

DESARROLLO DE UNA CÉLULA DE MANUFACTURA ROBOTIZADA PARA LA TÉCNICA DE PROCESAMIENTO FRICCIÓN-AGITACIÓN (FSP)

Ronquillo Ornelas Iza Iveth, Gallegos Orozco Verónica*, Santos Beltrán Audel, Medrano Prieto Hansel

Manuel, Santos Beltrán Miriam Moraima

Universidad Tecnológica de Chihuahua Sur; *Tecnológico Nacional de México campus Chihuahua

Departamento de Mecatrónica; *Departamento de Ciencias Básicas

Km 3.5 Carr. Chihuahua- Aldama; *Ave. Tecnológico #2909, Chihuahua, Chih. México. C.P. 31310

+52 (614) 4 20 34 10; *+52 (614) 2 01 20 00

ironquiii@utchs-sur.edu.mx, veronica.go@chihuahua.tecnm.mx, asantos@utchs-sur.edu.mx,

hmedrano@utchs-sur.edu.mx, msantos@utchs-sur.edu.mx

RESUMEN.

En el marco de este proyecto, se diseñó e implementó una célula de manufactura robotizada que incorpora un robot KUKA Agilus 6 y un robot UR5 controlados por medio de un Controlador Lógico Programable (PLC) Siemens modelo LOGO, con el objetivo de optimizar los parámetros necesarios para la integración de partículas de grafeno en la superficie de placas de aluminio logrando una solución altamente eficiente y adaptable en la automatización del mecanizado ya que esta integración facilita la coordinación y sincronización de movimientos para realizar la técnica de Procesamiento por Fricción-Agitación (FSP), lo que representa un avance significativo en la fabricación de materiales compuestos de alta calidad.

Palabras Clave: Procesamiento por Fricción Agitación (FSP), celda de manufactura, aluminio, Brazo robótico

ABSTRACT.

As part of this project, a robotic manufacturing cell was designed and implemented, incorporating a KUKA Agilus 6 robot and a UR5 robot controlled by a Siemens LOGO Programmable Logic Controller (PLC). The aim was to optimize the necessary parameters for integrating graphene particles on the surface of aluminum plates, achieving a highly efficient and adaptable solution in machining automation. This integration facilitates the coordination and synchronization of movements to perform the Friction Stir Processing (FSP) technique, representing a significant advancement in the fabrication of high-quality composite materials.

Keywords: Friction Stir Processing (FSP), manufacturing cell, aluminum, robotic arm

1. INTRODUCCIÓN

La evolución de las celdas de manufactura robotizada representa un avance significativo en la automatización industrial, combinando la precisión de la robótica con la eficiencia de los procesos de manufactura. Estas celdas de manufactura, que integran robots, bandas transportadoras y sistemas de control avanzado, han transformado la manera en que se producen bienes, mejorando la calidad, reduciendo costos y aumentando la productividad. El campo de las celdas de manufactura

robotizadas continúa evolucionando. Los avances en inteligencia artificial, visión por computadora y robótica colaborativa están impulsando una mayor eficiencia y flexibilidad en estos sistemas. Además, los robots colaborativos (cobots) como el UR5 de Universal Robots, permite una colaboración segura entre humanos y robots en el mismo espacio de trabajo. La digitalización y el Internet de las Cosas (IoT) han llevado a la creación de celdas de manufactura inteligentes, donde los robots y otros equipos se comunican y optimizan sus operaciones en tiempo real [1].

Este proyecto de célula robotizada de manufactura incorpora la técnica de Procesamiento por Fricción-Agitación (FSP, por sus siglas en inglés), que es una técnica derivada de la Soldadura por Fricción-Agitación (FSW) [2,3]. Esta técnica se utiliza para modificar las propiedades de los metales a través de una deformación plástica localizada. Entre sus aplicaciones, se encuentra el refinamiento de la microestructura, lo que mejora las propiedades mecánicas y térmicas de los metales [4].

2. MARCO TEORICO.

2.1. Técnica de procedimiento de Fricción-Agitación (FSP)

Los compuestos de matriz metálica a base de aluminio (MMC a base de Al) han ganado una atención significativa debido a sus propiedades mecánicas y tribológicas mejoradas. Estos compuestos se forman dispersando partículas reforzantes duras en una aleación de matriz de aluminio. Estos materiales compuestos se utilizan en componentes estructurales de aviones y naves espaciales debido a su alta resistencia, bajo peso, debido a que presentan mayor resistencia a la fluencia, la fatiga y el desgaste [5].

