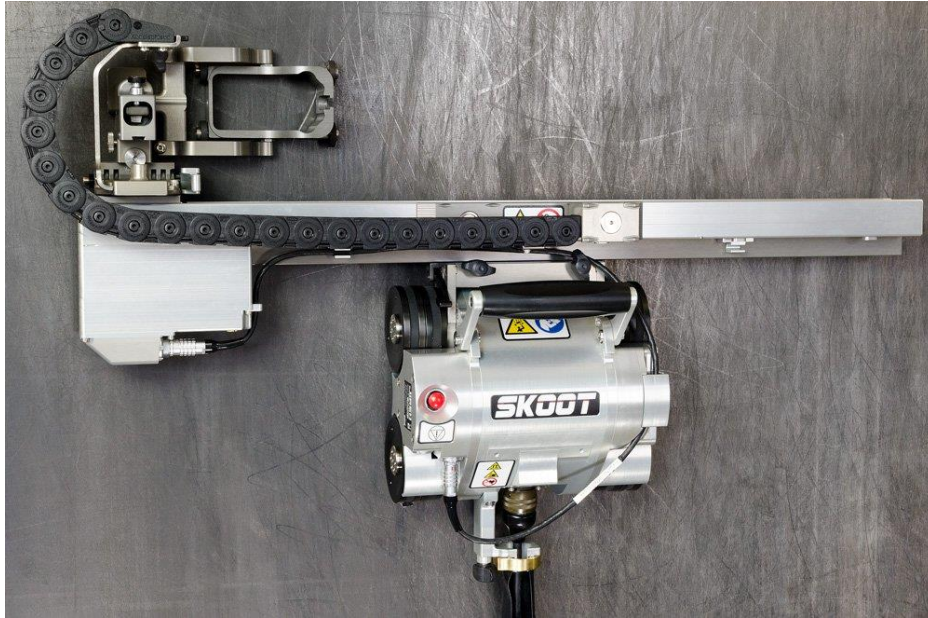


**SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN INTERNA Y EXTERNA DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS, APLICANDO METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN VISUAL Y ULTRASONIDO TIPO SCAN C**



**JAVIER ANDRES JARA ALONSO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
TUNJA, BOYACA  
2022**

**SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN INTERNA Y EXTERNA DE  
TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS, APLICANDO  
METODOLOGÍA DE INSPECCIÓN VISUAL Y ULTRASONIDO TIPO SCAN C**

**JAVIER ANDRES JARA ALONSO**

**Propuesta modalidad monografía, como requisito para optar al título de  
especialización en Gestión de Integridad y Corrosión**

**Director:**

**Ing. JOSE ANIBAL SERNA**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**

**TUNJA, BOYACA**

**2022**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

**FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**FIRMA DEL JURADO**

---

**FIRMA DEL JURADO**

## **DEDICATORIA**

Las palabras y esfuerzos de mis padres, esposa e hijas son el orgullo y la capacidad que me han dado la fortaleza para cumplir mis más grandes metas en mi vida profesional, así que este proyecto de monografía está dedicado a ellos, por sus buenas acciones y paciencia, al escuchar mis ideas, trabajos y metas propuestas.

A los maestros de la especialización de integridad y corrosión, por sus grandes experiencias y las mejores metodologías de enseñanza, su labor es de grandeza y de sabios.

Muchas Gracias.

## CONTENIDO

	Pag.
INDICE DE ILUSTRACIONES .....	7
RESUMEN .....	9
INTRODUCCION .....	10
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA .....	11
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA .....	11
2. JUSTIFICACION .....	12
3. OBJETIVOS .....	13
3.1 GENERAL .....	13
3.2 ESPECIFICOS .....	13
4. ALCANCES Y LIMITACIONES .....	14
5. MARCO TEORICO .....	15
5.1 FACTORES EN EL PROCESO DE IMPLANTACION DE ROBOTS .....	15
5.2 SISTEMAS REFERENCIADOS PARA LA INSPECCION DE TANQUES .....	18
5.2.1 nautilUS: la respuesta de bajo coste a la inspección de tanques de Oil & Gas .....	18
5.2.2 HUNTER – Advanced Magnetic Adhesion Inspection Crawler .....	19
5.2.3 NEPTUNE – Advanced Magnetic Adhesion Marinised Crawler .....	19
5.2.4 VortexScanner – Advanced Vacuum Adhesion Inspection Crawler .....	20
5.2.5 DT640 oruga magnética .....	20
5.2.6 TSR Wind Tratamiento superficial robotizado .....	21
5.2.7 JIREH NAVIC – escáner para mapeo de corrosión .....	21
6. SISTEMAS DE MAPEO DE CORROSIÓN POR ULTRASONIDO, CARACTERIZACIÓN POR SCAN C .....	22
6.1 ULTRASONIDOS CONVENCIONAL .....	22
6.2 ULTRASONIDOS PHASED ARRAY .....	23
6.3 ULTRASONIDOS SISTEMA TOFD .....	24
6.4 ULTRASONIDOS SEMI-AUTOMÁTICOS .....	25
6.5 ULTRASONIDOS AUTOMÁTICOS .....	26

6.6 ULTRASONIDOS TFM-FMC.....	26
<b>7. CARACTERIZACION E IMPORTANCIA DE LA CORROSIVIDAD EN MATERIALES FERROSOS.....</b>	<b>28</b>
<b>7.1 FORMAS DE CORROSIÓN .....</b>	<b>28</b>
7.1.1 Corrosión galvánica y uniforme .....	29
7.1.2 Corrosión por erosión .....	29
7.1.3 Corrosión por agrietamiento.....	30
7.1.4 Corrosión por picadura .....	30
7.1.5 Corrosión por exfoliación y disolución selectiva .....	30
7.1.6 Corrosión intergranular o intercrystalina .....	31
7.1.7 Corrosión de fractura por tensión.....	31
<b>8. METODOLOGIA PROPUESTA, DESARROLLO DEL ARTE .....</b>	<b>33</b>
<b>8.1 SELECCIÓN DE MATERIALES Y PARTES .....</b>	<b>36</b>
8.1.1 Uso de materiales para Tornillo Sin fin, Estructura, Escáner o Vehículo de desplazamiento.....	37
8.1.2 Uso de materiales para guías de desplazamiento y láminas de cobertura. ....	37
8.1.3 Uso de materiales para ruedas de desplazamiento y anclaje a superficies ferrosas.....	37
<b>8.2 CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE PIEZAS PARA ENSAMBLE.....</b>	<b>38</b>
8.2.1 Rodamientos .....	38
8.2.2 Ruedas Magnéticas .....	40
8.2.3 Motores de Avance .....	40
8.2.4 Motor de avance de Tornillo Sin Fin. ....	44
<b>8.2 SELECCIÓN DE EQUIPO DE ULTRASONIDO Y PALPADOR.....</b>	<b>47</b>
<b>8.3 SELECCION DE SISTEMA DE VISUAL, CAMARA DE ULTRA ALTA DEFINICON .....</b>	<b>49</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>51</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>52</b>

## INDICE DE ILUSTRACIONES

	Pag
<b>Ilustración 1.</b> Robot inspector Nautilus .....	18
<b>Ilustración 2.</b> Hunter Crawler de inspección .....	19
<b>Ilustración 3.</b> Neptune, Crawlwe de inspección .....	19
<b>Ilustración 4.</b> VortexScanner, Crawler de inspección .....	20
<b>Ilustración 5.</b> Caterpillar DT640 Oruga .....	20
<b>Ilustración 6.</b> Robot inspector de palas.....	21
<b>Ilustración 7.</b> Jireh Navic Inspector autónomo de mapeo de corrosión. ....	21
<b>Ilustración 8.</b> Representación grafica de inspección por ultrasonido.....	22
<b>Ilustración 9.</b> Forma de onda con ultrasonido convencional.....	22
<b>Ilustración 10.</b> Vistas de inspección con palpador multielemento, Scan A, C.....	23
<b>Ilustración 11.</b> Forma gráfica de representación de Ondas de ultrasonido para inspección de soldaduras.....	23
<b>Ilustración 12.</b> Grafico de muestra de inspección TOFD, tiempo de difracción de vuelo.....	24
<b>Ilustración 13.</b> Sistema de inspección ROV tipo Crawler aplicado a tuberías.....	25
<b>Ilustración 14.</b> Vista de Scan C para identificar anomalías, secciones con adelgazamiento y corrosión.....	26
<b>Ilustración 15.</b> Grafico de vistas de inspección basada en ultrasonido TFM-FMC .....	27
<b>Ilustración 16.</b> Diagrama Identificación y clasificación de formas de corrosión ...	29
<b>Ilustración 17,</b> Corrosión en materiales y aleaciones .....	32
<b>Ilustración 18.</b> Sistema robotizado para inspección de tanques propuesto _ INSPECRBOTRK.....	33
<b>Ilustración 19.</b> Sistema robotizado para inspección de tanques propuesto, cotas indicadas en vista lateral _ INSPECRBOTRK.....	34
<b>Ilustración 20.</b> Gráfico ilustrativo para seleccionar tipos de rodamientos. ....	38
<b>Ilustración 21.</b> Sistema equivalente para movimiento de tornillo sin fin y carro móvil .....	45

<b>Ilustración 22.</b> Muestra de sonda dual linear array para equipos de mapeo de corrosión automatizados .....	47
<b>Ilustración 23.</b> Muestra de equipo Olympus OmniScan SX .....	48
<b>Ilustración 24.</b> Muestra de cámara GoPro de alta definición .....	49

## INDICE DE TABLAS

	Pag
<b>Tabla 1.</b> Listado de partes diseñadas para posterior ensamble de sistema robotizado ROV tipo Crawler.....	34
<b>Tabla 2.</b> Características para la selección de rodamientos de bolas de una sola hilera sellados. ....	39
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones para selección de diámetro de rueda vs fuerza de atracción.....	40
<b>Tabla 4.</b> Dimensiones estándar de una cuerda tipo ACME .....	44



## RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito implementar los lineamientos para desarrollar un sistema robotizado manual y autónomo capaz de realizar inspecciones visuales y muestras se secciones específicas, donde, se puedan caracterizar áreas que puedan presentar corrosión interna, aplicando la tecnología Scan C, estas áreas se clasifican de difícil acceso, como lo puede ser, laminas superiores alrededor de los tanques, techos y otras secciones de la estructura, donde, el sistema robotizado puede inspeccionar y realizar un escaneo continuo de una manera más precisa y rápida en diferentes secciones del activo.

El sistema robotizado planteado es un equipo Mecatrónico que posee 2 ruedas de tracción independiente y 2 ruedas de estabilización, cámara de ultra alta definición, más un sistema tipo riel, acoplado a un tornillo sin fin y un carro móvil, el cual, a su vez sujetara una poma de limpieza y el palpador de ultrasonido.

Adicionalmente el impacto que tiene esta tecnología, en cuanto a la seguridad, está basada en prevenir el riesgo de accidentes fatales, debido al trabajo en las alturas del personal asignado a la inspección de grandes tanques de almacenamiento, estar expuesto a gases tóxicos generados por los hidrocarburos, desgaste prematuro de las articulaciones de las extremidades del personal de inspección por las continuas repeticiones que requiere el escaneo.

Finalmente, el equipo robotizado, continuara contribuyendo a reducir los desastres ambientales, al prevenir posibles fugas de sustancias peligrosas que contienen los tanques de almacenamiento, como son hidrocarburos, ácidos, entre otras.

## INTRODUCCION

La industria petrolera se caracteriza principalmente por operar con grandes cantidades de líquidos peligrosos, de ahí la importancia que se plantea con respecto al almacenamiento de estos productos como paso previo o posterior a un proceso de producción.

Normalmente el almacenamiento de estos líquidos peligrosos se realiza en los denominados tanques de almacenamiento, los cuales, son activos de sumo valor en la explotación de servicios de hidrocarburos, ya que, estos permiten tener un pulmón entre producción y transporte, en tener una referencia en la medición y despacho del producto, sedimentar el agua y borras del crudo antes de ser despachado por ductos y brindar una flexibilidad operativa.

Implementar medidas que permitan identificar a tiempo diferentes mecanismos de daño, asociados a la operación y mantenimiento de tanques de almacenamiento de hidrocarburos, se consolida como distintivo de gran relevancia para poder mantener estos activos en operación de manera segura sin generar ningún impacto social, económico y/o ambiental.

Dentro de las características a identificar y analizar, se inspeccionan diferentes ítems que conforman los tanques, dentro de los cuales están; accesorios instalados en los 360° (bridas, Manhole, medidores, etc.), estado de la fundación, anillo perimetral, dique, losas que conforman el dique, desagües, laminas, pintura, derrames y otras características indicadas y que recomienda el check list de la norma API STD 653 INSPECCION Y REPARACION DE TANQUES, apéndice C.

El desarrollo de este trabajo está basado en implementar los lineamientos para desarrollar un equipo portátil robotizado que identifique anomalías en secciones remotas, sin la necesidad de instalar andamios o unidades motorizadas de izaje, contar con personal calificado en alturas y sobre todo sin arriesgar la integridad de los trabajadores, tanto en una inspección interna como externa del tanque.

