

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

TESIS DE DOCTORADO

Desarrollo de métodos teóricos para barridos tridimensionales
precisos en oscuridad total

Autor:

César Antonio Sepúlveda Valdez

Director de Tesis:
Dr. Oleg Sergiyenko

Co-Director de Tesis:
Dra. Vera Tyrsa

*Una tesis presentada en cumplimiento de los requisitos
para el grado de Doctor en Ingeniería.
en el*

Instituto de Ingeniería
Campus Mexicali

Enero de 2025



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA
MEXICALI

Declaración de Autoría

Yo, César Antonio Sepúlveda Valdez, declaro que esta tesis titulada, “Desarrollo de métodos teóricos para barridos tridimensionales precisos en oscuridad total” y el trabajo presentado en ella es mío. Confirmo que este trabajo enviado para evaluación es mío y se expresa en mis propias palabras. Cualquier uso que se haga dentro de las obras de otros autores en cualquier forma (por ejemplo, ideas, ecuaciones, figuras, texto, tablas, programas) se reconoce adecuadamente en cualquier momento de su uso. Se incluye una lista de las referencias empleadas.

Firma:



Fecha: 8 de Enero del 2025

*“Si una persona es perseverante, aunque sea dura de entendimiento, se hará inteligente;
y aunque sea débil se transformará en fuerte.”*

Leonardo Da Vinci

Resumen

Instituto de Ingeniería

Campus Mexicali

Doctor en Ingeniería.

Desarrollo de métodos teóricos para barridos tridimensionales precisos en oscuridad total

por César Antonio Sepúlveda Valdez

Esta tesis doctoral presenta una aplicación novedosa del Sistema de Visión Técnico (TVS), que consiste en un escáner láser desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, que se puede utilizar para la inspección de tuberías que transportan insumos de alto valor como agua, gas y petróleo. La investigación aborda el rediseño del sistema, adaptándolo para condiciones dinámicas mediante su integración con un robot móvil, y desarrolla métodos de barrido optimizados que maximizan el rendimiento del escáner en entornos oscuros o de difícil acceso.

El trabajo incluye el desarrollo de modelos geométricos y cinemáticos del sistema, así como ecuaciones de movimiento y transformaciones de coordenadas para generar nubes de puntos útiles en la evaluación de la integridad estructural de las tuberías. Se presenta también un algoritmo de análisis de datos que permite identificar defectos y condiciones perjudiciales de forma eficiente durante las inspecciones.

Para validar la metodología propuesta, se realizaron experimentos que demuestran la viabilidad del sistema, destacando su precisión y robustez en la adquisición y procesamiento de datos. Adicionalmente, se introduce una herramienta para el análisis de errores en las nubes de puntos, comparando las mediciones obtenidas con el TVS frente a las condiciones ideales de tuberías en buen estado.

Este trabajo representa una contribución significativa en el ámbito de la inspección automatizada de tuberías, ofreciendo una solución eficiente y adaptable a las exigencias de la industria.

Abstract

This doctoral thesis presents a novel application of the Technical Vision System (TVS), a laser scanner developed at the Engineering Institute of the Autonomous University of Baja California, for the inspection of pipelines that transport high-value resources such as water, gas and oil. The research addresses the system's redesign, adapting it for dynamic conditions through its integration with a mobile robot, and develops optimized scanning methods that maximize the performance of the scanner in dark or difficult-to-access environments.

The work includes the development of geometric and kinematic models of the system, as well as equations of motion and coordinate transformations to generate point clouds useful in evaluating the structural integrity of the pipelines. A data analysis algorithm is also presented that allows defects and harmful conditions to be efficiently identified during inspections. To validate the proposed methodology, experiments were carried out that demonstrate the viability of the system, highlighting its precision and robustness in data acquisition and processing. Additionally, a tool is introduced for the analysis of errors in the point clouds, comparing the measurements obtained with the TVS against the ideal state of pipes in good condition.

This work represents a significant contribution in the field of automated pipe inspection, offering an efficient and adaptable solution to the demands of the industry.

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por su invaluable apoyo económico y material, que permitió financiar tanto la investigación como mi labor, así como por el respaldo constante mediante becas que me han brindado la oportunidad de continuar con mis estudios de posgrado, tanto en México como en el extranjero.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por brindarme la oportunidad de estudiar y alcanzar mi grado de Doctorado en Ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería de la UABC, campus Mexicali, por ofrecerme las instalaciones y recursos, y por contar con catedráticos que han sido fundamentales en mi formación académica como estudiante de posgrado.

A mi director de tesis, Dr. Oleg Sergiyenko, por desarrollar este proyecto de investigación y darme la oportunidad de formar parte de él, compartiendo generosamente su conocimiento y experiencia en el campo de estudio.

A mi codirectora de tesis, Dra. Vera Tyrsa, por su colaboración con el Dr. Oleg Sergiyenko en este proyecto de investigación, por su tiempo y por los valiosos consejos proporcionados a lo largo del proceso.

A mis compañeros, por su apoyo constante en los diversos proyectos y tareas que surgieron durante este tiempo de estudio. Sus sugerencias y perspectivas fueron esenciales para el progreso de mi trabajo.

Índice General

Declaración de Autoría.....	2
Resumen	4
Abstract.....	6
Reconocimientos.....	7
Índice de Figuras	11
Índice de Tablas	14
Abreviaturas.....	15
Símbolos	16
1. Introducción.....	19
1.1. Antecedentes	19
1.1.1. Escáner Láser	27
1.1.2. Sistema de Visión Técnica	28
1.1.3. Aplicaciones del TVS	28
1.1.4. Conceptos de óptica.....	29
1.1.5. Actualidad de los barridos en oscuridad	29
1.2. Planteamiento del problema.....	32
1.3. Justificación y uso de resultados	34
1.4. Objetivos de la investigación	35

1.4.1. Objetivo general	35
1.4.2. Objetivos específicos	35
1.5. Hipótesis.....	37
2. Marco teórico/ Fundamentos.....	38
2.1. Sistema de escaneo	39
2.1.1. Triangulación Dinámica.....	43
2.1.2. Diseño del Robot	46
2.2. Análisis Geométrico y Modelado Cinemático.	50
2.2.1. Análisis Geométrico	50
2.2.2. Modelado cinemático.....	59
2.3. Segmentación	61
2.3.1. RANSAC	61
3. Procedimiento Metodológico	63
3.1. Diagrama de flujo del algoritmo de inspección.....	64
3.1.1. Seguimiento de trayectoria.....	65
3.1.2. Escaneo de superficie.....	67
3.1.3. Segmentación por algoritmo modificado de RANSAC.....	71
4. Experimentación y análisis de resultados.	74
4.1. Consideraciones.....	74
4.1.1. Adecuación del método de escaneo a la superficie de aplicación.....	75

4.1.2. Validación de mediciones	75
4.2. Mediciones en diferentes condiciones de luz.....	76
4.3. Ambiente experimental.....	84
4.4. Adquisición de datos en movimiento.....	84
4.4.1. Análisis del error en la nube de puntos.....	96
5. Conclusiones	100
Referencias.....	103

Índice de Figuras

Figura 1. Modelo 3D del Escáner Láser o TVS. a) Nodo de emisión. b) Nodo de detección.....	39
Figura 2. Diagrama de la Scanning Aperture (en Inglés)(SA) o Apertura de Escaneo.	41
Figura 3. Generación de la señal de detección.....	42
Figura 4. La Triangulación Dinámica desde su vista superior (representación gráfica).	44
Figura 5. La Triangulación Dinámica: Representación gráfica de la vista lateral.	44
Figura 6. Hardware del sistema de inspección de tuberías – Modelo 3D. A es la sección transversal de la apertura de escaneo (SA). B es la sección transversal del posicionador láser (PL).	48
Figura 7. Representación de las variables físicas del sistema de escaneo de tuberías (en una construcción de madera para el modelado de segmentos de tuberías).	52
Figura 8. Representación d_{\min} en triangulación dinámica.	56
Figura 9. Representación gráfica de la falla por corrosión.	56
Figura 10. Representación gráfica del algoritmo del RANSAC en aplicación de evaluación del perfil circular del corte transversal de una tubería.	63
Figura 11. Flujo de trabajo general del sistema de inspección con el algoritmo de ruta de exploración, el algoritmo de escaneo de superficie y la segmentación de nubes de puntos a través de RANSAC.	66

Figura 12. Método #1 de escaneo de superficie. Movimiento del posicionador horizontal-vertical.	67
Figura 13. Método # 2 de escaneo de superficie. Movimiento del posicionador vertical-horizontal.	68
Figura 14 Método # 3 de escaneo de superficie. Movimiento del posicionador únicamente en vertical. Nube de puntos generada con el cambio de posición del RM.	69
Figura 15 Error angular medio para diferentes condiciones de luz. Iluminancia del ambiente 0 LUX (rojo), 100 LUX (azul), 200 LUX (verde). Muestra de 3000 mediciones. ...	78
Figura 16. Ejemplo de señal con la presencia de una fuente de luz (en azul) luz visible en toda la longitud de onda. Parte de la señal de longitud de onda de 633 nm. Representación de la señal en oscuridad total (rojo).....	80
Figura 17. Error espacial medio de las mediciones de distancia hechas con el TVS.	82
Figura 18. Representación del algoritmo de escaneo en configuración experimental. Generación de nubes de puntos con desplazamiento del RM.	85
Figura 19. Montaje experimental. Validación del uso del vector de desplazamiento para la obtención de nubes de puntos completas.....	88
Figura 20. Resultado del escaneo lateral de tubería. Nube de puntos: 1400 mediciones.	89
Figura 21. Sección completa de la tubería después de un segundo escaneo. Nube de puntos: 2792 mediciones.	90
Figura 22. Primer ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t = 0.01$ mm), Ideal, Rojo: Los valores atípicos (se eliminarán del resultado), el azul (Inliers) se mantendrá para el resultado.	91

Figura 23. 2° ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t=0.5$ mm), error medio de TVS, Rojo: Los valores atípicos (se eliminarán del resultado), el azul (Inliers) se mantendrá para el resultado.	92
Figura 24. 3° ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t=0.5$ mm), Rojo (Valores atípicos), Azul (inliers).....	93
Figura 25. 4° ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t = 0.5$ mm), Verde (Inliers), Rojo + (Outliers) con el método de la distancia al centro del círculo, Rojo * (Outliers) con el método del k-vecino más cercano, Azul (posible objeto). Unión de nubes de puntos en la parte superior del perfil del círculo.	95
Figura 26. Vista de la alineación de la nube de puntos de referencia (naranja) y medida (azul).	97
Figura 27. Distribución de frecuencias del error absoluto para la nube de puntos antes de eliminar outliers.....	99
Figura 28. Distribución de frecuencia del error absoluto de la nube de puntos después de la remoción de outliers.	99

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación de fallos por profundidad/dimensiones.....	58
Tabla 2 . Clasificación de Fallas/defectos	73

Abreviaturas

API. American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo)

APS. Advance Photo System (Sistema Avanzado de Fotografía)

CC. Corriente Continua

CCD. Charge-Coupled Device (Dispositivo de Carga Acoplada)

CCT. Circuito Cerrado de Televisión

CMOS. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (Semiconductor Complementario de Óxido Metálico)

CONAHCYT. Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías

FOV. Field of View (Campo de Visión)

LIDAR. Light Imaging Detection and Ranging (Detección de Luz y Rango)

PEMEX. Petróleos Mexicanos

PL. Posicionador Láser

RANSAC. Random Sample Consensus (Consenso de muestras aleatorias)

RM. Robot Móvil

rpm. Revoluciones por minuto

SA. Scanning Aperture (Apertura de Escaneo)

SNR. Signal-to-noise ratio (Relación Señal/Ruido)

TLS. Terrestrial Laser Scanner (Escáner Láser Terrestre)

TVS. Sistema de Visión Técnico

UABC. Universidad Autónoma de Baja California

UAV. Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo no Tripulado)

VANT. Vehículo Aéreo no Tripulado

Símbolos

Símbolo	Nombre	Unidad de Medición
P_i	Punto escaneado o medido	-
$S_{r\#}$	Número de pulsos estándar con una frecuencia de muestreo F_T	-
k	Número de puntos tomados para realizar la medición	-
cf_d	Detección de falla por corrosión	-
$C_{p_{ij}/p_{ij+1}}$	Cambio de posición del centro de circunferencia de la tubería	-
$D_{p_{ij}/p_{ij+1}}$	Cambio de diámetro de la tubería	-
T_v	Posición del RM	-
SS_{ij}	Nube de puntos del escaneo de superficie	-
T	Matriz de transformación	-
$R(z, \theta)$	Matriz de rotación en eje z	-
c, f, g	Constantes del círculo	-
CCS_1	Sistema de Coordenadas Cartesianas	-
α_i	Ángulo de posicionamiento vertical	Grados ($^\circ$)
γ_i	Ángulo de posicionamiento horizontal	Grados ($^\circ$)
β_i	Ángulo de reflexión o detección	Grados ($^\circ$)
$\dot{\theta}_{MR}(t)$	Ángulo entre el eje x del del Sistema Universal de Coordenadas Cartesianas y la propagación de la línea de movimiento del RM	Grados ($^\circ$)
β_R	Graduación o resolución más pequeña del ángulo β_i	Grados ($^\circ$)
F_T	Frecuencia de muestreo	Hertz (Hz)
d_i	Distancia entre el origen del TVS y el punto de reflexión en la superficie del objeto.	Metros (m)
p_i	Longitud de la base del triángulo izquierdo en la vista lateral de la Triangulación Dinámica	Metros (m)
q_i	Longitud de la base del triángulo derecho en la vista lateral de la Triangulación Dinámica	Metros (m)
a	Distancia de separación entre los centros del PL y la SA	Metros (m)
x_i, y_i, z_i	Coordenadas tridimensionales del punto P_i	Metros (m)
$\dot{x}_{MR}(t), \dot{y}_{MR}(t)$	Coordenadas cartesianas del RM en el plano de movimiento	Metros (m)
$d_{SG}(\beta_R)$	Cambio de distancia mínimo que el TVS será capaz de percibir	Metros (m)

$\dot{x}_{MR}(m_u)$	Posición final del RM en realizar una medición	Metros (m)
d_m	Distancia desde el centro del TVS hasta la superficie medida.	Metros (m)
r_{MRW}	Radio de las ruedas del RM	Metros (m)
d_{SGy}	Resolución mínima de desplazamiento lineal	Metros (m)
d_{\min}	Dimensiones mínimas percibidas por el sistema	Metros (m)
\vec{P}_{ij} y \vec{P}_{ij+1}	Vectores de posición de los P_i puntos medidos consecutivamente	Metros (m)
$diff_{p_{ij}/p_{ij+1}}$	Diferencia de profundidad de la superficie	Metros (m)
cll, clu	Límite inferior de la cavidad y el límite superior de la cavidad	Metros (m)
D_{\lim}	Límite de cambio de diámetro	Metros (m)
$v_{MR}(t)$	Velocidad de desplazamiento lineal del RM	Metros por segundo (m/s)
$\omega_{MR}(t)$	Velocidad angular del RM	Radian por segundo ($\frac{rad}{s}$)
ω_{SV}	Velocidad de escaneo del PL	Radian por segundo ($\frac{rad}{s}$)
ω_{MRW}	velocidad angular de las ruedas de RM	Radian por segundo ($\frac{rad}{s}$)
ω_{SA}	Velocidad de rotación de la SA	Revoluciones por minutos (rpm)
C_1, C_2, C_3, C_4, C_5	Intervalos de tiempo en la generación de señal en apertura	Segundos (s)
m_u	Tiempo total de medición	Segundos (s)
m_t	tiempo que tarda el SA en alcanzar k rotaciones completas	Segundos (s)
p_t	Constante de tiempo de procesamiento	Segundos (s)
L_{lA}	Límite de voltaje en señal de SA	Volts (V)

A mi familia. Este logro académico es un reflejo del esfuerzo y la dedicación que han puesto en brindarme una educación firme y sólida. Cada sacrificio, cada jornada de trabajo incansable y cada decisión tomada en mi beneficio han sido la base de este éxito. Su compromiso y amor por mi formación son un regalo que valoro profundamente, más allá de lo que las palabras pueden expresar.

Esta tesis es un testimonio de su sacrificio, amor y apoyo incondicional. Me llena de orgullo poder honrarlos de esta manera.

Los quiero con todo mi corazón.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Actualmente, la industria de los hidrocarburos sigue siendo uno de los principales soportes de la economía de los países. Por lo tanto, todas las actividades relacionadas con esta industria son ideales para la implementación de métodos modernos y actualizados. El uso de tuberías es la forma más eficaz para transportar gas, petróleo o agua. Con el objetivo de evitar pérdidas monetarias o accidentes, se debe garantizar que todos los procesos de transporte involucrados sean óptimos. Actualmente, el material más común utilizado para la construcción de tuberías utilizadas para el transporte de fluidos como el petróleo, el gas y el agua es el acero al carbono API 5L X65, X70 y X80 [1]. Sin embargo, lugares de México como Ciudad Juárez o internacionales como la ciudad de París en Francia mantienen el uso tuberías de concreto para alcantarillado y transporte de agua [2]. Según [3], la mayoría de las tuberías utilizadas en el transporte de hidrocarburos se encuentran bajo condiciones extremas, como temperatura, presión, corrosión, humedad, etc. Este tipo de condiciones pueden provocar desgaste en las tuberías; así que, aun cuando el concreto o el acero son materiales duraderos, las condiciones climáticas extremas reducen significativamente su vida útil. Para evitar accidentes y retrasos en el transporte de los hidrocarburos, se recomienda realizar una inspección periódica a las tuberías que transportan el recurso. Por lo tanto, la inspección de estas es una de las tareas más importantes para la industria. Normalmente, una inspección completa debe detectar diversos parámetros físicos cuyos valores pueden ser cruciales para el funcionamiento normal de la tubería. En su mayoría este tipo de

inspecciones se realiza en sitio, por personal capacitado y de manera visual, por esta razón, la forma más natural de automatizar el proceso de inspección es el uso de sistemas ópticos con múltiples sensores.

En el contexto nacional, según el sitio oficial de Petróleos Mexicanos (PEMEX) [4], hay más de 17,000 kilómetros de tuberías alrededor del Territorio Mexicano; utilizadas para el transporte de hidrocarburos. Estas tuberías difieren en diámetro dependiendo del tipo de rama y el propósito de la estación a la que están conectadas. En su mayoría, el diámetro de las tuberías principales es no menor a 60 centímetros. Los diámetros mínimo y máximo de las ramificaciones de los oleoductos de PEMEX pueden ir desde 15 hasta 120 centímetros respectivamente. Dentro del contexto internacional, se pudo hacer mención de uno de los oleoductos más grandes del mundo, el Trans-Alaska que es un sistema de tuberías con alrededor de 800 millas (1287 kilómetros) de tuberías (solo en su rama principal) con un diámetro de 48 pulgadas (102 cm) [5]. Este oleoducto se encuentra bajo condiciones climáticas de frío extremo debido a su ubicación geográfica. Dado que las condiciones ambientales extremas también afectarán a las herramientas utilizadas y a las personas que realizan dichas tareas, es importante proponer nuevos métodos o herramientas capaces de automatizar la inspección de tuberías. Los ejemplos aquí mencionados representan solo algunos de los lugares en donde se podría implementar el sistema propuesto en este proyecto de investigación.

En la literatura, algunos investigadores han trabajado hacia la automatización y seguridad de la inspección de tuberías. Existen aplicaciones autónomas para la inspección de las condiciones ya sea internas o externas de las mismas [3]. En [6] los autores presentan un esquema de control para un vehículo aéreo no tripulado (VANT o

UAV por sus siglas en inglés) que opera de manera autónoma, que es utilizado para la inspección externa de una tubería con la ayuda del procesamiento de imágenes. En [7] se presenta el diseño e implementación de un robot autónomo usado la exploración de las condiciones internas de la tubería. El trabajo se centra en la capacidad del robot para moverse dentro de la tubería, usando orugas de presión de pared. Por su diseño, el robot presenta limitaciones ya que solo es apto para tuberías de dimensiones reducidas, concretamente de 15 centímetros. En un sistema de tuberías complejo y extenso, podría ser posible que el diámetro varíe dentro de las secciones impidiendo que la inspección sea completa o totalmente automatizada. Además, la tensión de la oruga contra la pared de la tubería debe ajustarse manualmente a las condiciones del entorno, lo que significa más tiempo para iniciar a operar debido al ajuste/calibración necesaria para iniciar el proceso de inspección. Además, para poder moverse con suficiente velocidad a lo largo de la tubería, la oruga debe tener suficiente torque, lo que se convierte en un mayor requerimiento energético debido al alto número de motores de Corriente Continua (CC) en funcionamiento. El sistema de inspección utiliza cámaras, por lo que necesita una fuente de luz para un correcto funcionamiento. Además de que no es totalmente autónomo pues el sistema debe operarse de forma remota.

Los autores en [8] hicieron una revisión de los diferentes robots híbridos que aprovechan la ventaja de dos sistemas de locomoción, esto, los vuelve robustos y flexibles en términos de necesidad de aplicación. Muchos de ellos se enfrentan a restricciones y dificultades similares para realizar tareas objetivas. Como principal desventaja, ninguno de los robots con el sistema de movimiento mencionados en la investigación tiene la capacidad de viajar o inspeccionar tuberías de mayor a menor

diámetro (diámetros cambiantes). Además, según [8] algunos de los principales problemas de los robots de inspección en tuberías supone la incapacidad de navegar con confianza a lo largo de las tuberías y sus ramificaciones. En [9] se utiliza estéreo visión para detección de defectos, las cámaras a bordo del sistema requieren iluminación, sin esta, la calidad de mapeo disminuye. El tiempo de procesamiento para las imágenes adquiridas por 3 cámaras es muy alto debido a la gran cantidad de datos que proporciona cada imagen tomada, además, una gran cantidad de información adquirida se vuelve irrelevante cuando se busca un punto particular en la imagen, como el perfil de una superficie adquirida por el escáner láser en la aplicación mencionada por el autor de [9]. La relación entre la resolución de píxeles de la cámara y el grosor del láser crea la necesidad de encontrar el punto medio del rayo láser proyectado sobre la superficie para ubicar con precisión el centro de la sección circular de la tubería, esta acción aumenta significativamente el número de acciones necesarias para llegar a la medición deseada. En [7] el robot móvil puede viajar a través de la tubería, esto, siempre y cuando se integren elementos de detección extras; como resultado es necesario agregar varios sensores adicionales para obtener un dispositivo totalmente autónomo.

En [10] se hace una revisión sobre las técnicas de monitoreo de tuberías. Entre las técnicas visuales más populares utilizadas en la actualidad se encuentran el Circuito Cerrado de Televisión (CCT por sus siglas en ingles) y el Escáner Láser. El tiempo de ejecución, el requerimiento de memoria y el costo de energético de los distintos métodos de detección siguen siendo aspectos importantes por mejorar. En cuanto a los escáneres láser, en la aplicación de escaneo de superficies, los datos adquiridos normalmente tienden a distorsionarse por la distancia a la superficie, la longitud de onda emisora del

láser y los ángulos de incidencia. A pesar de que existen algunos métodos que buscan disminuir este nivel de distorsión [11], esto agrega complejos algoritmos de análisis que aumentan el tiempo de procesamiento.

Debido al enfoque de esta investigación que es la implementación del escáner láser, se establece la evolución cronológica y actualidad de estos sistemas y su uso en aplicaciones de posicionamiento y escaneo de superficies. Los escáneres láser se han consolidado como herramientas clave en una amplia variedad de procesos de medición, especialmente aquellos que requieren la recolección de información del entorno de manera remota o sin contacto físico directo. Su rango de aplicación es extenso, desde la medición de longitudes hasta la adquisición de datos topográficos y otras características del ambiente. A diferencia de los instrumentos de medición a contacto, como los instrumentos tipo lápiz (Stylus Instrument) [12], los escáneres láser, siendo dispositivos ópticos, tienen la capacidad de capturar una cantidad similar de información a una velocidad considerablemente más alta. Esta ventaja en velocidad se ha demostrado en diversas investigaciones, como en [13], donde se presenta un escáner láser de imágenes de alto rango dinámico, o en [14], que describe el desarrollo de un escáner láser para escaneo lineal rápido. Asimismo, en [15], se muestra la aplicación de un escáner láser para estudiar las condiciones de luz en la parte baja de los bosques dentro de los ecosistemas forestales, mientras que [16] destaca las ventajas de utilizar un escáner láser 3D para la documentación espacial de sitios históricos.

Por otro lado, el sistema láser de escaneo rotacional utilizado como herramienta principal en este trabajo de investigación ha sido objeto de desarrollo en investigaciones recientes como [17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26]; se observó que su

principal punto débil es una sensibilidad significativa al ruido de la luz ambiental y, en consecuencia, una mayor incertidumbre de medición debido a este factor. Sin embargo, el sistema disminuye naturalmente su incertidumbre cuando opera en completa oscuridad, además, el ruido, las pérdidas energéticas y la vida útil de la batería aumentan. Al mismo tiempo, en completa oscuridad, cuando los dispositivos ópticos tradicionales basados en cámaras de cualquier tipo (APS, CMOS, CCD, ojo de pez omnidireccional, etc.) son casi incapaces de funcionar, el sistema óptico solo aumenta sus habilidades operativas.