El procesamiento por fricción-agitación (FSP) es una técnica que puede refinar localmente la microestructura mediante el uso de una herramienta giratoria que penetra en el material. Por ejemplo, el FSP rompe las partículas grandes ricas en hierro (IM) en fragmentos más pequeños y redondeados [6]. Jeon et al. fabricaron MMC de grafeno/aluminio mediante FSP, mejorando la conductividad térmica y la ductilidad del compuesto [7].

Gamil y Ahmed investigaron las propiedades termomecánicas de un compuesto de nanoplaquetas de grafeno (GNP)/Al, donde reportan una mejora en la conductividad térmica del MMC de aproximadamente un 75% en comparación con el metal base y un incremento sustancial de la dureza de alrededor del 30% [8]. Xia et al. prepararon MMC de aluminio reforzado con grafeno por FSP utilizando una mezcla de grafeno y polvo de aluminio, los autores reportaron una influencia importante de parámetros del proceso de FSP, obteniendo una mayor dureza, conductividad eléctrica y resistencia al desgaste que la matriz de aluminio empleando los parámetros adecuados [9].

Por lo tanto, se requiere una optimización cuidadosa de los parámetros FSP para lograr el equilibrio deseado y obtener las mejores propiedades mecánicas. Además, podemos aprovechar las características de versatilidad que ofrece el uso de un brazo robot como son: control de la velocidad de desplazamiento y control de la fuerza aplicada, con el objeto de integrar el procedimiento de fricción-agitación en la celda de manufactura robotizada.

2.2. Células de Manufactura robotizadas

La evolución de la automatización industrial se ha definido por etapas de cambios radicales en las técnicas predominantes transformándose en la automatización parecen tener una fuerte conexión con la economía global [10]. La implementación del robot industrial, reconocido como un aparato independiente en los años 60 [11], en combinación con los sistemas de diseño y manufactura asistidos por computadora (CAD y CAM respectivamente), representan las tendencias más actuales en la automatización de procesos de manufactura. Estas innovaciones están impulsando a la automatización industrial hacia una nueva fase de cambio, cuya magnitud todavía es incierta [12].

Las celdas de manufactura robotizadas, son un sistema compuesto por uno o varios robots industriales, dispositivos periféricos y sistemas de control. Su diseño está específicamente orientado para realizar tareas específicas, como ensamblaje, soldadura, pintura, manipulación de materiales y procesamiento de superficies. La integración de robots en estas celdas no solo aumenta la flexibilidad, sino también la precisión y repetibilidad en comparación con los métodos manuales tradicionales.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño de la célula de manufactura

En esta sección se muestra los elementos que forman la célula de manufactura y sus características básicas.

Robot KUKA (RK) Agilus 6 R900 sixx es un manipulador industrial compacto de seis ejes diseñado para altas velocidades de trabajo [13]. Estos brazos robóticos son conocidos por su precisión, velocidad y capacidad de repetición. Aquí están algunas de sus características básicas:

Carga útil: 6 kg.

Alcance máximo: 901.5 mm².

Posiciones de montaje: Puede ser montado en el suelo, techo, pared y en ángulo.

Precisión de repetición: $\pm 0,03$ mm

Peso (sin controlador): Aproximadamente 52 kg

Robot UR5 de Universal Robots es un brazo robótico compacto y versátil, es parte de la serie UR de robots colaborativos, diseñados para trabajar de forma segura junto con humanos en entornos de trabajo compartido [14]. Tiene las siguientes características básicas:

Carga útil: 5 kg

Alcance máximo: 850 mm

Peso: Aproximadamente 18.4 kg

Precisión de repetición: ± 0.1 mm

Grados de libertad: 6 ejes

Velocidad máxima: Articulación: Máx. 180°/s. Herramienta: Típico 1 m/s².

Clasificación IP: IP54

Consumo de energía: Aprox. 200W utilizando un programa típico.

Banda transportadora es una banda didáctica de manufactura, que permite variar la elección y velocidad de las bandas y el sentido de rotación.

Dimensiones: 3 X 0.8 m

Capacidad de carga por banda 40 kg

Número de bandas 6

Suministro eléctrico de 115 V, 20 A, 60 Hz

Diseño de adaptaciones

El diseño tridimensional de las diversas fixturas se llevó a cabo utilizando el software CAD SolidWorks. Posteriormente, estos diseños fueron materializados mediante impresión 3D utilizando filamento de polietileno tereftalato glicol (PETG) o algunas mediante material MDF y acrílico. Este proceso garantizó la precisión y la replicabilidad de las piezas, así como su adecuada adaptación a los requerimientos del proyecto.