De esta manera el sistema robotizado estará en la capacidad de realizar una inspección visual interna como externa en tiempo real en las láminas que componen los tanques que sean de difícil acceso, adicional contar con un equipo palpador de alta resolución de 64 elementos, el cual, permitirá caracterizar zonas específicas, donde, el material pueda tener pérdida de metal y generar fallas de contención, igualmente, generar informes que permitirán calcular la velocidad de corrosión, y asegurar la integridad de estos activos.

## **1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Dentro de los requerimientos en el área de Integridad, Operación & Mantenimiento, se busca salvaguardar de manera integral todas las estructuras de almacenamiento de sustancias peligrosas, con el fin, de evitar paradas en la producción, daños al medio ambiente y personal que participa diariamente en actividades de inspección, mantenimiento y operación de estos medios de almacenamiento. Con este trabajo se buscará implementar los lineamientos para combinar un sistema portátil robotizado y el uso de ensayos no destructivos en áreas remotas o con condiciones especiales en su atmosfera, con el propósito, de evaluar la integridad del cuerpo, techo y fondo de los tanques.

### **1.1 DESCRIPCION DEL PROBLEMA**

Observamos que los materiales utilizados en la construcción de tanques generalmente tienden a degradarse por condiciones ambientales y por los líquidos almacenados, mostrando problemas de corrosión interna o externa, que si no se atienden de manera oportuna provocarían daños importantes. Es por tal motivo, que dentro de una inspección rutinaria se busca evaluar mejores técnicas de inspección, empleando tanto metodologías de ensayos no destructivos como la combinación de tecnologías de automatización que brinden una mayor robustez en la data obtenida, sea más seguro evaluar secciones remotas o de difícil acceso y que evite que los inspectores asuman un riesgo al acceder a un área con condiciones de altura y atmosferas peligrosas, adicionalmente, las condiciones para inspeccionar estos activos están sujetas a tener permisos especiales, programación de logística y recursos excesivos, alquiler de maquinaria especial, certificaciones del personal y maquinaria, aseguramientos de QHSE, entre otros.

### **1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA**

Esto muestra que tener un sistemas robotizado para inspeccionar áreas remotas en los tanques de almacenamiento, puede suplir o compensar las necesidades actuales de la industria en generar informes más puntuales, evitar riesgos al personal contratista, verificaciones con mayor rapidez, escaneo en tiempo real y con la capacidad de validar los registros con un subproceso adicional, todo siempre basado en mitigar el fenómeno de la corrosión, verificar la calidad de un recubrimiento, encontrar áreas que estén siendo afectadas por algún tipo de mecanismos corrosivo, hallar áreas en el metal que no cumplan con los espesores requeridos para continuar operativos, todos estos aspectos se pueden suplir con inspecciones que utilizan la combinación de tecnologías NDE (Scan C e inspección VT), y sistemas robotizados.

## 2. JUSTIFICACION

En el área de integridad, operación y mantenimiento, el propósito principal es mantener en operación la mayor cantidad de activos que componen un campo de explotación de hidrocarburos. Esta es una tarea que se mide con el plan de integridad de activos, medidos a través de indicadores de cumplimiento. Dentro de este plan uno de los ítems de gran relevancia es realizar periódicamente inspecciones a los tanques de almacenamiento, utilizando técnicas no intrusivas o comúnmente conocidas como ensayos no destructivos y basados en las sugerencias indicadas por la norma API STD 653 INSPECCION Y REPARACION DE TANQUES.

Por ejemplo, en la apertura, limpieza e inspección interna de un tanque, generalmente estos equipos se deben dejar abiertos a la atmosfera por un largo tiempo, con el fin de que todos los vapores tóxicos puedan ser liberados a la atmosfera y que no afecten la salud del personal que va a realizar la inspección interna y que para la mayoría de los casos se recomiendan a utilizar EPP especiales como máscaras full face o equipos de autocontención. Por lo tanto, es allí donde, utilizar equipos automatizados remotos de inspección hace que todas las consideraciones de seguridad anteriormente descritas no tengan un gran impacto en estos sistemas robotizados, ya que, al ser equipos intrínsecamente aislados, y que cumplen normas y estándares de construcción intrínsecamente seguros para espacios confinados, no se tiene el problema de dar espera al ingreso, ni de utilizar EPP especiales para estos equipos. Adicionalmente, no hay la necesidad de instalar andamios internos para llegar a áreas de gran altura y realizar de esta manera una inspección visual o de ultrasonido.

Esta investigación aporta lineamientos o parámetros para implementar un sistema robotizado que es capaz de llegar a áreas remotas en estructuras de almacenamiento de hidrocarburos y realizar una inspección de tipo visual e inspección con Scan C, lo que permitiría identificar y llevar una mayor trazabilidad de la integridad de las láminas que componen el cuerpo del tanque, evaluar componentes internos como ánodos de sacrificio, aberturas de manholes, e igualmente la base de fondo y del techo del activo.

El tener un equipo robotizado se justifica en tener un sistema de inspección más amplio en la identificación de anomalías relevantes, una manera más sencilla de llegar a secciones de difícil acceso y evaluar el estado mecánico del material, identificar fallas puntuales en el material, como áreas de bajos espesores, procesos de corrosión acelerado y otros mecanismos de corrosión que estén afectando la integridad del material, de igual forma se puede identificar de manera visual anomalías superficiales relevantes.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 GENERAL**

Establecer los lineamientos para implementar un sistema robotizado que pueda realizar inspecciones internas y externas de tanques de almacenamiento de hidrocarburos, utilizando metodologías de ensayos no destructivos como lo son de tipo visual y ultrasonido con Scan C, de tal manera que se pueda dar un seguimiento preventivo y correctivo frente al fenómeno de la corrosión y anomalías presentes en los recubrimientos.

#### **3.2 ESPECIFICOS**

- Analizar diversas alternativas tecnológicas, y con base a las consideraciones de los tanques a inspeccionar, implementar el sistema robotizado que más se ajuste a las necesidades.
- Especificar las principales características de diseño final, y materiales a ser implementados en la construcción del sistema robotizado.
- Establecer las especificaciones de diseño y las consideraciones generales que se deberían satisfacer para asegurar la estabilidad y funcionalidad del robot al desplazarse en paredes ferromagnéticas verticales.
- Automatizar las mediciones de espesores en los tanques por medio de sistema robotizado, buscando reducir el tiempo de inspección, asegurar las mediciones en las lecturas y eliminar el riesgo del inspector en las maniobras aéreas durante la medición convencional.

#### **4. ALCANCES Y LIMITACIONES**

El alcance de esta investigación es generar las bases para el diseño y control remoto y manual del sistema robotizado para la inspección de superficies ferrosas en tanques de almacenamiento tanto internos como externos con la aplicación de técnicas no destructivas como ultrasonido por Scan C e Inspección Visual.

Dentro de las características a resaltar se encuentran:

1. Generar diseños y caracterización de cada una de las partes que componen el sistema robotizado.
2. Generar diseño de la lógica de control, programación y electrónica a utilizar.
3. Realizar el sondeo de materiales de construcción.
4. Realizar una simulación del sistema robotizado identificando posibles inconvenientes para mejorar.

Una de las limitaciones que tiene esta herramienta es la no inspección cuando el tanque está en servicio, ya que para realizar estas valoraciones, las características del equipo a implementar cambian drásticamente.

## 5. MARCO TEORICO

Las instalaciones de almacenamiento de petróleo y carburantes requieren una infraestructura robusta y fiable, y las inspecciones periódicas son fundamentales para garantizar que los tanques están en condiciones de ser utilizados. Los métodos de inspección actuales suponen un trabajo peligroso, laborioso y costoso. Sin embargo, una respuesta a este problema es un sistema robotizado que puede controlar, inspeccionar e identificar diferentes indicaciones relevantes en las superficies de los tanques aplicando metodologías de ultrasonido e inspecciones visuales.

### 5.1 FACTORES EN EL PROCESO DE IMPLANTACION DE ROBOTS

Las ventajas que aporta la robótica, como medio de automatización de los procesos de producción e inspección, son múltiples y bien conocidas. Posiblemente las cuatro ventajas más importantes son las señaladas por el informe “Robótica y automatización” de la Fundación COTEC para la innovación tecnológica (2006): ***productividad, flexibilidad, calidad y seguridad laboral.***

Desde un punto de vista más técnico, en cuanto a procesos y productos finales, la robótica puede aportar estas ventajas:

- En los procesos se consigue la reducción de tiempos de ciclo, siendo en muchos casos la solución necesaria para romper cuellos de botella.
- Los procesos robotización, como medio de automatización, tienen un mayor nivel de autonomía, permitiendo un mayor control del proceso, y precisando menor mantenimiento.
- La robótica permite trabajar con mayor exactitud y precisión frente a otros métodos no automatizados, lo que permite obtener un producto de mayor fiabilidad y un aumento y respetabilidad en la calidad final.
- El uso de interfaces y técnicas de programación apropiadas permite una mayor rapidez de programación que reduce los tiempos necesarios para el cambio de tarea.

Por otro lado, la robótica mejora las condiciones laborables del trabajador:

- Se reducen los riesgos en el personal. En muchos casos las tareas más peligrosas son las primeras en robotizarse.

- También se reducen y evitan problemas ergonómicos, así como la realización de tareas repetitivas o desagradables.
- En el entorno de trabajo se obtiene una mayor higiene y limpieza en la planta.
- Por otro lado, para el operario, el robot industrial es una herramienta de fácil comprensión en cuanto a su puesta en marcha y supervisión.
- Permite aumentar el volumen de producción gracias a la reducción de tiempos y rechazos.
- Posibilita la reducción de costes de personal y maquinaria.
- Se evitan paradas por distintas posibles causas (descansos, turnos, huelgas, etc....) permitiendo una producción continua.
- En conjunto, aumenta la productividad, la rentabilidad y el beneficio económico de la compañía.

Es importante tener algunos factores que deben analizarse a la hora de plantearse la robotización de algún proceso. Esta lista de factores surge principalmente a partir de la identificación de barreras y problemas que la industria ha encontrado en los últimos años. Podemos agrupar estos factores en cuatro grupos principales:

- Factores económicos: inversión, rentabilidad, incertidumbre en los resultados.

Uno de los principales factores a estudiar a la hora de plantearse la robotización de algún proceso es el coste de la inversión necesaria, el valor real de una implantación depende principalmente de la aplicación de que se trate, de su complejidad y elementos necesarios.

Para analizar la rentabilidad, se propone el siguiente método para la estimación del número de meses de retorno de la inversión realizada para una instalación robótica:

$$N^{\circ} \text{ meses retorno inversión} = \frac{\text{Inversión Inicial}}{\text{Ahorros Anuales}}$$

Donde:

*Inversión Inicial* = Costes de los robots + Herramientas + Equipos auxiliares + Dispositivos - Coste de los equipos y/o herramientas que se liberan con la robotización



*Ahorros Anuales* = Coste anual por ahorro de los gastos salariales - Costes de programación y mantenimiento de los robots + Costes de recolocación del personal excedente (formación o jubilación) + Costes asociados a los impuestos

Otro factor importante es la ***incertidumbre en los resultados***. Es importante en la búsqueda de proveedores y presupuestos, exigir referencias y visitar instalaciones ya operativas de la misma aplicación que deseamos implantar. Puede resultar más atractiva (y tranquilizadora) la oferta de un proveedor con amplia experiencia en un tipo concreto de aplicación, aunque su precio sea mayor que otras ofertas de proveedores que aún no se hayan planteado dicha aplicación.

En el caso de aplicaciones nuevas o complejas sin referencias, puede ser interesante buscar el apoyo y asesoramiento de centros de investigación (Centros tecnológicos o Universidad, por ejemplo) que pueden realizar estudios previos de viabilidad y buscar soluciones tecnológicas.

Finalmente, es importante conocer las ayudas regionales y nacionales existentes que pueden apoyar parte de esta inversión, sobre todo en el caso de aplicaciones que precisan acciones de investigación y desarrollo. En este sentido los centros de investigación pueden asesorar a las empresas en la búsqueda y solicitud de estas ayudas.

- Factores técnicos en la implantación: tolerancias, seguridad, espacio, control.

Los requisitos de seguridad aumentan dado el espacio de trabajo, atmosferas y/o espacios confinados que pueden alcanzar los robots. Esto puede conllevar también problemas de espacio para la colocación de los robots y necesitar soluciones como el desplazamiento de elementos o la colocación de los robots suspendidos o sobre paredes.

- Factores técnicos tras la implantación: programación, utillaje y mantenimiento.

Se deben utilizar metodologías de programación que permitan crear programas con parámetros variables, de modo que el cambio de referencia implique el cambio automático de valores en variables del programa para que el mismo programa sea válido para las nuevas referencias.

- Gestión del conocimiento: formación y comunicación de la información

Se deben crear procedimientos documentados de cómo realizar las distintas tareas de mantenimiento, cambio de herramienta, etc. Se debería documentar la estrategia

o metodología de programación, de modo que los programas tengan una estructura semejante. Deben comentarse correctamente los programas para facilitar su comprensión, modificación y reutilización incluso por personal con conocimientos básicos. Los cursos de formación interna representan otra forma de almacenar toda esta información y permitir su traspaso rápidamente. Todas estas opciones implican un coste de tiempo de dedicación que debería tenerse en cuenta durante el proceso de implantación de robots.