La inspección de tuberías representa un desafío técnico significativo, especialmente en condiciones de oscuridad total y locaciones de difícil acceso. Las tecnologías actuales, aunque avanzadas, presentan limitaciones en cuanto a la identificación de defectos complejos, la eficiencia en la adquisición de datos y la adaptabilidad a diferentes condiciones. Este trabajo se enfoca en la solución de esas limitaciones al desarrollar un sistema de escaneo tridimensional capaz de operar en condiciones adversas, contribuyendo al mantenimiento estructural de tuberías utilizadas para el transporte de agua, gas y petróleo.

La motivación de la investigación es la generación de un método de barrido tridimensional en condiciones de oscuridad total con aplicación en la inspección de tuberías que transportan insumos como el agua, el gas, y el petróleo. La aportación más relevante será la aplicación e integración de un método de escaneo y análisis de datos que se ajusta naturalmente a la aplicación mencionada y a las características de sistema, garantizando un funcionamiento óptimo incluso en condiciones cambiantes y en lugares de difícil acceso.

El sistema aquí propuesto está destinado a la inspección de la superficie interna de la tubería, útil para los especialistas en mantenimiento estructural. Es capaz de localizar defectos complejos y en ubicaciones difícil acceso. Durante la experimentación con el prototipo más reciente en un modelo de tubería, se descubrieron otras ventajas significativas del sistema, mismas que refuerzan la relevancia de esta investigación.

En este documento se presenta un nuevo algoritmo de escaneo para el Sistema de Visión Técnica (TVS por sus singlas en inglés), utilizado para evaluar la condición interna de una tubería. Este sistema permite que un mecanismo robótico realice inspecciones detalladas, identificando obstrucciones, perforaciones y desgaste estructural. El sistema de escaneo propuesto es capaz de planificar rutas, mapear superficies, identificar defectos, y almacenar datos para su posterior procesamiento. Además, teniendo dimensiones similares al robot de [7] el sistema propuesto es adecuado para una gama más amplia de diámetros de tubería que van desde 220 mm hasta 1022 mm. En ambientes oscuros el escáner funciona correctamente aun sin un sistema de iluminación adicional externo o integrado como los de [6], [9], [10]. También, a diferencia de [9] las señales TVS por naturaleza superan la necesidad de una etapa de preprocesamiento para encontrar el rayo láser.

La metodología de escaneo desarrollada permite reducir los efectos mencionados en [9], [11] al optimizar el posicionamiento espacial de sistema, lo que asegura condiciones físicas óptimas para la propagación del láser a través del canal óptico. El enfoque o formalismo matemático implementado optimiza la adquisición de datos del sistema y la identificación de las características físicas de la superficie de la

tubería. Esto, al reducir el tiempo de cálculo y evitar la necesidad de un flujo de información redundante, mejorando la confiabilidad y eficiencia del sistema.

Este texto se organiza de la siguiente manera: en esta introducción, se hace un recuento de antecedentes pertinentes al tema en donde se menciona el funcionamiento y teoría del escáner, la amplia variedad de aplicaciones que posee, las ventajas de la implementación del escáner láser, conceptos de óptica y el estado del arte de sistemas y métodos de barrido en ambientes oscuros para la aplicación de interés. Posteriormente, se plantea la problemática, la justificación, y se delimitan el objetivo general y los objetivos específicos de investigación. Con base en la información planteada se construye la hipótesis sobre la que se dirigirá la investigación. En la segunda sección se presentan los conceptos teóricos del Sistema de Escaneo; Se describe los detalles del diseño, incluidos los aspectos electromecánicos y los requerimientos de la aplicación en inspección de tuberías. La tercera sección detalla la metodología de escaneo desarrollada para adquirir nubes de puntos precisas en las condiciones físicas específicas para la evaluación de tuberías. Posteriormente, se presenta la experimentación realizada para validar el método de escaneo, incluyendo el enfoque matemático utilizado para la identificación de defectos mediante la segmentación de nubes de puntos. Finalmente, las discusiones y conclusiones enfatizan las aportaciones de la investigación y su impacto.

Tomando en cuenta lo anterior, se presenta este trabajo de investigación que presenta una solución innovadora para el escaneo de tuberías, contribuyendo al avance de las tecnologías de inspección estructural.

1.1.1. Escáner Láser

La aplicación de escáneres láser varía según el objetivo principal y el sistema de adquisición requerido para cada tipo de escáner. Estas tecnologías han experimentado una expansión significativa en diversas áreas. Se emplean para obtener imágenes tridimensionales de alta precisión de la boca de pacientes en el área de la odontología, para inspección de plantaciones en el ámbito de la agronomía dando como resultado el estado o salud de los diferentes elementos inspeccionados, o ampliamente utilizados como sistemas de referencia para dispositivos de posicionamientos en distintas aplicaciones. En el monitoreo en la calidad de soldadura o estado de las estructuras soldadas, para obtención tomografías de salud estructural, y en la navegación de enjambres robots móviles. Los escáneres láser, como los sistemas LIDAR (Light Imaging Detection and Ranging), son una tecnología avanzada de detección remota con múltiples aplicaciones gracias a su amplio rango de operaciones, la versatilidad de los algoritmos que emplean, y la variedad de componentes que los conforman.

Como se menciona en [27], existen diferentes tipos de escáneres láser, tanto en el ámbito industrial como en el de investigación, cada uno con metodologías propias para realizar mediciones. No obstante, todos comparten una tarea común: escanear superficies mediante medios ópticos y procesar la información obtenida con un sensor especializado. Este procesamiento se lleva a cabo utilizando métodos matemáticos innovadores o procesadores de alta capacidad. Los sistemas electromecánicos son los más eficientes en términos de precisión, capaces de medir coordenadas en 3D con exactitud micrométrica. Sin embargo, su desempeño está limitado por las propiedades

mecánicas inherentes a estos sistemas. En [28], se analizan las fuentes de incertidumbre asociadas con los escáneres láser. que manejaran los diferentes tipos de escáneres láser.

1.1.2. Sistema de Visión Técnica

El Sistema de Visión Técnica (TVS, por sus siglas en inglés: Technical Vision System), que se presenta en esta investigación, es un escáner láser tridimensional basado en el principio de triangulación dinámica. Este sistema consta de dos nodos principales: uno fijo en la posición deseada y otro que rota a velocidad constante. Ambos nodos son controlados por motores. En el capítulo del marco teórico se expone detalladamente la información sobre los conceptos teóricos y el funcionamiento del sistema. Además, los factores de incertidumbre asociados con este sistema han sido abordados en investigaciones previas, como en [29] y [30].

1.1.3. Aplicaciones del TVS

El TVS presenta una amplia gama de aplicaciones. Un ejemplo de su uso es la propuesta en [31], donde se sugiere su implementación para el monitoreo de la curvatura en la espalda de pacientes con escoliosis. En [32], se utiliza el escaneo tridimensional proporcionado por el TVS para la navegación de robots autónomos. Un enfoque similar se describe en [33], pero en este caso se emplea para la navegación de un grupo de robots que operan en enjambre. En [34], el TVS se utiliza para medir la salud estructural de edificios, indicando puntos de interés y posibles desplazamientos ocurridos con el tiempo.

Además de estas aplicaciones, el sistema tiene un potencial aún sin explorar en varios campos, lo que deja abierta la posibilidad de nuevas investigaciones y propuestas de implementación en áreas aún no estudiadas.

1.1.4. Conceptos de óptica

El funcionamiento de este escáner láser se basa en conceptos ópticos que se describen brevemente a continuación. El escáner emite un haz láser desde un emisor hacia el objeto que se está observando. Este haz se refleja en la superficie del objeto y la reflexión es captada por el sensor del escáner. Para entender cómo se detecta esta reflexión, es importante conocer los dos tipos de reflexión de la luz: especular y difusa.

Cuando un rayo de luz incide sobre una superficie reflectante lisa, similar a un espejo, la luz se refleja de acuerdo con la Ley de Reflexión, que establece que el ángulo de reflexión será igual al ángulo de incidencia. Este fenómeno se conoce como reflexión especular. En cambio, cuando el rayo de luz incide sobre una superficie rugosa, como la piel humana, los rayos se dispersan en múltiples direcciones. Este fenómeno se denomina reflexión difusa. Es importante destacar que muchos materiales presentan una reflexión mixta, que combina tanto la reflexión especular como la difusa

1.1.5. Actualidad de los barridos en oscuridad

En [35] se presenta un escáner láser el cual basa su funcionamiento en la tecnología LIDAR y es utilizado para a recreación tridimensional del avance en la excavación de túneles en la construcción de autopistas. En este caso, cuando un túnel está en condiciones plenas de luz no puede considerarse como un sistema totalmente

aislado. Por lo tanto, la metodología del escáner láser presentada en este trabajo no tendría confiabilidad para la tarea que se desea desarrollar.

Un repaso de los últimos 10 años acerca de los Terrestrial Láser Scanner (TLS) o Escáneres Láser Terrestres y sus tecnologías es realizado a detalle en [36]. Con objetivo de realizar reconocimiento superficial de cuevas en tareas de inspección o espeleología. Utilizando también la tecnología de medición del rango de luz del LIDAR. Además, se indica la ventaja del escáner láser para la medición de puntos en modelados tridimensionales a pesar de la falta de luz en el ambiente. El autor menciona la especial importancia al procesamiento de los datos recolectados para poder generar modelos tridimensionales adecuados de las zonas de interés. En [37] se muestra la utilidad de la tecnología láser, aquí se presenta un escáner que trabaja independientemente de las condiciones de luz del ambiente en que se encuentra, dándole esta característica utilidad en la inspección de tuberías. Para realizar la tarea específica y evitar la dependencia de las condiciones de luz se explota la habilidad de medir el rango e intensidad de la señal luminosa emitida por el escáner.

Aun cuando existen trabajos de investigación acerca de las aplicaciones comentadas la gran mayoría basan su funcionamiento en la tecnología del LIDAR. Con esta investigación se propone un nuevo método de barrido basado en el escáner presentado a detalle en la sección pertinente el cual no se vea afectado por las condiciones de falta de luz en ambientes de poca luminosidad.

A continuación de la exposición de los antecedentes relevantes para el tema, se procederá con la formulación y delimitación del problema que se aborda en esta investigación.

1.2. Planteamiento del problema

El sistema de posicionamiento en tres dimensiones patentado y desarrollado en la UABC por el Instituto de Ingeniería basa su principio de operación en la triangulación dinámica y realiza mediciones por medio de barrido laser. En la sección de antecedentes me hizo mención de las aplicaciones prácticas de este Sistema de Visión Técnica (TVS) las cuales son muy diversas, desde la medición en la curvatura de la espalda en aplicaciones médicas hasta la navegación de robots móviles. Sin embargo, a pesar de su versatilidad, aplicaciones para barridos espaciales en condiciones extremas de aislamiento óptico no han sido abordadas previamente.

En investigaciones previas y experiencia práctica con el sistema, se ha demostrado la ventaja del TVS con respecto a otro tipo de escáneres cuando existen condiciones de iluminación insuficientes. Mientras que los escáneres que utilizan cámaras se ven afectados negativamente por la falta de luz, perdiendo precisión y confiabilidad, el TVS se beneficia de la ausencia de ruido óptico generado por otras fuentes de luz. Esto le permite tener un rendimiento superior en la medición bajo estas condiciones adversas.

Con base en esas ventajas, se propone utilizar el TVS en operaciones de inspección de áreas oscuras o aisladas totalmente de la luz, y de difícil acceso para el ser humano. Ejemplos de estas aplicaciones incluyen la inspección interna de tuberías, de gas, petróleo (oleoducto), gasolinas (como las utilizadas por las empresas multinacionales) o inspección en minas con difícil acceso y peligro de derrumbe.

Sin embargo, para implementar con éxito esta idea, y a partir de este nuevo concepto de aplicación, surge la necesidad de desarrollar métodos teóricos de barrido en condiciones de oscuridad. Los cuales aprovechen la ventaja mencionada anteriormente y optimicen el funcionamiento del TVS en estas aplicaciones. Además, es necesario establecer, una serie de restricciones tanto físicas, mecánicas y eléctricas aseguren un desempeño adecuado del sistema en la aplicación.

De este modo, se plantea la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuál es la metodología de barrido más adecuada para el TVS en ambientes de oscuridad total, y cuáles son los aspectos del escáner que deben considerarse para la inspección de la superficie interna de tuberías?

Este trabajo busca responder esta pregunta desarrollando un marco teórico y experimental que permita optimizar el TVS para aplicaciones en condiciones de oscuridad extrema. Después de planteada la problemática a enfrentar, se realiza una justificación adecuada la cual indica las ventajas de realizar esta investigación.

1.3. Justificación y uso de resultados

En el apartado de antecedentes de esta investigación se destacan las notables ventajas de los escáneres láser en comparación con otros dispositivos de medición que emplean métodos o tecnologías diferentes. Entre las muchas fortalezas, los escáneres láser sobresalen por su alta velocidad tanto de captura de datos como en obtención de mediciones precisas. Además, se hace énfasis en la ventaja del TVS a la operación en condiciones mínimas de luz. Para aprovechar esta ventaja se propone utilizar el sistema en barridos espaciales de ambientes con oscuridad total como es la inspección de tuberías. De esta ventaja e idea de aplicación, surge la necesidad de este trabajo de investigación para nivel de doctorado. Al utilizar el TVS patentado por el Instituto de Ingeniería de la UABC, se facilitará el trabajo de futuros investigadores que deseen desarrollar y ampliar el uso de este sistema en aplicaciones innovadoras. Esto, porque al asegurar el funcionamiento del escáner en un ambiente diferente, idea que no ha sido desarrollada totalmente por los anteriores investigadores, se generaran nuevas líneas de investigación y posible desarrollo de tecnología utilizando el escáner. Proporcionando temas de investigación futuros para nuevos alumnos tanto de maestría y doctorado. También áreas de la industria que vean útil la implementación de este Sistema de Inspección en sus actividades y procesos, como pueden ser las empresas petroleras que realizan inspecciones obligatorias en sus tuberías.

En función de lo anterior, se considera justificada la realización de un trabajo doctoral y la elaboración de una tesis en esta línea de investigación.

1.4. Objetivos de la investigación

Después de describir la problemática principal de esta investigación y justificar la importancia de su realización, se establecen el alcance y las limitaciones del estudio mediante la formulación y establecimiento de un objetivo general y varios objetivos específicos.

1.4.1. Objetivo general

Este proyecto de doctorado tiene como objetivo principal el desarrollo de un método preciso de barrido tridimensional para la adquisición dinámica (en movimiento) de nubes de puntos en condiciones de oscuridad total y el posterior análisis de datos que posibiliten la identificación de defectos y fallas estructurales que se pueden encontrar en la inspección de tuberías que transportan insumos como el agua, el gas, y el petróleo.

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Revisar los factores relevantes durante una inspección automatizada de tuberías de petróleo, gas o agua.
- 2) Investigar y analizar la tecnología y metodología del TVS en su estado actual, para determinar las modificaciones necesarias al prototipo que posibiliten validar el método de barrido tridimensional.
- 3) Investigar y analizar los fenómenos y comportamientos ópticos pertinentes a la aplicación que aprovechen las características del sistema en la inspección de tuberías.

- 4) Analizar el complejo de las fuentes físicas de error de barrido en condiciones de oscuridad y las condiciones necesarias en las actividades de la implementación (como la resolución mínima del instrumento de medición en una inspección de tuberías o las características de las superficies) con el fin de desarrollar el plan de medidas teórico-prácticas para el barrido a desarrollar.
- 5) Experimentación y recolección de mediciones en condiciones de laboratorio con el método de barrido desarrollado.
- 6) Estimar los errores asociados a las mediciones obtenidas mediante el nuevo método de barrido, y llevar a cabo un análisis estadístico detallado de la distribución de incertidumbre, para evaluar la precisión y confiabilidad del sistema.

1.5. Hipótesis

Al proponer este trabajo de investigación enfocado en el desarrollo de un método de barrido preciso para oscuridad total se plantea la siguiente hipótesis:

El desarrollo de un método de escaneo láser basado en la tecnología de visión espectral (TVS) permitirá realizar barridos de alta precisión en condiciones de oscuridad total, como las presentes en la inspección de tuberías. Dicho método garantizará tanto precisión como resolución metrológica en la captura de datos, posibilitando la identificación precisa de defectos estructurales en las superficies internas de las tuberías incluso en ausencia total de iluminación.

2. Marco teórico/ Fundamentos

Para poder profundizar en la temática que este trabajo de investigación plantea y proveer de fundamento teórico se investigara en literatura especializada la construcción y detalles teóricos y técnicos del TVS, aplicaciones y avances recientes del grupo de investigación, así como teorías y avances en el campo de la óptica que sean utilices para alcanzar el objetivo deseado. Se realizará un estudio de los componentes que conforman el sistema de barrido del prototipo # 3 y se determinara su correcto funcionamiento para la tarea deseada. Se ampliará la investigación de barridos en condiciones de oscuridad y aplicaciones similares de la actualidad para determinar el correcto rumbo del diseño de los métodos de barrido. Se determinará la mejor configuración, y método de barrido para el diseño. Con base en la investigación bibliográfica se procederá a analizar los elementos pertinentes que afecten las mediciones en condiciones de falta de luz. Realizando una primera etapa de experimentación en laboratorio. Después de identificados los factores que afecten al error en las mediciones de este tipo de barridos se procederá a su compensación o eliminación por medio del procesamiento de los datos medidos. Después de implementada la metodología de barrido al TVS se procederá a una segunda etapa de experimentación en laboratorio. Mediante métodos estadísticos y conceptos metrológicos se establecerán las nuevas especificaciones de funcionamiento del sistema en condiciones de ausencia de luz para la inspección de tuberías.

Para poder adentrarse en las especificaciones y requerimientos necesarios en la aplicación se realizará una investigación sobre el tema de interés.

2.1. Sistema de escaneo

El escáner láser denominado Sistema de Visión Técnico o TVS por sus siglas en inglés (Technical Vision System) es el principal elemento de medición utilizado para los escaneos del sistema de inspección aquí propuesto. En la Figura 1 se puede observar el modelo 3D del TVS.

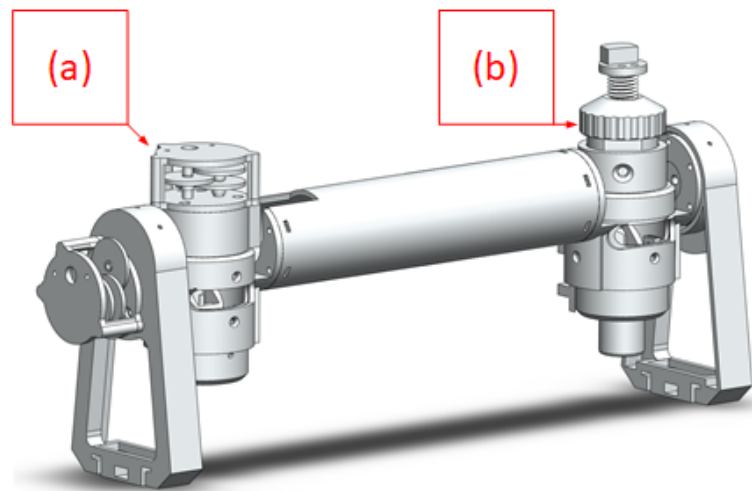


Figura 1. Modelo 3D del Escáner Láser o TVS. a) Nodo de emisión. b) Nodo de detección.

El escáner introducido en [17], [18] basa su funcionalidad en la reflexión de un rayo láser dirigido a la superficie de un objetivo. El TVS ha sido ampliamente utilizado en distintos escenarios. Numerosos experimentos confirman que la precisión del sistema mejora al aislarlo de fuentes de luz externas que no sean el propio láser. Los entornos iluminación, como aquellos en presencia de la luz del día al aire libre, producen señales inestables con altas relaciones señal/ruido o SNR por sus siglas en inglés (Signal-to-noise ratio), lo que provoca errores de medición o la necesidad de agregar complejos

filtros de señales como etapa de acondicionamiento de la señal. En cambio, los entornos oscuros producen señales bajo nivel de SNR, lo que mejora la precisión. Este aislamiento, que suele ser un inconveniente, resulta ventajoso para la inspección en la tubería, ya que garantiza una mayor calidad de la señal al eliminar la interferencia de luz externa. La oscuridad interna propaga las señales de forma óptima, lo que permite un funcionamiento preciso del escáner.

El TVS consta de dos nodos principales, un elemento emisor de láser, que es la parte activa del sistema, y un elemento sensor electroóptico, que considera el nodo pasivo o de detección. El emisor (Figura 1-a) utiliza un láser rojo en la longitud de onda de 633 nm. Para dirigir el láser hacia una región de interés se utilizan motores de corriente continua (CC) y un conjunto de espejos con corte a 45° y lentes biconvexas, este mecanismo se denomina Posicionador Láser (PL). El PL proporciona al TVS la capacidad de apuntar a cualquier punto en el espacio por medio de los ángulos de posicionamiento α_i, γ_i , el ángulo de posicionamiento vertical y horizontal respectivamente.

La Apertura de Escaneo (SA por sus siglas en inglés Scanning Aperture) es el nodo de detección, consta de un espejo con corte a 45° montado en una base que se encuentra en rotación constante y es impulsada por un motor de CC que puede alcanzar hasta 17000 revoluciones por minuto (rpm) (Figura 1-b). En este espejo se recibe y redirige la energía del láser que es reflejada desde la superficie del objeto al cual se está apuntando. La reflexión de la energía que llega al espejo es enfocada con dos lentes biconvexas a un fototransistor BPW77NB denominado “sensor de paro”. El fototransistor es sensible a la radiación visible e infrarroja cercana (en un ancho de banda

de 480 a 1080 nm) con tiempos de respuesta rápidos (tiempo de encendido/apagado entre 5-6 μs). En la base giratoria del espejo, se encuentra un optoacoplador (llamado “sensor cero”) utilizado para realizar un seguimiento de la rotación y proporcionar una señal en cada instante de tiempo en el que realiza una rotación del espejo. Con la señal del optoacoplador (rotación) y el fototransistor (energía reflejada del láser) es posible calcular el ángulo de reflexión β_i . En la Figura 2 se muestra un diagrama detallado de la SA.

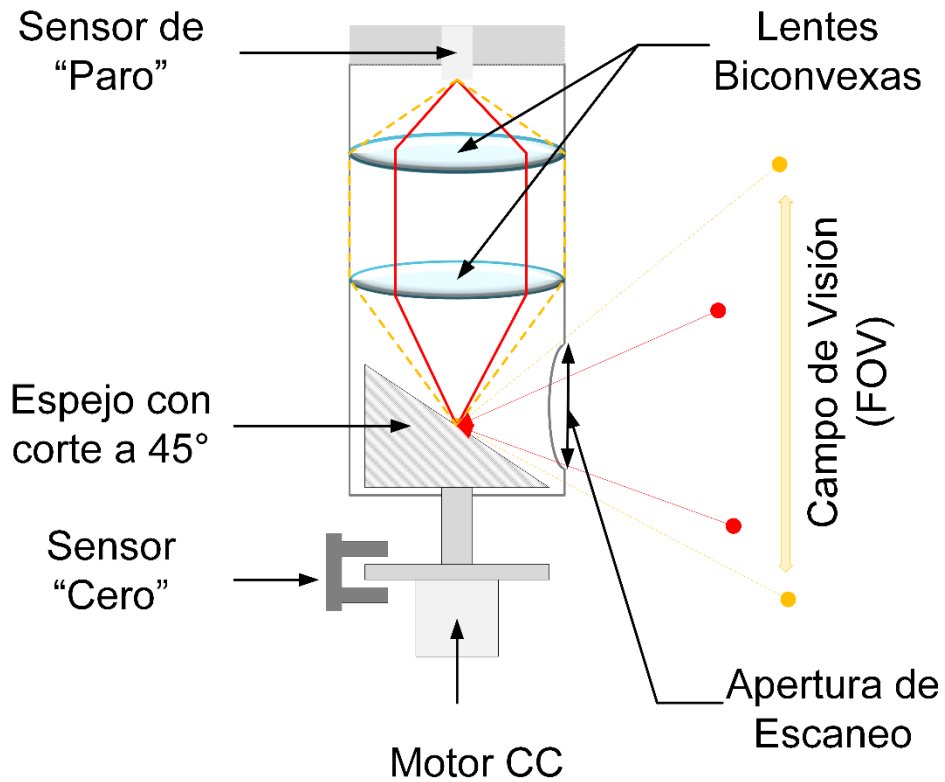


Figura 2. Diagrama de la Scanning Aperture (en Inglés)(SA) o Apertura de Escaneo.

