

Diseño e implementación de soluciones de procesos de manufactura automatizados usando simulaciones con RoboDK y UR10.

Eliseo Olvera Fuentes A01735753.

Diego Ignacio García Carrera A01735579.

Massimiliano Tuccella Ramírez A01734774.

Monica Gabriela Ocampo Durán A01734837.

René Rodrigo Mendoza Martínez A01735463.

Resumen: La colaboración de robots con humanos, es un área de investigación interdisciplinaria que ha llamado la atención dentro del contexto de la fabricación inteligente. Para abordar este tema dentro de los procesos de fabricación de la empresa socioformativa “ADIENT” se realiza una investigación del brazo robótico UR10 abordando diversos temas para una posible implementación.

1. Introducción.

Los brazos robóticos se han convertido en un componente crucial de la automatización industrial moderna, proporcionando a los fabricantes una mayor productividad, mayor seguridad, calidad constante, rentabilidad, flexibilidad, operación remota y un entorno de trabajo mejorado. Actualmente uno de los objetivos de ADIENT es el constante mejoramiento continuo de su producto terminado, por esta razón se requiere realizar estudios de automatización industrial para determinar la factibilidad de la automatización de los procesos de la fábrica, dirigiendo el enfoque hacia un UR10.

2. Robot UR10.

2.1. Definición de Robot Industrial.

Un robot industrial es diseñado específicamente para automatizar tareas intensivas de producción, como las que se requieren en una línea de montaje en constante movimiento. Debido a su tamaño y peso, estos robots se colocan en posiciones fijas dentro de una planta industrial y las tareas y procesos de los trabajadores giran en torno a ellos.

Las características de los robots industriales pueden variar según el fabricante, las necesidades y el entorno en el que se utilizarán. Según la norma ISO 8373:2012, un robot industrial es un manipulador multifuncional, reprogramable y controlado automáticamente, programable en tres o más ejes, que puede ser fijo o móvil para su uso en aplicaciones de automatización industrial.

Aunque estos robots no suelen tener forma humanoide, son capaces de imitar movimientos y comportamientos humanos con la fuerza, precisión y rapidez de una máquina.

2.2. Modelo Cinemático del Manipulador Robótico.

Ejes coordinados para UR10.

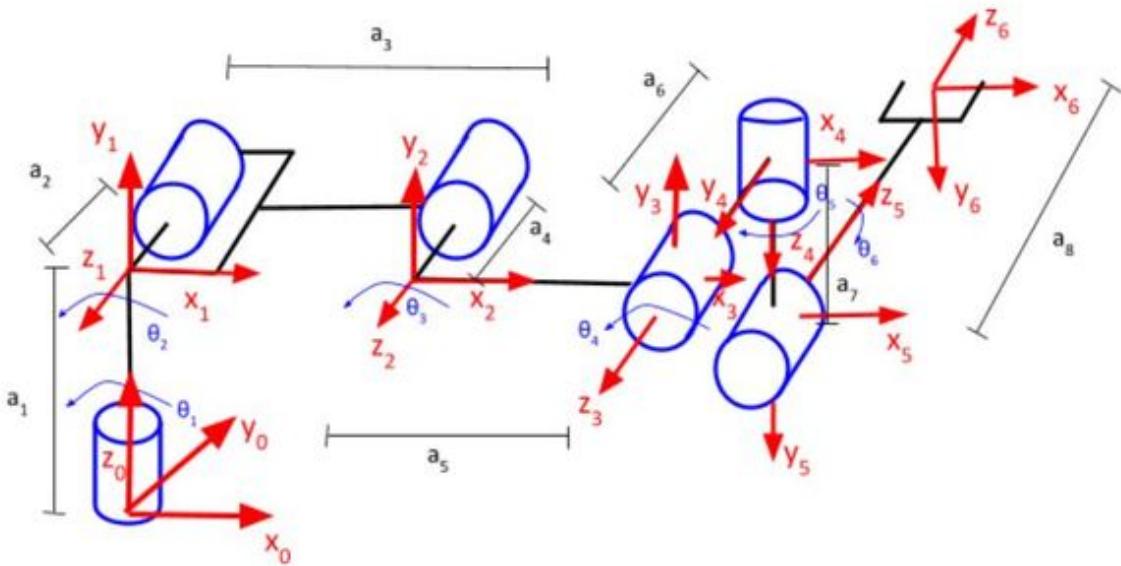


Fig. 1. UR10 with extra attachments.