Diseño para cubierta de base para la técnica de FSP

Se diseñó una cubierta con el propósito de alojar los pistones cilíndricos de 3 varillas para contener placas de aluminio, además de facilitar el montaje y desmontaje rápido de un cajón para los residuos.

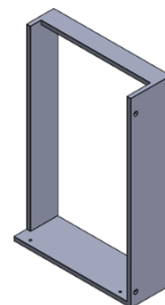


Figura 1. CAD Base

Diseño de Cajón para residuos

Se ha diseñado un cajón equipado para la técnica de FSP (Figura 2) con un sistema que facilita su montaje y desmontaje rápido. Este diseño evita que sea una estructura permanente, lo que permite una gestión práctica de los residuos generados por el sistema de pulverización y grabado. Además, este enfoque contribuye a un mantenimiento sencillo y eficiente del área.

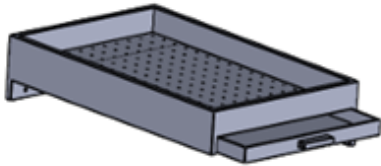


Figura 2. CAD ensamblaje base

Diseño montar el herramental del motor del RK

Se reemplazó el gripper del Robot KUKA con un diseño que se adapta a las especificaciones necesarias. Se acopló un motor paso a paso para llevar a cabo el proceso de Fricción-Agitación en placas de aluminio, siendo este un componente esencial para la integración con el Robot KUKA.

Se elaboró un diseño compuesto por tres piezas que se ensamblan mediante tornillos guía. Estas piezas incluyen una base destinada a fijarse al Robot KUKA, así como un ensamblaje diseñado para sujetar y proteger el motor.

Como se muestra en la figura 4, el soporte cuya función principal es ensamblar la base destinada al Robot KUKA y conectarla a la estructura del motor.

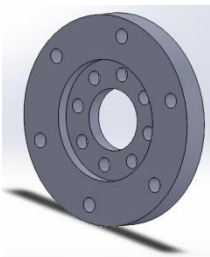


Figura 3. CAD Base motor



Figura 4. CAD tapa, ensamble de motor



Figura 5. CAD ensamble con herramental de KUKA

Diseño del adaptador del herramental para las ventosas de Robot UR5

Se desarrolló un accesorio que consiste en un diseño circular destinado a facilitar la integración de un acoplamiento entre el robot UR5 y una herramienta neumática como efector final. Este accesorio se caracteriza por poseer cuatro orificios estratégicamente ubicados que permiten la fijación mediante tornillos. La funcionalidad primaria de estos orificios radica en asegurar la unión entre nuestra pieza y el robot, mientras que los restantes están destinados a sostener la herramienta de manera segura durante su operación.

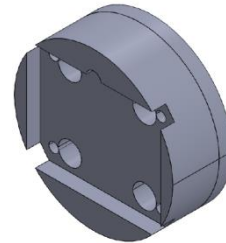


Figura 6. CAD del adaptador de UR para las ventosas

Se utilizó el software FLUIDSIM NEUMATIC para diseñar el sistema neumático de las ventosas del UR5. Este paso permitió validar el diseño antes de proceder con la implementación física, garantizando así la eficacia y precisión del sistema en su ejecución real, como se puede observar en la Figura 7.

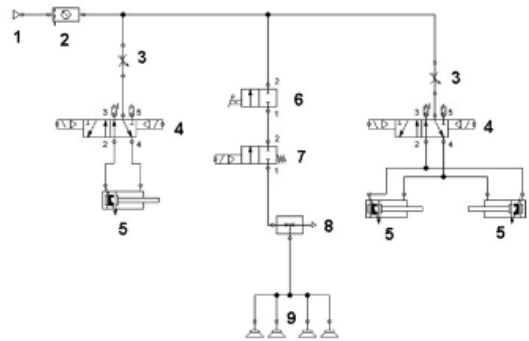


Figura 7. Diagrama neumático

En la tabla 1 muestras los elementos neumáticos para las ventosas del Robot UR5.

