

Banco de pruebas para sensores de flujo (MFL) y ultrasónicos (UT – EMAT)

Juan Manuel Arguello & Juan Esteban Rodríguez

Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga
juan.arguello@upb.edu.co, juan.rodriguez.2019@upb.edu.co

Resumen— La necesidad de encontrar fuentes de energía no contaminantes, presenta como una alternativa el uso del hidrógeno verde como un combustible limpio y sostenible; que presenta cero emisiones de CO₂ y que se obtiene mediante el uso de energías renovables en su producción; donde para su transporte de forma segura desde la fuente hacia los centros de distribución, se utiliza una mezcla entre gas natural e hidrógeno, en una proporción 80 – 20; haciendo necesario desarrollar un sistema de detección predictiva de fallas estructurales de las tuberías de transporte de esta mezcla; para lo cual se necesita validar previamente el sistema propuesto, mediante un banco de pruebas de laboratorio desarrollado con una metodología exploratoria en la cual se tienen en cuenta parámetros técnicos, junto con las necesidades específicas de uso, y las condiciones de trabajo en campo; obteniendo un banco de pruebas robusto y versátil, que permite validar el adecuado funcionamiento de los sensores MFL y UT – EMAT desarrollados.

Palabras Clave— Hidrógeno verde, nuevas fuentes de energía, banco de pruebas, gas natural, detección predictiva, CO₂.

Recibido: 5 de noviembre de 2024. Revisado: 17 de febrero de 2025. Aceptado: 28 de febrero de 2025.

Design of a Test Bench for Flow (MFL) and Ultrasonic sensors

Abstract— The need to find non-polluting energy sources presents as an alternative the use of green hydrogen as a clean and sustainable fuel; which presents zero CO₂ emissions, and is obtained through the use of renewable energies in its production; where for its safe transport from the source to the distribution centers, a mixture of natural gas and hydrogen is used, in a proportion of 80 - 20; making it necessary to develop a predictive detection system for structural failures in the transport pipes of this mixture; for which it is necessary to previously validate the proposed system, through a laboratory test bench developed with an exploratory methodology in which technical parameters are taken into account, together with the specific needs of use, and the working conditions in the field; obtaining a robust and versatile test bench, which allows validating the proper functioning of the MFL and UT - EMAT sensors developed.

Keywords— Green hydrogen, new energy sources, test bench, natural gas, Predictive Detection, CO₂.

1 Introducción

La inspección de tuberías por medio de flujo magnético disperso (MFL), es una de las técnicas no destructivas más usadas en la industria; y consiste en detectar el campo magnético fugado por los eventuales defectos [1]. Esta fuga se presenta tanto en la cara en la que visualiza el defecto, como en la cara opuesta, y es significativa solo cuando las líneas del

campo magnético son aproximadamente perpendiculares a la dirección del defecto [2]. Así mismo, la inspección por ultrasonido (UT – EMAT), es un procedimiento de inspección no destructiva de tipo mecánico, que se basa en la impedancia acústica, la cual se manifiesta como el producto de la velocidad máxima de propagación del sonido entre la densidad de un material.

El transporte de hidrógeno se constituye en una tarea compleja, debido a su baja densidad volumétrica (0,071KG/m³), y su bajo punto de ebullición (-253°C), lo que ocasiona que se deba transportar disuelto en otra sustancia como lo es el gas natural. Al utilizarse infraestructura existente (gasoductos), la interacción presentada entre el gas natural y la tubería, pueden haber ocasionado el deterioro macro y microestructural, lo cual podría ocasionar una fuga peligrosa [3]. Teniendo en cuenta lo anterior, la Corporación para el Estudio de la Corrosión (CIC), la escuela de ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), sede Bucaramanga, y la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Unisangil, sede San Gil; pretenden desarrollar un sistema de inspección y detección de anomalías, a partir del diseño de un dispositivo portátil de sensado por medio de MFL y UT que permita la detección de fallas estructurales en las tuberías de transporte; para lo cual se hace necesario, en su fase inicial; el diseño de un banco de pruebas que permita validar las diferentes configuraciones propuestas para los sensores MFL y UT y así pueda ser correctamente implementado en el dispositivo portátil de detección a diseñar.