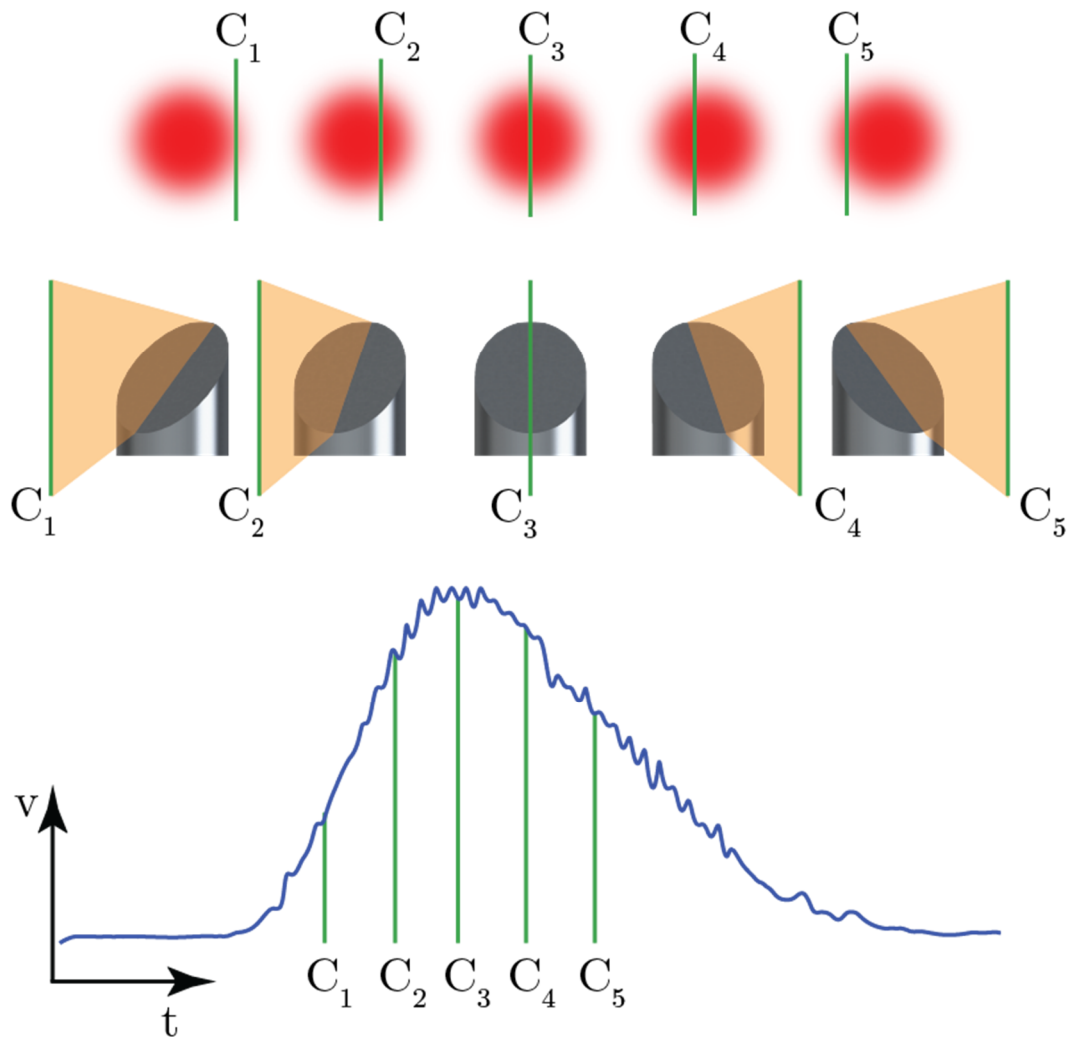


Figura 3. Generación de la señal de detección.

En la Figura 3 se puede ver como se genera la señal de recepción o detección en la SA. Una gráfica que indica el comportamiento de voltaje en el fototransistor con respecto al tiempo en los intervalos específicos C_1 hasta C_5 . Aquí se puede ver como la señal en el fototransistor aumenta su nivel de voltaje a medida que el espejo se acerca al centro energético de la mancha de láser que se proyecta en la superficie del objeto y a medida que este se aleja de la misma el nivel de voltaje decrece. De esta forma, se obtiene una señal con forma de campana de Gauss que puede ser procesada para

encontrar el instante de tiempo en el que la SA se encontró alineada al punto preciso del centro energético de la mancha de laser en la superficie del objeto apuntado.

Con esta señal es posible calcular el ángulo de rotación en el que se encuentra la apertura y formar un triángulo con el que se pueden conocer las coordenadas del punto en la superficie del objeto por medio de la Triangulación Dinámica.

2.1.1. Triangulación Dinámica

Con los ángulos $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ y una separación conocida entre los dos elementos (SA y PL), las coordenadas espaciales del punto de reflexión en la superficie del objeto se pueden calcular mediante el uso de la ley de senos. Esta teoría se denomina Triangulación Dinámica y se representa desde su vista superior y lateral en la Figura 4 y Figura 5 respectivamente.

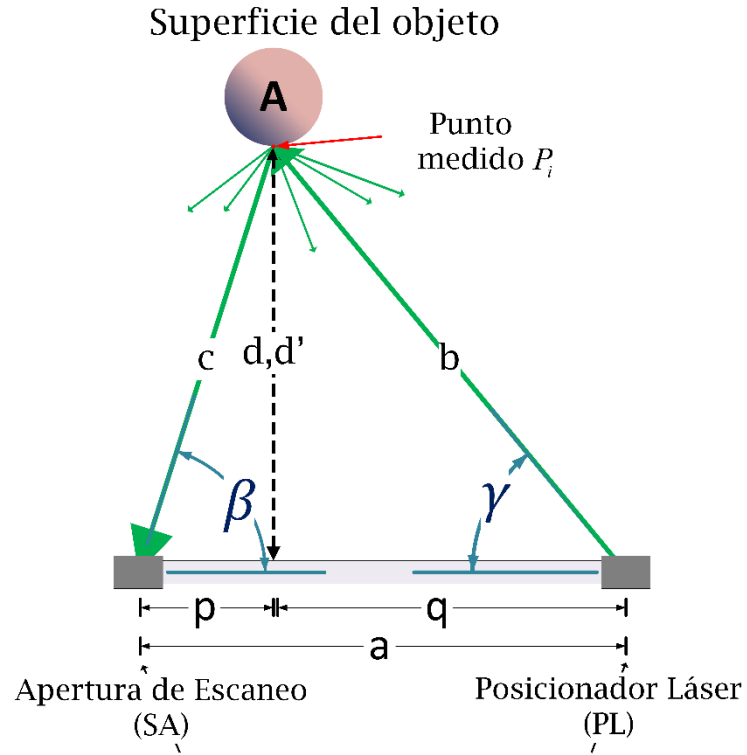


Figura 4. La Triangulación Dinámica desde su vista superior (representación gráfica).

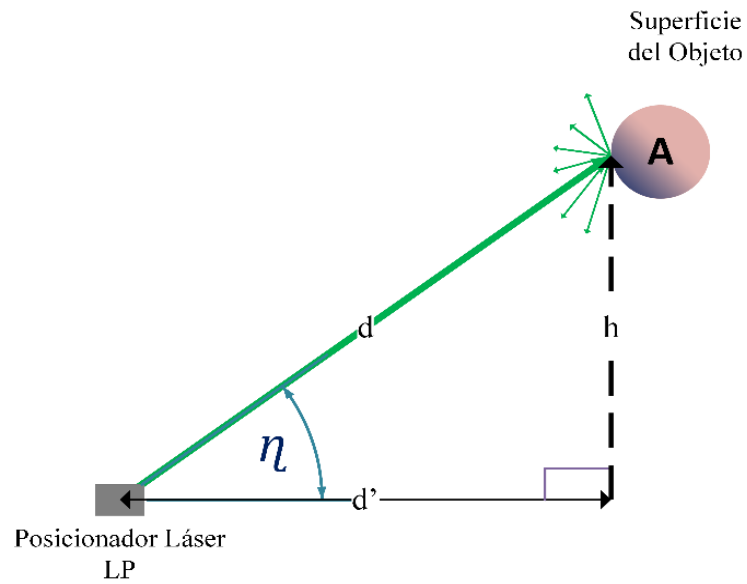


Figura 5. La Triangulación Dinámica: Representación gráfica de la vista lateral.

La construcción detallada y los principios del escáner láser con conceptos teóricos se han presentado en trabajos como [17], [18].

Las ecuaciones (1),(2) y (3) detallan el cálculo para la obtención de las distancias p_i , d_i y q_i .

$$d_i = a \frac{(\text{sen } \beta_i)(\text{sen } \gamma_i)}{\text{sen}(\beta_i + \gamma_i)} \quad (1)$$

$$p_i = \frac{d_i}{\tan \beta_i} = a \frac{(\cos \beta_i)(\text{sen } \gamma_i)}{\text{sen}(\beta_i + \gamma_i)} \quad (2)$$

$$q_i = \frac{d_i}{\tan \gamma_i} = a \frac{(\text{sen } \beta_i)(\cos \gamma_i)}{\text{sen}(\beta_i + \gamma_i)} \quad (3)$$

Aquí, d_i , es la distancia calculada entre el origen del sistema de coordenadas del TVS y el punto de reflexión en la superficie del objeto, p_i es la longitud de la base del triángulo izquierdo en la vista superior (formado entre la SA, el punto de reflexión P_i en la superficie del objeto A y el punto en el que se unen p_i y q_i) y q_i es la base del triángulo derecho en la vista superior (formado entre el PL, el punto de reflexión P_i y el punto en el que se unen p_i y q_i), por último a es la distancia de separación entre los centros del PL y la SA.

Las coordenadas tridimensionales x_i , y_i y z_i del punto escaneado o medido P_i se calculan por medio de las ecuaciones (4), (5) y (6).

$$x_i = a \frac{(\text{sen } \beta_i)(\text{sen } \gamma_i)}{\text{sen}(\beta_i + \gamma_i)} \quad (4)$$

$$y_i = a \left(\frac{1}{2} - \frac{(\text{sen } \beta_i)(\text{sen } \gamma_i)}{\text{sen}(\beta_i + \gamma_i)} \right) \quad (5)$$

$$z_i = a \left(\frac{\tan(\alpha)(\text{sen } \beta_i)(\text{sen } \gamma_i)}{\text{sen}(\beta_i + \gamma_i)} \right) \quad (6)$$

Las características electrónicas, mecánicas y de diseño del TVS crean limitaciones para el libre movimiento de los elementos, restringiendo el Campo de Visión del sistema, FOV por sus siglas en inglés (Field of View). Aunque el campo de visión del TVS no es esférico completo (360 grados horizontales/verticales), es suficiente para realizar mediciones espaciales con el escáner, como se ha demostrado ampliamente a través de varios trabajos de investigación como [17], [18], [19], [20], [21], [38].

2.1.2. Diseño del Robot

Aunque en esta investigación se analiza la metodología para la inspección precisa de tuberías con el TVS, cualquier tipo de mecanismo robótico o Robot Móvil (RM) podría adaptarse para trabajar con el sistema de escaneo. Sin embargo, para demostrar experimentalmente la funcionalidad del método de inspección aquí propuesto se seleccionó un robot móvil para trabajar en conjunto con el escáner. El robot móvil Smart Robot Car Kit V2.0 de ELEGOO se utiliza comúnmente para tareas de navegación autónoma en la literatura científica [39], [40], [41], [42]. Estas investigaciones demuestran que es una herramienta más que adecuada para la etapa de desarrollo de este sistema de inspección aun cuando está diseñado para propósitos didácticos.

Después de seleccionado el RM a utilizar se hizo un rediseño significativo al robot, montando el prototipo número #3 del TVS (denominado “mini TVS”) y agregando otros elementos relevantes para la operación en la etapa de experimentación.

Los elementos extras agregados al RM, así como los componentes del TVS fueron elaborados mediante la tecnología de impresión 3D. Entre los objetivos de las modificaciones se encuentran, acercar al suelo el centro de masa del dispositivo y mejorar la precisión del giro las ruedas que impulsan al robot para evaluar de mejor manera la aplicación del método de escaneo con el algoritmo aquí propuesto.

El sistema de inspección se encuentra detallado en la Figura 6. Ahí, se pueden observar el escáner láser o TVS y el Robot Móvil. Como se mencionó, el TVS se montó en la plataforma del RM, por medio de una base impresa en 3D. El RM tiene ruedas de 6.5 cm de diámetro y puede transportar entre 300 y 500 gramos sin afectar el tiempo de vida de la batería y hasta 2 Kg de peso máximo. La capacidad de tracción de las ruedas y motores permite que el sistema de inspección se desplace a lo largo de la tubería incluso si hay elementos contaminantes en la superficie como agua, aceite y otros fluidos transportados por tuberías.

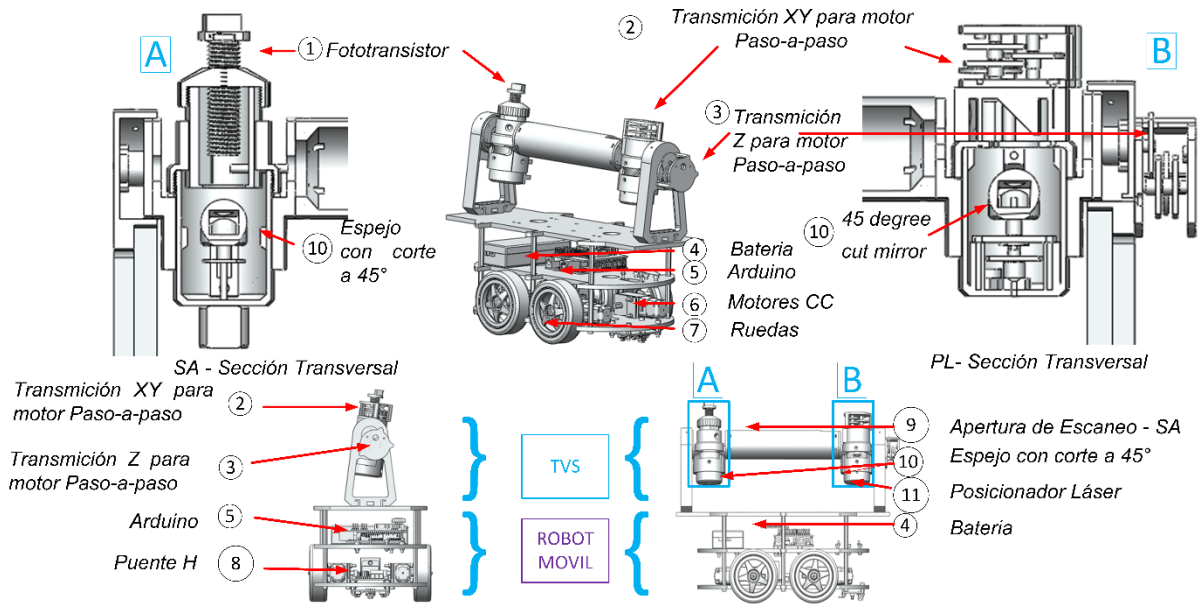


Figura 6. Hardware del sistema de inspección de tuberías – Modelo 3D. A es la sección transversal de la apertura de escaneo (SA). B es la sección transversal del posicionador láser (PL).

En la figura se pueden observar los elementos del RM, 4 ruedas dan tracción al robot, y son propulsadas por motores CC con caja reductora y que funcionan en un rango de 3V a 6V con corrientes de entre 100 mA a 1 A con cargas máximas. La reducción de engranes típica de estos motores es de 1:48 y se aumentó el rango de esta reducción agregando una nueva transmisión con relación de 1:148. De esta manera, el RM puede alcanzar bajas velocidades de movimiento (ideal para evaluar el método de barrido aquí propuesto). Las ruedas del robot son energizadas a través un puente H utilizado como etapa de potencia y una batería de 6 V a bordo del robot. Las señales de movimiento al robot se envían mediante un Arduino MEGA.

En la parte electrónica del TVS se fabricaron circuitos impresos para una portabilidad más adecuada de los circuitos de escáner, además, el circuito principal de control del TVS se separó en 3 módulos principales; uno para operación del PL, otro

para operación de la SA y un último para control del sistema y adquisición de los datos. Para la etapa de adquisición de las señales, procesamiento de los datos y la programación de las secuencias de barrido en el TVS se utiliza un Teensy 4.0.

El TVS es montado en paralelo al eje más largo del RM, para lograr de esta manera que el TVS se encuentre de frente a la superficie a evaluar y aprovechar en mayor medida las zonas de mayor precisión del FOV del TVS.

Este diseño, enfocado en la aplicación, y la metodología de escaneo tienen como objetivo optimizar el trabajo colaborativo del robot y el TVS fortaleciendo las propiedades de escaneo del sistema.

Debido al aumento en el rendimiento del TVS en ambientes oscuros (demostrado en la sección de "Experimentación"), el sistema no requiere una herramienta de iluminación integrada. Sin embargo, si es necesario, se puede agregar una herramienta de iluminación o un sistema de linterna al diseño robótico, como el presentado en [9]. El hecho de que no exista necesidad de una fuente de luz es beneficioso en el ahorro de energía en comparación con otros sistemas utilizados para la inspección interna de tuberías, como aquellos en [9], [43]. Ahorrar energía es útil en un escaneo totalmente automatizado ya que de esta manera se puede alcanzar una mayor distancia de tubería inspeccionada con la misma batería.

2.2. Análisis Geométrico y Modelado Cinemático.

En la siguiente sección se describen los algoritmos y los aspectos matemáticos del método de escaneo de tuberías propuesto. Esta propuesta realiza mediciones de las dimensiones del entorno mediante el uso de la fuente emisora de láser.

Solo requiere la inicialización, guardar en la memoria las coordenadas espaciales iniciales del RM (origen), y los valores iniciales de balanceo-cabeceo-guiñada (roll-pitch-yaw en inglés) los ángulos de posicionamiento del robot en este momento. Las posiciones cambiantes del RM, la posición y el deslizamiento de las ruedas se compensan mediante la matriz de transformación homogénea y se pueden detectar mediante el uso de una plataforma inercial como en [44]. Los de datos medidos por el TVS se procesan posteriormente para evaluar el estado estructural de la tubería, esto mediante la comparación entre las condiciones reales medidas de la tubería y las especificaciones de fabricación de los planos de la tubería. Se señalan en caso de existir las ubicaciones de los defectos y de esta manera (con la información obtenida) poder tomar decisiones sobre el mantenimiento requerido.

2.2.1. Análisis Geométrico

Las ecuaciones de movimiento del RM están representadas en el sistema de ecuaciones (7).

$$\begin{aligned}\dot{x}_{MR}(t) &= v_{MR}(t) \cos(\theta_{MR}(t)) \\ \dot{y}_{MR}(t) &= v_{MR}(t) \sin(\theta_{MR}(t)) \\ \dot{\theta}_{MR}(t) &= \omega_{MR}(t)\end{aligned}\tag{7}$$

En el sistema de ecuaciones, $\dot{x}_{MR}(t)$, $\dot{y}_{MR}(t)$ son las coordenadas cartesianas del RM en el plano de movimiento. $\dot{\theta}_{MR}(t)$ es el ángulo entre el eje x del del Sistema Universal de Coordenadas Cartesianas (en el plano de movimiento CCS_1) y la propagación de la línea de movimiento del RM. $\omega_{MR}(t)$ es la velocidad angular del RM, y $v_{MR}(t)$ es velocidad de desplazamiento lineal del RM que es paralela a la posición del robot con respecto al eje x o al ángulo $\dot{\theta}_{MR}(t)$ con respecto al Sistema de Referencia Inercial 2 (IRS_2 por sus siglas en inglés). La *Figura 7* muestra estas variables en un ambiente de inspección simulado.

Las señales de control del sistema de inspección se obtienen a partir de la implementación conjunta de (7), y las ecuaciones de la Triangulación Dinámica (4), (5) y (6). Para que las ecuaciones del sistema sean válidas se deben de cumplir ciertas condiciones. Las velocidades de operación (8) del sistema son obtenidas a partir de (7).

$$\omega_{SA} \gg \omega_{SV} \gg \omega_{MRW} \quad (8)$$

La ecuación (8) es la relación que debe satisfacerse para asegurar el correcto funcionamiento del sistema de inspección. Aquí, ω_{SA} es la velocidad de rotación de la SA, ω_{SV} es la velocidad de escaneo del PL, y ω_{MRW} es la velocidad angular de las ruedas de RM. La velocidad de rotación ω_{SA} de la SA está relacionada con la capacidad de adquisición de datos del TVS en (9):

$$S_{r\#} = \frac{F_T}{\omega_{SA} / 60} \quad (9)$$

Aquí, $S_{r\#}$ es el número de pulsos estándar con una frecuencia de muestreo F_T durante una rotación completa del espejo de la apertura de escaneo SA, adquirido por el Teensy en una rotación completa a una velocidad de rotación constante. A partir de esto, es posible determinar la graduación o resolución más pequeña β_R de la medición del ángulo β_i . Esto se determina en (10):

$$\beta_R = \frac{360}{S_{\#R}} \quad (10)$$

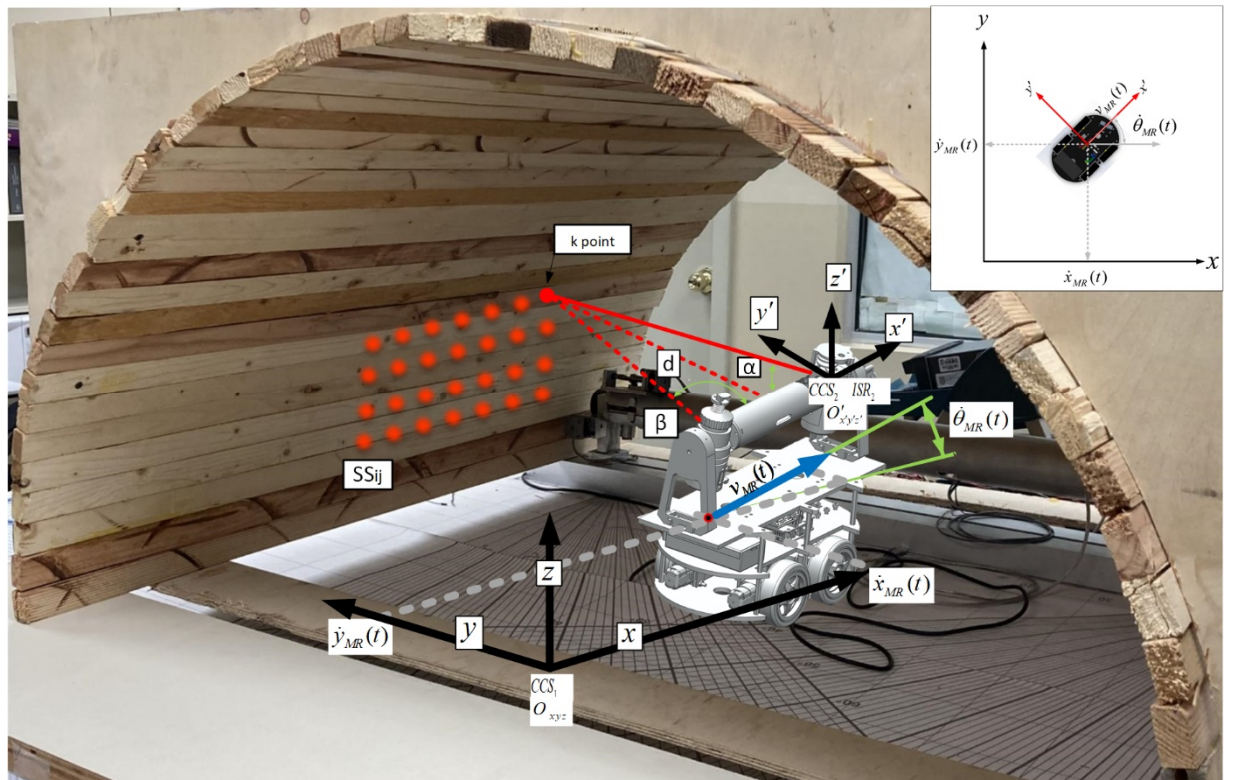


Figura 7. Representación de las variables físicas del sistema de escaneo de tuberías (en una construcción de madera para el modelado de segmentos de tuberías).

A diferencia de [26] donde el ángulo β_R es fijo, en la presente aplicación el TVS supone un ligero margen para ajustar el β_R escaneo aproximado/detallado. Al conocer la resolución, el tiempo total que tarda el sistema en realizar una medición de

un solo punto es importante para los tiempos de operación. Esto se calcula mediante la ecuación (11).

$$m_u = (k)(m_t) + p_t \quad (11)$$

Donde, m_u es el Tiempo Total de Medición, k es el número de puntos tomados para realizar la medición (generalmente proporcionando 3 coordenadas promediando en cada uno de *los* k puntos escaneados de la *Figura 7*), m_t es el tiempo que tarda el SA en alcanzar k rotaciones completas, y p_t es la constante de tiempo de procesamiento que normalmente es de 7ms. m_u se puede utilizar para determinar el cambio de posición de la RM una vez que el TVS terminó de medir un punto con sus coordenadas 3D, si la posición del RM cambia por una diferencia mayor que $d_{SG}(\beta_R)$ la medición no podría considerarse confiable. La ecuación (12) y (13) describe este fenómeno.

$$[\dot{x}_{MR}(m_u)]_2 - [\dot{x}_{MR}(m_u)]_1 \leq d_{SG}(\beta_R) \quad (12)$$

$$d_{SG}(\beta_R) = d_m \tan(\beta_R) \quad (13)$$

Donde, $d_{SG}(\beta_R)$ es el cambio de distancia mínimo que el TVS será capaz de percibir, y $\dot{x}_{MR}(m_u)$ 1 y 2 representan la posición final e inicial respectivamente del RM en el x eje del Sistema Cartesiano Inercial, y d_m es la distancia desde el centro del TVS hasta la superficie medida.