Tabla 1. Elementos neumáticos

N°	COMPONENTES
1.	Fuente de aire comprimido
2.	Unidad de mantenimiento
3.	Válvula estranguladora
4.	Válvula 4/2
5.	Pistón de doble efecto
6.	Válvula 2/2 con accionamiento manual
7.	Válvula 2/2
8.	Generador de vacío
9.	Ventosas de vacío

3.2 Diseño de sistema de control

El sistema de control fue diseñado considerando los requisitos del proceso como se muestra en la Fig. 6. Esto incluye la determinación de la interacción entre los sensores y las electroválvulas para alcanzar los objetivos propuestos, tales como la detección de la placa de aluminio, el manejo de la banda transportadora, y la activación de los robots UR5 y KUKA. Para la programación del PLC, se empleó inicialmente el simulador ‘Logix Pro’, seguido de la programación en ‘Logo Siemens’.

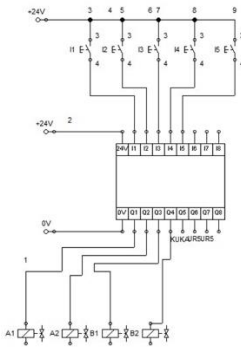


Figura 6. Diagrama de conexión del PLC

La Tabla 2 presenta la configuración de las entradas del PLC, las cuales están conectadas a los sensores, y las salidas que controlan las electroválvulas para los diversos procesos.

Tabla 2. Configuración de entradas y salidas del PLC

NUMERO DE ENTRADAS	ESPECIFICACIÓN	NUMERO DE SALIDAS	ESPECIFICACIÓN
I1	BOTÓN DE ARRANQUE	Q1	SALIDA PISTÓN/ABASTECER PLACA
I2	FIN DE CARRERA	Q2	REGRESO PISTÓN/ABASTECER PLACA

I3	UR5 PLACA SIN GRABAR COLOCADA	Q3	SALIDA DE PISTÓN/ AGARRE DE PLACA
I4	KUKA PLACA GRABADA	Q4	REGRESO DE PISTÓN/AGARRE DE PLACA
I5	UR5 PLACA GRABADA	Q5	KUKA EMPEZAR GRABADO
		Q6	UR5 RETIRAR PLACA GRABADA
		Q7	UR5 COLOCAR PLACA PARA GRABADO

3.3 Diagrama de proceso

Esta sección explica detalladamente el proceso llevado a cabo por una célula de manufactura robotizada, la cual es gestionada por un PLC. Durante la operación de la célula, un operador coloca una placa de aluminio en la banda transportadora y activa el proceso presionando un botón. La banda, que está equipada con un sensor de proximidad, envía una señal al Robot UR5 para que recoja la placa de aluminio y la sitúe en la estación de trabajo del Robot KUKA. Una vez que la placa está en la estación de trabajo se aplica la técnica de FSP. Este proceso inicia generando fricción en el material, seguido de la aplicación de grafito para exfoliar el material.

El proceso finaliza con la colocación de la placa finalizada en la banda transportadora, como se observa en la figura 8.

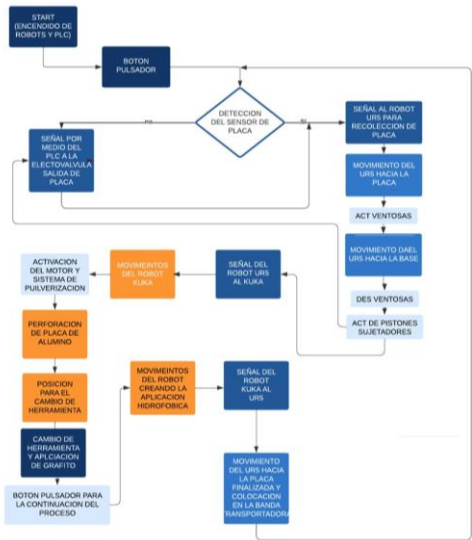


Figura 8. Diagrama de proceso

3.4 Programación de Robot

El robot UR5 se programa para realizar la manipulación y el traslado de las placas de aluminio. La programación se realiza a través de un Teach Pendant, utilizando UR Script como lenguaje de codificación. Este lenguaje permite la gestión de variables, la definición de posiciones cartesianas y la configuración de entradas y salidas digitales.

La estructura de la programación se basa en un contador que se incrementa al recibir señales de un Controlador Lógico Programable (PLC). El PLC emite un pulso de un segundo para activar esta señal. Cuando el contador se incrementa, se activa una condición IF que desencadena la ejecución de una secuencia de movimientos predefinidos. Una vez que se completa la secuencia, el contador se reinicia a cero y se envía una señal de confirmación al PLC, indicando que el traslado de la placa se ha completado con éxito.