Este artículo presenta el diseño de un banco de pruebas que cumpla con el objetivo de realizar las diferentes pruebas de validación de sensores MFL y UT – EMAT, que serán implementados en la herramienta portátil de detección de anomalías estructurales de un sistema de transporte de hidrógeno diluido en gas natural.

2 Objetivos

3 Marco Teórico

El transporte de petróleo y gas a través de tuberías es fundamental para la industria energética global, pero estas infraestructuras son susceptibles a una variedad de defectos debido a corrosión, deformaciones y fallas estructurales. Las



técnicas no destructivas (END), son esenciales para evaluar la integridad de estas tuberías sin causarles daño. En la figura 1, se presenta el fundamento una de las técnicas más utilizadas en la detección de alteraciones en el campo magnético inducido por defectos en la tubería, que es la fuga de flujo magnético (MFL), implementada desde los años 60; tal como se detalla en el artículo de Shi et al. (2015), el MFL que indica que esta técnica permite identificar fisuras y corrosión de forma precisa. [4]

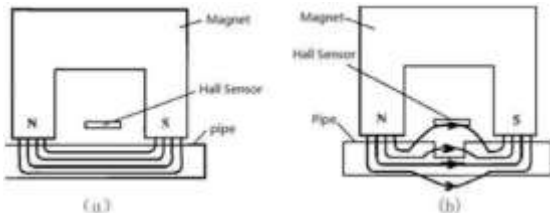


Figura 1. Principio de detección de fuga de flujo magnético. (a) Tubería sin pérdida de material (b) tubería con defecto. Fuente: [4].

Con el crecimiento del interés en el hidrógeno verde como fuente de energía sostenible, surgen nuevos retos para las infraestructuras de transporte debido a la baja densidad y bajo punto de ebullición del hidrógeno. Hernández (2023), presenta en la figura 2 el proceso de obtención, uso y transformación de dicho combustible, donde estos procesos requieren líneas de conducción para ser transportados; donde surge la necesidad de implementar técnicas de inspección avanzadas que aseguren la integridad de las tuberías utilizadas [5].



Figura 2. Esquema usos del hidrógeno verde (Siemens). Fuente: [5].

Barrera (2019) propone un enfoque predictivo para establecer el Factor Estimado de Reparación (FER) en tuberías corroídas, no solo como una mejora en la eficiencia en la identificación de defectos críticos, sino que también permite a las empresas de transporte de hidrocarburos, tomar decisiones más informadas, maximizando los beneficios económicos y prolongando la vida útil de estas. La predicción de fallas por corrosión y defectos estructurales es aún incipiente, pero su

integración con herramientas avanzadas de END, como la MFL y el EMAT, promete una mejora sustancial en la gestión de integridad de infraestructuras de transporte de hidrocarburos, optimizando las actividades de inspección, mantenimiento y reparación [6].

Las técnicas de simulación numérica han avanzado considerablemente en el análisis de técnicas como MFL y EMAT, siendo útiles para modelar con mayor precisión la interacción entre los defectos en el material y las señales magnéticas detectadas. El artículo de Etcheverry et al. (2007) se centra en analizar cómo el uso de métodos de elementos finitos (FEM) y elementos de frontera (BEM-FEM) ha mejorado la capacidad para simular defectos complejos en geometrías ferromagnéticas. Estas simulaciones no solo permiten ajustar los parámetros de inspección para mejorar la sensibilidad de la MFL, sino que también reducen la complejidad computacional mediante la simplificación del modelado de materiales no ferromagnéticos, lo cual permitirá sugerir la adecuada localización de los sensores en el banco de pruebas a ser construido.