## 5.2 SISTEMAS REFERENCIADOS PARA LA INSPECCION DE TANQUES

En gran medida estos campos de inspección y automatización, han mostrado ser un rubro fuerte para la industria de Oil & Gas, esto a su vez representa un desarrollo de equipos con mayores grados de autonomía, precisión, durabilidad y características más especializadas en la implementación de la industria.

A continuación, se muestra algunos sistemas, presentes y con propuestas muy interesantes que buscan facilitar la adquisición e interpretación de datos de manera más intuitiva, valoración puntual de anomalías, obtener registros de bases de históricos y sobre todo prevención de accidentes ambientales, humano y daños a activos. Todas estas ventajas anteriormente mencionadas, tiene como propósito final, tener una mayor productividad, una producción sostenible y limpia, seguridad en los procesos y estándares de calidad tanto de los activos como del personal involucrado.

### 5.2.1 nautilus: la respuesta de bajo coste a la inspección de tanques de Oil & Gas

**NAUTILUS:** Plataforma robótica de inspección, desarrollada para los ensayos no destructivos (NDT) en los tanques de almacenamiento utilizados en la industria petroquímica.

**Ilustración 1.** Robot inspector Nautilus



Fuente: <https://www.rs-online.com/designspark/project-nautilus-revolutionising-petrochemical-oil-tank-inspections>

El robot utiliza controles remotos activos en tiempo real para moverse

alrededor de un tanque y una sonda de ultrasonido para realizar mediciones del adelgazamiento del piso y registra datos sobre la ubicación para el procesamiento posterior.

El diseño tiene como objetivo obtener la huella más pequeña posible para permitir la entrada a través de las bocas de acceso más pequeñas de los tanques de almacenamiento de líquidos. Para que el robot realice una inspección en un entorno explosivo e inflamable, la operación del robot debe evitar las chispas que pueden crear una explosión en el tanque debido al calor y la presencia de vapor.

## 5.2.2 HUNTER – Advanced Magnetic Adhesion Inspection Crawler

Ilustración 2. Hunter Crawler de inspección

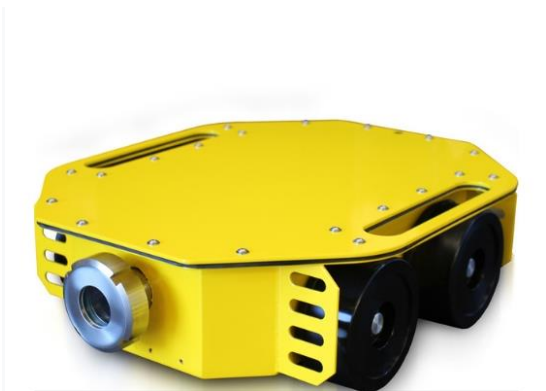


Fuente. <https://robotics.innotecuk.com/hunter-advanced-magnetic-adhesion-inspection-crawler/>

**HUNTER:** es un rastreador de acceso remoto modular diseñado para imágenes ultrasónicas NDT rentables de estructuras ferromagnéticas como tanques de almacenamiento, recipientes a presión, tuberías de gran diámetro y cascos de barcos sin necesidad de acceso por cuerda; eliminando así los riesgos potenciales asociados con las inspecciones manuales específicamente en terrenos peligrosos o de difícil acceso.

## 5.2.3 NEPTUNE – Advanced Magnetic Adhesion Marinised Crawler

Ilustración 3. Neptune, Crawlwe de inspección



Fuente. <https://robotics.innotecuk.com/neptune-advanced-magnetic-adhesion-marinated-crawler/>

**NEPTUNE:** es un rastreador magnético resistente y avanzado diseñado para obtener imágenes rentables de escaneo A, B, C y Sector en estructuras ferromagnéticas bajo el agua, como recipientes a presión e instalaciones en alta mar (cascos de barcos, patas / chaquetas de plataformas en alta mar, etc.) sin la necesidad de costosos buzos o ROV bajo el agua.

Su diseño modular y su versatilidad le permiten configurarse rápidamente según los requisitos del cliente, lo que permite una capacidad de inspección rápida desde una ubicación segura y remota.

## 5.2.4 VortexScanner – Advanced Vacuum Adhesion Inspection Crawler

**Ilustración 4.** VortexScanner, Crawler de inspección



Fuente. <https://robotics.innotecuk.com/vortexscanner-advanced-vacuum-adhesion-inspection-crawler/>

**VORTEXSCANNER:** es un rastreador de adhesión de vacío de peso ligero, diseñado para la inspección rentable de NDT de varias superficies no magnéticas grandes en entornos peligrosos y de difícil acceso con facilidad.

Su diseño compacto pero robusto lo hace perfecto para proporcionar una implementación rápida e inspección en el sitio, al tiempo que aumenta la seguridad; eliminando la exposición humana a entornos potencialmente peligrosos al permitir la inspección desde un lugar seguro y remoto.

## 5.2.5 DT640 oruga magnética

**Ilustración 5.** Caterpillar DT640 Oruga



Fuente. <https://www.deeptrekker.com/cl/products/utility-crawlers/dt640-mag-utility-crawler>

La **DT640** es una oruga de tres ruedas, con imanes en el interior del cubo de las ruedas y una cubierta de silicona y goma para tracción, y para evitar dañar la superficie sobre la que se está conduciendo. Los imanes permiten que el vehículo se “pegue” a

superficies ferrosas o de acero, conduciendo de forma vertical o incluso boca abajo en el acero.

La oruga está equipada con cámara orientada hacia adelante y reflectores LED, lo que permite ver en vivo lo que la oruga ve desde el controlador que está conectado mediante el cable, lo que la convierte en una herramienta de sondeo y estudio efectiva. La ventaja de estar adherida a la superficie es que puede mantenerse estable incluso en aguas con corrientes altas y desplegar una variedad de herramientas mientras opera, como el medidor de espesor, el cabezal de lavado a presión o el sonar de generación de imágenes.

## 5.2.6 TSR Wind Tratamiento superficial robotizado

**Ilustración 6.** Robot inspector de palas



Fuente. <https://tsrwind.com/eolos/>

**El robot EOLOS:** incorpora una cámara de alta resolución con la que lleva a cabo el servicio de inspección, obteniendo fotografías de gran calidad y máximo detalle que nos ofrecen el estado completo de la pala así como imágenes de detalle de los daños detectados.

El EOLOS 100 se adhiere a la superficie metálica de las torres mediante imanes permanentes de neodimio y es teleoperado por radiocontrol. Pesa alrededor de 25 kg, por lo que puede ser manejado con facilidad. Su extraordinaria capacidad para realizar tanto movimientos horizontales como verticales le proporcionan una total maniobrabilidad. Un especialista de TSR Wind lo controla desde el suelo monitorizando en tiempo real la altura e inclinación del mismo, así como las imágenes captadas por la cámara durante todo el proceso. EOLOS 100 puede trabajar con velocidades de viento de hasta 15 metros por segundo e incluso con rachas de viento mayores gracias a su gran capacidad de adherencia, por lo que tiene menor dependencia de las condiciones meteorológicas que el resto de sistemas de inspección.

## 5.2.7 JIREH NAVIC – escáner para mapeo de corrosión

**Ilustración 7.** Jireh Navic Inspector autónomo de mapeo de corrosión.



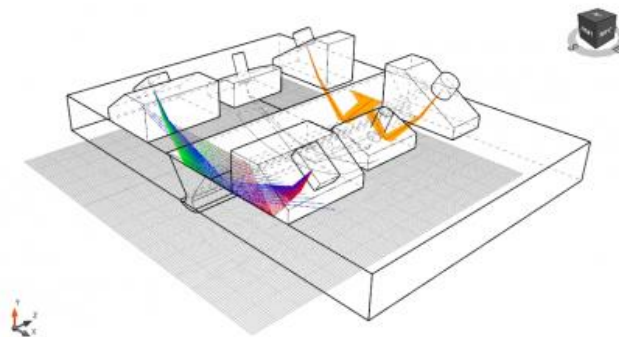
Fuente. NDT Scanners for Advanced Ultrasonic Testing | Eddyfi Technologies

**El NAVIC:** junto con el brazo de trazado motorizado, está diseñado para ayudar en la identificación de variaciones en el espesor del material debido a la corrosión. Permite programar rutas de escaneo específicas que usando el controlador remoto de mano. Realice scan C de precisión, scan lineal, HydroFORM

## 6. SISTEMAS DE MAPEO DE CORROSIÓN POR ULTRASONIDO, CARACTERIZACIÓN POR SCAN C

El ensayo por Ultrasonidos es un método no destructivo volumétrico, que puede ser aplicado en un amplio rango de espesores y geometrías complejas. El examen posee muchas ventajas en comparación a otros métodos, tales como; una rápida ejecución, resultados inmediatos, alta sensibilidad y resolución para detectar indicaciones. Los Ultrasonidos se basan en la generación de ondas elásticas en el material, las cuales, se propagan a través de él, con el objeto de detectar en su recorrido del sonido las indicaciones.

**Ilustración 8.** Representación gráfica de inspección por ultrasonido



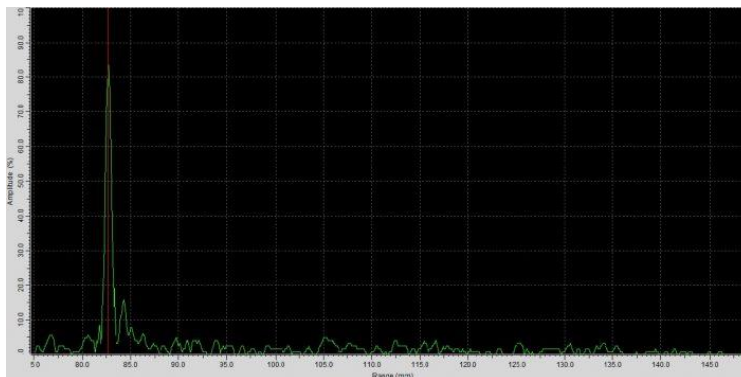
Fuente. <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>

### 6.1 ULTRASONIDOS CONVENCIONAL

El método tradicional o convencional de los Ultrasonidos dispone de un equipo y diferentes transductores con ángulos definidos para poder inspeccionar los componentes.

Es una técnica en la cual, el inspector realiza un escaneo manual (MUT, Manual Ultrasonic Testing) del componente a examinar realizando la interpretando in situ de los datos e indicaciones que se detectan.

**Ilustración 9.** Forma de onda con ultrasonido convencional



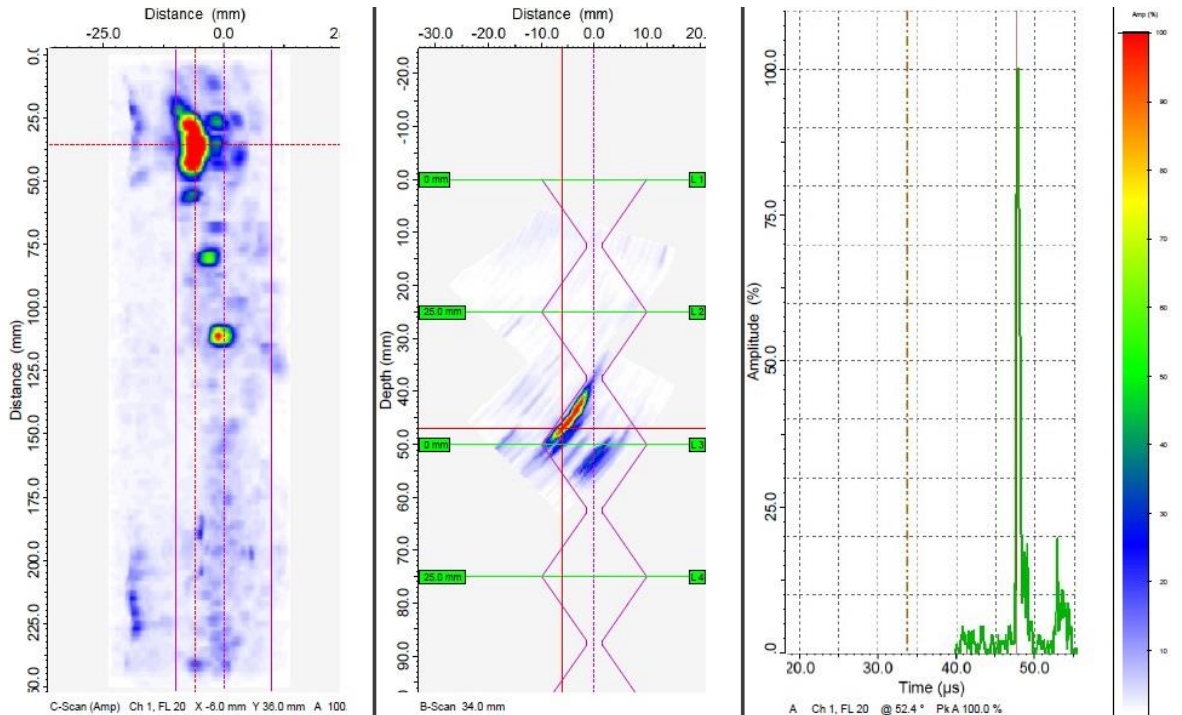
Fuente. <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>



## 6.2 ULTRASONIDOS PHASED ARRAY

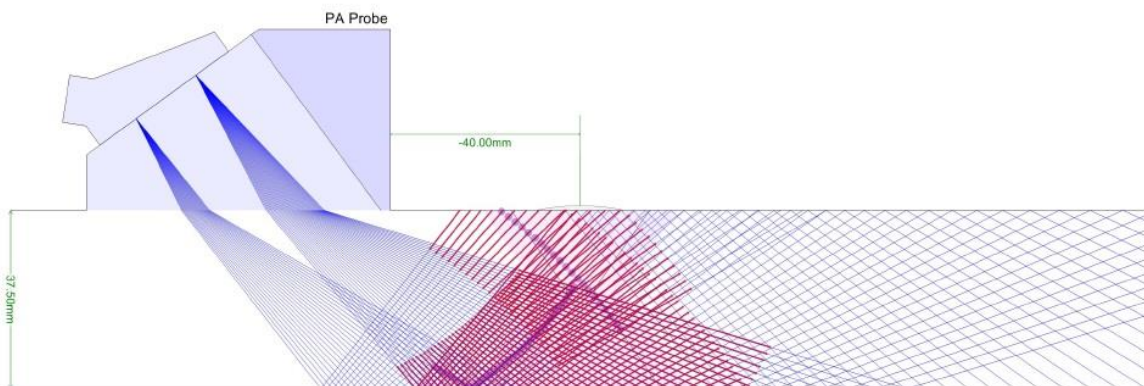
El término Phased Array quiere decir; Arreglo de Fases, y consiste en una extensión del ultrasonido convencional, pero que tiene la capacidad de controlar o modificar electrónicamente las características acústicas de un transductor, haciéndolo mucho más versátil, rápido y confiable en la detección de indicaciones.