2.3. Metodología sistemática.

La matriz de transformación Denavit-Hartenberg (DH) para el robot UR10 de Universal Robots con accesorios adicionales dependerá del accesorio específico y de cómo afecta la cinemática del robot. Sin embargo, el proceso general para la obtención de los parámetros DH y las matrices de transformación es el mismo que para el robot UR10 estándar. Estos son los pasos generales:

- Definir los marcos de coordenadas:

Marco 0: marco (fijado a la base del robot).

Cuadro 1: Situado en la base de la primera articulación (cintura).

Cuadro 2: Situado en la base de la segunda articulación (hombro).

Cuadro 3: Situado en la base de la tercera articulación (codo).

Cuadro 4: Situado en la base de la cuarta articulación (muñeca 1).

Cuadro 5: Ubicado en la base de la quinta articulación (muñeca 2).

Cuadro 6: Ubicado en la base de la sexta articulación (muñeca 3).

Cuadro 7: Ubicado en el efecto final (extensión).

➤ Asignar parámetros DH:

a: Distancia a lo largo del eje z anterior a la normal común.

alfa: Ángulo sobre el eje z anterior a la normal común.

d: Distancia a lo largo del eje z actual hasta la siguiente articulación.

theta: ángulo sobre el eje z actual a la siguiente articulación.

- Determinar los parámetros DH para cada articulación y el archivo adjunto. Los parámetros DH dependen de la geometría del accesorio y cómo afecta la cinemática del robot.
- Calcular la matriz de transformación para cada articulación y el archivo adjunto utilizando parámetros DH. Las matrices de transformación dependerán de los parámetros DH y de los ángulos de articulación del robot.

Una vez que se calculan las matrices de transformación DH para todas las articulaciones y el accesorio, se pueden multiplicar para obtener la matriz de transformación general desde el marco base del robot hasta el marco del accesorio. La matriz de transformación resultante se puede utilizar para calcular la posición y la orientación del accesorio en relación con el marco base del robot.

2.4. Screwdriver.

- Propuesta 1: KDS.

En primer lugar se consideró implementar un sistema de atornillado automático usando el cobot UR10 y la herramienta de atornillado de la marca Kolver KDS-PL50CA, la cual tiene un rango de torque de 0.1 a 70 Nm, es compatible con una gran variedad de tornillos incluyendo el M6. En este sistema de atornillado se consideró un pre-atornillado realizado por un operador y el atornillado por el cobot. Los beneficios de esta propuesta aunque sencilla pero efectiva incluyen una reducción del tiempo de atornillado a 12 segundos como se podrá observar en la simulación de RoboDK, la ausencia de un operador para el proceso de atornillado y una inversión menor del presupuesto.



Fig. 2. Sistema de atornillado Kolver.