Con (8)-(12) podemos obtener el sistema de ecuaciones que define el funcionamiento del dispositivo de inspección.

$$\begin{aligned}
& [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_2 - [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_1 \leq d(\beta_{SG}) \\
& [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_2 - [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_1 \leq d_m \tan\left(\frac{360}{S_{\#R}}\right) \\
& [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_2 - [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_1 \leq d_m \tan\left(\frac{360\omega_{SA}}{60F_T}\right) \quad (14) \\
& [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_2 - [v_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_1 \leq d_m \tan\left(6\frac{\omega_{SA}}{F_T}\right) \\
& [r_{MRW}\omega_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_2 - [r_{MRW}\omega_{MR}(m_u) \cos(\omega_{MR}(m_u))]_1 \leq d_m \tan\left(6\frac{\omega_{SA}}{F_T}\right)
\end{aligned}$$

Aquí, r_{MRW} representa el radio de las ruedas del RM. El uso de (8) en (14) arroja como resultado la ecuación (15) que es la que relaciona las restricciones para las velocidades de ω_{SA} , $\omega_{MR}(t)$, y ω_{SV} .

$$\begin{aligned}
& [r_{MRW}\omega_{MR}((k)m_t + p_t) \cos(\omega_{MR}((k)m_t + p_t))]_2 \\
& - [[r_{MRW}\omega_{MR}((k)m_t + p_t) \cos(\omega_{MR}((k)m_t + p_t))]_1 \\
& \leq d_m \tan\left(6\frac{\omega_{SA}}{F_T}\right) \\
& [r_{MRW}\omega_{MR}\left((k)\frac{\omega_{SA}}{60} + p_t\right) \cos\left((k)\frac{\omega_{SA}}{60} + p_t\right)]_2 \quad (15) \\
& - [r_{MRW}\omega_{MR}\left((k)\frac{\omega_{SA}}{60} + p_t\right) \cos\left((k)\frac{\omega_{SA}}{60} + p_t\right)]_1 \\
& \leq d_m \tan\left(6\frac{\omega_{SA}}{F_T}\right)
\end{aligned}$$

La ecuación (15) se define por constantes r_{MRW} , p_t , k , m_t , F_T , y a partir de ahí velocidades ω_{SA} , ω_{MR} , y ω_{SV} se pueden relacionar. Las ecuaciones (8) y (14) son parámetros condicionales para la inspección de tuberías con el TVS. En (16), la resolución mínima de la medición de un eje d_{SGx} es un parámetro de restricción para la precisión de la medición, debido a la restricción de k las velocidades dadas $\omega_{SA} \cdot \omega_{MR}$ Es

decir, cuanto menor es la relación entre las dos velocidades, menos k puntos medidos es capaz de medir y promediar el sistema, lo que se traduce en un incremento de la incertidumbre de medición.

$$\begin{aligned}
v_{MR} \left((k) \frac{\omega_{SA}}{60} + p_t \right) \cos(\omega_{MR} \left((k) \frac{\omega_{SA}}{60} + p_t \right)) &\leq d_m \tan \left(6 \frac{\omega_{SA}}{F_T} \right) \\
r_{MRW} \omega_{MR} \cdot \cos(\omega_{MR} \left((k) \frac{\omega_{SA}}{60} + p_t \right)) &\leq d_m \tan \left(6 \frac{\omega_{SA}}{F_T} \right) \\
\dot{x}_{MR}(m_t) &\leq d_{SGx}(\beta_{SG})
\end{aligned} \tag{16}$$

Entonces, la ecuación (17) podría ser el parámetro de restricción para la localización de defectos (dependiendo de la orientación de la RM con respecto a CCS_1 en la Figura 7).

$$\dot{y}_{MR}(m_t) \leq d_{SGy}(\beta_{SG}) \tag{17}$$

La ecuación representa la resolución mínima de desplazamiento lineal d_{SGy} que define la variación mínima de profundidad para que el TVS la perciba. Esto significa que, cuanto más pequeño d_{SGy} es, el sistema de inspección podría encontrar un defecto más detallado. Por lo tanto, el valor se clasifica de acuerdo con la Tabla 1. La tabla enumera las dimensiones características de las diferentes fallas típicas de las tuberías, de acuerdo con [1], [45], [46]. Además, se proporciona la ubicación y el código proporcionado por nuestro algoritmo en el proceso de identificación.

El sistema identifica defectos a lo largo del proceso de inspección. En la Figura 8 se muestran las dimensiones mínimas para el cálculo de la resolución y en la

Figura 9 la representación gráfica de falla por corrosión. Dentro de la superficie de la tubería, el algoritmo analiza las magnitudes del vector de posición para las diferencias de alrededor de 0.2-0.8 mm como tamaño típico de la cavidad de corrosión.

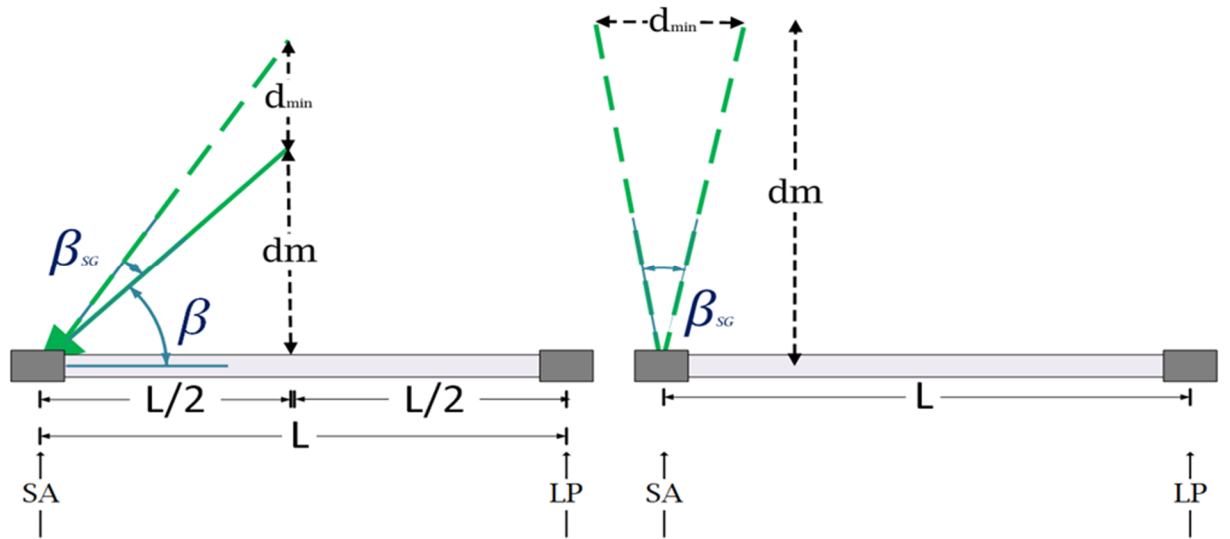


Figura 8. Representación d_{min} en triangulación dinámica.

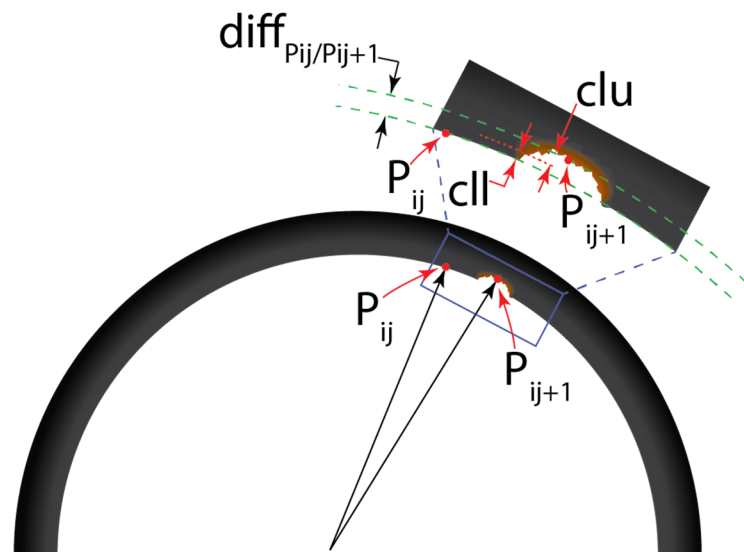


Figura 9. Representación gráfica de la falla por corrosión.

La ecuación (18) es la diferencia entre la magnitud del vector de posición (desde el centro del círculo) y el vector de posición \vec{P}_{ij} y el vector \vec{P}_{ij+1} .

$$\begin{aligned} diff_{p_{ij}/p_{ij+1}} &= |\vec{P}_{ij}| - |\vec{P}_{ij+1}| \\ cfd = clu &> diff_{p_{ij}/p_{ij+1}} > cll \\ cfd = 0.8 &> diff_{p_{ij}/p_{ij+1}} > 0.2 \end{aligned} \quad (18)$$

Donde, cfd es la detección de falla por corrosión, $diff_{p_{ij}/p_{ij+1}}$ es la diferencia de profundidad de la superficie, cll, clu son el límite inferior de la cavidad y el límite superior de la cavidad respectivamente, y $\vec{P}_{ij}, \vec{P}_{ij+1}$ son los i puntos medidos consecutivos que se comparan.

La falla de soldadura y los defectos de fabricación se identifican una vez que la nube de puntos presenta un cambio uniforme de centro o diámetro y se presenta en (19). Si el cambio de diámetro está dentro de la dimensión de falla de soldadura y vuelve al estado original después del movimiento de RM, se clasifica como falla de soldadura. Si el centro de la nube de puntos de la tubería cambia de posición, se clasifica como defecto de fabricación.

$$\begin{aligned} C_{p_{ij}/p_{ij+1}} &\rightarrow C_{p_{ij}} = C_{p_{ij+1}} \\ D_{p_{ij}/p_{ij+1}} &\rightarrow D_{p_{ij}} - (D_{p_{ij+1}} + D_{lim}) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Donde, $C_{p_{ij}/p_{ij+1}}$ es el cambio de posición del centro de circunferencia de la tubería, $D_{p_{ij}/p_{ij+1}}$ es el cambio de diámetro de la tubería y D_{lim} es el límite de cambio de diámetro.

La deformación se clasifica mediante el algoritmo RANSAC. Por último, en el caso de una perforación, el algoritmo clasifica el defecto por la presencia de luz externa.

Tabla 1. Clasificación de fallos por profundidad/dimensiones

Falla	Localización del defecto	Código*	Dimensión**
Corrosión	Interna	1	0.2-0.8 mm
Fallo de soldadura	Interna	2	10 mm
Perforación	Interna/Externa	3	-----
Grieta	Interna/Externa	4	10-30 mm
Defecto de fabricación	Interna	5	10-100 mm
Fractura	Interna	6	> 20 mm

*Códigos utilizados como etiquetas para la programación del algoritmo de detección. **Dimensiones típicas de los defectos en tuberías[1], [10], [47], [48], [49], [50], [51].

Dependiendo de la prioridad de inspección, el TVS se puede configurar para clasificar defectos con dimensiones más o menos pequeñas, las velocidades ω_{SA} y ω_{MR} , y el valor de k son las variables que indican la precisión requerida.

$$d_{SGy} = \frac{\sqrt{d_m^2 + L/2^2} \sin(\beta_{SG})}{\sin(180 - \beta_{SG} - (90 + \tan^{-1}(\frac{d_m}{L/2})))} \quad (20)$$

Con los parámetros de restricción mencionados de d_{SGy} en (20), se seleccionan las velocidades de operación del sistema ω_{SA} , ω_{SV} , y ω_{MR} de la RM, mediante la lógica

del algoritmo y las dimensiones de clasificación, donde las restricciones se establecen según los requisitos específicos de inspección y las velocidades de control establecidas de acuerdo con la Tabla 1.

Después de la restricción de parámetros por los requisitos de la aplicación, las mediciones de TVS se ajustan a la nube de puntos mediante las ecuaciones de movimiento de RM como se ve en (21).

$$T_V = \begin{bmatrix} \dot{x}_{MR}(t) \\ \dot{y}_{MR}(t) \\ \dot{\theta}_{MR}(t) \end{bmatrix}, SS_{ij} = [x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}] \quad (21)$$

Donde, SS_{ij} es el resultado de la nube de puntos del escaneo de superficie i de los puntos escaneados (malla de puntos en la *Figura 7*), que se traslada espacialmente con el vector de traslación T_V que define la posición actual de la RM a lo largo de su trayectoria física. La posición actual de la RM se conoce en este momento por varios registros simultáneos, tales como: conteo simple de revoluciones promediadas de las ruedas; por doble integral de mediciones de acelerómetro; y, por último, contabilizar el tiempo de funcionamiento interno del sistema, lo que permite estimar indirectamente un desplazamiento actual de RM. El promedio de estos tres métodos diferentes de estimación física para la misma coordenada nos permite disminuir su incertidumbre hasta un valor despreciable, gracias al enfoque multiparamétrico implementado.

2.2.2. Modelado cinemático

Como se mencionó anteriormente, el TVS conoce su orientación espacial con la ayuda de un giroscopio / plataforma inercial. Luego, después de escanear las nubes de

puntos, se deben realizar algunos ajustes matemáticos para vincular / unir las nubes de puntos medidos con coordenadas tridimensionales. Este ajuste se realiza con la Matriz de Transformación Homogénea de Traslación y Rotación. La matriz de transformación homogénea T representada en (22) es la matriz de 4 por 4 elementos que contiene la transformación de un vector o punto de un sistema coordinado a otro. Sus componentes son la matriz de rotación, el vector de traslación, la transformación de perspectiva y la relación de escala, respectivamente.

$$T = \begin{pmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Rotation} & \text{Traslation} \\ \text{Perspective} & \text{Scale} \end{pmatrix} \quad (22)$$

La matriz de rotación en el \hat{z} eje por un ángulo θ es la ecuación (23), en este escenario; el ángulo θ es el mismo que el ángulo de inclinación RM con respecto al plano en movimiento $\dot{\theta}_{MR}(t)$.

$$R(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Al comparar un sistema de referencia estático O_{xyz} (CCS_1 en la Figura 7) con rotado $O'_{x'y'z'}$ (CCS_2 en la Figura 7) por un ángulo $\dot{\theta}_{MR}(t)$ y trasladado por T_v un eje $\hat{x}\hat{y}$, la posición real de la nube medida se representa matemáticamente en (24).

La transformación de las mediciones mediante la rotación del origen de las coordenadas del TVS según la posición de la RM permite calcular las nubes de puntos giradas o transformadas sobre el origen del sistema de coordenadas O_{xyz} .

$$\begin{aligned}
T &= \begin{pmatrix} R_{(z, \dot{\theta}_{MR}(t))} & T_v \\ f_{1 \times 3} & w_{1 \times 1} \end{pmatrix} \\
&= \left(\begin{array}{ccc|c} \left[\begin{array}{ccc} \cos \dot{\theta}_{MR}(t) & -\sin \dot{\theta}_{MR}(t) & 0 \\ \sin \dot{\theta}_{MR}(t) & \cos \dot{\theta}_{MR}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right] & \begin{bmatrix} \dot{x}_{MR}(t) \\ \dot{y}_{MR}(t) \\ \dot{\theta}_{MR}(t) \end{bmatrix} \\ \text{Perspective} & \text{Scale} \end{array} \right) \quad (24)
\end{aligned}$$

La ecuación (24) se utiliza para rotar y posicionar las nubes de puntos adquiridas por el TVS en referencia a CCS_1 en el z -axis (que es el eje de giro de la RM) y para completar toda la nube de puntos de la tubería con la posición/orientación de la RM adquirida por la plataforma inercial en θ .

2.3. Segmentación

La segmentación de nubes de puntos 3D a menudo tiene que lidiar con el problema de definir las diferencias o bordes entre el primer plano y el fondo debido a los enredos que existen entre estos en una llamada "escena" [52].

2.3.1. RANSAC

El consenso de muestras aleatorias o en inglés Random Sample Consensus (RANSAC) es un método utilizado para el cálculo de un modelo matemático que se ajusta a un conjunto de datos, sin que los valores atípicos (si están presentes en la muestra analizada) afecten el resultado. Con esto, se pueden identificar valores atípicos en los datos, como por ejemplo en una nube de puntos adquirida por un escáner laser. El algoritmo se ha utilizado para el análisis de nubes de puntos en investigaciones como [53], [54], [55] desde que se presentó en [56].

Típicamente, el algoritmo se utiliza para ajustar datos a líneas rectas. Para el caso de aplicación pensado, el modelo matemático a ajustar es el de un círculo (25), este debido al perfil que presenta la tubería cuando se le realiza una sección transversal.

$$\begin{aligned}x^2 + y^2 + 2gx + 2fy + c &= 0 \\r^2 &= g^2 + f^2 - c\end{aligned}\tag{25}$$

La ecuación (25) es el modelo matemático para el perfil del círculo. Aquí, x, y son las coordenadas espaciales del punto evaluado, r es el radio del modelo de círculo, c, f y g son las constantes del centro del círculo. El algoritmo itera seleccionando aleatoriamente un subconjunto de la nube de puntos que se va a analizar, ajustando el modelo (25) al subconjunto seleccionado con una distancia de umbral determinada, de esta forma identifica el número de valores atípicos (datos fuera del umbral) y repite estos pasos para k iteraciones.

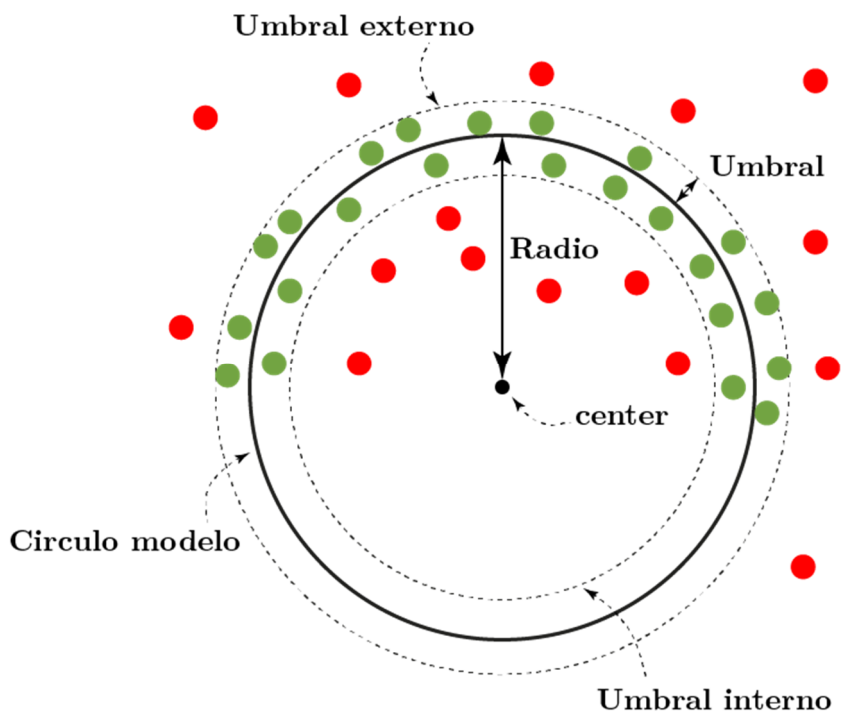


Figura 10. Representación gráfica del algoritmo del RANSAC en aplicación de evaluación del perfil circular del corte transversal de una tubería.

Figura 10 es la representación gráfica del algoritmo del RANSAC, aplicado para el modelo matemático de un círculo. Para el algoritmo se utiliza un valor de umbral para diferenciar o segmentar los valores dentro y fuera de este rango. En la figura, los valores atípicos o outliers se representan en rojo, los valores dentro del rango se denominan válidos o inliers y están representados en verde y el perfil circular o círculo a ajustar en color negro.

3. Procedimiento Metodológico

Tras revisar la literatura sobre métodos de análisis de nubes de puntos y considerando las especificaciones, necesidades y restricciones mecánicas del Prototipo #3 del TVS o mini TVS utilizado en este trabajo, se procede a detallar la metodología

empleada para escanear superficies y generar nubes de puntos con el objetivo de evaluar el estado estructural de una tubería. Así, se detalla el algoritmo de escaneo de superficie propuesto. Se procede a la integración de este en el sistema de barrido por láser. Para poder realizar experimentación y determinar el comportamiento del de análisis de los puntos medidos manera dinámica con el sistema. Y, finalmente se determina la precisión y resolución de las mediciones obtenidas con el sistema, así como la capacidad de identificación de distintos tipos de defecto.

3.1. Diagrama de flujo del algoritmo de inspección

La colaboración entre el RM y el TVS requiere del ajuste espacial de las mediciones del escáner láser en función de la posición del RM, MR_{xyz} para cada instante de tiempo. Además, la velocidad de movimiento de las ruedas del robot debe sincronizarse con la velocidad de escaneo de TVS para garantizar medición de coordenadas en condiciones cuasi-estáticas durante los escaneos a altas frecuencias de operación, y evitar así la pérdida o distorsión de la información.

Un sistema completamente automático para inspección de tuberías utilizando el TVS requeriría de 3 principales operaciones (mostradas en la Figura 11): El algoritmo de exploración para identificación de la ruta a seguir dentro de la tubería, el escaneo de superficie para conocer el estado estructural de la tubería y la segmentación con el RANSAC de las nubes de puntos 3D adquiridas. La planificación de trayectorias para robots móviles usando el TVS ha sido ampliamente detallada en trabajos como [18], [19], [57]. En este trabajo solo se hará mención del algoritmo que se seguiría dentro de una tubería. Se enfocará mayormente en las aportaciones de la investigación, el escaneo

de una superficie cilíndrica (tubería), y la segmentación de la nube de puntos adquirida para determinar el estado de la tubería en una inspección de mantenimiento.

3.1.1. Seguimiento de trayectoria.

Después del posicionamiento de RM al comienzo de la tubería, el algoritmo inicializa los sensores y las variables del sistema. La posición real de RM se convierte en el origen del Sistema de Coordenadas Cartesianas CCS_1 (de Figura 7), establecido utilizando el sensor inercial MPU6050. El TVS se encarga de monitorear los alrededores del RM en búsqueda constante de objetos o superficies con las que pudiera colisionar en su trayecto en el interior de la tubería. Para esto se toman en cuenta como parámetros de entrada las dimensiones físicas del sistema y la velocidad de movimiento del RM. Este algoritmo y sus alcances ha sido explicado detalladamente en trabajos como [19], [22], [26], [58].

3.1.2. Escaneo de superficie

En el escaneo de superficie la velocidad del RM debe ajustarse de manera que, la posición del RM en cada instante de tiempo en el que se toma una medición pueda ser considerada cuasi-estática. Para el algoritmo se emplean las variables $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ para establecer posiciones físicas fijas P_i a las que se dirigirá el PL al momento de realizar las mediciones en la superficie de la tubería.

En la Figura 12 se representa la secuencia de movimientos o barrido que realiza el PL en el primer método posible de escaneo de superficie. En este tipo de movimiento el posicionador genera la malla o nube puntos con movimientos que alternan entre movimiento horizontal y movimiento vertical en ese orden hasta llegar al punto final del barrido.

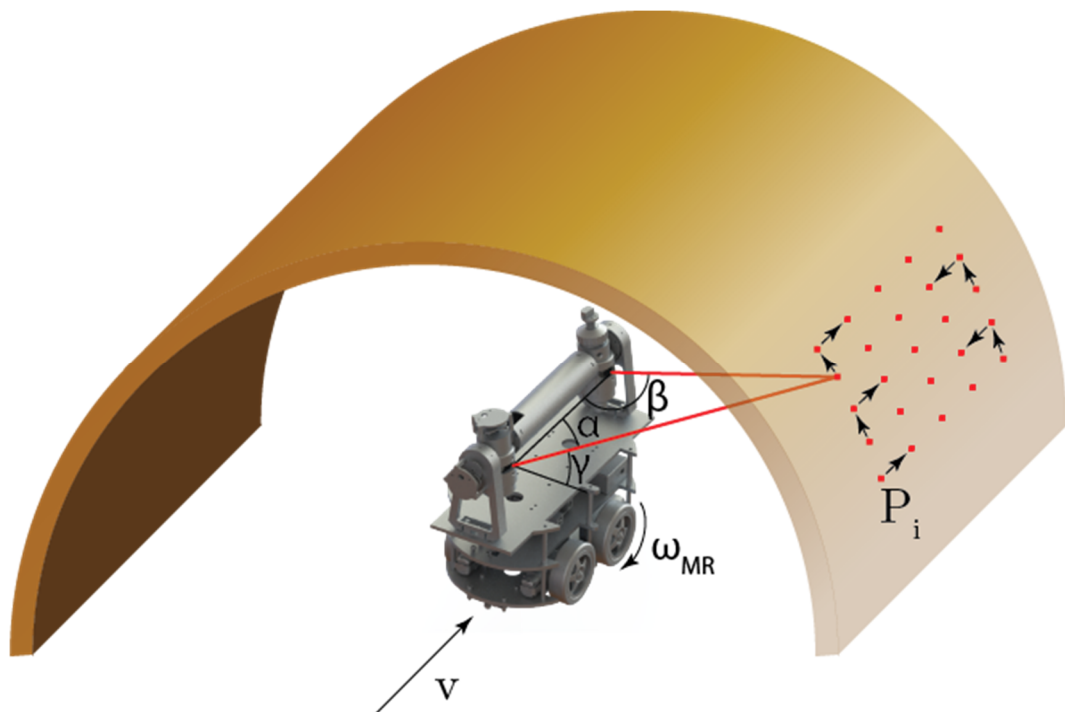


Figura 12. Método #1 de escaneo de superficie. Movimiento del posicionador horizontal-vertical.