**Ilustración 10.** Vistas de inspección con palpador multielemento, Scan A, C.



Fuente: <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>

**Ilustración 11.** Forma gráfica de representación de Ondas de ultrasonido para inspección de soldaduras



Fuente: <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>

El transductor al poseer múltiples cristales, permite focalizar en el área de interés que se requiere examinar, seleccionando los elementos y ángulos apropiados para una mayor detectabilidad.

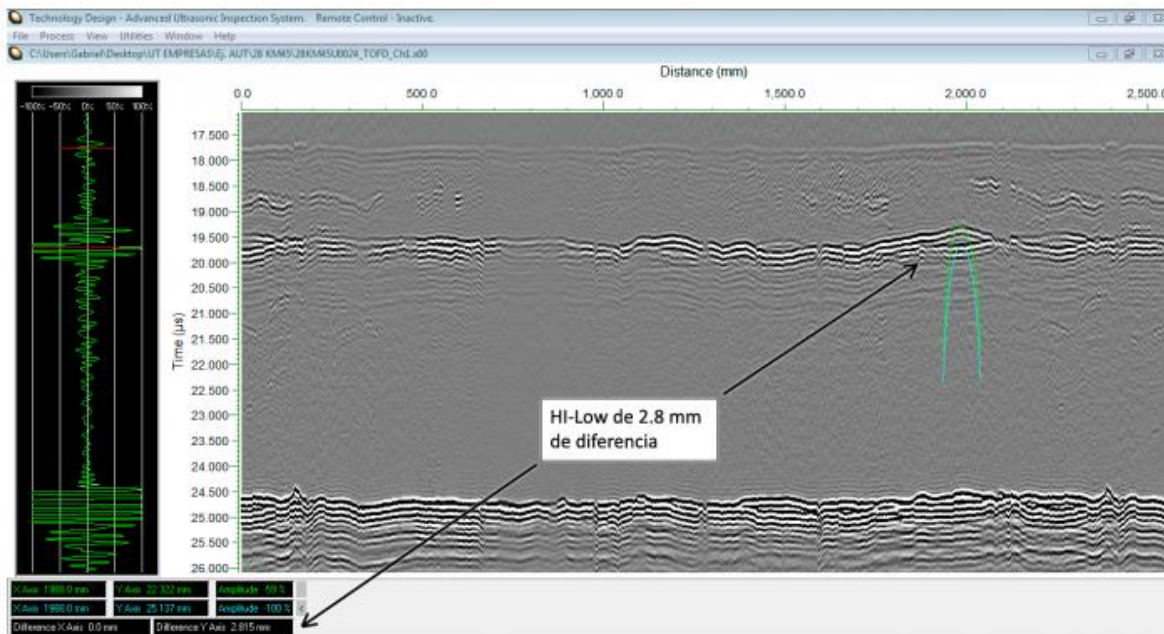
Esta técnica desarrollada en los años 90 ha tenido alto impacto en el mercado, ya que, los tiempos de retardo se reducen bastante en comparación a los ultrasonidos convencional.

### 6.3 ULTRASONIDOS SISTEMA TOFD

La técnica TOFD (Time of Flight Diffraction, Tiempo de Difracción de Vuelo) es una poderosa herramienta, que permite realizar un control eficiente y rápido a soldaduras de gran espesor, o con configuraciones de bisel muy complejas, donde en algunas ocasiones la técnica convencional Pulso Eco o Phased Array pueden tener problemas.

Existen diversos tipos de transductores en diámetros y frecuencias, y la selección de cada uno de ellos dependerá de muchos factores tales como: tipo de material, espesor a ensayar, geometría de la pieza, etc. Este sistema es muy eficiente para inspección de tuberías en HDPE debido a que la mayoría de las soldaduras son por termofusión, utilizando transductores de baja frecuencia y diámetros grandes.

**Ilustración 12.** Grafico de muestra de inspección TOFD, tiempo de difracción de vuelo.



Fuente. <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>



## 6.4 ULTRASONIDOS SEMI-AUTOMÁTICOS

Los Ultrasonidos Semi-Automáticos aportan en el mercado actual la mayor eficiencia y versatilidad en la industria. Este sistema puede funcionar combinando técnicas como Phased Array, TOFD o Pulso-Eco, en que los transductores son montadas en un sistema mecánico con un encoder, el cual, digitaliza con precisión desde 1mm toda la pieza examinada.

El sistema SAUT (Semi-Automated Ultrasonic Testing) presenta las siguientes ventajas:

- Resultados Inmediatos.
- No requiere de zonas de exclusión las cuales generan altas pérdidas económicas y atrasos en la producción.
- Alta probabilidad de detección de discontinuidades.
- No contamina con radiaciones ionizantes el medio ambiente.
- Permite registrar 100% el volumen de la zona de interés, reportándose al cliente en un archivo digital los resultados de cada punto examinado.
- Capaz de reemplazar a la radiografía en todas sus aplicaciones, de acuerdo a; Códigos, Especificaciones y Normas internacionales que lo avalan.

**Ilustración 13.** Sistema de inspección ROV tipo Crawler aplicado a tuberías.



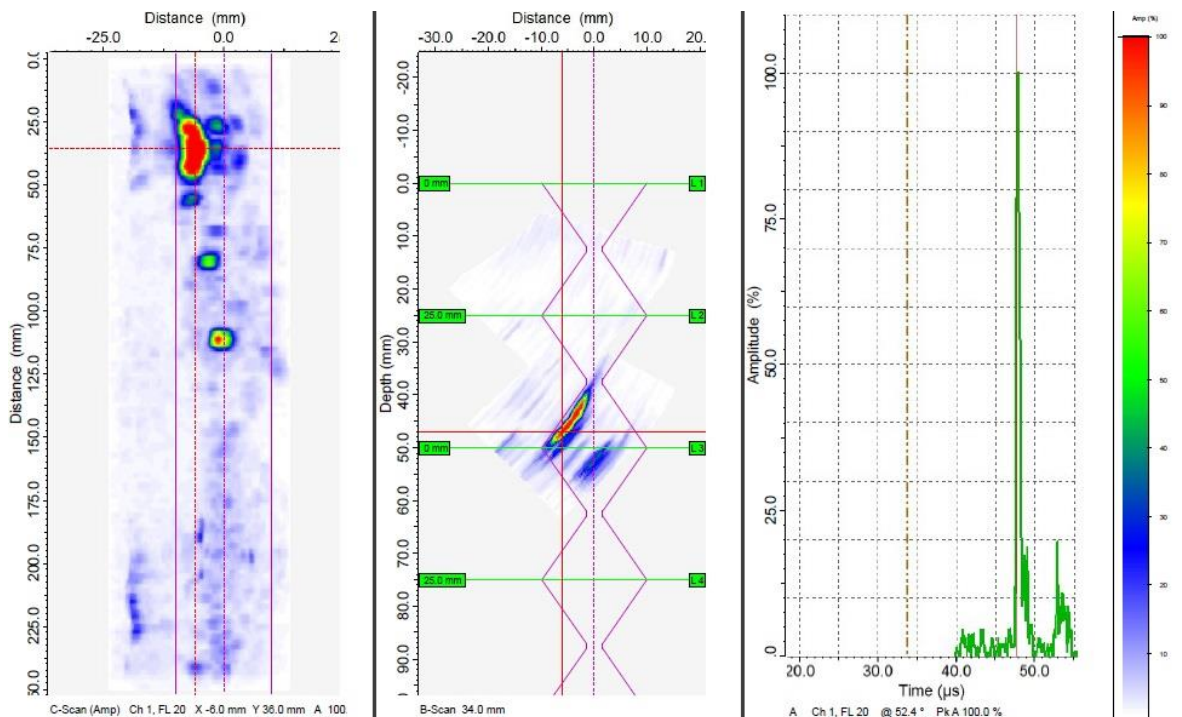
Fuente. <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>

## 6.5 ULTRASONIDOS AUTOMÁTICOS

Los Ultrasonidos Automáticos (AUT, **Automated Ultrasonic Testing**) consisten en primero dividir la soldadura en zonas y emplear para cada una de éstas un haz de ultrasonido incidente (Discriminación por Zonas). Para esto se emplean hoy en día, transductores Phased Array, TOFD y Pulso-Eco en conjunto, montados en un sistema mecánico que luego son accionados por un sistema robotizado de escaneo que se desliza a una distancia fija del eje de la soldadura de la cañería.

Su principal aplicación se encuentra en soldaduras de línea o pipelines. La visualización de los resultados se aprecia en un esquema denominado Strip Chart, en que la inspección junto con la interpretación puede llegar a resultados entre 5 – 10 minutos por unión.

**Ilustración 14.** Vista de Scan C para identificar anomalías, secciones con adelgazamiento y corrosión.



Fuente: <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>

## 6.6 ULTRASONIDOS TFM-FMC

La última generación de los Ultrasonidos se encuentra en la focalización dinámica en tiempo real basado en la técnica TFM – FMC (Total Focusing Method – Full Matrix Capture).

La medición de espesor por ultrasonidos es uno de los métodos relativamente más sencillos de aplicar, es una manera efectiva para el control de corrosión, erosión o

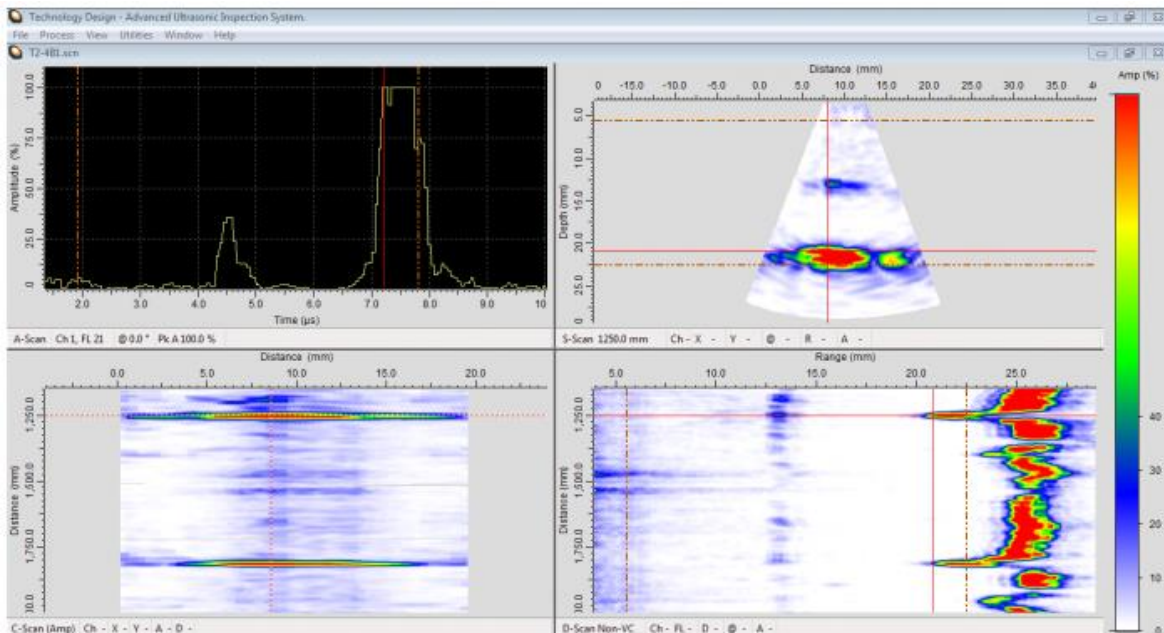
desgaste abrasivo de diferentes componentes, tales como estanques a presión, tuberías de proceso, estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos, entre otros.