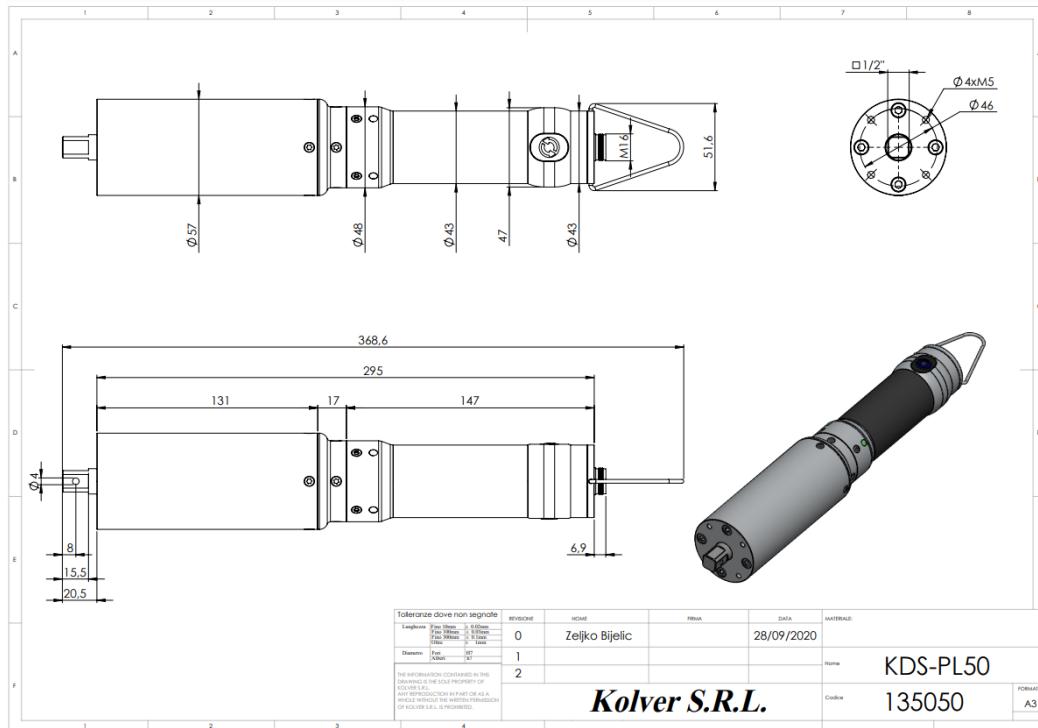


Fig. 3. Dibujo técnico de atornillado Kolver.

- **Propuesta 2: KDS- Automatic screw supplier.**

La segunda propuesta consiste en un sistema capaz de realizar el pre-atornillado y el atornillado en una sola acción usando el cobot UR10, la herramienta de atornillado de la marca Kolver KDS-PL50CA, y el dispensador de tornillos automatico kolver NFK-UNI. En este sistema de atornillado se consideró un pre-atornillado y atornillado realizado por el cobot, una vez colocado el asiento en el banda corrediza, el cobot se alimenta del dispensador y realizará el pre-atornillado y atornillado en un solo movimiento para cada barreno. A diferencia de la primera propuesta el pre-atornillado y atornillado son realizados por el cobot, sin embargo aunque se aumenta el tiempo de atornillado con respecto a la propuesta 1 a 28 segundos, seguiría existiendo una reducción considerable al tiempo total.

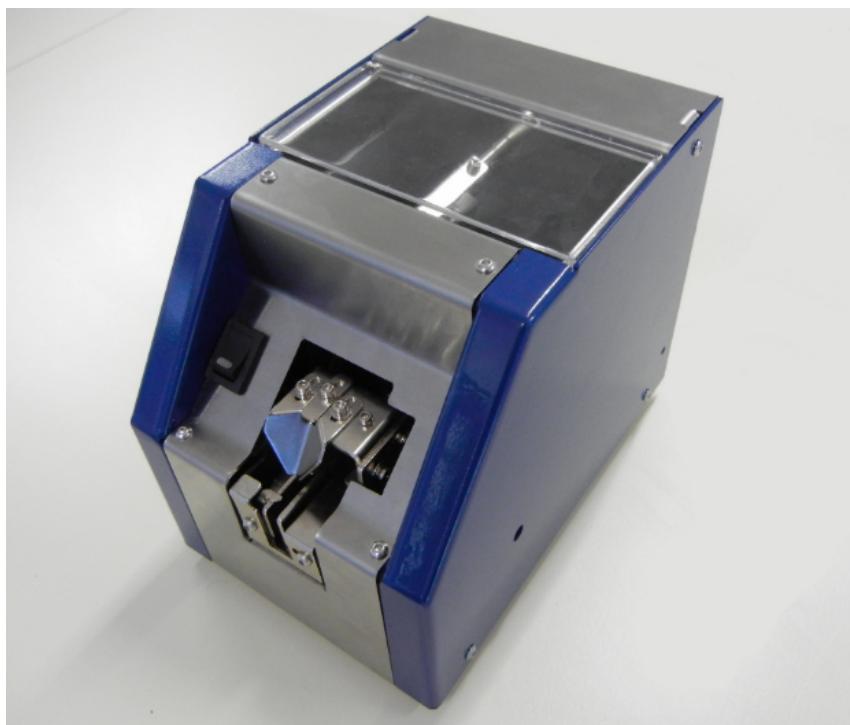


Fig. 4. Dispensador de tornillos automático kolver.