Para la programación del robot KUKA, se utilizó un lenguaje denominado KRL, que es notablemente más sofisticado que el empleado para robots del tipo UR5. Durante el desarrollo, se implementaron estructuras de control como LOOP, WAIT y WAIT FOR.

En términos de cinemática, se optó por movimientos PTP (punto a punto), que no consideran la trayectoria intermedia del robot para alcanzar la posición final deseada. La regulación de la velocidad de los movimientos fue un aspecto crítico, dada la precisión milimétrica requerida por la aplicación y el alto riesgo de colisiones. En operaciones de Fricción-agitación o grabado, es esencial mantener velocidades reducidas para asegurar que la herramienta ejecute su función sin problemas, como atascos o acumulación excesiva de material.

La Figura 7 muestra una parte del código utilizado para la técnica de procesamiento de fricción-agitación.

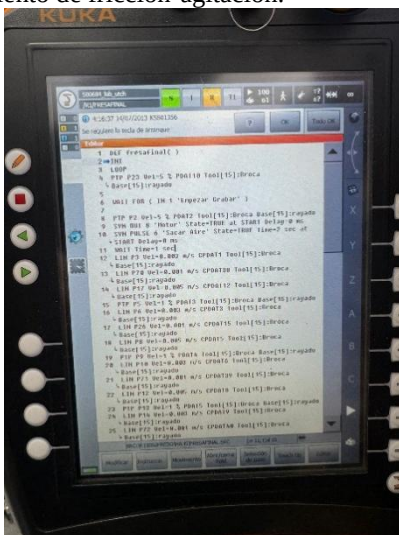


Figura 7. Código para la técnica de FSP

3.5 Mantenimiento en la estación de trabajo para técnica FSP

Se diseñó una cubierta de base para la técnica de FSP. Esta base, elaborada en MDF, posee una longitud de 93.5 cm y un ancho de 60 cm. Dos de sus paredes laterales y la pared trasera tienen una altura de 20.5 cm, mientras que el lateral izquierdo, que se ubica junto al robot KUKA, presenta una altura de 14 cm. La pared frontal, por su parte, tiene una altura de 8.5 cm.

La pared lateral izquierda, al ser la más corta, se posicionó al mismo nivel que la mesa de trabajo del robot KUKA. Esto permite disponer de una altura adecuada para la inserción de un cajón destinado a la recolección de los residuos generados durante el proceso de rayado (Fig. 9)



Figura 9. Sistema de sujeción de placas

Se utilizó un panel de acrílico en la parte superior, el cual fue perforado de manera estratégica para desempeñar dos funciones específicas:

1. Filtrar los residuos: El panel ayuda a filtrar los residuos producidos por el sistema de pulverización y el proceso de grabado del aluminio, facilitando así el mantenimiento necesario para el proceso.

2. Mejorar la fijación de los cilindros neumáticos: El diseño del panel permite una fijación más efectiva de los cilindros neumáticos, lo que resulta en un soporte más robusto para las placas de aluminio y facilita el procesamiento de fricción-agitación.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se ha logrado el diseño, desarrollo e implementación de una célula robotizada de manufactura para el procesamiento de la técnica de Fricción-agitación que reduce al mínimo la intervención humana. En la etapa actual, la única asistencia necesaria por parte del personal es la supervisión del dispensador de placas de aluminio para garantizar que siempre haya placas disponibles para su dispensación. Además, es necesario realizar el cambio de herramienta para la técnica de procesamiento de Fricción-Agitación. En la Figura 10 muestra el sistema completo, con cada uno de los robots tiene su herramienta correspondiente a la acción en el proceso.

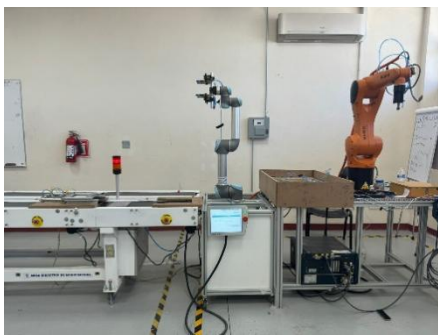


Figura 10. Célula robotizada de manufactura para el procesamiento de la Técnica de FSP.

El robot UR5 está equipado con ventosas para el traslado de las placas de aluminio, mientras que el robot KUKA cuenta con el motor, el sistema de pulverización y la salida de aire para retirar las virutas.

Una vez ensamblado el sistema final, se realizaron pruebas de la técnica FSP.