Los resultados se pueden indicar en forma puntual (punto a punto) sobre la zona ensayada o pueden ser registrados digitalmente. A esto último se le conoce como corrosión mapping.

El mapeo de corrosión consiste en una medición de espesor semiautomatizada, la cual registra todo el componente examinado con precisión milimétrica. Esta tecnología es ampliamente utilizada para la evaluación de integridad de tuberías, estanques a presión, entre otros componentes y para el análisis de corrosión.

La digitalización de los resultados es indicada en una vista vista A-Scan, C-Scan, D-Scan y S-Scan o B-Scan, la cual muestra mediante una escala de colores las zonas que se encuentran con mayor daño o severidad.

**Ilustración 15.** Grafico de vistas de inspección basada en ultrasonido TFM-FMC



Fuente: <https://www.gems.cl/servicios/ultrasonidos>

## 7. CARACTERIZACION E IMPORTANCIA DE LA CORROSION EN MATERIALES FERROSOS

El ingeniero que trabaja en problemas de corrosión necesita saber dónde empezar y tener un conocimiento básico para reconocer la corrosión, cómo se produce, cómo impedir su severidad, qué herramientas son necesarias, técnicas de inspección, variables de diseño que afectan a la corrosión, selección de materiales y la forma de interpretar y aplicar la información del problema corrosivo, así como saber dónde obtener ayuda.

La corrosión ha sido definida como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica por el medio ambiente y representa la diferencia entre una operación libre de problemas con gastos de operación muy elevados.

Para efectos prácticos, es casi imposible eliminar la corrosión y el secreto efectivo de la ingeniería en este campo radica más en su control, que en su eliminación siendo necesario tomar en cuenta el fenómeno corrosivo desde el diseño de las instalaciones y no después de ponerlas en operación.

Todos los metales y aleaciones son susceptibles al fenómeno de corrosión, no habiendo material útil para todas las aplicaciones.

### 7.1 FORMAS DE CORROSIÓN

La corrosión ocurre en muy variadas formas, pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

**a) Naturaleza de la sustancia corrosiva.** La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca, para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.

**b) Mecanismo de corrosión.** Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.

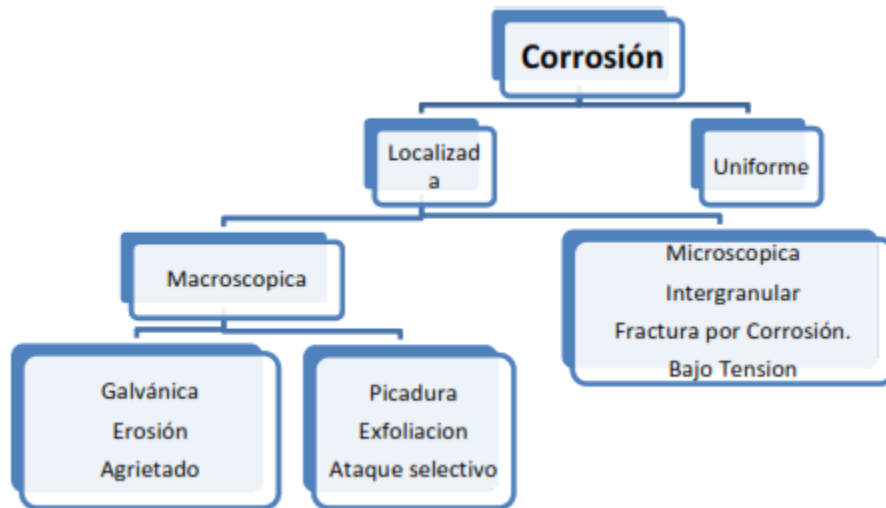
**c) Apariencia del metal corroído.** La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que, en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local.

En el ataque microscópico, la cantidad de metal disuelto es mínimo y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible.

Los diferentes tipos de corrosión se presentan a continuación, se enuncia cada una de estas formas.

**Ilustración 16.** Diagrama Identificación y clasificación de formas de corrosión



**Fuente.** [http://www.surcosistemas.com.ar/virtual/ujuy/Taller\\_metalurgia\\_electroquimica/Corrosi%C3%B3n-Teor%C3%ADa.pdf](http://www.surcosistemas.com.ar/virtual/ujuy/Taller_metalurgia_electroquimica/Corrosi%C3%B3n-Teor%C3%ADa.pdf)

### 7.1.1 Corrosión galvánica y uniforme

El ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química, siendo necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura, para controlarla.

Por otra parte, la corrosión uniforme es la forma más fácil de medir, por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas simplemente por inspección regular.

La corrosión galvánica se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso, existe una diferencia en potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado.

### 7.1.2 Corrosión por erosión

Cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, este recibe el nombre de corrosión por erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como, por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, generalmente tiene la apariencia de picaduras poco profundas de fondo terso, y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal.

### **7.1.3 Corrosión por agrietamiento**

Las condiciones ambientales en una grieta, pueden con el tiempo volverse muy diferentes de las existentes en una superficie limpia y abierta, por lo que un medio ambiente muy agresivo puede desarrollar y causar corrosión en las grietas.

Las grietas o hendiduras generalmente se encuentran en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, etc., y también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento.

La corrosión por agrietamiento, generalmente se atribuye a los siguientes factores:

- a). Cambios de acidez en la grieta o hendidura.
- b). Escasez de oxígeno en la grieta.
- c). Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.
- d). Agotamiento de Inhibidor en la grieta.

### **7.1.4 Corrosión por picadura**

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente intocada y las picaduras pueden tener varias formas. La forma de una picadura es a menudo responsable de su propio avance, por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, es decir, una picadura puede ser considerada como una grieta o hendidura formada por sí misma.

Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad.

### **7.1.5 Corrosión por exfoliación y disolución selectiva**

La corrosión por exfoliación es una corrosión sub superficial que comienza sobre una superficie limpia, pero se esparce debajo de ella y difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar.

Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie.



Al final del ataque, una muestra tiene la apariencia de un mazo de barajas en el cual algunas de las cartas han sido extraídas. Este mecanismo es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se combate utilizando aleaciones y tratamientos térmicos. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso.

### **7.1.6 Corrosión intergranular o intercristalina**

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se cuela en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales.

Los límites de grano son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite. La corrosión generalmente ocurre, porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión inter cristalina, granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites, en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa al ojo desnudo y se sentirá rasposa debido a la pérdida de los granos.

### **7.1.7 Corrosión de fractura por tensión**

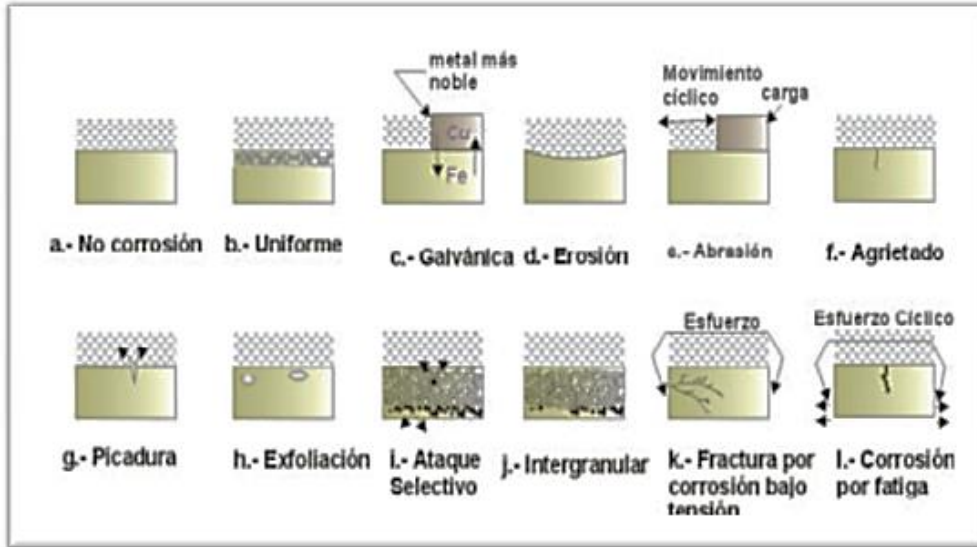
La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones aleación – corrosivo que causan este problema, son relativamente pocas. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios.

Las fracturas pueden seguir caminos inter cristalinos o trans - cristalinos que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario realizar el relevado de esfuerzo o seleccionar un material más resistente.

La corrosión por fatiga, se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo, de tal forma que el esfuerzo necesario para producir la corrosión por fatiga, se reduce en algunas ocasiones hasta la mitad del necesario, para producir la falla en aire seco.

Ilustración 17, Corrosión en materiales y aleaciones



Fuente. [http://www.surcosistemas.com.ar/virtual/jujuy/Taller\\_metalurgia\\_electroquimica/Corrosi%C3%B3n-Teor%C3%ADa.pdf](http://www.surcosistemas.com.ar/virtual/jujuy/Taller_metalurgia_electroquimica/Corrosi%C3%B3n-Teor%C3%ADa.pdf)



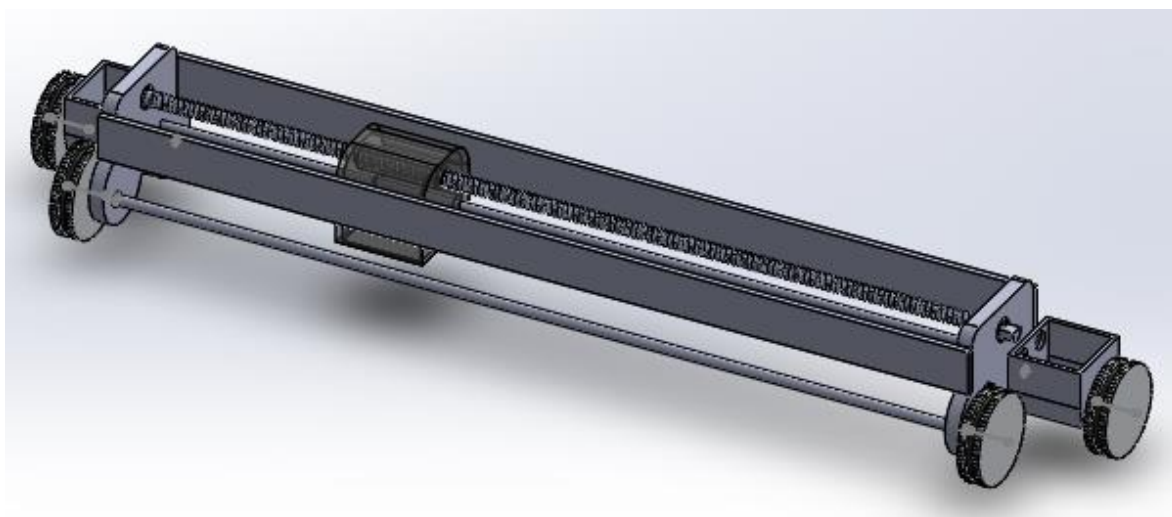
## 8. METODOLOGIA PROPUESTA, DESARROLLO DEL ARTE

Dentro del marco investigativo, se puede observar, sistemas que son capaces de suplir la necesidad propuesta en esta monografía, sin embargo, al entrar en detalles económicos, los sistemas robotizados tienden a tener costos adquisitivos muy altos. Y algo, que busca esta investigación, adicionalmente de proponer una guía para diseñar un sistema robotizado para inspección de tanques verticales, es que a su vez sea un proyecto de desarrollo económicamente viable y con insumos y materiales cien por ciento de la industria colombiana.

Basados en lo anterior, esta monografía pretende abrir esta rama investigativa y tener una propuesta de como implementar un sistema robotizado capaz de realizar inspecciones visuales y con ultrasonido a tanques de almacenamiento de sustancias peligrosas y poder prevenir accidentes, sean ambientales, humanos, materiales, y que finalmente, estos afecten la continuidad del proceso y afecten directamente los costos de la operación.

A continuación, se presenta en primera etapa de desarrollo el sistema robotizado de inspección llamado **INSPECRBOTRK**, para posteriormente, generar un listado detallado de cada uno de sus componentes, muestra detallada de cálculos de diseño en la selección de materiales y partes. Adicionalmente, realizar la selección del palpador de ultrasonido y tipo de cámara HD a ser implementada.

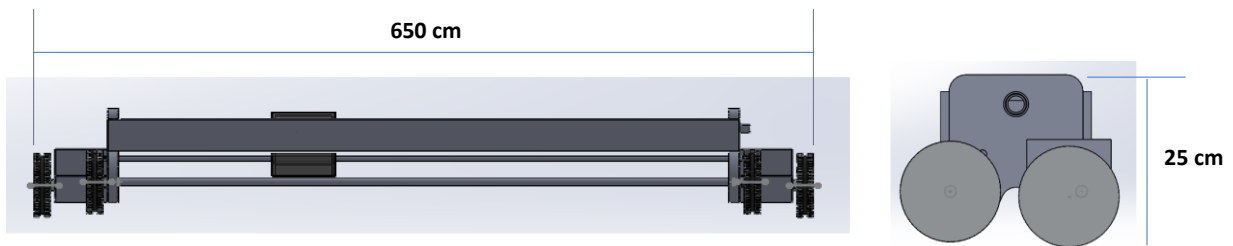
**Ilustración 18.** Sistema robotizado para inspección de tanques propuesto \_ INSPECRBOTRK



Fuente. Diseño propio del autor, realizado en software Solidworks V.2020

El equipo en mención, tiene las siguientes dimensiones: 65 cm de largo X 25 cm de alto, como se muestra en siguiente la ilustración.