- **Recomendación a implementar en propuesta 1: Deprag Plus.**

Si se quisiera implementar un sistema capaz de realizar el pre-atornillado y el atornillado sin la intervención de un operador y a un tiempo reducido, se podría considerar la implementación de un sistema de alimentación automática para la herramienta de atornillado, sin necesidad de que esta se desplace. Sin embargo esta tecnología de automatización se personaliza de acuerdo a cada aplicación individual, por lo tanto, no existe una opción de pedido en línea para estos artículos, se tendría que contactar con la empresa que desarrolla estos sistemas (DEPRAG) y se requiere de una inversión mayor.

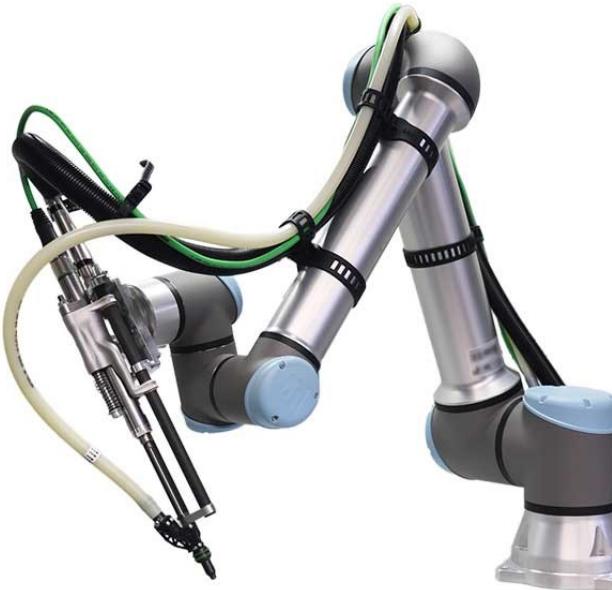


Fig. 5. Deprag screwdriver.



Fig. 6. Deprag ejemplos de alimentación automática.

2.5. Denavit Hartenberg parámetros para UR10 con extensiones.

Tabla 1. Parámetros del UR10.

θ_i	d_i	a_i	α_i
θ_0	$l_1(128\text{mm})$	0	90°
θ_1	0	0	0°
θ_2	0	$l_2(612\text{mm})$	0°
θ_3	$l_4(116\text{mm})$	$l_3(572\text{mm})$	0°
θ_4	$l_5(116\text{mm})$	0	90°
θ_5	$l_6(92\text{mm})$	0	-90°

Tabla 2. Parámetros de un atornillador.

θ_6	$l_7(280\text{mm})$	0	0°
------------	---------------------	---	-----------

2.6. Transformación de matrices homogéneas.

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_2 * \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & l_2 * \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & l_3 * \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & l_3 * \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & 0 & \sin(\theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_4) & 0 & -\cos(\theta_4) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_5) & 0 & \sin(\theta_5) & 0 \\ \sin(\theta_5) & 0 & -\cos(\theta_5) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & l_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_7^6 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 T_7^6$$

Gracias a la obtención de estas matrices, simplemente las multiplicamos para obtener la ecuación final.

2.7. Modelo Cinemático Inverso.

La cinemática inversa es un proceso mediante el cual podemos llevar al robot a una posición y orientación deseada empleando la matriz transformada que lo define y obteniendo una variedad de soluciones las cuales deben de ser analizadas para verificar que no provoquen un accidente o provoquen que el robot realice movimientos innecesarios.