Este enfoque es particularmente útil para la calibración de los sensores y la optimización de las técnicas END, como EMAT, que se basan en la interacción entre campos magnéticos y acústicos. Las simulaciones avanzadas también permiten evaluar diferentes estados de magnetización y estrategias de desmagnetización, facilitando el diseño de dispositivos más eficientes para la inspección de tuberías de acero, como se aprecia en la figura 3. [1]

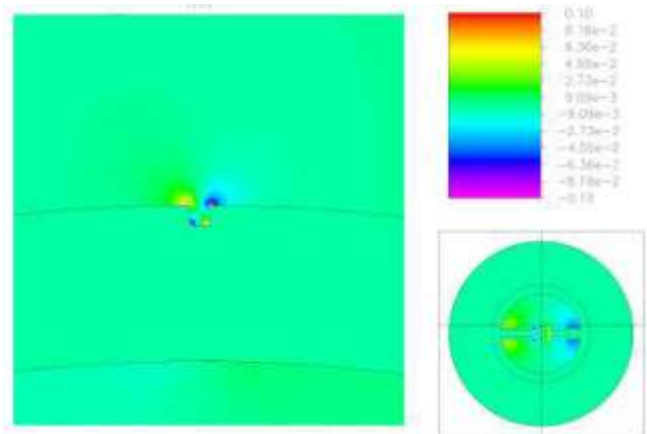


Figura 3. Distribución del módulo de la inducción magnética cerca de un defecto obtenido en una tubería de acero mediante el uso del código adaptivo de "multigrilla PLTMG". Fuente: [1].

Por otra parte, el desarrollo de tecnologías END, como MFL y EMAT, requiere bancos de pruebas específicos para asegurar la correcta calibración y funcionamiento de los sensores. La experiencia en el diseño y construcción de bancos didácticos de pruebas para sensores de proximidad puede proporcionar un marco de referencia útil para el diseño de un banco de pruebas EMAT. Al igual que el banco de pruebas de sensores inductivos, fotoeléctricos y de ultrasonido diseñado en el artículo de Muñoz et al. (2016), el banco de pruebas

EMAT debe garantizar la separación adecuada entre los sensores y el material a inspeccionar, evitando interferencias que puedan comprometer la precisión de las mediciones.

Bancos de pruebas como los mostrados en la figura 4, son fundamentales para validar experimentalmente las simulaciones numéricas y garantizar que los sensores EMAT puedan operar con precisión bajo diferentes condiciones de campo. La incorporación de metodologías de pruebas robustas y seguras, garantizarán la calidad de los datos obtenidos y facilitará la implementación industrial de esta tecnología, por medio del contraste de resultados de simulación y experimentales [7].



Figura 4. Montaje general de banco didáctico de pruebas de sensores inductivos, fotoeléctricos y de ultrasonido. Fuente: [7].

El desarrollo de tecnologías avanzadas de inspección no destructiva es crucial para la industria del petróleo y gas, especialmente ante los retos que presentan las tuberías flexibles no metálicas y el transporte de hidrógeno. La combinación de técnicas como MFL y EMAT, junto con herramientas predictivas basadas en machine learning, promete mejorar la precisión y eficiencia en la detección de defectos, prolongando la vida útil de las infraestructuras críticas. La simulación numérica y el desarrollo de bancos de pruebas robustos, pero a su vez portátiles, juegan un rol clave en la calibración y validación de estas tecnologías, asegurando que las futuras aplicaciones industriales sean seguras y eficientes.

4 Metodología

Teniendo en cuenta la necesidad de determinar la confiabilidad y eficiencia de la herramienta de sensado diseñada, se estableció la construcción de un banco de pruebas donde se pudieran verificar los parámetros de sensado, intensidad de la señal, y rango de medición de los sistemas MFL y UT – EMAT, para posteriormente ser comparado con los resultados de las simulaciones numéricas. Este proceso abarca varias etapas que se describen a continuación:

- 1) **Parámetros y necesidades de diseño:** se determinó que en el banco de pruebas se podrían montar tramos de tubería SCH 40 de longitud entre 1,5 y 3 pulgadas, y un diámetro entre 5 y 9 pulgadas, que son los comúnmente usados en el transporte de hidrógeno diluido en gas natural. Así mismo, se establecieron dos posiciones para la implementación de los sensores, con un desplazamiento vertical entre 0,5 y 2,5 pulgadas, y un recorrido angular entre 4 y 176 grados, con la posibilidad también, de montar probetas macizas y 2 posiciones de sensado (exterior e interior).
- 2) **Materiales:** se seleccionaron materiales resistentes, presentes en el mercado, y con un grado estético acorde a un laboratorio de ingeniería. Para el cuerpo del banco de pruebas y brazos articuladores, se seleccionó el acrílico cristal (polimetilmetacrilato – PMMA – C5O2H8), por ser un material estético, pero a su vez resistente, (Esfuerzo de fluencia 69 Mpa – esfuerzo último 91 Mpa - Módulo de elasticidad 2,9 Gpa) [8]. Para los contenedores de los sensores, se decidió utilizar el TPU (poliuretano termoplástico – [O-(C6H4)-C(CH3)2-(C6H4)-CO]), por su facilidad para ser usado en impresoras 3D, su no conductividad térmica y eléctrica, y sus buenos acabados. [10]. Para los elementos de unión, se seleccionaron tornillos y tuercas mariposa (DIN 933 – DIN 315), y rodamientos (SKF W-639) sellados y libres de mantenimiento, que permiten el giro de los cabezales donde se encuentran los sensores y su alta resistencia a cargas dinámicas y estáticas.
- 3) **Procesos de fabricación:** de acuerdo con los materiales seleccionados, se usó para el acrílico el corte láser por medio de una máquina CO2 3DMK 1390; para la impresión 3D se utilizó una impresora Creality K1 MAX, por su versatilidad y rapidez de impresión; disponibles en el laboratorio de procesos de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga.[9]
- 4) **Ensamble:** este proceso fue realizado por el joven investigador adscrito al proyecto de investigación “implementación de tecnologías para la inspección de líneas que transportan hidrógeno en mezcla con gas natural”, que realizan en conjunto la CIC, UniSanGil y la UPB Bucaramanga.

5 Procedimiento

Dentro del desarrollo de Ecosistemas de Investigación e Innovación para la transición energética justa, mediante la conformación de un banco de proyectos elegibles de I+D+i orientados al desarrollo, adopción y adaptación de tecnologías, que aprovechen sosteniblemente el potencial de los recursos naturales de las regiones, desarrollen cadenas de valor y generen capacidades de CTel en los territorios; La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), seccional Bucaramanga; en asocio con el Corporación para el estudio de la Corrosión (CIC); y la Fundación universitaria de San Gil (UniSanGil); están desarrollando el proyecto de investigación en la implementación de tecnologías para la inspección de

líneas que transportan hidrógeno en mezcla con gas natural; que en su fase 4 contempla el diseño de una herramienta de inspección y detección de anomalías, a partir del diseño de un dispositivo portátil de sensado por medio de MFL y UT – EMAT.

El dispositivo a desarrollar debe ser capaz de detectar anomalías (agujeros, fisuras y corrosión), dentro de un ducto que transportará hidrógeno diluido al 20% en gas natural, por un gasoducto que ha sido utilizado previamente para el transporte de gas, presentando el respectivo desgaste estructural por el estrés natural de los fenómenos compresivos a los que se encuentra expuesto. Para cumplir con dicho propósito, se debe diseñar un sistema portable, de fácil transporte, manipulación y almacenamiento, que se pueda adaptar a los diferentes diámetros de tubería existentes en los gasoductos del país.

A partir de la revisión de la literatura y experiencias previas, se determinó que la mejor forma de realizar dicha detección de anomalías, era mediante la combinación de un sistema MFL (Magnetic Flux Leakage) y UT – EMAT (ElectroMagnetic Acoustic Transducer), por la facilidad de detección de fenómenos como fracturas y espesores de pared.

La primera fase de diseño del dispositivo sensor a desarrollar, comprendía dos fases a realizar el paralelo. La primera, el diseño de un sistema de contención mecánica de los sensores desarrollados, que se adaptara fácilmente a diferentes geometrías (diámetros) de los ductos de transporte (gasoductos) existentes en Colombia. La segunda, el diseño de un banco de pruebas para los sensores diseñados (MFL y UT – EMAT), donde se pudieran probar diferentes arreglos de los sensores, midiendo anomalías predeterminadas en una probeta, que pudiera ubicarse fácilmente en el banco de pruebas desarrollado.

A partir de los parámetros presentados en la metodología, es como se procedió a plantear varios modelos tridimensionales CAD para el banco de pruebas, teniendo en cuenta la facilidad para la ubicación de la probeta y los sensores, y su movilidad para la disposición de varias configuraciones de sensado.