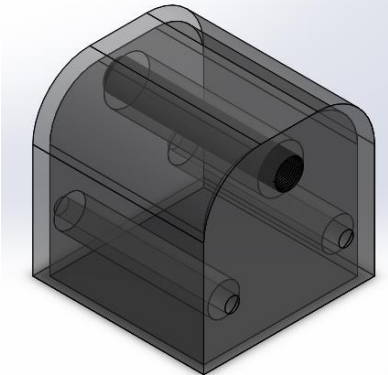
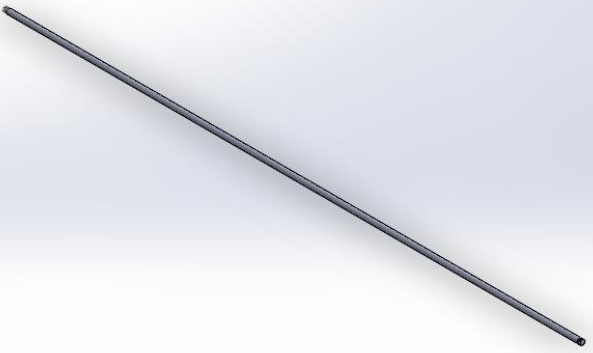
**Ilustración 19.** Sistema robotizado para inspección de tanques propuesto, cotas indicadas en vista lateral \_ INSPECRBOTRK



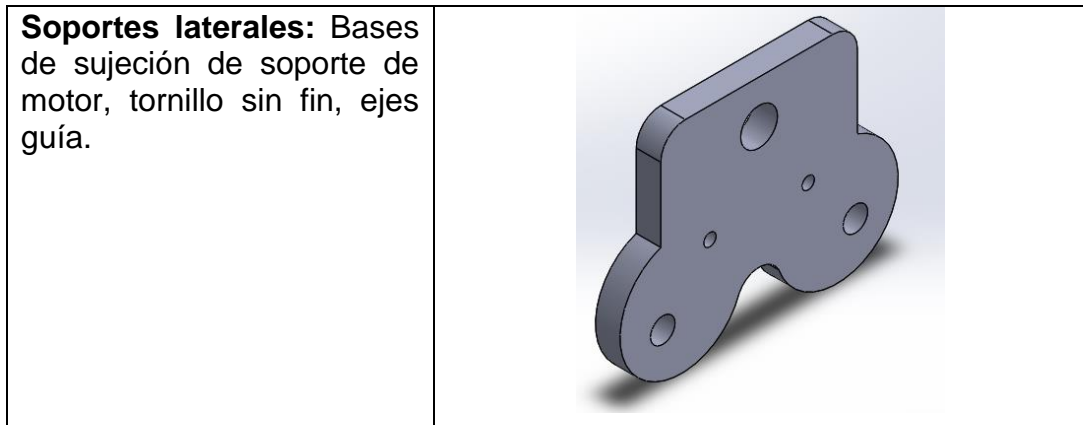
Fuente. Diseño propio del autor, realizado en software Solidworks V.2020

Para realizar una descripción detalla de los componentes estos se presentan a continuación de manera desglosada.

**Tabla 1.** Listado de partes diseñadas para posterior ensamble de sistema robotizado ROV tipo Crawler

Descripción	Modelo
<p><b>Carro de acople:</b> sistema sujeto a tornillo sin fin, el cual, la función principal es llevar el palpador de ultrasonido y desplazarse por en el eje horizontal tanto de ida como vuelta.</p>	
<p><b>Varillas Guía:</b> Acoplada a las bases laterales, servirán como guía y a su vez como soporte para el carro de acople, evitando que este se descarrile o genere movimientos no establecidos a los operativos.</p>	

<p><b>Tornillo Sin fin:</b> Elemento que acoplado a un servomotor servirá para realizar los desplazamientos del carro de acople, este tornillo transformará el movimiento rotacional en horizontal.</p>	
<p><b>Balineras:</b> Elementos que estará acoplado a los ejes de las ruedas, como, del tornillo sin fin, dispositivo que ayudará a suavizar y mantener alineado los diferentes ejes del robot.</p>	
<p><b>Rueda motriz Magnética:</b> Ruedas mecanizadas en aluminio con estrías para agarres a la superficie, en la mitad se componen de un imán comúnmente neodimio el cual, mantendrá adherido el robot a la superficie vertical.</p>	
<p><b>Soporte para motor:</b> Elemento que mantendrá alineado y guardado el motor de las ruedas y tornillo sin fin. Acoplado al soporte lateral.</p>	



Fuente. Diseño propio del autor, realizado en software Solidworks V.2020

## 8.1 SELECCIÓN DE MATERIALES Y PARTES

La implementación de robots automáticos es uno de los ámbitos de desarrollo en la industria de ROV'S tipo Crawler, utilizados para inspecciones con ensayos no destructivos NDE. El objetivo principal de esta tecnología es la realización de tareas en áreas clasificadas buscando disminuir la intervención humana en labores repetitivas o inadecuadas.

A un robot por lo general se le demandan elevadas prestaciones en velocidad y precisión de movimientos. La utilización de materiales más ligeros, de sistemas de transmisión sin holguras y con baja inercia, actuadores rápidos y precisos o de sensores de elevada resolución, han permitido mejorar la calidad de movimiento de la robótica.

El control cinemático selecciona trayectorias que idealmente deberá seguir el robot, teniendo en cuenta sus limitaciones, ajustarse lo mejor posible a las especificaciones del usuario no será del todo posible, pues las características dinámicas del robot (inercias, rozamientos, holguras, etc.) muchas veces desconocidas, impiden en general una coincidencia entre la trayectoria deseada y la real.

Una característica fundamental en la implementación de este tipo de robótica es tener un control adaptativo, esta técnica se puede aplicar con buenos resultados en ocasiones en las que el modelo, aun siendo conocido, cambia continuamente por cambiar las condiciones de funcionamiento. La idea básica del control adaptativo es modificar en tiempo real los parámetros que el caso de que el punto de funcionamiento no coincida exactamente con las entradas, se puedan modificar otros parámetros dentro del mismo lazo de control.

Teniendo en cuenta las características propuestas para llevar a cabo el modelamiento del sistema robótico, se relaciona una serie de materiales específicos que no solo ayudaran a mejorar las características cinemáticas y dinámicas del

robot, sino, además, la selección de los materiales tendrá que influenciar directamente en el peso del equipo, durabilidad y dinámica, ya que, el sistema debe vencer fuerzas propias de la naturaleza como por ejemplo la gravedad, rozamiento, etc.

### **8.1.1 Uso de materiales para Tornillo Sin fin, Estructura, Escáner o Vehículo de desplazamiento.**

Partiendo de los conocimientos, experiencias e investigaciones previas, en primera instancia la estructura, tornillo sin fin, carro de desplazamiento positivo y negativo, se recomienda **utilizar Polietileno de alto peso molecular (UHMWPE)**, material que dentro de sus principales características es muy resistente a la abrasión, al impacto, a la temperatura, bajo coeficiente de fricción, auto lubricación sobre superficies deslizables y fácil mecanizado.

### **8.1.2 Uso de materiales para guías de desplazamiento y láminas de cobertura.**

Las partes que requieran la utilización de acero, como por ejemplo las guías de desplazamiento del carro portador del sensor de ultrasonido, se recomienda utilizar acero 1050, material que provee características de medio carbono, con una resistencia a la tracción y una tenacidad media y con altas prestaciones para ser mecanizado. Se fabrican según las normas ASTM A510/A510M, ASTM A713/A713M y SAE J403 entre otras.

### **8.1.3 Uso de materiales para ruedas de desplazamiento y anclaje a superficies ferrosas.**

El material para implementar en el sistema de desplazamiento del sistema robotizado, se recomienda utilizar aluminio, ya que este material es no ferromagnético, es decir no tendrá ningún tipo de influencia o interferencia con los imanes a instalar, y con características de que es un metal muy ligero, muy resistente a la corrosión, a altas y bajas temperaturas y de fácil mecanizado.

Ahora para el material a utilizar y ensamblar en las ruedas como medio magnético para este tipo de aplicación se recomienda utilizar Neodimio, este es un imán de última generación de los materiales magnéticos. Dichos imanes poseen propiedades muy superiores a las tradicionales. Su alta coercitividad y su elevada remanencia magnética permiten obtener en pequeños imanes gran fuerza de atracción, por lo cual tiene muchas aplicaciones, cabe resaltar otras características:

- Alta remanencia magnética.
- Es un material duro (esto impide su maquinado con herramientas convencionales).
- El material es frágil (lo hace quebradizo y se puede romper cuando se golpea).
- Sensible a la oxidación (esta recubierto con una capa de cromo, níquel o zinc para evitar la exposición al medio ambiente).
- La temperatura máxima recomendada para trabajar es de 80°C.

## 8.2 CÁLCULOS Y SELECCIÓN DE PIEZAS PARA ENSAMBLE.

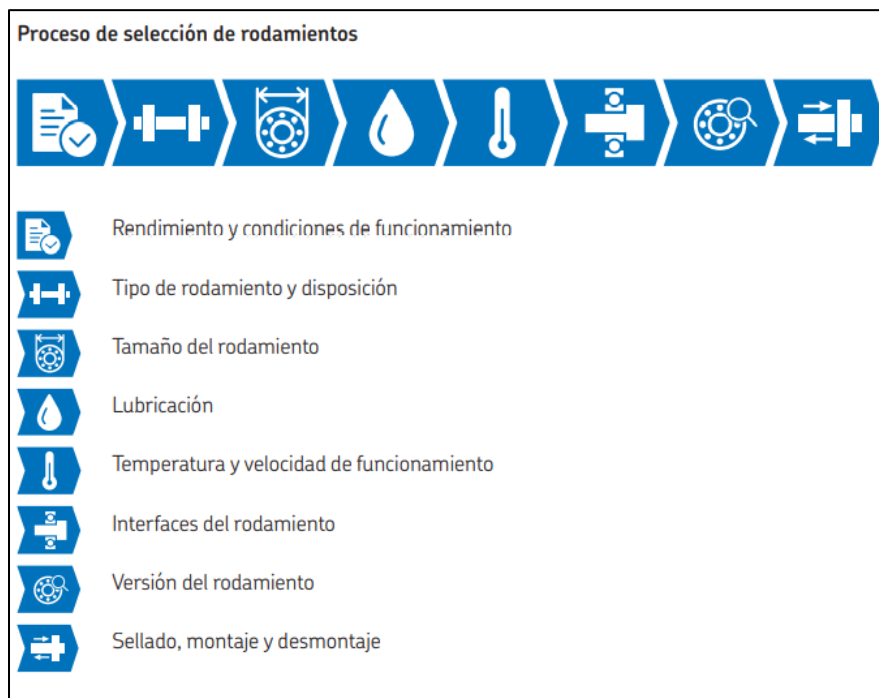
### 8.2.1 Rodamientos

Los rodamientos de rodillos y de bolas se suministran en una gran variedad de tipos y dimensiones. La consideración más importante en la selección de un rodamiento es escoger aquél que permita a la máquina o la parte en la cual se instala, desempeñarse satisfactoriamente y en la forma esperada.

Para facilitar el proceso de selección y lograr la determinación del rodamiento más apropiado para una tarea, es necesario analizar las especificaciones requeridas.

Aunque no hay reglas rápidas y fijas para la selección, la siguiente lista de pasos de evaluación ofrece entre otros conceptos, una referencia general en la elección del rodamiento adecuado:

**Ilustración 20.** Gráfico ilustrativo para seleccionar tipos de rodamientos.



Fuente. [https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000\\_1-ES\\_tcm\\_201-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf)

Al seguir las recomendaciones y procedimientos descritos en el documento de SKF, para el caso específico se recomienda utilizar rodamientos rígidos de bolas, algunas de sus características son; particularmente versátiles. aptos para velocidades altas y muy altas, soportan cargas radiales y axiales en ambos sentidos y con requerimientos bajos de mantenimiento.

Para este caso se tiene como guía el diámetro externo del tornillo sin fin, el cual, según el diseño planteado se propone un tornillo de rosca ACME, diámetro externo de 17 mm y 5/8" de diámetro nominal de cuerda, por lo tanto, para tal caso, se selecciona un rodamiento con las siguientes características dada por las tablas proporcionadas por el manual de rodamientos SKF.