En la Figura 13 se representa el segundo método de escaneo de superficie. En esta secuencia de movimientos la nube de puntos se genera a partir de movimientos vertical-horizontal hasta llegar al punto final del barrido.

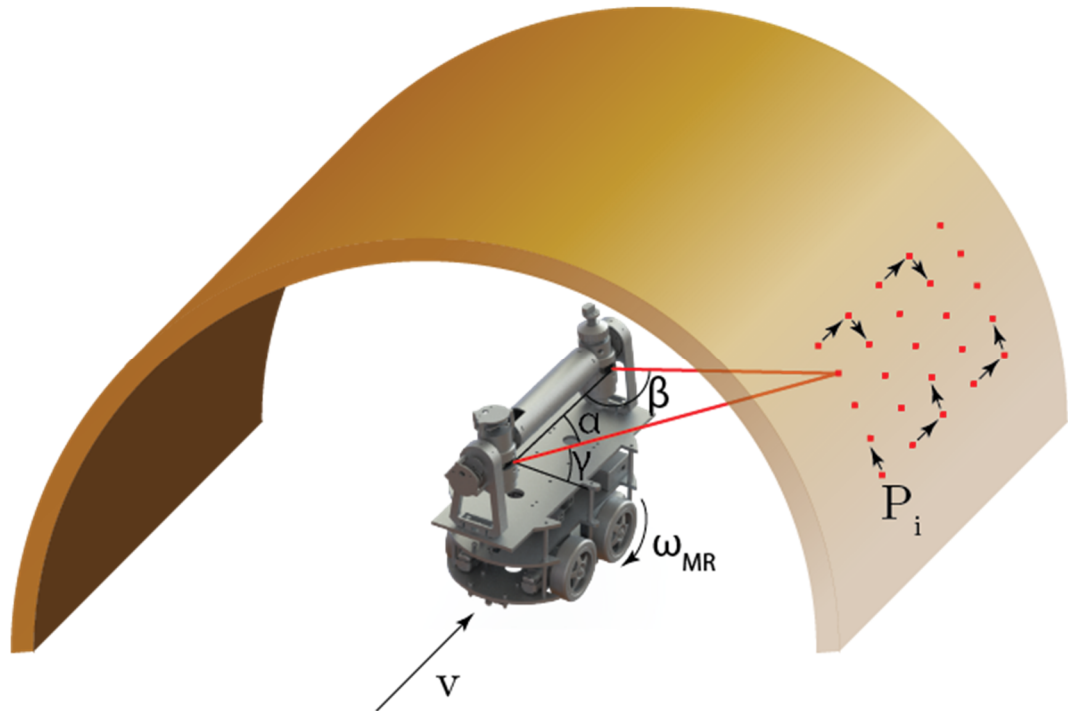


Figura 13. Método #2 de escaneo de superficie. Movimiento del posicionador vertical-horizontal.

En estos dos métodos de barrido el TVS generaría distintas nubes de puntos que se unirán en una nube de puntos final resultante. Sin embargo, debido al movimiento del robot y a las características del FOV se obtienen nubes de puntos resultantes de mayor calidad (debido a que cada medición se hace en la zona de mayor rendimiento del FOV) omitiendo el movimiento horizontal del TVS y generando un tercer método de barrido solo con movimientos verticales desde un punto inicial hasta una final y repitiendo hasta terminar el trayecto del RM.

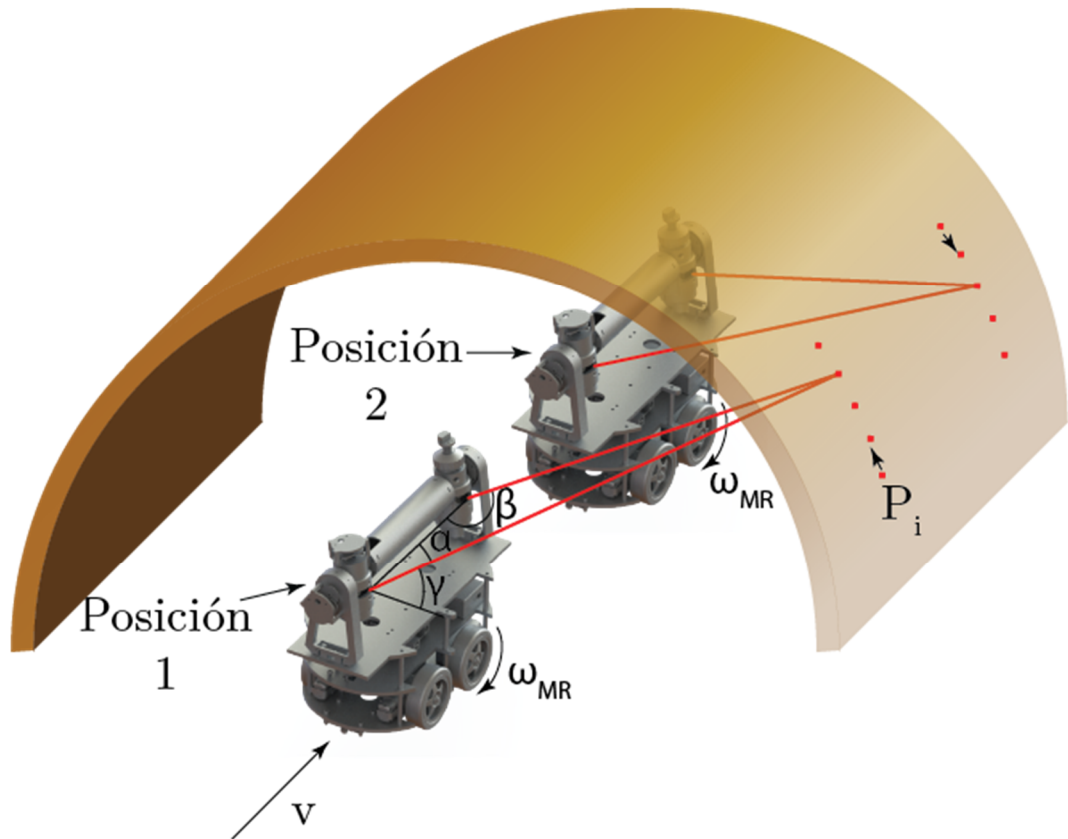


Figura 14 Método # 3 de escaneo de superficie. Movimiento del posicionador únicamente en vertical. Nube de puntos generada con el cambio de posición del RM.

En la Figura 14 se describe el método de barrido # 3. Como se mencionó, las direcciones a las que el PL apunta en la superficie de la tubería generan únicamente líneas, la nube de puntos se completa con el cambio de posición del RM, de acuerdo con $v_{MR}(t)$ (velocidad de desplazamiento), de esta manera, la densidad de los datos en esta nube de puntos (cercanía entre puntos medidos) está directamente relacionada con los cambios de posición del RM.

En este algoritmo se comparan los datos adquiridos con los de una referencia ideal tomada de los planos de fabricación de las tuberías inspeccionadas. Esto, con el fin de identificar desviaciones en la estructura de la tubería.

En este proceso se monitorea continuamente la amplitud de la señal de la SA (utilizando un umbral o límite de voltaje L_{IA}) para detectar cambios en la iluminación, identificando posibles grietas.

Como resultado del escaneo de superficie, una matriz de datos con las variables x_i, y_i, z_i que son las coordenadas tridimensionales de cada punto medido por el TVS, a partir de los ángulos de posicionamiento y recepción $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ de la triangulación dinámica.

El vector de traslación T_v (utilizado para desplazar en el espacio las nubes de puntos medidas con respecto al origen de CCS_1), ω_{SA} es la velocidad de rotación del SA. Por último, ω_{SV} es la velocidad de escaneo del PL y ω_{MR} la velocidad de rotación de las ruedas del RM. Se debe cumplir la condición (8) para obtener escaneos de alta precisión con el TVS.

Por último, las nubes de puntos se segmentan mediante la utilización del RANSAC que identifica y clasifica los defectos encontrados durante la inspección de tuberías (con niveles de probabilidad de ocurrencia de acuerdo con la Tabla 2). El algoritmo completa la nube de puntos mediante transformaciones y ajustes espaciales, analizando toda la nube de puntos 3D para identificar y clasificar los defectos con precisión. El algoritmo detallado de la segmentación y el análisis matemático de la nube de puntos 3D, mejorando la detección de defectos y la precisión de la clasificación, se detalla a continuación.

3.1.3. Segmentación por algoritmo modificado de RANSAC

En el caso de un escaneo de la superficie interna de una tubería, el problema de segmentación en una de puntos se simplifica debido a la conocida forma ideal y cilíndrica de una tubería. Esta forma ideal se puede modelar y etiquetar fácilmente como fondo, dejando todos los datos que no cumplen con las características del fondo como primer plano y, por lo tanto, como posibilitando al algoritmo de identificar "defectos" o "superficies no deseadas".

La aplicación del RANSAC permite determinar el estado estructural de la tubería de una manera lógica y natural. Además, el objetivo del uso del algoritmo es aumentar los datos útiles en la nube de puntos, para presentar el resultado final, concepto probado y publicado en resultados como [25], [32].

Al aplicar el algoritmo, como resultado se obtiene una nube de puntos con inliers y outliers identificados. Normalmente solo los datos validos o inliers se ocuparían para analizar o tomar decisiones, pero en este caso la identificación de valores atípicos posee otra ventaja. Los inliers, son utilizados para la determinación de parámetros de la tubería, estos son, encontrar el diámetro, las dimensiones y el centro de la tubería inspeccionada. Sin embargo, la identificación de valores atípicos a través de la evaluación de nubes de puntos con el RANSAC posibilita encontrar defectos estructurales en la tubería. Esto, mediante la adición de 2 etapas de procesamiento o comparación extra. Primero, los valores atípicos se evalúan de acuerdo con la condición (26).

$$\begin{aligned} outlier > radius &= outlier \\ outlier < radius &= possibledefect \end{aligned} \tag{26}$$

Para eliminar todos los datos de la nube de puntos que sobrepasan el límite físico de la superficie de la tubería, se evalúa la distancia euclidiana de cada punto P_i hasta el origen o centro del círculo. Si esa distancia es mayor, se considera que el punto P_i es un error en la nube de puntos y se mantiene etiquetado como outlier. Si esa distancia es menor, se considera que el punto P_i está en el dentro del cilindro de la tubería y por lo tanto puede significar que es un obstáculo, defecto, malformación u obstrucción detectados en el interior de la tubería. Este punto se mantiene en la nube de datos y se compara en una tercera etapa de procesamiento. Después de esta comparación, los valores atípicos se eliminan de la nube de puntos final y los posibles defectos se evalúan con una clase de algoritmo de vecino cercano simplificado al que se le da un uso similar al presentado en [24]. Este algoritmo funciona de la siguiente manera, se calcula la distancia media entre los puntos que se ajustaron al perfil del círculo desde la primera etapa de procesamiento (primer conjunto de inliers detectado). Esta distancia promedio se utiliza como punto de comparación para determinar la distancia de separación entre los datos. Si los datos de puntos medidos están muy separados entre sí, permanecen como valores atípicos y se eliminan de la nube de puntos. Si se reúnen suficientes puntos en una zona, se clasifican como posible defecto. La Tabla 2 es la probabilidad característica de que aparezca cada tipo de evento o defecto en una inspección.

En una inspección automática esta información se vuelve relevante en la configuración e inicialización del robot, según el tipo de mantenimiento de tubería.

Tabla 2 . Clasificación de Fallas/defectos

Falla	Localización del defecto	Probabilidad
Corrosión	Interior	Alta
Fallo de soldadura	Interior	Baja
Perforación	Interior /Exterior	Media
Grieta	Interior / Exterior	Media
Defecto de fabricación	Interior	Baja
Fractura	Interior	Media

Los tres procesos del algoritmo de inspección para el escaneo de tuberías se repiten continuamente hasta que finaliza el barrido completo del segmento de tubería o secciones del oleoducto inspeccionado.

Si la identificación de parámetros no es posible, en una inspección completamente automática, el sistema de inspección deberá ser capaz de determinar si se necesita realizar un escaneo con mayor densidad de datos (más puntos medidos en un área menor de la superficie escaneada). Esto, en las zonas de la tubería identificadas o resaltadas como faltantes de información y así identificar con precisión las condiciones estructurales en cualquier zona de un oleoducto o tubería, mediante la correcta identificación de defectos, de esta manera será posible tomar decisiones de futuro mantenimiento.

En la sección de experimentación de este trabajo de investigación se presentan los resultados después de la aplicación del algoritmo a los datos medidos.

4. Experimentación y análisis de resultados.

4.1. Consideraciones

Un punto importante para tener en cuenta sobre el prototipo es la Arquitectura de Software y Hardware utilizada para controlar todos los elementos. El software para el sistema de inspección utiliza Python para la evaluación de superficies, mediciones 3D y procesamiento de señales, además para la programación de algoritmos de operación y aplicación del RANSAC. Las etapas de adquisición y preprocesamiento se realizan mediante un microcontrolador y los datos adquiridos se guardan memoria para ser accesibles en cualquier momento. Para el hardware, la plataforma inercial utilizada es la MPU6050, el sensor de paro en el SA es el BPW77NB, un Teensy 4.1 USB se utiliza para adquirir las señales y un Arduino MEGA para el movimiento de los motores del robot.

El sistema ha sido probado en diferentes condiciones y configuraciones experimentales, esto para validar la funcionalidad y precisión de los métodos de escaneo desarrollados. Además, las mediciones se comparan con las que se tratan como datos reales sobre el terreno (plano) para validar el error de operación del método de inspección. Los factores más importantes obtenidos durante los experimentos son la precisión en dichas condiciones, la calidad de la nube de puntos (mapa 3D de la superficie), la identificación de defectos, la detección de la orientación espacial, su rendimiento en tiempo real y la estimación de la robustez del sistema.

4.1.1. Adecuación del método de escaneo a la superficie de aplicación

Uno de los principales problemas a abordar en un proceso de escaneo dentro de una tubería con el TVS es la parte de procesamiento de los datos recibidos por el TVS. Debido a la superficie circular y al material de la tubería, la reflexión esperada del láser emisor será diferente de la ideal, lo que significa que es necesario realizar una validación de los datos recibidos.

Para validar el uso de la SA para la inspección de la superficie circular interna de la tubería, se utilizó un modelo experimental de tubería que simula la forma cilíndrica de la superficie. El TVS se introdujo por primera vez solo en el modelo de tubería y se llevaron a cabo varios experimentos. Se agregaron defectos artificiales al modelo de tubería para analizar el rendimiento del TVS en tales circunstancias. Se probaron diferentes posiciones del TVS dentro de la tubería, esto con el objetivo de beneficiarse de las zonas de mayor precisión del campo de visión del sistema.

4.1.2. Validación de mediciones

Se analizan todas las medidas adquiridas en condiciones experimentales (con diferentes velocidades de barrido) y los datos estadísticos de las mismas pueden proporcionar información valiosa sobre el rendimiento del TVS en diferentes condiciones. La comparación de precisión entre ambas posiciones del TVS, en el momento en que se tomaron las medidas, concluye con la configuración ideal del TVS para realizar el escaneo de la superficie de la tubería.

Los defectos como deformidades de tuberías, perforaciones y obstáculos se detectan e identifican con éxito, estos son uno de los defectos más críticos que se pueden encontrar y reparar en una tubería que transporta recursos de alto valor.

4.2. Mediciones en diferentes condiciones de luz

Según [17], [19], [22], [23] el TVS tiene una mejora de rendimiento en entornos sin iluminación. Se llevaron a cabo experimentos para demostrarlo, probando el funcionamiento del TVS al medir distancias de la misma superficie con diferentes condiciones de iluminación afectando a la zona de inspección. Se manejaron 3 diferentes condiciones de iluminación: 0 lux (con luz apagada en el laboratorio y cortinas oscuras totalmente cubiertas en el modelo de la tubería), 100 lux (con luz apagada en el laboratorio y cortinas oscuras parcialmente cubiertas en el modelo de la tubería), 200 lux (con luz de encendido en el laboratorio y cortinas oscuras parcialmente cubriendo en el modelo de la tubería). La medición de la iluminancia se ha hizo con el 407026 Heavy

Duty Light Meter de EXTECH. Los resultados de este experimento se muestran en la

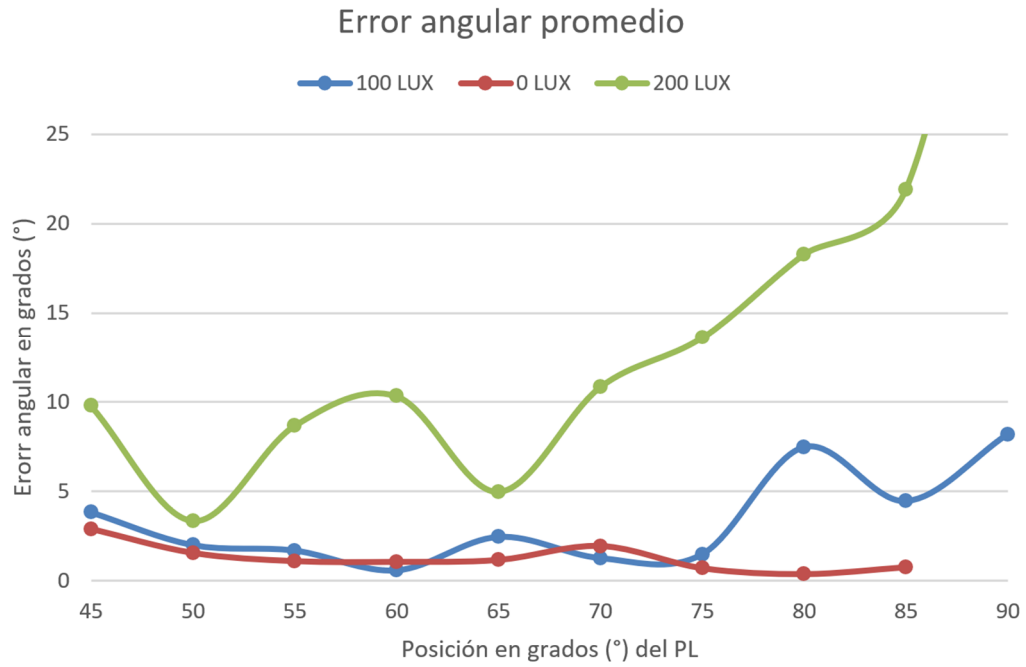


Figura 15.

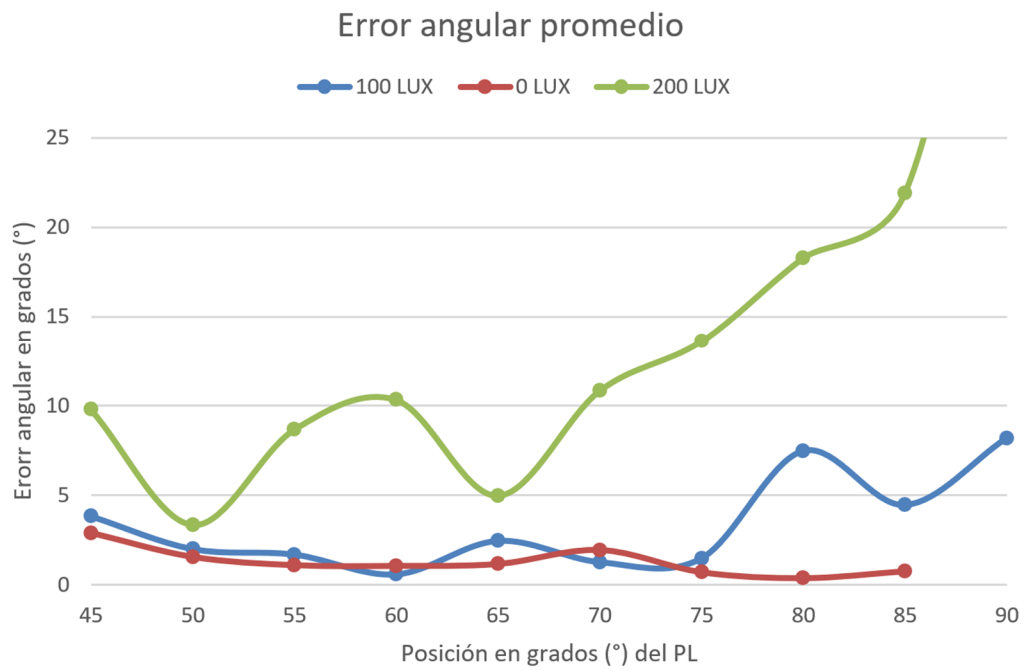


Figura 15 Error angular medio para diferentes condiciones de luz. Iluminancia del ambiente 0 LUX (rojo), 100 LUX (azul), 200 LUX (verde). Muestra de 3000 mediciones.

En

la

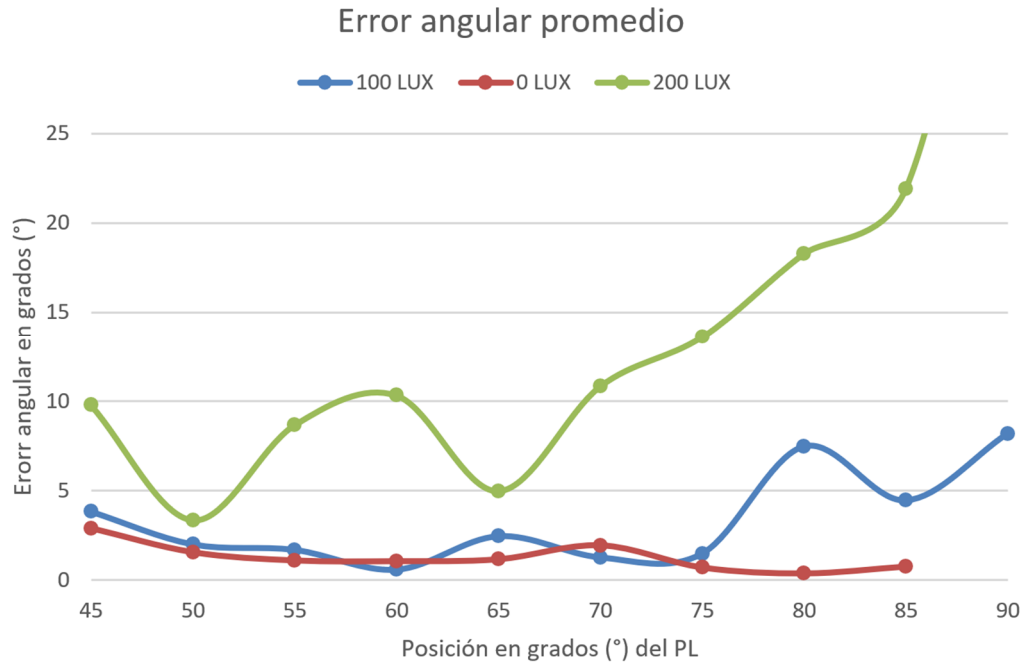


Figura 15 se presenta el error angular medio del TVS en diferentes zonas del campo de visión o FOV. Este error en el ángulo de detección del TVS puede producir errores espaciales en las coordenadas medidas de hasta 10 cm (por ejemplo, a 1 m de distancia entre la superficie y el TVS). para una posición en el campo visión de 45° del

PL a l m de la superficie escaneada. Además, en la

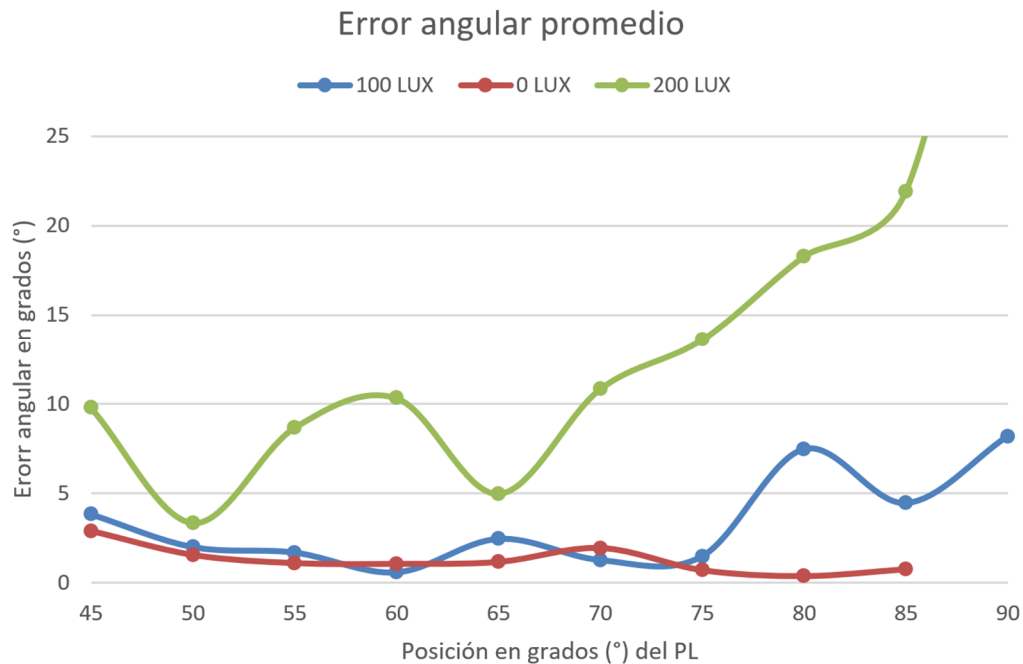


Figura 15, es posible observar que hay ángulos en los que el error de medición es menor en presencia de una fuente de luz externa (100 LUX). Sin embargo, el rendimiento general del TVS en todo el campo de visión tiene un error angular menor en la mayoría de las zonas cuando se presenta la condición de ausencia de fuentes de luz (0 LUX). Confirmando de forma experimental práctica, que el sistema de escaneo láser es una buena solución para la inspección en la oscuridad.