Inicialmente se planteó una configuración vertical (figura 5), considerando la facilidad para disponer los sensores en la parte superior de la probeta, su diseño modular y adaptativo, que le permitía ubicar probetas de diferentes diámetros.



Figura 5. Alternativa de disposición del banco de pruebas para sensores MFL y UT – EMAT, con disposición vertical de la probeta. Fuente: Autores

Teniendo en cuenta las dificultades para la ubicación de las probetas dentro del banco de pruebas, debido a su peso, y al poco espacio para ubicar los receptores de señal en la parte inferior de la probeta; se realiza una segunda propuesta de configuración horizontal (figura 6), que permite fácilmente la ubicación y variación, en distancia y grados de los sensores, facilitando la ubicación de probetas con diámetros entre 5 y 9 pulgadas de diámetro; presentando gran facilidad para el acople y retirada de los sensores del banco de pruebas.

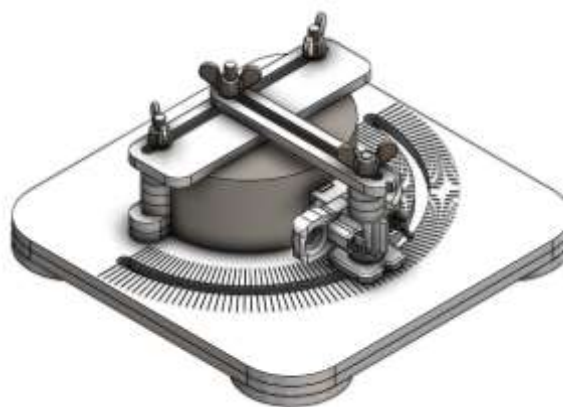


Figura 6. Alternativa de disposición del banco de pruebas para sensores MFL y UT – EMAT, con disposición horizontal de la probeta. Fuente: Autores

Considerando la versatilidad, ya que puede armarse rápidamente; la facilidad de fabricación, porque se usaran equipos disponibles en el taller de procesos industriales de la UPB; la configuración, dado que el brazo extensible del banco puede girar entre 2 y 178 grados, y alargarse o acortarse el porta sensor para ajustarse a una probeta circular entre 5 y 9 pulgadas; y la disposición de los sensores para la realización de múltiples pruebas, ubicándose tanto en la parte curva, como

plana de la probeta; se decidió por parte del equipo interdisciplinario del proyecto, escoger la segunda alternativa propuesta (figura 6), para proceder posteriormente a su fabricación (Figura 7).

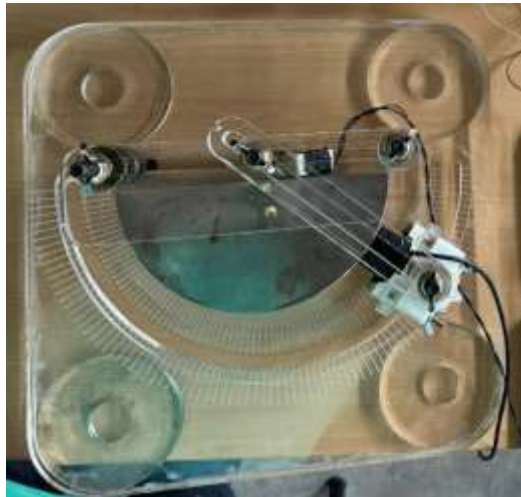


Figura 7. Banco de pruebas para sensores MFL y UT – EMAT, con disposición horizontal de la probeta.
Fuente: Autores

Con el banco de pruebas construido, se procedió a realizar las diferentes configuraciones y arreglos de los sensores, tanto la cara curva, como en la plana de probeta; para determinar la mejor disposición de estos (figura 8), y así proceder posteriormente a implementarse en la herramienta de portátil de detección de anomalías estructurales de un sistema de transporte de hidrógeno diluido en gas natural.



Figura 8. Pruebas para sensores MFL y UT – EMAT, en banco de pruebas con disposición horizontal de la probeta.
Fuente: Autores

6 Conclusiones

La revisión teórica, realizada por los autores, ayudó a comprender las diferentes técnicas de inspección no destructiva utilizadas en los sistemas de transporte de

hidrocarburos; permitiendo determinar los parámetros de diseño del banco de sensores propuesto, que garanticen su adecuado funcionamiento.