Referenciando un artículo de MDPI relacionado a la cinemática inversa para robots con 6 grados de libertad, se muestra la obtención del siguiente modelo matemático, dónde debido a la extensión de los cálculos para determinar los valores de la ecuación homogénea, se emplea la siguiente notación para describir los siguientes valores:

$$s_i = \sin(\theta_i) \quad c_i = \cos(\theta_i) \quad s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j + \dots) \quad c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j + \dots)$$

$$\begin{matrix} {}^0_6T = \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$r_{11} = c_1c_{234}c_5c_6 + c_6s_1s_5 - c_1s_{234}s_6 \quad (2)$$

$$r_{21} = c_{234}c_5c_6s_1 - c_1c_6s_5 - s_1s_{234}s_6 \quad (3)$$

$$r_{31} = c_5c_6s_{234} + c_{234}s_6 \quad (4)$$

$$r_{12} = -c_1c_{234}c_5s_6 - s_1s_5s_6 - c_1c_6s_{234} \quad (5)$$

$$r_{22} = -c_{234}c_5s_1s_6 + c_1s_5s_6 - c_6s_1s_{234} \quad (6)$$

$$r_{32} = -c_5s_{234}s_6 + c_{234}c_6 \quad (7)$$

$$r_{13} = -c_1c_{234}s_5 + c_5s_1 \quad (8)$$

$$r_{23} = -c_{234}s_1s_5 - c_1c_5 \quad (9)$$

$$r_{33} = -s_{234}s_5 \quad (10)$$

$$p_x = r_{13}d_6 + c_1(s_{234}d_5 + c_{23}a_3 + c_2a_2) + s_1d_4 \quad (11)$$

$$p_y = r_{23}d_6 + s_1(s_{234}d_5 + c_{23}a_3 + c_2a_2) - c_1d_4 \quad (12)$$

$$p_z = r_{33}d_6 - c_{234}d_5 + s_{23}a_3 + s_2a_2 + d_1 \quad (13)$$

La solución de cinemática inversa con la cual podemos aplicar algoritmos de planeación de trayectorias tiene los siguientes elementos que toman relaciones angulares y longitudes del brazo para obtener las ecuaciones que definen el ángulo de cada junta.

$$A = p_y - d_6r_{23} \quad (14)$$

$$B = p_x - d_6r_{13} \quad (15)$$

$$C = c_1r_{11} + s_1r_{21} \quad (16)$$

$$D = c_1r_{22} - s_1r_{12} \quad (17)$$

$$E = s_1r_{11} - c_1r_{21} \quad (18)$$

$$F = c_5c_6 \quad (19)$$

$$\theta_1 = \pm \text{atan2} \left(\sqrt{B^2 + (-A)^2 - d_4^2}, d_4 \right) + \text{atan2}(B, -A) \quad (20)$$

$$\theta_5 = \pm \text{atan2} \left(\sqrt{E^2 + D^2}, s_1r_{13} - c_1r_{23} \right) \quad (21)$$

$$\theta_6 = \text{atan2} \left(\frac{D}{s_5}, \frac{E}{s_5} \right) \quad (22)$$

$$\theta_{234} = \text{atan2} (r_{31}F - s_6C, FC + s_6r_{31}) \quad (23)$$

$$K_C = c_1p_x + s_1p_y - s_{234}d_5 + c_{234}s_5d_6 \quad (24)$$

$$K_S = p_z - d_1 + c_{234}d_5 + s_{234}s_5d_6 \quad (25)$$

$$c_3 = \frac{K_S^2 + K_C^2 - a_2^2 - a_3^2}{2a_2a_3} \quad (26)$$

$$s_3 = \sqrt{1 - c_3^2} \quad (27)$$

$$\theta_3 = \pm \text{atan2}(s_3, c_3) \quad (28)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(K_S, K_C) - \text{atan2}(s_3 a_3, c_3 a_3 + a_2) \quad (29)$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3 \quad (30)$$

3. Industria.

3.1. Requerimientos del socio formador para el desarrollo del proyecto.

- Cumplir con el margen de 38 piezas de cushion por hora.
- Sistema encargado del atornillado y pre atornillado.
- Sistema para el 60% de los armazones.
- Velocidad del sistema igual o superior al proceso actual.
- Incluir protocolo de fallo de tornillo y de paro.
- Capacitación para el uso del cobot.