Además, la presencia de fuentes de luz externas afecta directamente a la señal adquirida, lo que resulta en la necesidad de filtros u otros tipos de elementos para reducir el error de medición o aumentar la capacidad del TVS para alcanzar distancias más largas. En la Figura 16 se puede ver la influencia de las fuentes de luz externas (azul) en la señal de detección. La energía reflejada por el láser (señal representada en rojo) es superada por la fuente de luz, proporcionando errores en las mediciones del TVS. La

influencia de la fuente de luz externa en la señal produce un error diferente dependiendo de la posición del PL en el FOV.

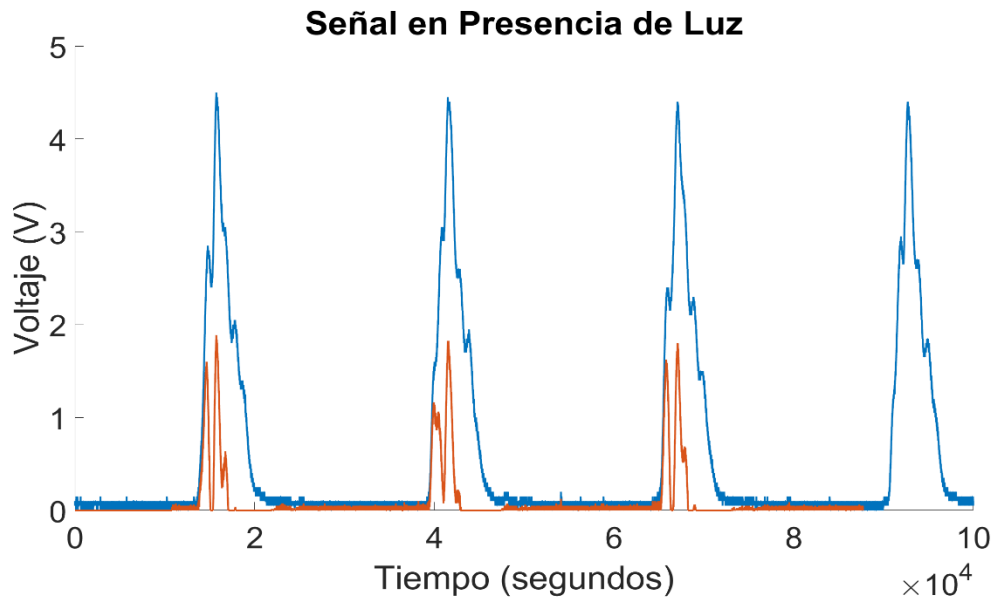


Figura 16. Ejemplo de señal con la presencia de una fuente de luz (en azul) luz visible en toda la longitud de onda. Parte de la señal de longitud de onda de 633 nm. Representación de la señal en oscuridad total (rojo).

La Figura 17 muestra el error espacial medio del TVS en diferentes condiciones de luz. Se puede observar que el error espacial de las mediciones tomadas por el TVS en

la Figura 17 presenta un comportamiento similar a los errores de la

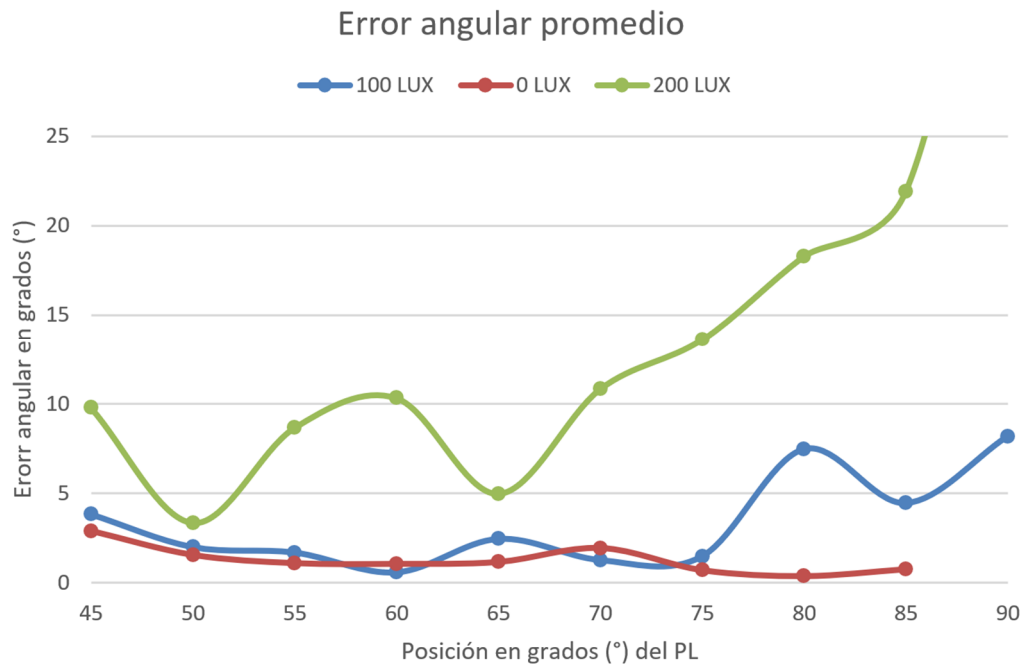


Figura 15. Además, debido a que el error espacial es la suma del error de medición de coordenadas en los tres ejes diferentes, estos errores podrían significar que la nube de puntos resultante será menos confiable.

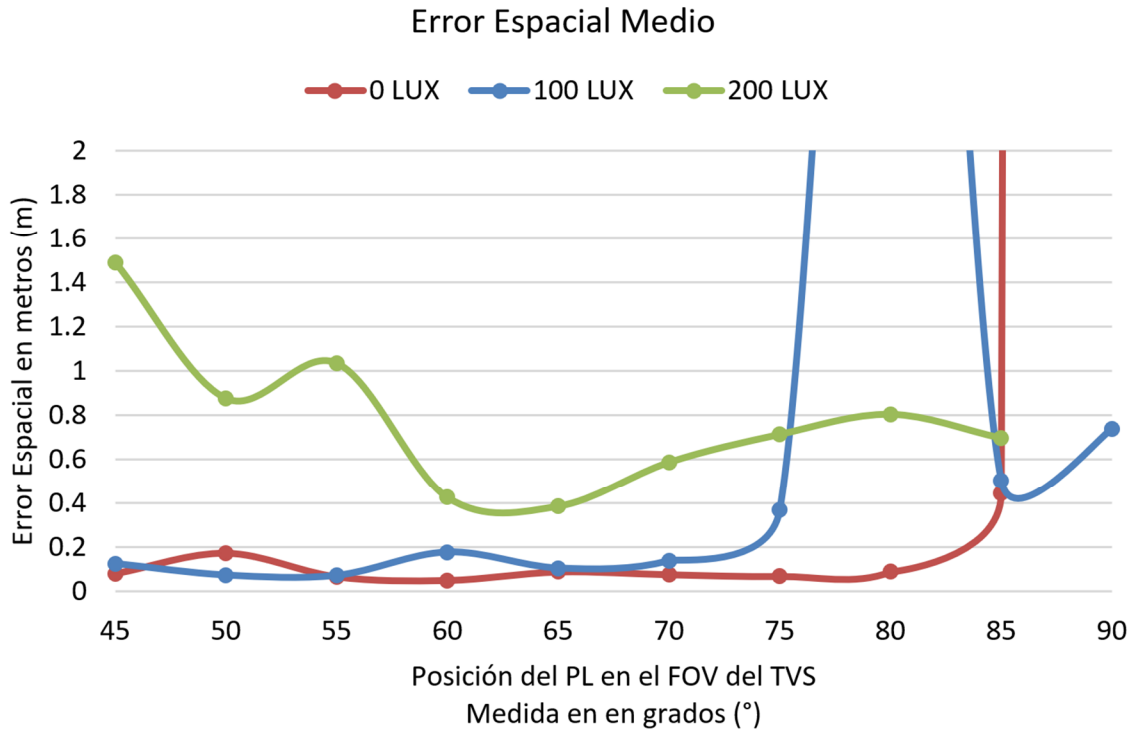


Figura 17. Error espacial medio de las mediciones de distancia hechas con el TVS.

Analizando

la

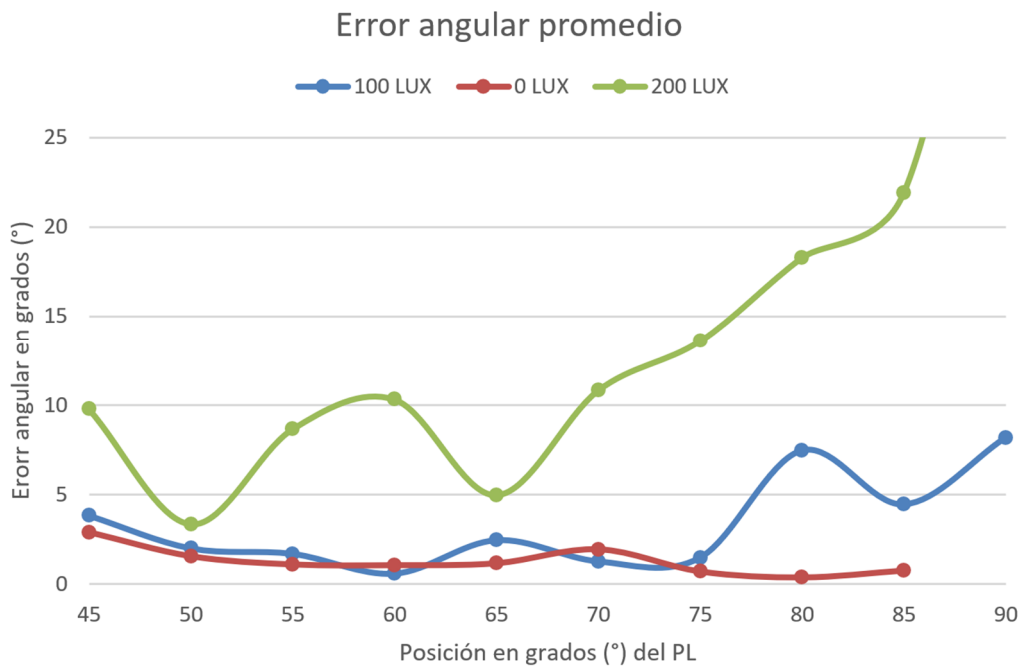


Figura 15, la Figura 17, y sobre todo la Figura 16, se puede afirmar que en comparación a los trabajos [3], [7] y aprovechando esta condición de la señal, se puede simplificar, sin pérdidas de eficiencia la búsqueda de los daños más significativos y peligrosos de la tubería, como puede ser una perforación completa esto se considera un aporte muy importante. Esto se hace mediante el aislamiento artificial de dos flujos de información complementarios: mientras que las coordenadas x, y, z del punto medido en la superficie escaneada provienen del procesamiento de la información completa del escáner láser, la información sobre la perforación puede provenir del canal del fotosensor mediante una comparación de nivel de voltaje (mencionada en la sección 3). Cuando la forma de la señal en este canal de información cambia instantáneamente de manera tan drástica como la presentada en Figura 16, el sistema puede interpretar que detectó una falla de "perforación". Esto basándose en que se está analizando las condiciones ópticas dentro una tubería que se debe encontrar en total oscuridad (este proceso se ilustra por el operador " U_A " en el diagrama de flujo de Figura 11). Además, las coordenadas x_i, y_i, z_i , de la ubicación de esta falla provienen nuevamente del primer canal de información las mediciones realizadas por el TVS.

Esta es una primera novedad del método propuesto. Permite simplificar y acelerar la detección de este peligroso defecto en comparación con [3], [7]. Es importante tener en cuenta que esto se obtiene gracias al uso de otro principio físico, sin embargo, de la misma parte óptica sensorial.

A partir de estos experimentos, en conclusión, es importante tener en cuenta que las condiciones ambientales dentro de la tubería son adecuadas para la mejora del

rendimiento natural del sistema de escaneo. Ya que la mayoría de las veces, el entorno de inspección estará en completa oscuridad (cerca de 0 LUX) debido a la ausencia de fuentes de luz (que no sean el láser).

4.3. Ambiente experimental

Con la intención de replicar las condiciones de aplicación de una inspección de tuberías. Se fabricó una superficie semicilíndrica de madera (ver Figura 18), simulando la forma de la tubería, replicando tanto la superficie cilíndrica como las condiciones de oscuridad (los entornos simulados también intentan reproducir la textura interna, esto en condiciones controladas de laboratorio).

4.4. Adquisición de datos en movimiento.

El sistema de escaneo cuenta con unidades de medición, que son capaces de realizar mediciones de desplazamientos y proporcionan información útil sobre el entorno en el que se encuentra, y que se utilizan en la etapa experimental de este trabajo.

En esta sección, se describe la configuración experimental diseñada para realizar una evaluación de la precisión y exactitud del método de inspección presentado. Figura 7 muestra la configuración experimental utilizada para validar el rendimiento del método de escaneo en condiciones dinámicas (utilizando el enfoque mencionado de las mediciones de desplazamiento utilizadas como parámetros de traslación y rotación para los escaneos individuales tomados por el TVS), así como para demostrar y cuantificar la ventaja del sistema trabajando en diferentes condiciones de luz.

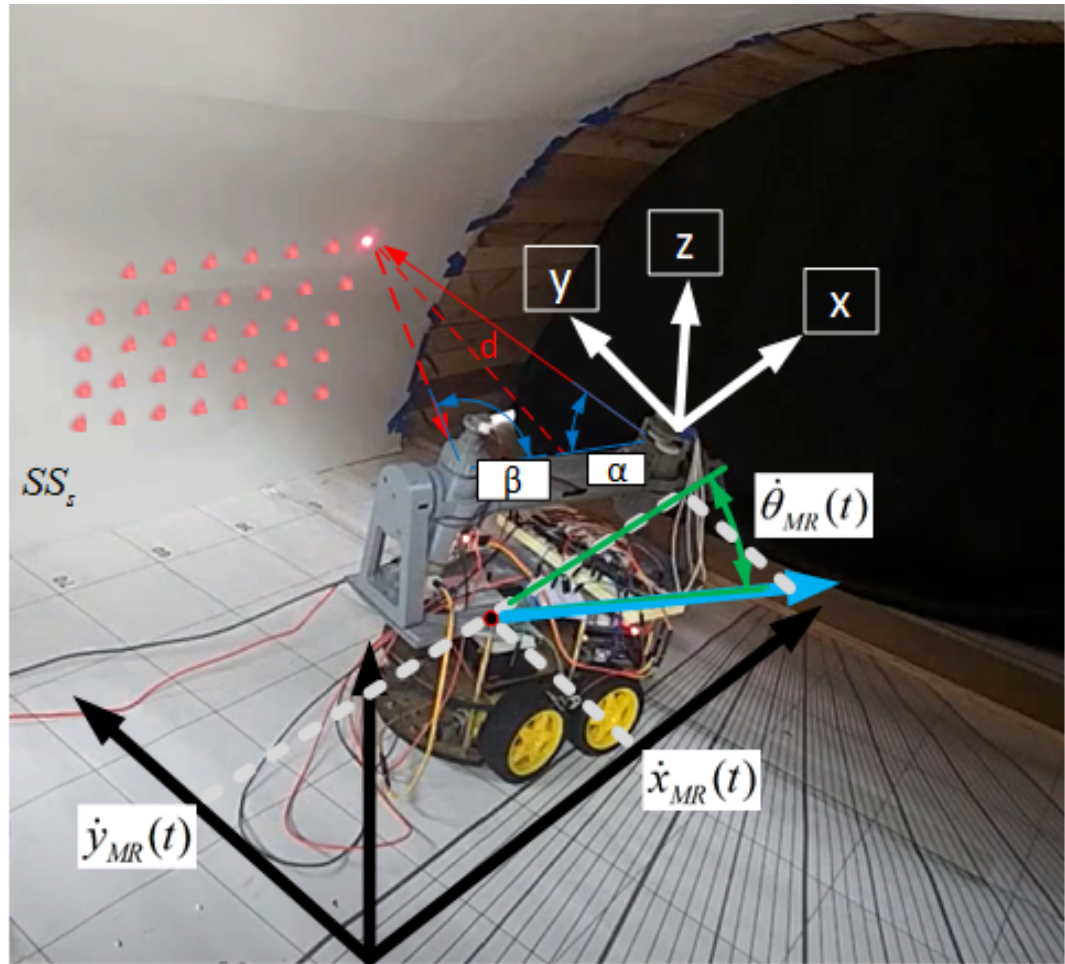


Figura 18. Representación del algoritmo de escaneo en configuración experimental. Generación de nubes de puntos con desplazamiento del RM.

El experimento consistió en diferentes escaneos individuales del TVS. Mientras que el RM se mueve a lo largo de la longitud de la sección de la tubería, el TVS cubre toda la superficie lateral de la tubería. La Figura 18 muestra la generación de la nube de puntos de la tubería. Los escaneos individuales o laterales de la tubería se identifican como iteraciones, donde SS_s es el número de iteración (o lado inspeccionado) en el escaneo de en curso.

En la Figura 18, el RM se mueve dentro de la sección de la tubería (simulada con una superficie semicilíndrica de madera, utilizada para proporcionar tanto la muestra

de superficie como la cámara de oscuridad), y el TVS escanea la superficie interna de la tubería. Como se mencionó anteriormente, el programa del robot está configurado para moverse a una velocidad cuasi-estática (pero aún variable); dando al TVS tiempo suficiente para realizar escaneos. El TVS escanea la superficie de la sección interna de la tubería, y el odómetro del robot y las unidades de medición de desplazamiento almacenan los datos de movimiento para aplicar la nueva posición a las nubes de puntos con coordenadas tridimensionales adquiridas por el sistema.

Para la aplicación en campo, el sistema deberá contar con capacidad de monitoreo de las condiciones energéticas del RM y el TVS. Esto, para asegurarse de que el RM viaje a lo largo de la tubería con un tercio de la energía de la batería, y con la energía restante vuelva al origen escaneando durante este movimiento la otra mitad de la tubería, asegurando así la completa automatización de la inspección de la tubería.

En cualquier iteración de escaneo, las unidades de medición de desplazamiento almacenan la posición real del RM y, por lo tanto, la posición del TVS (con respecto al origen del sistema de coordenadas O'_{xyz}), y cada punto tomado por el TVS se traslada y se rota con la ecuación (22) para generar un escaneo completo de superficie, combinando ambas mitades de los escaneos laterales mencionados.

Los resultados finales de la unión de ambos escaneos en una nube de puntos única que representa la superficie escaneada de la tubería se presentan más adelante en este documento en la sección de “Experimentación”.

El sistema de inspección adquiere un lado de la tubería (SS_s) hasta que la batería disminuye a un nivel de batería establecido por B_{li} . En ese momento el RM gira en su propio eje vertical con un movimiento de control o tracción diferencial (skid-steer en inglés), la orientación y el cambio de posición del RM se capturan con la plataforma inercial y se almacenan en T_v , y $\dot{\theta}_{MR}(t)$, que son matrices con la correspondencia adecuada de ij . El lado opuesto de la tubería se adquiere al momento del regreso del RM a la posición inicial de la inspección. Con este funcionamiento, el RM realiza una inspección completa de la sección de la tubería y es capaz de identificar defectos en su superficie.

Para poder comparar el funcionamiento de los diferentes prototipos del TVS se realizó el ajuste experimental observado en Figura 19. El rendimiento estático del prototipo del TVS # 2 (a la izquierda en la imagen), se comparó con el funcionamiento del prototipo # 3 del TVS (lado derecho, que se utiliza para el sistema de inspección de la Ahorrar energía es útil en un escaneo totalmente automatizado ya que de esta manera se puede alcanzar una mayor distancia de tubería inspeccionada con la misma batería.).

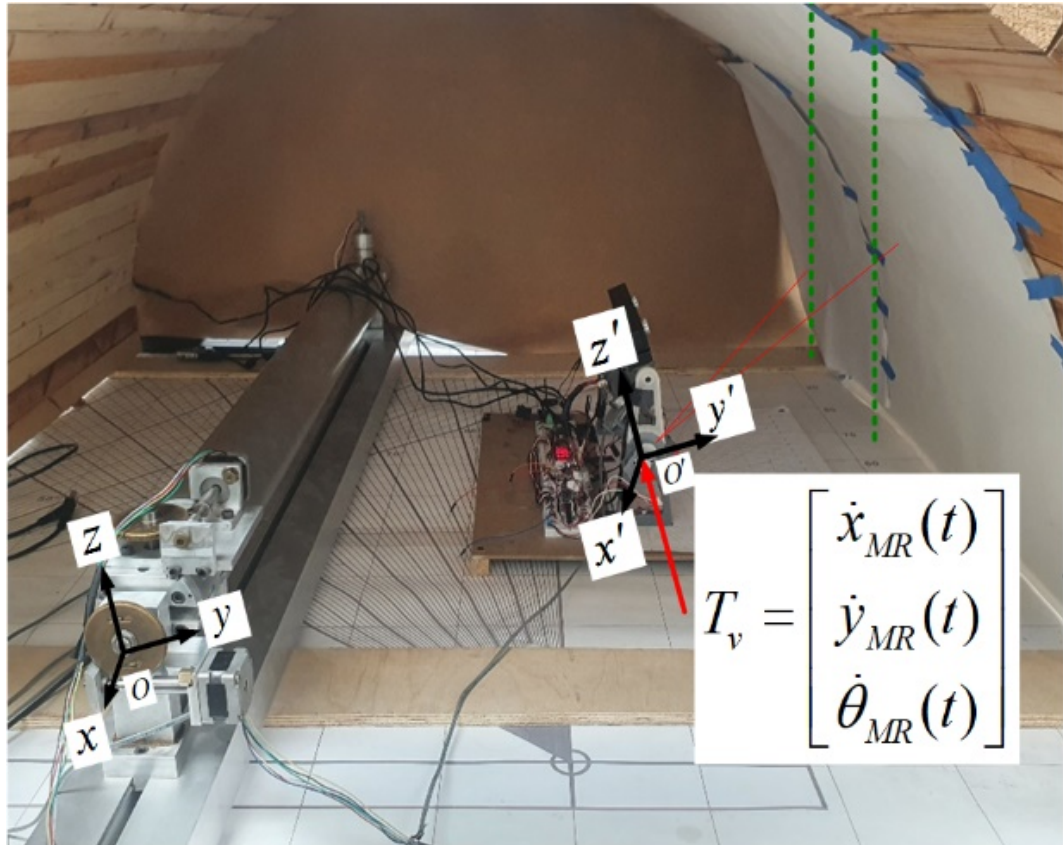


Figura 19. Montaje experimental. Validación del uso del vector de desplazamiento para la obtención de nubes de puntos completas.

En la configuración experimental de la Figura 19 el prototipo # 2 del TVS se toma como el sistema de coordenadas original o de referencia O y el prototipo # 3 es el sistema de coordenadas móvil O' (trasladado en este experimento por un mecanismo de reloj preciso, unido con el prototipo # 3 por un cable y una polea), que se traslada por T_v .

En comparación, toda la nube de puntos adquirida con el prototipo # 2 puede ser evaluada por el RANSAC sin ajustes de nubes de puntos, mientras que la nube de puntos adquirida por el prototipo # 3 debe alinearse después de las traslaciones con T_v , esto, debido a la desviación de los puntos medidos en las zonas de menor precisión del campo de visión. Sin embargo, las desviaciones presentes en las mediciones que

conforman la nube de puntos resultante no afectan significativamente el análisis final realizado mediante el algoritmo RANSAC.

Estos experimentos demuestran que, tomar varias nubes de puntos y combinarlas con respecto a una posición de referencia almacenada (T_v) es útil para el análisis de tuberías a gran escala. Además, la incorporación de las unidades de medición de desplazamiento del RM para registrar cambios de posición permiten que el sistema de inspección reconstruya completamente la superficie interna de la tubería.