**Tabla 2.** Características para la selección de rodamientos de bolas de una sola hilera sellados.

**1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas**  
d 15 - 17 mm

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite <sup>1)</sup>		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado <sup>1)</sup>
mm			kN		kN	r p m		kg	-	-
<b>15</b> cont.	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	26 000	0,032	▶ 6002-Z	6002-Z
	32	13	5,59	2,85	0,12	-	14 000	0,039	▶ 63002-2RS1	-
	35	11	8,06	3,75	0,16	43 000	28 000	0,045	▶ 6202	-
	35	11	8,06	3,75	0,16	-	13 000	0,046	▶ 6202-2RSH	6202-RSH
	35	11	8,06	3,75	0,16	43 000	22 000	0,046	▶ 6202-2RSL	6202-RSL
	35	11	8,06	3,75	0,16	43 000	22 000	0,048	▶ 6202-Z	6202-Z
	35	14	7,8	3,75	0,16	-	13 000	0,054	▶ 62202-2RS1	-
	42	13	11,9	5,4	0,228	38 000	24 000	0,082	▶ 6302	-
	42	13	11,9	5,4	0,228	-	12 000	0,085	▶ 6302-2RSH	6302-RSH
	42	13	11,9	5,4	0,228	38 000	19 000	0,085	▶ 6302-2RSL	6302-RSL
42	13	11,9	5,4	0,228	38 000	19 000	0,086	▶ 6302-Z	6302-Z	
42	17	11,4	5,4	0,228	-	12 000	0,11	▶ 62302-2RS1	-	
52	7	4,49	3,75	0,16	-	7 500	0,034	▶ 61808-2RS1	-	
<b>17</b>	26	5	2,03	1,27	0,054	-	16 000	0,0082	▶ 61803-2RS1	-
	26	5	2,03	1,27	0,054	56 000	28 000	0,0082	▶ 61803-2RZ	-
	26	5	2,03	1,27	0,054	56 000	28 000	0,0082	▶ 61803-Z	-

Fuente. [https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings--17000\\_1-ES\\_tcm\\_201-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings--17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf)

El rodamiento a seleccionar para el diseño propuesto deber tener un diámetro interno de 17 mm y un diámetro externo de 26 mm, igualmente las características de velocidad, capacidad de carga y carga límite de fatiga, tomada como referencia en la ilustración, para el caso específico de la aplicación son más que suficientes.

### 8.2.2 Ruedas Magnéticas

Los robots magnéticos para escalar paredes y techos se han propuesto en muchas aplicaciones industriales en las que los robots deben moverse sobre superficies de materiales ferromagnéticos. El diseño del circuito magnético con cálculo de la fuerza de atracción magnética de la rueda magnética permanente juega un papel importante que afecta significativamente la confiabilidad del sistema, la capacidad de carga útil y el consumo de energía del robot.

Las fuerzas están basadas en contacto directo con un hierro de grosor medio y sin pintar. Estas fuerzas pueden verse reducidas con pinturas gruesas o superficies corroídas. Para su uso en vertical, normalmente la fuerza de sujeción de una rueda tiene que ser igual o mayor que el peso total del carro. La parte exterior de los polos puede ser mecanizada para aumentar la adhesión. Usar siempre ejes no ferromagnéticos para ser utilizado con estas ruedas.

**Tabla 3.** Especificaciones para selección de diámetro de rueda vs fuerza de atracción.

Código Artículo	OD (mm)	T (mm)	ID eje (max)	Fuerza atracción		Peso g
				Neodimio	SmCo	
C-00/RD1	30	16	10	10 Kg	7 Kg	57
C-00/RD1	40	20	10	8 Kg	5 Kg	130
C-00/RD1	50	29	12,7	20 Kg	17 Kg	281
C-00/RD1	75	40	12,7	50 Kg	40 Kg	930
C-00/RD1	100	50	12,7	60 Kg	55 Kg	1685

Fuente. <https://es.fzmag.com/Magnetic-Drive-Wheel-for-Wall-Climbing-Robot/>

Para la selección de la rueda, se determina un peso calculado con la ayuda del software SolidWorks, con los materiales diseñados y ensamblados nos indica un peso aproximado de 20 Kg, ya conocido el peso del sistema robotizado y con la ayuda de la tabla No 2. Se puede seleccionar y utilizar la referencia C-00/RD1 de 50 mm, con una fuerza de atracción de 20 Kg, utilizando un imán de Neodimio.

### 8.2.3 Motores de Avance

Para realizar la selección de los motores de avance del equipo, es necesario tener en cuenta la velocidad angular de cada rueda, con el fin de determinar las RPM y el torque necesario de cada motor. A continuación, y en base al diámetro seleccionado para la rueda, se tiene los siguientes parámetros cinemáticos:



En primera instancia se calcula el torque que necesita los motores, los cuales, son calculados en base al peso a vencer o mover, y el radio de la rueda. El peso indicado anteriormente a vencer es de 20 Kg, y la rueda tiene un diámetro de 50 mm, recomendada por la tabla No 2.

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} * \text{Distancia}$$

$$\text{Torque} = 20 \text{ Kg} * 2.5 \text{ cm}$$

$$\text{Torque} = 50 \text{ Kg} * \text{cm}$$

Sin embargo, para este caso específico se utilizan dos motores de empuje, lo cual, se tiene que dividir en 2, el torque requerido, siendo así, tenemos:

$$\text{Torque} = 25 \text{ Kg} * \text{cm}$$

Para calcular la velocidad en una rueda calcula la distancia que recorre la rueda en una vuelta usando la formula

$$\text{Perimetro} = 2 * \pi * r$$

$$\text{Perimetro} = 2 * \pi * 2.5$$

$$\text{Perimetro} = 15.70 \text{ cm} - 0.5170 \text{ m}$$

En este caso el perímetro es igual a la distancia que recorre una rueda al dar una vuelta, ahora la velocidad es igual

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Espacio}}{\text{Tiempo}}$$

En motores tenemos la velocidad dada en RPM (Revoluciones Por Minuto), para este caso y a modo de cálculo queremos que nuestro equipo se desplace a aproximadamente a 1 metro/segundo, por tanto, convertimos esta velocidad a RPM

1 minuto = 60Seg, cantidad que dividimos en 60 en ambos lados obteniendo a 1 Segundo = 1 minuto/60, y reemplazamos los segundos de la velocidad por 1 minuto/60

velocidad =  $1m / (1\text{minuto}/60) = 60m/\text{minuto}$ , esta es la velocidad requerida para recorrer 60 metros en un minuto y si nuestra rueda se desplaza a 15.70 cm en un giro, calculamos cuantas vueltas tiene que dar para recorrer 60 metros, para ello llevamos los 15.70 cm a metros y dividimos

$$Velocidad = \frac{60\ m}{0.1570\ m}$$

$$Velocidad = 382,1\ RPM$$

Ya tenemos dos datos claves, **Torque constante de 25kg\*cm** y **Velocidad de 382 RPM**, ahora buscamos motores que tenga estas características siempre tratando de por lo menos estar un 10% sobre los datos estimados.


$$Torque\ 10\% = 27.56\ Kg * cm$$

$$Velocidad\ 10\% = 420\ RPM$$

A continuación, se recomienda la siguiente referencia de motor para realizar la implementación del sistema robotizado.

Motorreductor de 12V es ideal para aplicaciones de baja potencia como robots móviles o maquinas livianas, el voltaje de funcionamiento es entre 6 a 12V y el torque continuo que puede manejar es de 30 kg\*cm, sin embargo, es recomendable trabajarlo debajo de ese torque ya que está en el límite de trabajo y esto puede reducir la vida útil del motor, la piñonería es metálica y el primer piñón es helicoidal que reduce un el ruido con respecto a los piñones normales

### Motorreductor 12v 500 RPM reducción 19:1 encoder

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltaje: 12 V</li> <li>• Reducción 19.2:1</li> <li>• Tipo de piñonería: planetaria</li> <li>• Material de piñonería:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Casing: Steel Ring Gear</li> <li>• Nivel 1: Engranajes de acero, engranajes orbitales de Acetal</li> <li>• Nivel 2: Engranajes de acero.</li> </ul> </li> <li>• Velocidad sin carga 12V: 500 RPM</li> <li>• Stall torque 12V: 55 kg-cm</li> <li>• Corriente Stall 12V: 9.2A</li> <li>• Corriente free-run: 250 mA</li> <li>• Diámetro eje de salida: 6mm tipo D</li> <li>• Torque a máxima eficiencia: 30 kg*cm</li> <li>• Velocidad a máxima eficiencia: 450 RPM</li> <li>• Corriente a máxima eficiencia: 2A</li> <li>• Peso: 420 gr</li> </ul>	
--	---

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensiones 37.5D x 140.8L mm</li> <li>• Encoder relativo en cuadratura</li> <li>• Tipo de encoder: Efecto hall</li> <li>• Rango de voltaje 3.3 – 5VDC</li> <li>• CPR en el motorreductor: 537.6CPR en cuadratura</li> </ul> |  |
|---|--|

Teniendo en cuenta los parámetros de RPM necesarios en cada motor, se procede a calcular la velocidad angular por cada rueda, esto con el fin de determinar la velocidad final del equipo.

Una rueda gira a aproximadamente 382 r.p.m.= 382 revoluciones por minuto. Entonces, se debe calcular 382/60, lo que es igual a 6.36 RPS.

Si la frecuencia es igual a  $f = 6.36$  RPS,  $1/s$   $T = 1/6.36 = 0,157$  seg. (segundos/vuelta o por ciclo), se tiene lo siguiente:

$$w = 2 * \pi * f$$

$$w = 2 * \pi * (6.36 \text{ RPS})$$

$$w = 40 \text{ RPS}$$

Considerando al robot como un cuerpo rígido, la velocidad lineal del centro de masa se obtiene a partir del promedio de las velocidades lineales de cada una de sus ruedas. La velocidad lineal de cada rueda se obtiene como el producto de la velocidad angular (velocidad de giro) y el radio de ellas. La velocidad del centro de masa queda definida por:

$$V = \frac{r(W1 + W2)}{2}$$

$$V = \frac{0.025 \text{ m} (40 \text{ RPS} + 40 \text{ RPS})}{2}$$

$$V = 1 \text{ m/s}$$

Para corroborar este método se puede utilizar esta ecuación:

$$K1 = \frac{((\pi * \text{Diametro}) * \text{RPM}) * 60}{1000}$$

$$K1 = \frac{((\pi * 0.050 \text{ m}) * 382) * 60}{1000}$$

$$K1 = 3.6 \frac{\text{Km}}{\text{h}} \text{ o } 1 \text{ m/seg}$$

Por lo tanto, es desplazamiento o sistema de avance principal para el sistema robotizado será aproximadamente de 1 metro / segundo, así mismo, será su giro, el cual, se realiza deteniendo uno de sus motores y el otro girando de manera normal, igualmente, para girar en el sentido opuesto.

#### 8.2.4 Motor de avance de Tornillo Sin Fin.

Para el cálculo del motor que va acoplado al carro o transductor que lleva el palpador de ultrasonido, para el diseño propuesto se determina un diámetro exterior del tornillo sin fin de 17 mm (0,66") y una sección roscada de 35 cm (13,77"), según este parámetro en la tabla No 3, se selecciona un diámetro nominal de rosca tipo ACME de 5/8", con un paso de 8 hilos por pulgada o 0,125".

Ya con estos parámetros indicados anteriormente, se necesita calcular las revoluciones por minuto y establecer el tiempo máximo de desplazamiento del vehículo portador del palpador de ultrasonido.

**Tabla 4.** Dimensiones estándar de una cuerda tipo ACME

TABLA 12.3 Dimensiones estándar de una cuerda ACME			
Diámetro mayor nominal (in)	Hilos por pulgada, $n$	Paso (in) $P = \frac{1}{n}$	Diámetro de paso nominal (in)
1/4	16	0.0625	0.2043
3/8	14	0.0714	0.2614
1/2	12	0.0833	0.3161
5/8	12	0.0833	0.3783
3/4	10	0.1000	0.4306
5/8	8	0.125	0.5408
3/4	6	0.1667	0.6424
7/8	6	0.1667	0.7663
1	5	0.2000	0.8726
1 1/8	5	0.2000	0.9967
1 1/4	5	0.2000	1.1210
1 3/8	4	0.2500	1.2188
1 1/2	4	0.2500	1.3429
1 3/4	4	0.2500	1.5916
2	4	0.2500	1.8402
2 1/4	3	0.3333	2.0450
2 1/2	3	0.3333	2.2939
2 3/4	3	0.3333	2.5427
3	2	0.5000	2.7044
3 1/2	2	0.5000	3.2026
4	2	0.5000	3.7008
4 1/2	2	0.5000	4.1991
5	2	0.5000	4.6973

Fuente. (88) Máquinas y Mecanismos 4ta Edición | Carlos Isaac Contreras Villegas - Academia.edu, Capítulo 12.

A continuación, se indican los pasos para realizar este cálculo.