Se realizaron pruebas para el procesamiento de Fricción-agitación y probar la teoría sobre el soldado del grafito por medio de la fricción, primero se realizaron 4 puntos a lo largo de la placa, de 1 mm de profundidad, en ellos se colocó grafito, con la broca para grabado se hizo una pasada por la línea a la velocidad más baja que se puede la cual es 0.001 m/s, como resultado obtenido se puede observar en la Figura 11.



Figura 11. Placa de aluminio con la técnica de FSP

Este proceso de soldadura por fricción se basa en la rotación de las piezas metálicas a unir, aplicando una fuerza de alta presión entre ellas. La fricción generada calienta las superficies de contacto hasta que se completa el ciclo de soldadura. Es un método eficiente y capaz de unir muchos tipos de metales y combinaciones de materiales.

5. CONCLUSIONES

Se utilizaron los brazos robots UR5 y KUKA y un PLC Siemens modelo LOGO para la implementación de un proceso fabricación de superficies de MMC mediante la técnica de Fricción-Agitación. El sistema implementado representa una solución altamente eficiente y adaptable en la automatización del mecanizado. La precisión y flexibilidad inherentes de estos

robots, combinadas con las avanzadas capacidades de programación del PLC LOGO de Siemens, han demostrado ser una fórmula exitosa para lograr operaciones de la célula robotizada de manufactura con el procesamiento de la técnica FSP.

La integración de estos sistemas robóticos con el PLC LOGO no solo facilita la coordinación y sincronización de movimientos, sino que también garantiza un entorno de trabajo seguro gracias a las funciones de seguridad integradas en los sistemas PLC. Esto ha resultado en una mejora significativa en la productividad y la calidad del producto final, reduciendo al mismo tiempo los tiempos de producción y los costos operativos.

6. REFERENCIAS.

- [1] "Cobots and the Future of Manufacturing," Universal Robots, 2023. [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/>. [Accessed: 10-Jul-2024]
- [2] Lockwood, W. D.; Tomaz, B.; Reynolds, A. P. "Mechanical response of friction stir welded AA2024: Experiment and modeling." *Materials Science and Engineering A*, 2002, 323, 348-3531
- [3] Mishra, R. S.; Ma, Z. Y. "Friction stir welding and processing." *Materials Science and Engineering R Reports*, 2005, 50, 1-78
- [4] Sharma, V., Prakash, U., & Kumar, B. M. (2015). "Surface composites by friction stir processing: A review." *Journal of Materials Processing Technology*, 224, 117-134.
- [5] J. Pérez, "Materiales compuestos en la industria aeroespacial," en *Materiales Compuestos*, Ciudad de México, México, 2020, pp. 50-60.
- [6] Hannard, F.; Castin, S.; Maire, E.; Mokso, R.; Pardoën, T.; Simar, A. "Ductilization of aluminium alloy 6056 by friction stir processing." *Acta Materialia*, 2017, 130, 121-136.
- [7] Jeon, C. H., Jeong, Y. H., Seo, J. J., Tien, H. N., Hong, S. T., Yum, Y. J., Hur, S. H., & Lee, K. J. (2014). "Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 15(6), 1235-1239.
- [8] Gamil, M., & Ahmed, M. M. Z. (2020). "Investigating the thermo-mechanical properties of aluminum/graphene nano-platelets composites developed by friction stir processing." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21(9), 1539-15461.
- [9] x Xia, Y., Wang, X., Li, J., Yan, S., Yang, C., He, W., Chen, J., Wang, S., Zhang, X., & Dai, S. (2016). "Microstructure and tensile properties of bulk nanostructured aluminum/graphene composites prepared via cryomilling". *Materials Science and Engineering: A*, 651, 406-413.
- [10] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 4th ed., Pearson, 2018.
- [11] R. Brooks, *Flesh and Machines*, Pantheon Books, Nueva York, 2002.
- [12] La Federación Internacional de Robótica y las Naciones Unidas, "Robótica mundial 2001", Estadísticas, Análisis de mercado, Proyecciones, Casos de Estudio y Rentabilidad de la Inversión en Robots, Publicación de las Naciones Unidas, Nueva York y Ginebra, 2001
- [13] KUKA AG, "KR AGILUS," [Online]. Available: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/industrial-robots/kr-agilus>. [Accessed: 11-Jul-2024]
- [14] Universal Robots, "Universal Robots UR5: características y aplicaciones," [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot>. [Accessed: 11-Jul-2024].