c
Peso	1760g con soporte para tableta
Transmisión del control remoto	
Designación de emisiones	Enlace descendente: máx 18Mbps <ul style="list-style-type: none"> • Video: 1080@30fps • Datos FMU • Enlace ascendente: máx 3Mbps • Comandos RC
Banda de Frecuencia Tx	2.4 GHz \leq 20 dBm
Cifrado de Enlace de Radio	128 bit aes-ctr según la especificación LTE
Tableta	
Cargador/ Batería	Tragador rápido USB 5V/15W
Temperatura de Carga	0° C a 40° C
Tiempo de Carga	3h (Con cargador rápido proporcionado con la tableta) 5h (Con cargador normal proporcionado por Samsung)
Modelo	Tableta Samsung Galaxy S7 o S8
Temperatura de Funcionamiento	-10° C a 50°C
Peso	500 g


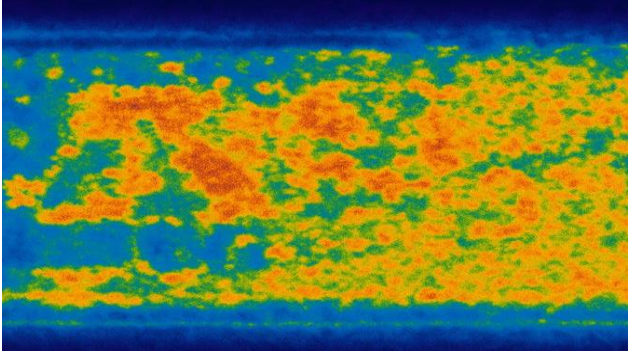

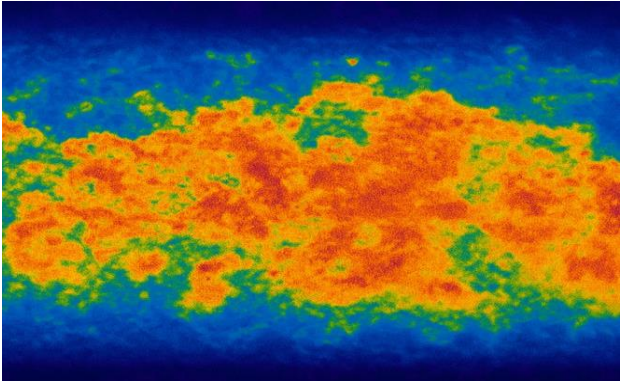
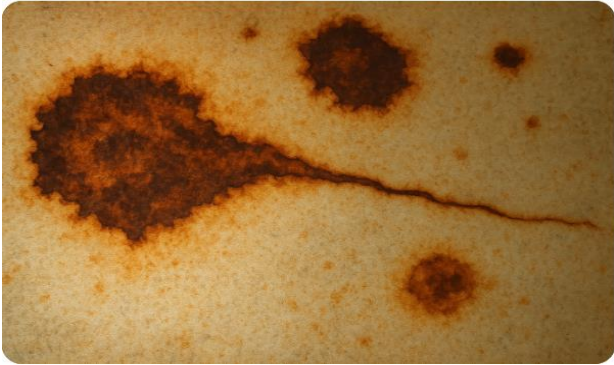
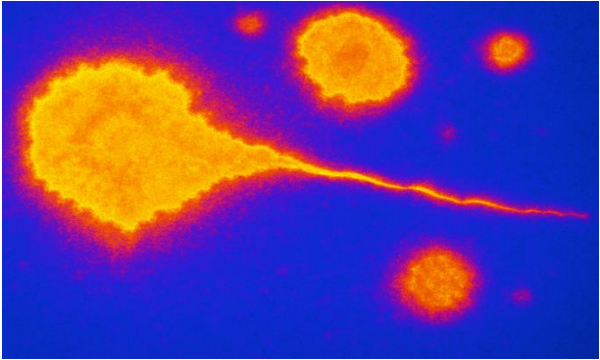

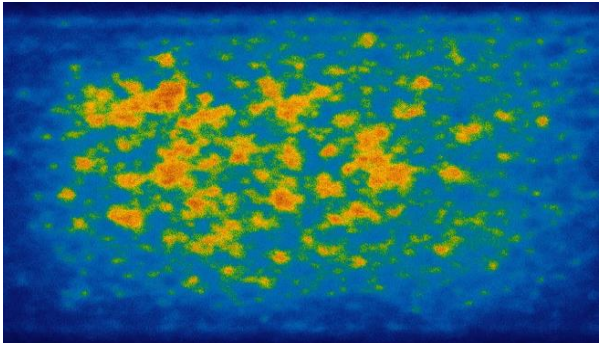
Fuente: *Flyability. (April 5, 2019).*

Apéndice E Especificaciones de la Batería Inteligente

BATERÍA INTELIGENTE	
Tiempo de cambio de batería	<10sg mediante mecanismo de batería plug and play
Tiempo de vida de la batería	50 vuelos
	<p>LiPo 65 HV Batería Inteligente:</p> <ul style="list-style-type: none"> • LED, botón e interfaz de usuario para la supervisión del SOC, etc • Mayor seguridad durante el ciclo de carga (protección para: sobrecarga, sobre corriente, sobretensión.) • Estimación precisa del estado de salud y del estado de cambio • Enchufar & Plug and play • Auto equilibrio • Autodescarga de almacenamiento • Contador de ciclos • Batería ID
Cargador	<p>Carga de batería inteligente plug and play</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entrada de potencia reactiva de 150VA • Entrada de voltaje de CA de 100-240 Vt • 1.5A AC entrada de corriente máxima
Temperatura de carga	32° F – 113°F (0°C - 45°C)
Tiempo de carga	1 hr
Cumplimiento	Homologado para equipaje de mano Cumple con la regulación de mercancías peligrosas de la IATA
Energía	99.2 Wh
Peso Neto	620 g; 1.4 lbs
Voltaje Nominal	22.8 V
Temperatura de funcionamiento	50°F – 104°F (10°C - 40°C)
Capacidad nominal	1350 mAh
Alarma de seguridad	Advertencia audible cuando el voltaje de la batería es bajo

Fuente: *Flyability. (April 5, 2019).*

Apéndice F Imágenes Visuales y Térmicas de la Corrosión por Hidrógeno

IMÁGENES VISUALES	IMÁGENES TÉRMICAS
	
	
	
	

Fuente: Flyability. (April 5, 2019).