La Figura 20 muestra la nube de puntos obtenida de la inspección realizada por el TVS. Como se puede observar, la nube de puntos medida presenta la curvatura de la superficie interna de la tubería.

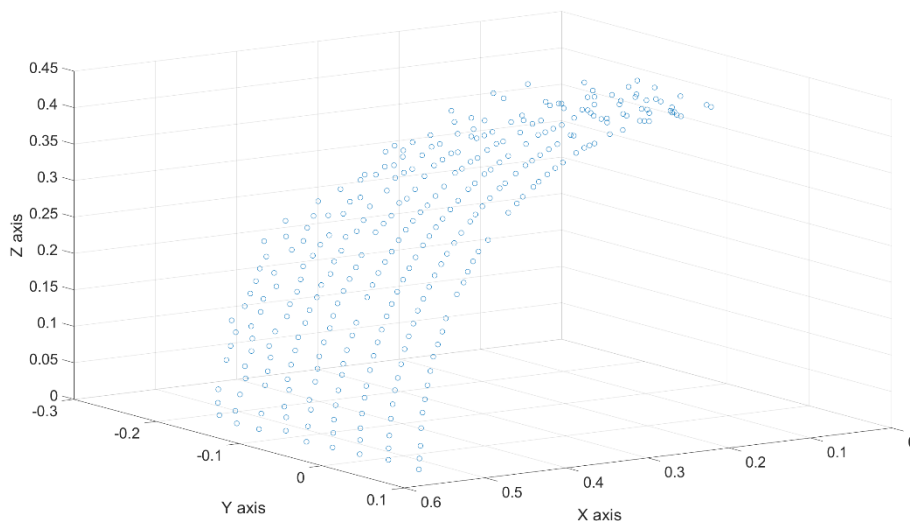


Figura 20. Resultado del escaneo lateral de tubería. Nube de puntos: 1400 mediciones.

La Figura 21 es la nube de puntos final adquirida después de escanear el segundo lado de la tubería y ambos se han ajustado mediante la ecuación (22).

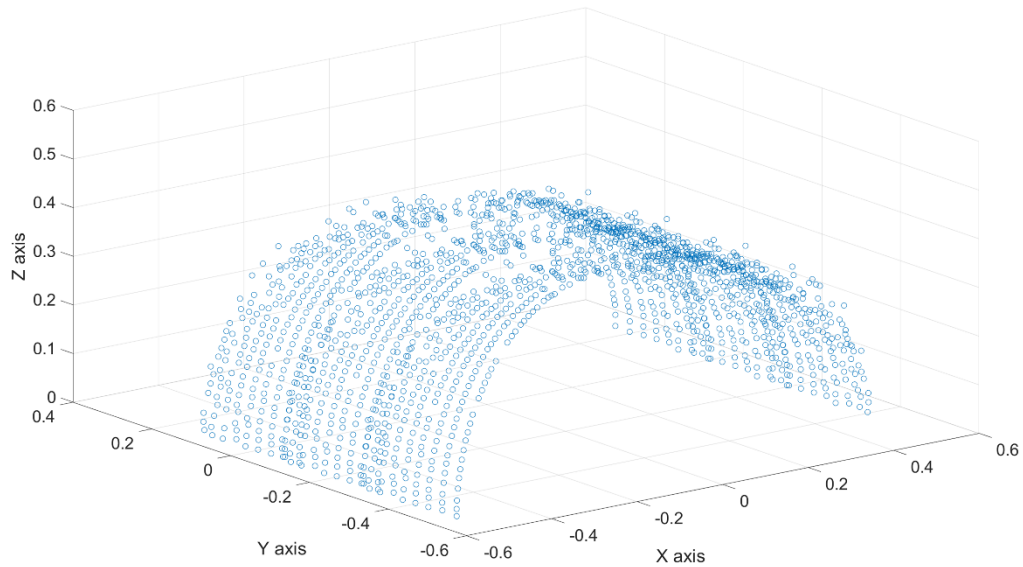


Figura 21. Sección completa de la tubería después de un segundo escaneo. Nube de puntos: 2792 mediciones.

Después de las primeras experimentaciones es necesario probar el uso del algoritmo RANSAC para identificar valores atípicos en las nubes de puntos adquiridas por el sistema de inspección y verificar su eficiencia en la identificación de la condición de la tubería. Como se explica en la sección 3 de la metodología, el algoritmo en la Figura 11 evalúa el perfil circular de la tubería en la etapa de segmentación, haciendo uso del algoritmo "RANSAC" modificado para verificar la condición (26). Al agregar el eje de tiempo del proceso, se puede considerar que se está verificando el perfil cilíndrico de la tubería completa.

Al perfilar las nubes de puntos adquiridas en círculos, fue posible obtener los siguientes resultados.

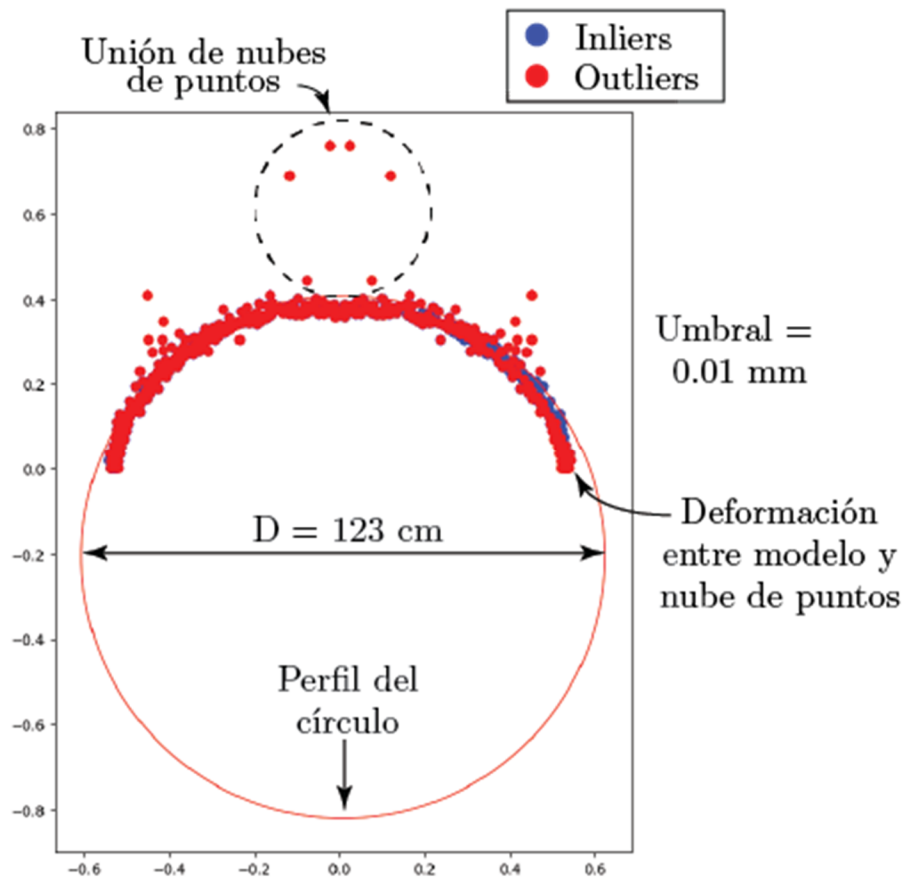


Figura 22. Primer ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t = 0.01$ mm), Ideal, Rojo: Los valores atípicos (se eliminarán del resultado), el azul (Inliers) se mantendrá para el resultado.

El gráfico de Figura 22 muestra el primer ajuste al perfil ideal con el algoritmo del RANSAC sin alteraciones y con un umbral de detección de 0.01 mm. Como se puede observar la mayoría de los puntos se clasifican o identifican como valores atípicos, esto se debe al error inherente del TVS a la hora de tomar mediciones.

En el gráfico de la Figura 23 se muestra el resultado del perfilado después de ajustar el umbral al error espacial de medición del TVS, que es de 0.5 mm. En este caso, se aprovecha el 87 % de la nube de puntos original para evaluar las condiciones de la tubería. Con el ajuste del umbral, el RANSAC identifica con éxito los valores atípicos que están lejos de la nube de puntos que define la superficie de la tubería. En este caso,

el algoritmo identifica correctamente los parámetros del perfil circular: diámetro y centro, que en la práctica deberían aquellos que definan las dimensiones de la tubería inspeccionada.

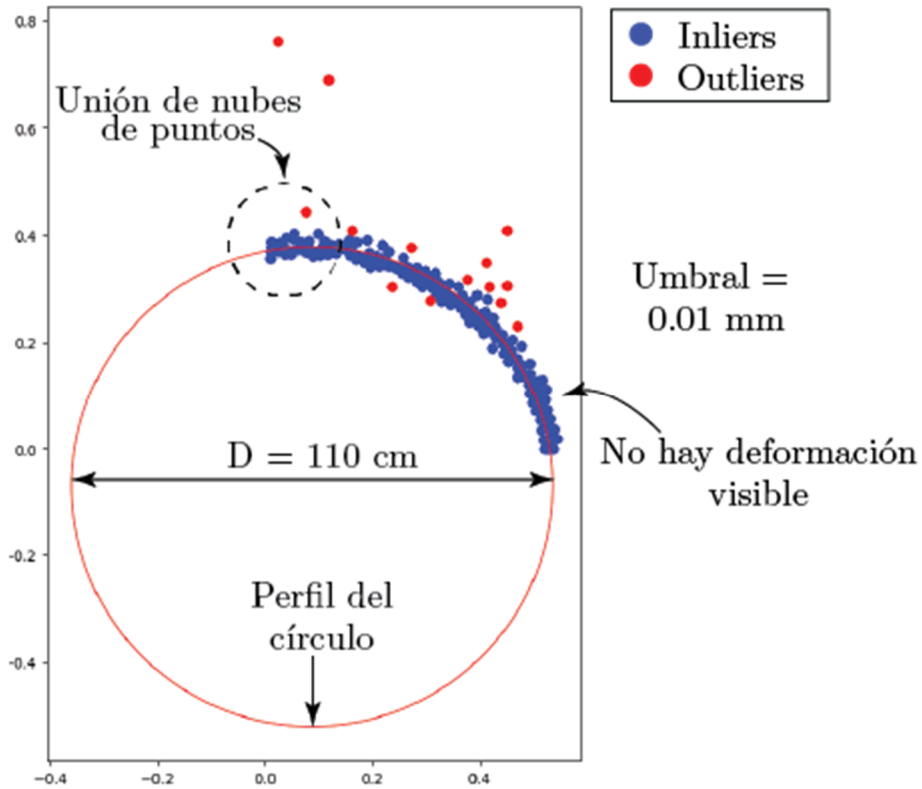


Figura 23. 2º ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t=0.5 \text{ mm}$), error medio de TVS, Rojo: Los valores atípicos (se eliminarán del resultado), el azul (Inliers) se mantendrá para el resultado.

Es importante tener en cuenta que, al identificar las dimensiones de la tubería por medio de nube de puntos adquirida por el escáner láser, la mayoría de los puntos de la nube no serían útiles, debido a las desviaciones por el error en las mediciones del TVS producirán una nube de puntos distorsionada. Por lo tanto, es necesario un proceso posterior a la nube puntos para adquirir las dimensiones y características de la tubería. Sin embargo, esta experimentación demostró la utilidad del algoritmo RANSAC para

esta aplicación específica. El algoritmo se modifica para clasificar los valores atípicos de diferentes maneras en función de ciertas condiciones.

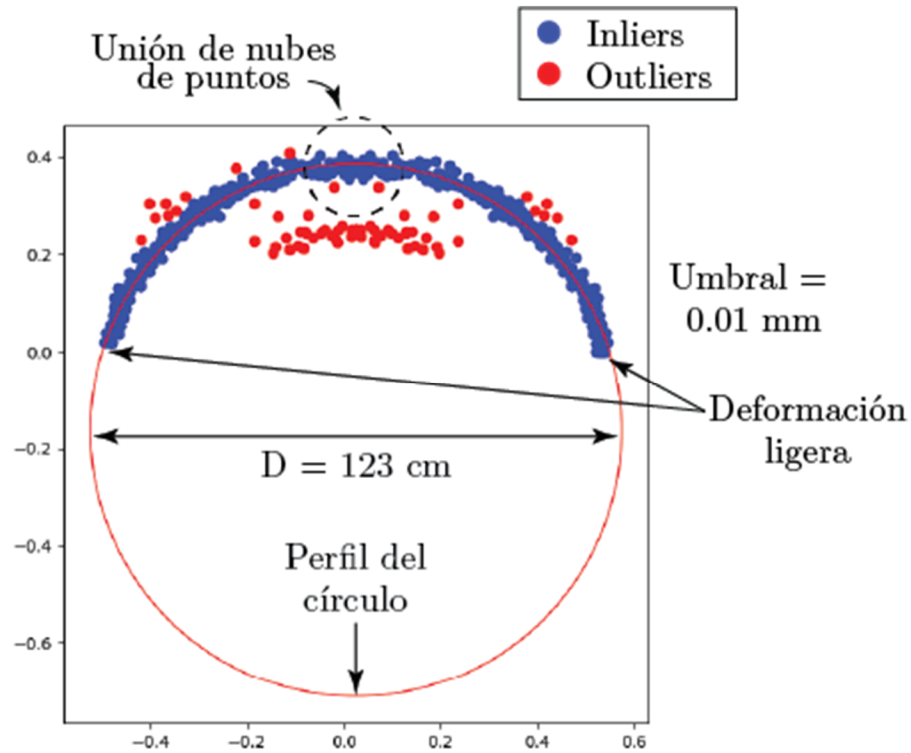


Figura 24. 3º ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t=0.5$ mm), Rojo (Valores atípicos), Azul (inliers).

La Figura 24 muestra la nube de puntos tomada con la presencia de un obstáculo artificial en el interior de la superficie de la tubería, después de perfilar las dimensiones de la tubería, también se observa que un grupo de valores atípicos en el interior del círculo representan un obstáculo.

La segunda novedad del método propuesto se puede determinar a partir del análisis de la Figura 22, la Figura 23, y Figura 24 . También se centra en el aumento de la robustez del sistema mediante un algoritmo de análisis simplificado. Realmente, si podemos mirar la Figura 24, podemos ver varios aspectos interesantes. La deformación detectada del perfil de la superficie interna (simulada en el experimento por una pieza

de poliestireno expandido o “unicel” montada en la pared de la tubería) puede ser reconocida por el sistema óptico como valores atípicos en la ubicación del defecto. Los valores atípicos externos de la Figura 22 son eliminados robustamente por RANSAC, por comparación bajo la simple condición de "punto fuera del radio del perfil detectado", los puntos internos de la Figura 24 se pueden clasificar bajo una condición aún más simple: el sistema está verificando (en el algoritmo de control de inspección de Figura 11) la densidad de puntos en esta nube de "valores atípicos internos". Si la distancia entre estos dos valores atípicos adyacentes es mayor que la distancia media en cm detectado experimentalmente, dichos puntos son realmente valores atípicos y sus coordenadas se pueden eliminar. Pero, si la distancia entre puntos es menor que Z , tal nube de puntos es el defecto interno de la tubería detectado, y sus coordenadas 3D son las de la ubicación de la deformación.

La eficiencia práctica de este enfoque se confirma e ilustra en Figura 25, en este caso los defectos encontrados en el experimento, simulados dos piezas de por poliestireno expandido o “unicel” separadas, montadas en el mismo lugar, el cual resulta inconveniente para escanear. El punto superior de la tubería con respecto al sistema de inspección.

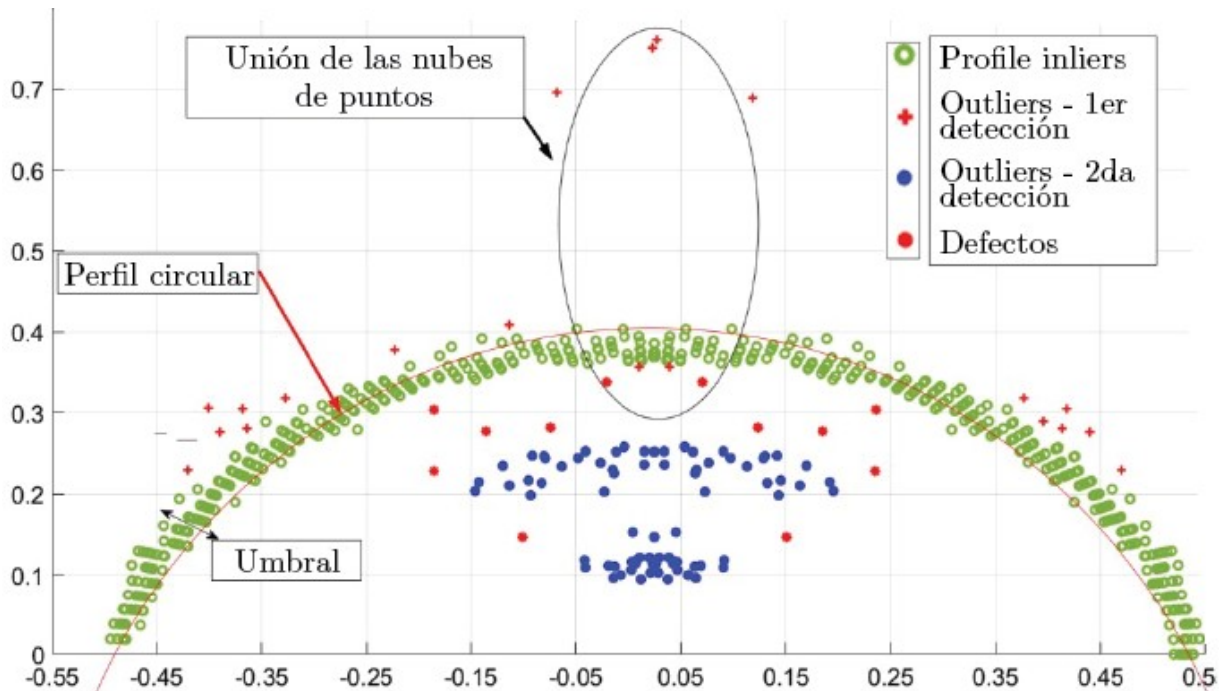


Figura 25. 4º ajuste de perfil con RANSAC, umbral ($t = 0.5 \text{ mm}$), Verde (Inliers), Rojo + (Outliers) con el método de la distancia al centro del círculo, Rojo * (Outliers) con el método del k-vecino más cercano, Azul (posible objeto). Unión de nubes de puntos en la parte superior del perfil del círculo.

Por último, la tercera novedad es la posibilidad de que el sistema puede realizar inspección de tuberías de diferente diámetro independientemente de las dimensiones del mismo, lo que nos permite explorar tuberías de diferentes diámetros o incluso con diámetro variable, y que sería imposible, con otros métodos como en el presentado en [5].

Además, la tecnología de impresión 3D para la mayoría de las partes del sistema de inspección, incluidas las partes de escáner láser o TVS, en la práctica permite variar casi sin restricciones el tamaño del RM ajustándolo a cualquier diámetro de tubería.

4.4.1. Análisis del error en la nube de puntos

Para analizar el error de una nube de puntos, se emplean comúnmente métodos como la medición de distancias entre puntos, el cálculo de estadísticas de errores globales o la comparación con una superficie de referencia [59], [60], [61], [62]. En el caso de las nubes de puntos adquiridas mediante el TVS, el análisis se realiza en relación con una superficie de referencia. Esto permite evaluar el rendimiento del sistema como una unidad y compararlo con los rangos de error reportados en la literatura. Por ejemplo, en [9] se utilizó un tubo de metal corroído de 600 mm de diámetro para probar el método, logrando una precisión de 1 mm. Por otro lado, estudios como [9], [10], [11] reportan precisiones cercanas a los 7 mm. Este análisis permitirá determinar el desempeño del sistema de inspección propuesto en comparación con otros métodos documentados.

La superficie de referencia utilizada para comparación con las nubes de puntos adquiridas en el proceso de inspección será una tubería de referencia ideal adquirida de los planos de fabricación de las tuberías a inspeccionar.

La nube de puntos ideal se compara con la nube de puntos medida, calculando las diferencias de distancia entre cada punto medido P_i y su punto correspondiente en la referencia ideal. Esta comparación está representada en la Figura 26. En la figura la nube de referencia está representada en color naranja y la nube de puntos medida en color azul.

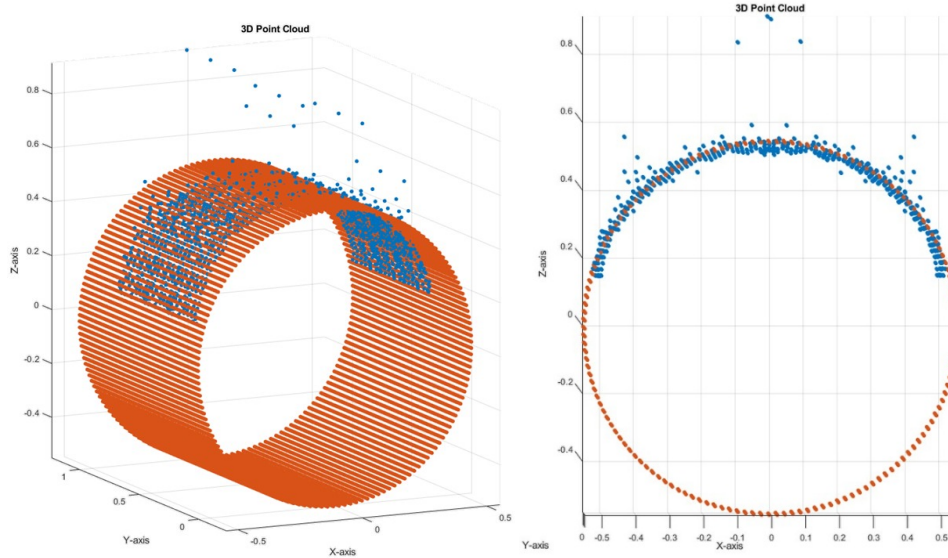


Figura 26. Vista de la alineación de la nube de puntos de referencia (naranja) y medida (azul).

Para que esta comparación sea válida, es necesario alinear ambas nubes de puntos, posicionando sus centros en un origen común o referencia compartida. Esto se logra mediante las técnicas de traslación y rotación, que aseguran la superposición adecuada de las nubes. La Figura 26 muestra el resultado después de este proceso.

Debido a que estas nubes de puntos generalmente tienen densidades de datos diferentes, es crucial determinar qué puntos de la nube medida corresponden a los puntos de la nube de referencia. Para resolver esta correspondencia, se utiliza un algoritmo similar al Método Iterativo del Punto Más Cercano (ICP, por sus siglas en inglés, Iterative Closest Point), ampliamente empleado en la alineación de nubes de puntos [55], [61], [63], [64], [65]. Este algoritmo calcula las distancias entre cada punto de una nube y los puntos en la otra nube, identificando las correspondencias en función de la menor distancia entre ellos mediante (27).

$$\min d(P_i^{medida}, P_j^{referencia}) \quad (27)$$

Donde, $\min d$ es la distancia mínimo entre cada par de puntos (i, j) , i es el punto correspondiente de la nube medida al punto j en la nube de referencia.

El cálculo del error de la nube de puntos se realiza usando el error absoluto (28), que representa la magnitud de las diferencias espaciales (desplazamientos) en cada uno de los tres ejes (x, y, z) .

$$ErrorAbsoluto = |P_i^{medida} - P_j^{ideal}| \quad (28)$$

Este cálculo permite evaluar el error total y observar cómo se distribuye el error en las nubes de puntos adquiridas. El análisis resultante facilita la identificación de patrones de error y áreas de mejora en el proceso de adquisición o alineación de datos.

A continuación, se presentan las distribuciones de frecuencias del error absoluto de la nube de puntos adquirida antes de la eliminación de los outliers y después de la eliminación de los outliers.

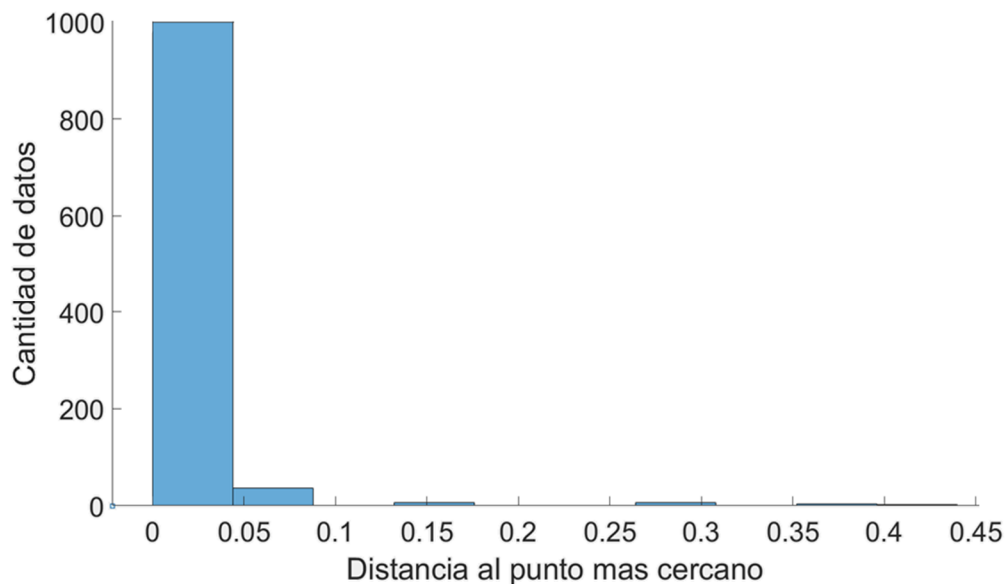


Figura 27. Distribución de frecuencias del error absoluto para la nube de puntos antes de eliminar outliers.