La correcta aplicación de una metodología de diseño estructurada, permitieron el diseño conceptual (modelamiento CAD) del banco de pruebas para sensores MFL y UT – EMAT, que responda a las necesidades de muestreo a ser evaluadas, como la pérdida de material magnético causado por corrosión; así como la detección de grietas debido a fallas estructurales; lo mismo que la mejor disposición geométrica y funcional de cada uno de los elementos requeridos.

Se construyó un banco de pruebas para sensores MFL y UT – EMAT robusto, funcional y versátil, con materiales durables estéticos y configurables en diferentes arreglos geométricos, que permitirá validar el funcionamiento de cada sensor diseñado para ser implementado en la herramienta portátil de detección de anomalías estructurales de un sistema de transporte de hidrógeno diluido en gas natural.

Se validó el correcto funcionamiento del banco de pruebas para sensores MFL y UT – EMAT, mediante la realización de 30 pruebas de diferentes tipos y arreglos de sistemas de sensado a ser implementados en la herramienta portátil de detección de anomalías estructurales de un sistema de transporte de hidrógeno diluido en gas natural, a ser desarrollado por la Corporación para el Estudio de la Corrosión (CIC), la escuela de ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), sede Bucaramanga, y la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Unisangil, sede San Gil; obteniendo una fiabilidad del 96,7% con respecto a los resultados observados en la revisión bibliográfica y pruebas de campo realizadas manualmente, de forma previa por parte de la CIC.

Referencias

- [1] T. Guozden, J. Etcheverry y G. Sanchez. “MFL en tubos de acero: simulaciones numéricas con FEM; BEM-FEM”. NDT.net - Nondestructive Testing (NDT) Portal; Open Access Archive. Accedido el 4 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/24.pdf>
- [2] P. Mosquera, M. Sánchez y C. García, “Detección de fallas superficiales e internas, en tuberías de alta presión para motores estacionarios, por medio de ultrasonido”, Dsp. Ups, vol. 1, n.º 1, 2015, art. n.º 2. Accedido el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8947/1/UPS-CT005211.pdf>
- [3] J. Valencia y D. Aguilar. “Transporte de hidrógeno usando infraestructura existente, una apuesta exitosa para la industria energética en Colombia.” Universidad Externado de Colombia: Inicio. Accedido el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/e502f751-f30e-45e3-9afd-0d42163784aa/content>
- [4] Y. Shi, C. Zhang, R. Li, M. Cai y G. Jia, “Theory and Application of Magnetic Flux Leakage Pipeline Detection”, Sensors, vol. 15, n.º 12, pp. 31036–31055, diciembre de 2015. Accedido el 21 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/s151229845>
- [5] Y. G. Cuellar Pérez, J. R. Bermúdez Santaella y D. A. Herrea Susa, “Hidrógeno verde revisión del estado del arte de las tecnologías de generación para la descarbonización del sector energético”, Ing. Compet., vol. 26, n.º 3, agosto de 2024. Accedido el 22 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.25100/iyv.v26i3.14190>

- [6] B. Barrera y c. A. Franco. “Metodología para la evaluación de la integridad de tuberías corroídas mediante la predicción del factor estimado de reparación a través de la aplicación de algoritmos de *machine learning*”. Repositorio institucional Séneca. Accedido el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/d087b1b1-1f37-4609-add7-63730cd4dac3/content>
- [7] C. A. Muñoz & E. N. Lesmes Diseño y Construcción de un Banco Didáctico de Pruebas para Sensores de Proximidad del Laboratorio de Tecnología en Electricidad. Accedido el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11349/3126>
- [8] S. William, Fundamentos de ingeniería y ciencias de materiales (Spanish Edition), 7a ed. McGraw-Hill Interam. Espana S.L., 2014. p. 108.
- [9] D. Torreblanca Díaz, “Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos”, Iconofacto, vol. 12, n.º 18, pp. 118–143, 2016. Accedido el 20 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.18566/v12n18.a07>