3.2. Plan de trabajo.

Planeación de tareas

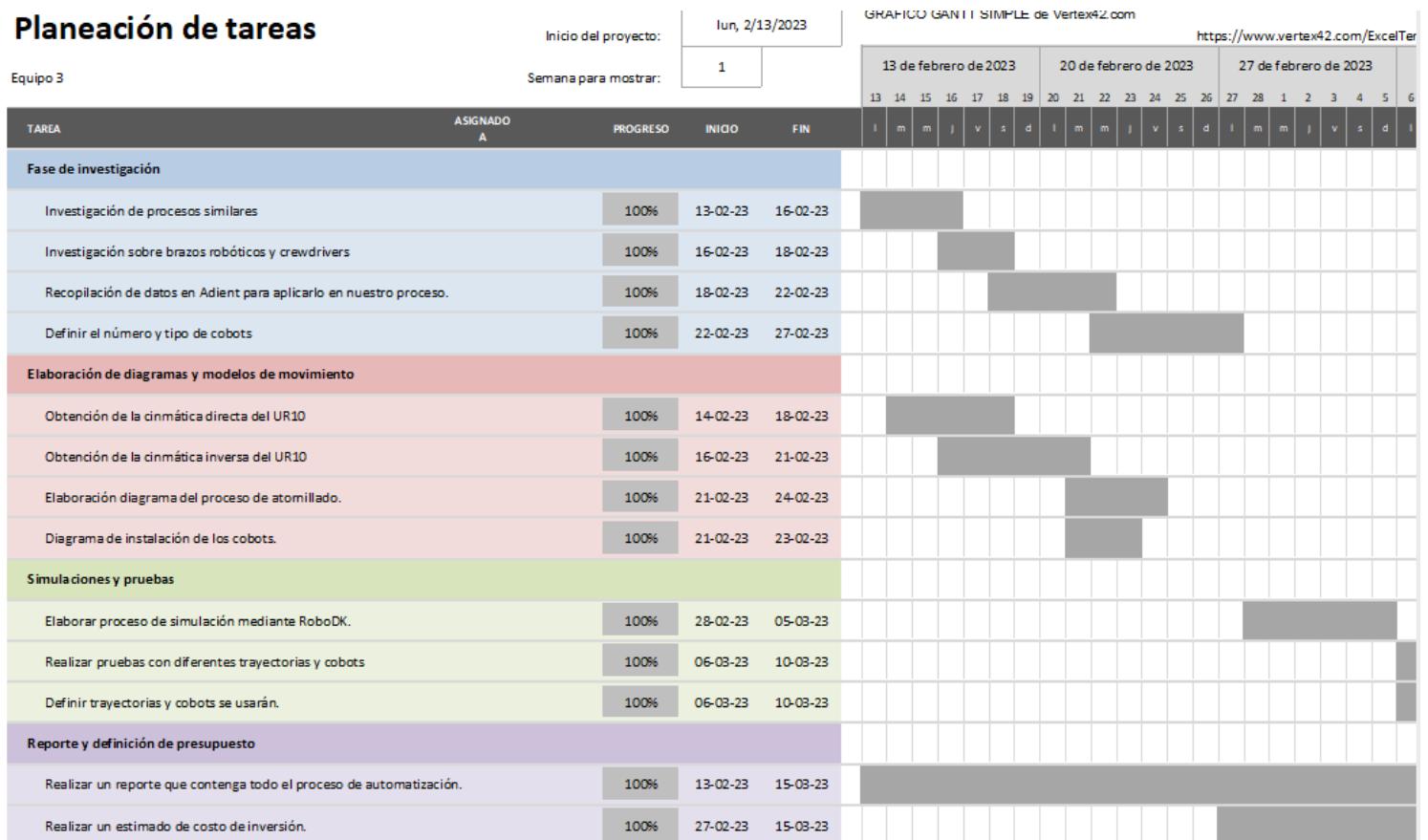


Fig. 7. Diagrama de Gantt del proyecto

3.3. Diagrama del Proceso de atornillado.

- HOME = Posición de reposo del ur10.
- I1 = Botón que inicia el proceso de atornillado.

- R1 = Reanimación del proceso en caso de fallo.
- M1 = Memoria que guarda la posición del robot en caso de fallo de un tornillo.
- A3 = MÍnimo de 3 intentos de atornillado para declarar fallo en el sistema.
- P0 = Se mueve el brazo hacia la posición del alimentador.
- P1 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 1.
- P2 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 2.
- P3 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 3.
- P4 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 4.
- P5 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 5.
- P6 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 6.
- P7 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 7.
- P8 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 8.
- P9 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 9.
- P10 = Se mueve el brazo hacia la posición del tornillo 10.