En la Figura 27 se presenta el histograma del error absoluto de una nube de puntos antes de la eliminación de los outliers. En este caso se presentan errores de hasta 30 cm en el peor caso de error (esto debido a la presencia de outliers en la nube de datos).

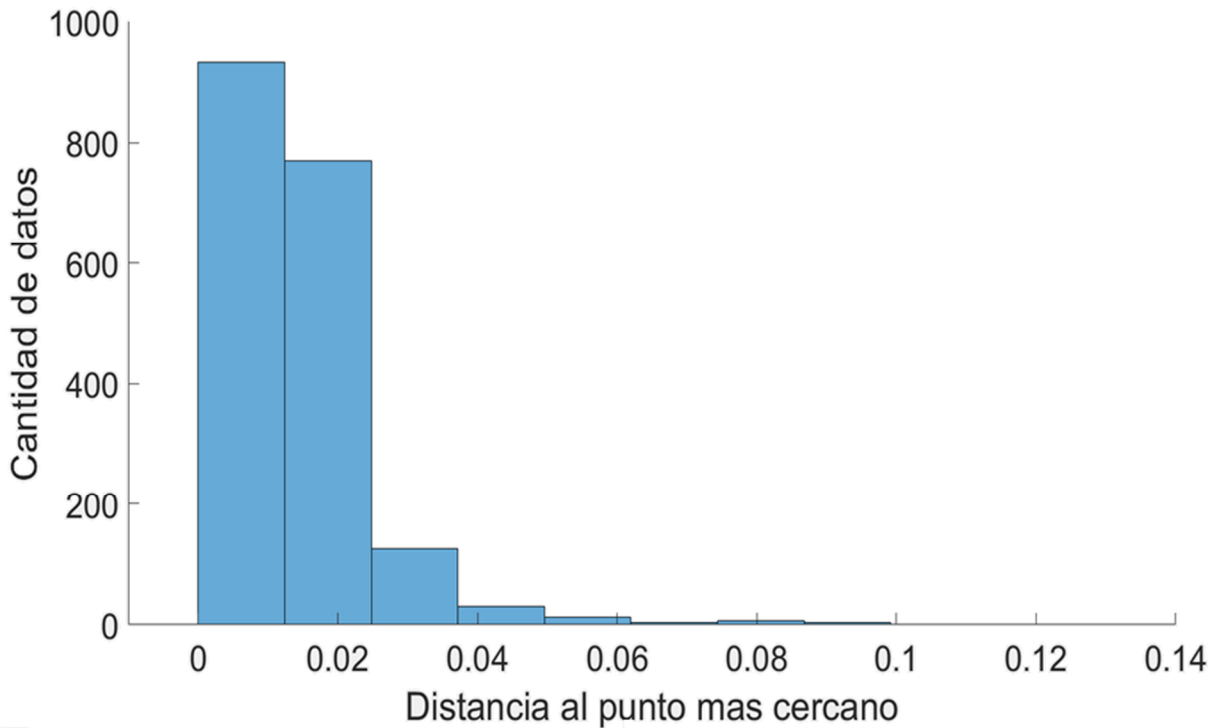


Figura 28. Distribución de frecuencia del error absoluto de la nube de puntos después de la remoción de outliers.

Por último, en la Figura 28 se puede observar que después de eliminar los outliers de la nube de puntos final, la distribución del error de la nube de puntos se vuelve menos ancha. Esto debido a los errores que influyen mayormente a que el histograma modifique su forma se eliminan satisfactoriamente por medio del algoritmo del RANSAC, probando su efectividad.

5. Conclusiones

En esta investigación se presentó una metodología de inspección para la estimación de la integridad estructural de tuberías, utilizando el Escáner Láser TVS. Durante el desarrollo, se consideraron factores relevantes como las condiciones físicas de las tuberías y las limitaciones propias de inspecciones automatizadas, particularmente en entornos de difícil acceso.

Se investigaron y analizaron los fenómenos ópticos inherentes al TVS que potencian su rendimiento en condiciones de baja luminosidad. Esto permitió identificar y aprovechar ventajas significativas en la adquisición de nubes de puntos, mejorando la eficiencia del sistema. Además, se evaluó el estado actual del TVS, realizando modificaciones necesarias al prototipo para validar el método de barrido tridimensional.

El principal desafío fue desarrollar un formalismo matemático optimizado que permitiera obtener resultados confiables a partir del escaneo de la superficie interna. Esto, con la intención de que el sistema utilice menos tiempo y recursos computacionales. Este enfoque contribuyó a aumentar la robustez del sistema en la etapa de adquisición, evitando el procesamiento de información redundante y facilitando la detección de defectos.

Los resultados experimentales obtenidos demuestran que el sistema de medición TVS cumple con los requisitos de la aplicación para la tarea seleccionada. Además, la integración del TVS con una plataforma robótica móvil (RM) es adecuada

para la inspección automatizada de tuberías, mejorando la eficiencia y fiabilidad del proceso, en comparación [6], [7], [37], [45], [66].

En particular, el uso del algoritmo RANSAC fue fundamental para identificar el perfil de la tubería mediante el reconocimiento de valores atípicos. Además, como muestran los experimentos, esta etapa preliminar permitió clasificar y detectar defectos de manera eficiente, como se detalla en la sección 3. Asimismo, la eficiencia en la adquisición de la nube de puntos mejora debido a las propiedades naturales del funcionamiento del escaneo láser.

Una de las principales ventajas del sistema propuesto es su capacidad para detectar cambios en el perfil circular de la superficie de la tubería con una incertidumbre adecuada. Esto se logra gracias al algoritmo simplificado de detección de valores atípicos, lo que permite que el sistema funcione de manera robusta incluso en movimiento, sin pérdidas significativas de confiabilidad.

La aplicación del RANSAC ofrece dos beneficios clave; Mayor eficiencia en la utilización de puntos medidos. El porcentaje de puntos útiles alcanzó un 80.87% a partir de una muestra de 800 mediciones, utilizando un nivel de umbral de 0.5 mm; Clasificación precisa de defecto. El análisis de los valores atípicos en relación con el centro del perfil circular permitió reducir los defectos potenciales detectados del 17.82% al 16.79%, utilizando un algoritmo de vecindad y distancia radial desde el origen del perfil circular obtenido mediante el análisis del RANSAC.

Finalmente, se considera que la eficiencia del sistema ha mejorado al maximizar la utilidad de las mediciones realizadas y eliminar la necesidad de etapas

adicionales de escaneo y procesamiento. Estos avances hacen que el sistema propuesto sea una herramienta prometedora para la inspección de tuberías en condiciones de operación complejas, contribuyendo al campo de la automatización en mantenimiento estructural.

Para cerrar la sección de conclusiones se hace mención en este último párrafo de las posibles áreas de oportunidad que posee el prototipo utilizado en este proyecto de investigación y se hace mención de otras aplicaciones en las que se podría enfocar el uso de la metodología aquí propuesta. La variable k (número de muestras utilizadas para una sola medición) promedio, es significativa en la mejora de la precisión de las mediciones del TVS, para poder aumentar el número de muestras utilizadas, la tasa de muestreo de la SA, PL y el Teensy del TVS deben aumentar, esto, mediante el rediseño de los elementos y componentes del escáner, u optimizarse por medio de algoritmos programáticos y matemáticos que logren este cometido. Entre las áreas de investigación en las que el sistema podría mejorar en trabajos futuros están; la modificación del algoritmo RANSAC para el ajuste de un cuerpo cilíndrico (en lugar de los perfiles circulares) para la clasificación de defectos, esto para comparar el rendimiento en ambos escenarios y encontrar la manera de optimizar el funcionamiento.

Referencias

- [1] S. A. Abubakar, S. Mori, and J. Sumner, “A Review of Factors Affecting SCC Initiation and Propagation in Pipeline Carbon Steels,” *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 8, p. 1397, Aug. 2022, doi: 10.3390/met12081397.
- [2] H. Zhu, T. Wang, Y. Wang, and V. C. Li, “Trenchless rehabilitation for concrete pipelines of water infrastructure: A review from the structural perspective,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 123, p. 104193, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.104193.
- [3] A. Shukla and H. Karki, “Application of robotics in onshore oil and gas industry-A review Part i,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 75, pp. 490–507, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.robot.2015.09.012.
- [4] PEMEX, “Base de Datos Institucional | Estadísticas operativas seleccionadas.” Accessed: Nov. 16, 2022. [Online]. Available: <https://ebdi.pemex.com/bdi/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=MESTADOP>
- [5] W. L. Mathieson, P. Croft, and F. J. Wuttig, “Infrastructure Adaptions to Changing Permafrost Conditions—Three Case Studies along the Trans Alaska Pipeline System,” in *Geo-Congress 2020: Geotechnical Earthquake Engineering and Special Topics*, American Society of Civil Engineers (ASCE), Feb. 2020, pp. 913–925. doi: 10.1061/9780784482810.095.
- [6] A. Shukla, H. Xiaoqian, and H. Karki, “Autonomous tracking of oil and gas pipelines by an unmanned aerial vehicle,” in *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jul. 2016. doi: 10.1109/MWSCAS.2016.7870114.
- [7] J. H. Kim, G. Sharma, and S. S. Iyengar, “FAMPER: A fully autonomous mobile robot for pipeline exploration,” *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 517–523, 2010, doi: 10.1109/ICIT.2010.5472748.
- [8] N. S. Roslin, A. Anuar, M. F. A. Jalal, and K. S. M. Sahari, “A review: Hybrid locomotion of in-pipe inspection robot,” *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 1456–1462, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.335.
- [9] A. Gunatilake, L. Piyathilaka, A. Tran, V. K. Vishwanathan, K. Thiagarajan, and S. Kodagoda, “Stereo vision combined with laser profiling for mapping of pipeline internal defects,” *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 10, pp. 11926–11934, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3040396.
- [10] J. Latif, M. Z. Shakir, N. Edwards, M. Jaszczykowski, N. Ramzan, and V. Edwards, “Review on condition monitoring techniques for water pipelines,” *Measurement*, vol. 193, p. 110895, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2022.110895.

- [11] K. Tan and X. Cheng, "Correction of Incidence Angle and Distance Effects on TLS Intensity Data Based on Reference Targets," *Remote Sens.*, vol. 8, no. 3, p. 251, Mar. 2016, doi: 10.3390/rs8030251.
- [12] R. K. Leach, "The measurement of surface texture using stylus instruments.," 2014, Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://eprintspublications.npl.co.uk/2041>
- [13] Y. Zhongdong, W. Peng, L. Xiaohui, and S. Changku, "3D laser scanner system using high dynamic range imaging," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 54, pp. 31–41, 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.09.003.
- [14] S. Xiang, S. Chen, X. Wu, D. Xiao, and X. Zheng, "Study on fast linear scanning for a new laser scanner," *Opt. Laser Technol.*, vol. 42, no. 1, pp. 42–46, 2010, doi: 10.1016/j.optlastec.2009.04.019.
- [15] C. Alexander, J. E. Moeslund, P. K. Bøcher, L. Arge, and J. C. Svenning, "Airborne laser scanner (LiDAR) proxies for understory light conditions," *Remote Sens. Environ.*, vol. 134, pp. 152–161, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.rse.2013.02.028.
- [16] N. A. Haddad, "From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 23, no. 2, pp. 109–118, 2011. doi: 10.1016/j.jksues.2011.03.001.
- [17] O. Sergiyenko, W. Hernandez, V. Tyrsa, L. F. D. Cruz, O. Starostenko, and M. Peña-Cabrera, "Remote sensor for spatial measurements by using optical scanning," *Sensors*, vol. 9, no. 7, pp. 5477–5492, Jul. 2009, doi: 10.3390/s90705477.
- [18] O. Y. Sergiyenko and V. V. Tyrsa, "3D Optical Machine Vision Sensors with Intelligent Data Management for Robotic Swarm Navigation Improvement," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 10, pp. 11262–11274, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3007856.
- [19] L. C. Básaca-Preciado *et al.*, "Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 54, pp. 159–169, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.08.005.
- [20] J. O. Santos-Sanchez *et al.*, "Analysis of the construction of an autonomous robot to improve its energy efficiency when traveling through irregular terrain," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, vol. 2022-Octob, 2022, doi: 10.1109/IECON49645.2022.9968541.
- [21] R. Alaniz-Plata *et al.*, "ROS and Stereovision Collaborative System," *Optoelectron. Devices Robot. Syst.*, pp. 71–113, 2022, doi: 10.1007/978-3-031-09791-1_4.
- [22] O. Sergiyenko, *Optoelectronic Devices in Robotic Systems*. 2022. doi: 10.1007/978-3-031-09791-1.
- [23] C. Sepulveda-Valdez *et al.*, "Geometric analysis of a laser scanner functioning based on

- dynamic triangulation,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2020-June, pp. 1398–1403, Jun. 2020, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152268.
- [24] O. Real-Moreno, M. J. Castro-Toscano, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernández-Balbuena, W. Flores-Fuentes, and M. Rivas-Lopez, “Implementing k-nearest neighbor algorithm on scanning aperture for accuracy improvement,” *Proc. IECON 2018 - 44th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 3182–3186, Dec. 2018, doi: 10.1109/IECON.2018.8592804.
- [25] C. Sepulveda-Valdez *et al.*, “Laser Scanning Point Cloud Improvement by Implementation of RANSAC for Pipeline Inspection Application,” Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Nov. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/iecon51785.2023.10312684.
- [26] M. R. Lopez *et al.*, “Optoelectronic Method for Structural Health Monitoring,” <http://dx.doi.org/10.1177/1475921709340975>, vol. 9, no. 2, pp. 105–120, Sep. 2009, doi: 10.1177/1475921709340975.
- [27] C. Sepulveda-Valdez *et al.*, “Point Cloud Optimization Employing Multisensory Vision,” *Scanning Technol. Auton. Syst.*, pp. 275–300, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-59531-8_10.
- [28] C. A. Sepulveda-Valdez *et al.*, “Circular Scanning Resolution Improvement by its Velocity Close Loop Control,” in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2019, pp. 244–249. doi: 10.1109/ISIE.2019.8781135.
- [29] O. Sergiyenko, V. Tyrsa, D. Hernandez-Balbuena, M. R. López, I. R. López, and L. D. Cruz, “Precise optical scanning for practical multi-applications,” in *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, 2008, pp. 1656–1661. doi: 10.1109/IECON.2008.4758202.
- [30] W. Flores-Fuentes, M. Rivas-Lopez, O. Sergiyenko, J. C. Rodríguez-Quiñonez, D. Hernández-Balbuena, and J. Rivera-Castillo, “Energy center detection in light scanning sensors for structural health monitoring accuracy enhancement,” *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 7, pp. 2355–2361, 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2310224.
- [31] J. C. Rodriguez, O. Y. Sergiyenko, V. V. Tyrsa, L. C. Basaca, and J. I. N. Hipólito, “Monitoreo continuo de rehabilitación en pacientes con escoliosis utilizando barrido Laser automático,” in *Pan American Health Care Exchanges, PAHCE 2011 - Conference, Workshops, and Exhibits. Cooperation / Linkages: An Independent Forum for Patient Care and Technology Support*, 2011, pp. 410–414. doi: 10.1109/PAHCE.2011.5871941.
- [32] C. Sepulveda-Valdez *et al.*, “Mathematical Modeling for Robot 3D Laser Scanning in Complete Darkness Environments to Advance Pipeline Inspection,” *Mathematics*, vol. 12, no. 13, p. 1940, Jun. 2024, doi: 10.3390/math12131940.

- [33] O. Y. Sergiyenko *et al.*, “Data transferring model determination in robotic group,” *Rob. Auton. Syst.*, vol. 83, pp. 251–260, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.robot.2016.04.003.
- [34] J. Rivera-Castillo *et al.*, “Experimental image and range scanner datasets fusion in SHM for displacement detection,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 24, no. 10, p. e1967, Oct. 2017, doi: 10.1002/stc.1967.
- [35] V. Gikas, “Three-dimensional laser scanning for geometry documentation and construction management of highway tunnels during excavation,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 12, no. 8, pp. 11249–11270, 2012, doi: 10.3390/s120811249.
- [36] M. Oludare Idrees and B. Pradhan, “A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development,” *International Journal of Speleology*, vol. 45, no. 1. University of South Florida Board of Trustees, a public body corporate, having locations in Tampa, St. Petersburg, and Sarasota, pp. 71–88, Jan. 01, 2016. doi: 10.5038/1827-806x.45.1.1923.
- [37] T. D. Barfoot *et al.*, “Into darkness: Visual navigation based on a lidar-intensity-image pipeline,” in *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Springer Verlag, 2016, pp. 487–504. doi: 10.1007/978-3-319-28872-7_28.
- [38] J. A. Núñez-López *et al.*, “Advances in Laser Positioning of Machine Vision System and Their Impact on 3D Coordinates Measurement,” *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Nov. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/iecon51785.2023.10312329.
- [39] A. Latoui and M. El Hossine Daachi, “Implementation of Q-Learning Algorithm on Arduino: Application to Autonomous Mobile Robot Navigation in COVID-19 Field Hospitals,” in *International Conference on Electrical, Computer, and Energy Technologies, ICECET 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/ICECET52533.2021.9698498.
- [40] R. Febbo, B. Flood, J. Halloy, P. Lau, K. Wong, and A. Ayala, “Autonomous Vehicle Control Using a Deep Neural Network and Jetson Nano,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Jul. 2020, pp. 333–338. doi: 10.1145/3311790.3396669.
- [41] S. Vespoli, G. Guizzi, G. Converso, V. Popolo, and A. Tedesco, “An electrical DC Motor Equivalent Circuit testbed for the battery Prognostic Health and Management,” in *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2019 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jun. 2019, pp. 108–111. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792849.
- [42] S. Singh, M. Weeber, and K. P. Birke, “Advancing digital twin implementation: A toolbox for modelling and simulation,” in *Procedia CIRP*, Elsevier, Jan. 2021, pp. 567–572. doi: 10.1016/j.procir.2021.03.078.
- [43] Z. Wang, Q. Cao, N. Luan, and L. Zhan, “Development of an autonomous in-pipe robot for offshore pipeline maintenance,” *Ind. Rob.*, vol. 37, no. 2, pp. 177–184, 2010, doi:

10.1108/01439911011018957.

- [44] W. Hernandez, J. de Vicente, O. Y. Sergiyenko, and E. Fernández, “Improving the response of accelerometers for automotive applications by using LMS adaptive filters: Part II,” *Sensors*, vol. 10, no. 1, pp. 952–962, Jan. 2010, doi: 10.3390/s100100952.
- [45] A. Nayak and S. K. Pradhan, “Design of a new in-pipe inspection robot,” *Procedia Eng.*, vol. 97, pp. 2081–2091, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.451.
- [46] J. César Velázquez *et al.*, “Effects of depth in external and internal corrosion defects on failure pressure predictions of oil and gas pipelines using finite element models,” *journals.sagepub.comS Capula Colindres, GT Méndez, JC Velázquez, R Cabrera-Sierra, D Angeles-HerreraAdvances Struct. Eng. 2020•journals.sagepub.com*, vol. 23, no. 14, pp. 3128–3139, Oct. 2020, doi: 10.1177/1369433220924790.
- [47] J. Hegedüs-Kuti, J. Szölösi, D. Varga, J. Abonyi, M. Andó, and T. Ruppert, “3D Scanner-Based Identification of Welding Defects—Clustering the Results of Point Cloud Alignment,” *Sensors 2023, Vol. 23, Page 2503*, vol. 23, no. 5, p. 2503, Feb. 2023, doi: 10.3390/S23052503.
- [48] C. Wang, S. Wu, J. Xin, R. He, ... J. C.-2021 4th I., and undefined 2021, “Numerical simulation of oil and gas pipeline crack detection based on pulsed eddy current testing technology,” *ieeexplore.ieee.orgC Wang, S Wu, J Xin, R He, J Chen, D Wang2021 4th Int. Conf. Electron Device and, 2021•ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Dec. 09, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9434526/>
- [49] B. S. Marció, P. Nienhaysen, D. Habor, and R. C. C. Flesch, “Quality assessment and deviation analysis of three-dimensional geometrical characterization of a metal pipeline by pulse-echo ultrasonic and laser scanning techniques,” *Measurement*, vol. 145, pp. 30–37, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2019.05.084.
- [50] Z. Huang *et al.*, “A Novel Three-Dimensional Reconstruction Technology for the Defect Inspection of Tubing and Casing,” *Process. 2023, Vol. 11, Page 2168*, vol. 11, no. 7, p. 2168, Jul. 2023, doi: 10.3390/PR11072168.
- [51] J. Ling, X. Peng, K. Siggers, M. Peussner, R. Rayhana, and Z. Liu, “Reconstruction of 3-D pipeline corrosion defect profile from MFL signals with deep learning approach,” <https://doi.org/10.1117/12.3010024>, vol. 12952, pp. 61–68, May 2024, doi: 10.1117/12.3010024.
- [52] A. Nguyen and B. Le, “3D point cloud segmentation: A survey,” *IEEE Conf. Robot. Autom. Mechatronics, RAM - Proc.*, pp. 225–230, 2013, doi: 10.1109/RAM.2013.6758588.
- [53] R. Schnabel, R. Wahl, R. K.-C. graphics forum, and undefined 2007, “Efficient RANSAC for point-cloud shape detection,” *Wiley Online Libr. Schnabel, R Wahl, R KleinComputer Graph. forum, 2007•Wiley Online Libr.*, vol. 26, no. 2, pp. 214–226, 2007, doi: 10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x.

- [54] J. M. Martínez-Otzeta, I. Rodríguez-Moreno, I. Mendiáldua, and B. Sierra, “RANSAC for Robotic Applications: A Survey,” *Sensors 2023, Vol. 23, Page 327*, vol. 23, no. 1, p. 327, Dec. 2022, doi: 10.3390/S23010327.
- [55] J. Li, Q. Hu, and M. Ai, “Point Cloud Registration Based on One-Point RANSAC and Scale-Annealing Biweight Estimation,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 59, no. 11, pp. 9716–9729, Nov. 2021, doi: 10.1109/TGRS.2020.3045456.
- [56] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography,” *Commun. ACM*, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, Jun. 1981, doi: 10.1145/358669.358692.
- [57] O. Sergiyenko, V. Tyrsa, A. Zhirabok, A. Z.-C. E. Practice, and undefined 2023, “Sliding mode observer based fault identification in automatic vision system of robot,” *Elsevier*, Accessed: Dec. 06, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967066123001831>
- [58] O. Sergiyenko, V. Tyrsa, ... M. I.-... on P. E., and undefined 2020, “Fusion of knowledge bases for better navigation of wheeled mobile robotic group with 3D TVS,” *ieeexplore.ieee.org O Sergiyenko, V Tyrsa, M Ivanov, P Mercorelli, W Hernandez, M Kolendovska 2020 Int. Symp. Power Electron. Electr. 2020*•*ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Dec. 06, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9161957/>
- [59] H. Du, X. Yan, J. Wang, D. Xie, and S. Pu, “Rethinking the Approximation Error in 3D Surface Fitting for Point Cloud Normal Estimation.” pp. 9486–9495, 2023.
- [60] P. Li, R. Wang, Y. Wang, and W. Tao, “Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 68030–68048, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2986470.
- [61] F. Wang and Z. Zhao, “A survey of iterative closest point algorithm,” *Proc. - 2017 Chinese Autom. Congr. CAC 2017*, vol. 2017-January, pp. 4395–4399, Dec. 2017, doi: 10.1109/CAC.2017.8243553.
- [62] P. Bergmann and D. Sattlegger, “Anomaly Detection in 3D Point Clouds using Deep Geometric Descriptors,” in *Proceedings - 2023 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2023*, 2023, pp. 2612–2622. doi: 10.1109/WACV56688.2023.00264.
- [63] F. A. Maken, F. Ramos, and L. Ott, “Speeding up iterative closest point using stochastic gradient descent,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 2019-May, pp. 6395–6401, May 2019, doi: 10.1109/ICRA.2019.8794011.
- [64] L. Wang and X. Sun, “Comparisons of iterative closest point algorithms,” *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 331, pp. 649–655, 2015, doi: 10.1007/978-94-017-9618-7_68.
- [65] C. Lara, L. Romero, and F. Calderón, “A Robust Iterative Closest Point Algorithm with

Augmented Features,” pp. 605–614, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-88636-5_58.

- [66] M. B. Kaushik, P. Karthikeyan, and A. Jothilingam, “Design of Pipe-Inspection Robot for All Pipeline Configurations,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 26, pp. 1–3, 2016, Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: www.ijert.org