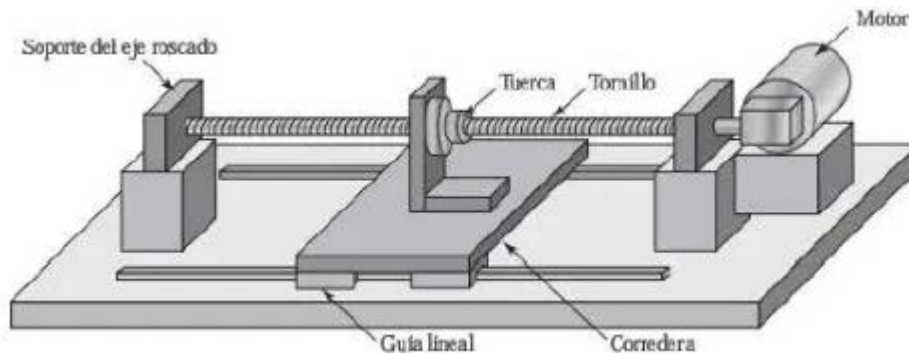
### 1. Determinar el movimiento relativo

Es esta configuración, el motor gira el tornillo sobre los cojinetes, pero los hombros del eje evitan la translación del tornillo. La tuerca esta impedida para la rotación, aunque se le permite la translación a lo largo de las guías lineales, en este ejemplo se usa la siguiente notación:

La parte A es el tornillo

La parte B es la tuerca

**Ilustración 21.** Sistema equivalente para movimiento de tornillo sin fin y carro móvil



Fuente. (88) Máquinas y Mecanismos 4ta Edición | Carlos Isaac Contreras Villegas - Academia.edu, Capítulo 12.

### 2. Cálculo de la geometría del tornillo

La cuerda seleccionada es de 5/8"-8 ACME de tornillo, con los siguientes parámetros:

Numero de hilos:  $N1 = 1$  hilo/rev

Numero de hilos por pulgada:  $N = 8$

Paso  $P = \frac{1}{n} = \frac{1}{8} = 0,125$  in/hilo

Avance  $L = N1P = 0,125$  in/rev

### 3. Determinar el desplazamiento del tornillo

El desplazamiento angular del tornillo para producir un desplazamiento lineal de 35 cm (13,77 in) de la tuerca se calcula a continuación:

$$\Delta\theta_A = \frac{\Delta d}{L} = \frac{13,77''}{0,125''/rev} = 110,16 \text{ rev/min}$$

#### 4. Cálculo de la velocidad de la tuerca

Como parámetro asumido para la velocidad máxima de inspección por ultrasonido con Scan C, se calcula en base a tener una rata de 1.8 segundos tanto en avance positivo como negativo del escáner, el cual, debe recorrer la distancia anteriormente planteada de 13.77", por lo tanto, tenemos que para alcanzar este parámetro de desplazamiento y tiempo se requiere. utilizar una velocidad de salida del motor a aproximadamente 6000 RPM

$$VB - VA = L * Wa = \left(0,125 \frac{in}{rev}\right) * \left(\frac{6000rev}{min}\right) = 750 in/min$$

La analogía para integrar y/o relacionar las RPM calculadas y las RPM necesarias para cumplir o tener un desplazamiento de 35 cm, en aproximadamente 1.8 seg, se basa en tener la siguiente interpretación:

Si a 110 RPM se desplaza 13.77 in en un tiempo de 1 min, se calcula que para 6000 RPM se necesita desplazar igualmente 13.77 in, pero en 1.8 seg. Simplemente se realiza una ecuación compuesta de la siguiente manera:

$$\frac{110.16 \text{ RPM}}{6000 \text{ RPM}} \longrightarrow \frac{13,77''}{13,77''} \longrightarrow \frac{1 \text{ min}}{X}$$

Al resolver esta ecuación, el tiempo estimado es entregado en minutos, sin embargo, se debe tener en cuenta que a mayores revoluciones entregadas por el motor el desplazamiento del escáner va ser mayor, por lo tanto, la ecuación se reduce a tenerla de manera inversa, es decir se tendría el cálculo de la siguiente manera:

$$\frac{110,16 \text{ RPM}}{6000 \text{ RPM}} \longrightarrow \frac{X}{1 \text{ min}}$$

Lo que nos entrega como resultado que a 6000 RPM y un desplazamiento del escáner a 13,77 in se obtiene un tiempo de 1.83 seg, requeridos como  $t$  máximo.

$$X t = 0,01836 \text{ minutos} = 1,83 \text{ segundos}$$

El torque requerido para este motor calculado con un peso de 0,55 Kg (peso del scanner + vehículo) y un desplazamiento de 25 cm, requiere un torque de 15,12 kg\*cm.

$$\text{Torque} = \text{Fuerza} * \text{Distancia}$$

$$\begin{aligned} \text{Torque} &= 0,55 \text{ Kg} * 25 \text{ cm} \\ \text{Torque} &= 13,75 \text{ Kg} * \text{cm} \\ \text{Torque } 10\% &= 15,12 \text{ Kg} * \text{cm} \end{aligned}$$

## 8.2 SELECCIÓN DE EQUIPO DE ULTRASONIDO Y PALPADOR

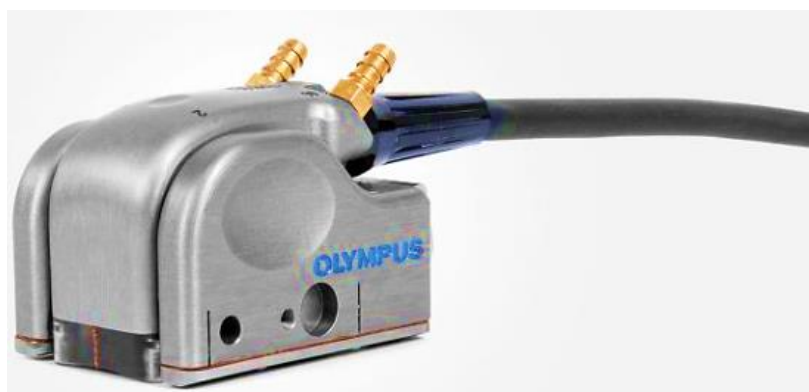
Por lo general, las sondas Phased Array se dotan de 1 MHz a 17 MHz de frecuencia y poseen de 10 a 128 elementos, sondas que aplican la tecnología piezocompuesta para todos los tipos de inspecciones.

Para el desarrollo e implementación de este sistema escáner se recomienda utilizar una sonda con suela [zapata] integrada, de 64 elementos y 5 MHz. A continuación, se entrega una corta especificación de la sonda recomendada para ser utilizada en equipos automatizados.

**La sonda Dual Linear Array™** para inspecciones de corrosión brinda muchas más ventajas en comparación con las sondas duales por ultrasonido convencional. Esta solución de ultrasonido multielemento (Phased Array) optimiza la productividad gracias a sus características, entre las cuales destacan: una gran cobertura del haz, una velocidad de escaneo aún más rápida, y una representación C-scan con densidad puntual de datos incrementada.

En las aplicaciones de mapeo de corrosión, la técnica de emisión y recepción de esta nueva sonda proporciona mayor resolución cercana a la superficie y una detección de picaduras (o fisuras) más rigurosa que la técnica pulso eco de las sondas de ultrasonido multielemento, lo cual incrementa la probabilidad de detección de pérdidas de espesor críticas en las paredes de la pieza.

**Ilustración 22.** Muestra de sonda dual linear array para equipos de mapeo de corrosión automatizados



Fuente <https://www.olympus-ims.com/es/dual-linear-array-probe/>

Gracias a sus nuevas características, como el sistema de irrigación integrado y la línea de retardo reemplazable y moldeada para adaptarse mejor a la curvatura del tubo, la sonda DLA para la inspección de la corrosión puede, ahora, usarse en las inspecciones automatizadas.

#### Ventajas y funciones de la sonda

- Detección de defectos poco profundos: 1 mm (0,04 pulg.) bajo la superficie.
- Línea de retardo reemplazable y rentable.
- Sistema de irrigación integrado.
- Funcionamiento a temperaturas elevadas opcional para la inspección de superficies calientes.
- Cobertura del haz de hasta 30 mm (1,18 pulg.) de ancho.
- Sistema de ajuste rápido para adaptarse a piezas de 100 mm (4 pulg) de diámetro a planas.
- Placas antidesgaste de carburo durables para proteger la suela (zapata).
- Profundidad de inspección típica de 1 a 80 mm en el acero al carbono.
- Representaciones de la vista lateral, inferior y superior (B-scan, D-scan y C-scan).
- Almacenamiento del A-scan completo en alta resolución.
- Dos puertas de detección configurables.

En cuanto al equipo recomendado para ser usado y compatible con la sonda anteriormente citada, se recomienda utilizar el detector de defectos OmniScan SX. Este instrumento presenta una novedosa interfaz de software visible a través de una cómoda pantalla táctil de 8,4" (21,3 cm). El OmniScan SX, que es un instrumento de un solo grupo (canal) sin módulos, es fácil de operar y rentable para aplicaciones exigentes.

**Ilustración 23.** Muestra de equipo Olympus OmniScan SX



Fuente. <https://www.olympus-ims.com/es/omniscan-sx/>



### 8.3 SELECCION DE SISTEMA DE VISUAL, CAMARA DE ULTRA ALTA DEFINICON

Para realizar la selección de este tipo de dispositivos es importante comprender la resolución, pixeles que manejan este tipo de cámaras, ya que entre más pixeles posea la cámara más definición tendrá las imágenes o secuencia de video, sin embargo, para apreciar en la totalidad la alta definición que cuentan estos dispositivos así mismo se necesita un reproductor con las características similares.

Actualmente se cuenta con resoluciones de 4:3 y 16:9, con arreglos de pixeles entre 720 (1280X720), 960 (1280X960), 1080(1920X1080), 1440(1920X1440), 2,7K (2704X1500) y 4K (3840X2760).

Adicionalmente, es importante tener en cuenta la capacidad de almacenamiento para cada uno de estos formatos de grabación, ya que entre más definición se requiera, existirá más consumo de batería, consumo de más espacio y el equipo utilizado presentara una mayor alza en su temperatura, adicional, se necesita un buen equipo de reproducción que mantenga un video fluido al instante de volverlo a reproducir.

**Ilustración 24.** Muestra de cámara GoPro de alta definición



Fuente. Cámaras – GoPro Colombia

Un equipo para esta clase de aplicación, de fácil adquisición en el mercado y con prestaciones muy altas, se recomienda utilizar equipos de la referencia GoPro, Una GoPro es una cámara para fotos y vídeos con un cuerpo especialmente compacto y un peso extremadamente ligero. Este tipo de cámaras suelen ser muy resistente<sup>1</sup>s a golpes y salpicaduras de agua.

Dentro de las referencias recomendadas se puede utilizar la Hero 6, Hero 7, black y Hero 9, con las siguientes características:

- Tamaño: más o menos se mueven entorno a los 6,2 x 4,4 x 3,2 cm.
- Lentes digitales: SuperView, Gran Angular, Lineal, Estrecho en el modelo superior, y Gran Angular en el más «básico».
- Muy ligera: todos los modelos se mueven entorno a un peso aproximado de: 120g.
- Sumergibles sin carcasa hasta 10m y con carcasa (vendida como accesorio) hasta 40m.
- Resolución de hasta 20MP, dependiendo del modelo.
- Grabación de vídeo, alguna hasta en 5k.

## CONCLUSIONES

- La solución de implementar un sistema robotizado con la capacidad de control adaptativo abre el camino para una cobertura de mapas de corrosión del 100% de los activos críticos, generando ventajas de poder realizar una inspección 10 veces más rápido a una resolución más alta en comparación con UT convencional.
- El sistema robotizado propuesto no solamente está ajustado a la inspección de tanques de almacenamiento, si no se puede aplicar a otros recipientes, oleoducto, gasoductos, carcasas de barcos y otros activos críticos.
- El mapeo de corrosión automatizado se ha convertido en una parte integral de las campañas de inspección de END y es ampliamente aceptado dentro de los programas de administración de integridad, así que ampliar este método es de gran versatilidad y aprovechamiento de los recursos tecnológicos actuales.
- La capacidad de recopilar datos de alta resolución a mayores velocidades de escaneo mejora la probabilidad de detección, mejora la obtención de imágenes y mejora la caracterización de defectos.
- El sistema robotizado al contar con una cámara de alta resolución a bordo es capaz de transmitir video en vivo, lo que permite que los operadores realicen inspecciones visuales instantáneas en entornos difíciles de alcanzar y, con frecuencia, de acceso imposible.
- El sistema robotizado propuesto aumenta la seguridad del personal involucrado en esta clase de inspecciones ya que este elimina la exposición humana a entornos potencialmente peligrosos al permitir la inspección desde un lugar seguro y remoto.

## BIBLIOGRAFIA

- MODELO MATEMÁTICO PARA UN ROBOT MÓVIL, RÍOS G., LUÍS HERNANDO; BUENO L., MAXIMILIANO MODELO MATEMÁTICO PARA UN ROBOT MÓVIL Scientia Et Technica, vol. XIV, núm. 38, junio, 2008, pp. 13-18 Universidad Tecnológica de Pereira Pereira, Colombia.
- GUÍA DE IMPLANTACIÓN DE ROBOTS SECTOR METAL, FEMETAL.
- MAQUINAS Y MECANISMOS, 4TA EDICION, DAVID H, MISZKA, PEARSON.
- FUNDAMENTOS DE ROBOTICA, Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, Carlos Balaguer, Rafael Aracil, Universidad Politécnica de Madrid. McGRAW-HILL.
- API 1160 Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines
- NACE Intenational CP2-Cathodic Protection Technician [Sección de libro] / trad. Albaya María. - [s.l.] : NACE International, 2008.
- SCHWEITZER Philip Fundamentals of Corrosion Mechanisms, Causes, and Preventative Methods [Libro]. - Boca Raton : CRC Press, 2009. - Primera