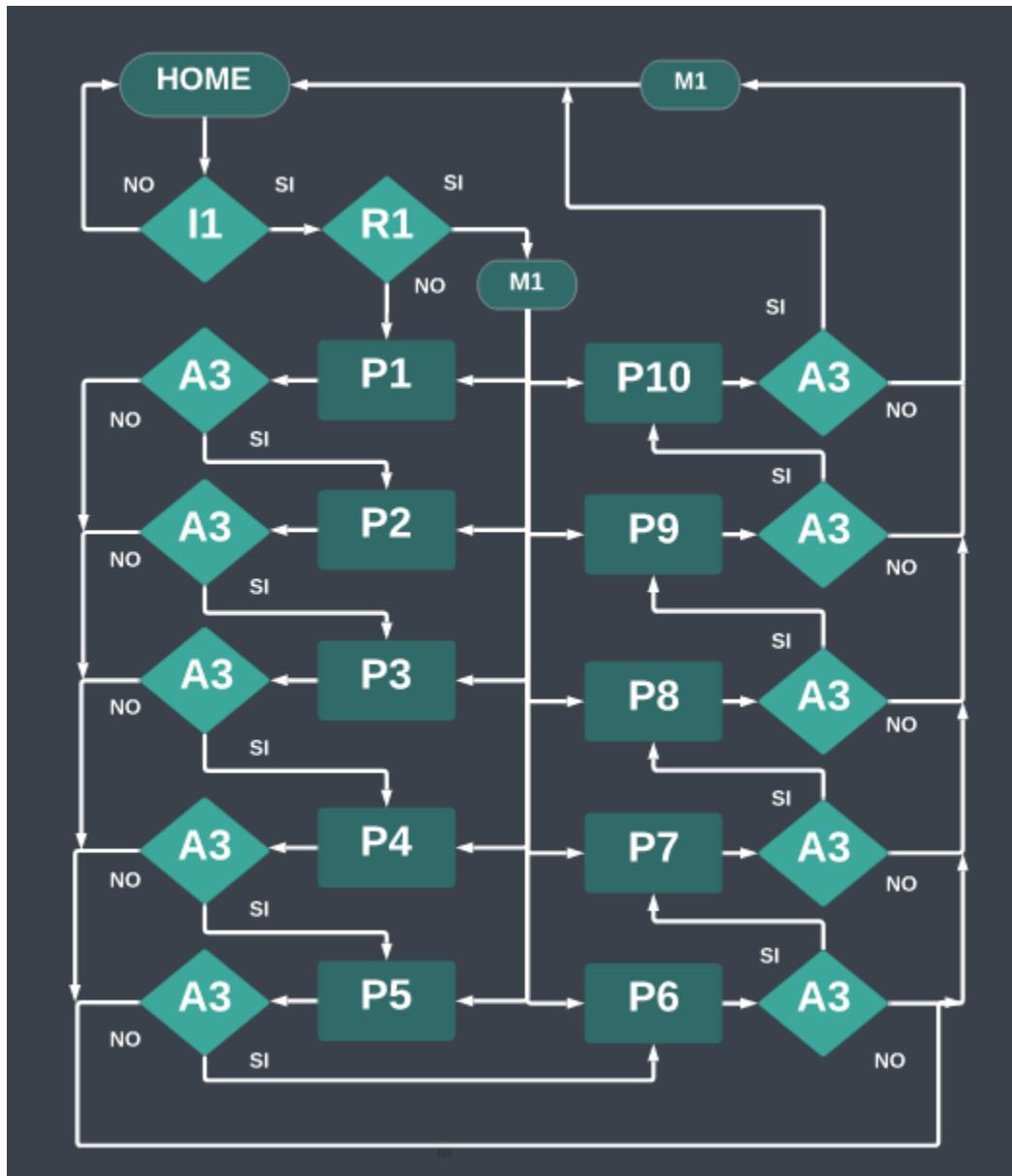


Fig. 8. Diagrama del Proceso de atornillado con previo pre-atornillado.

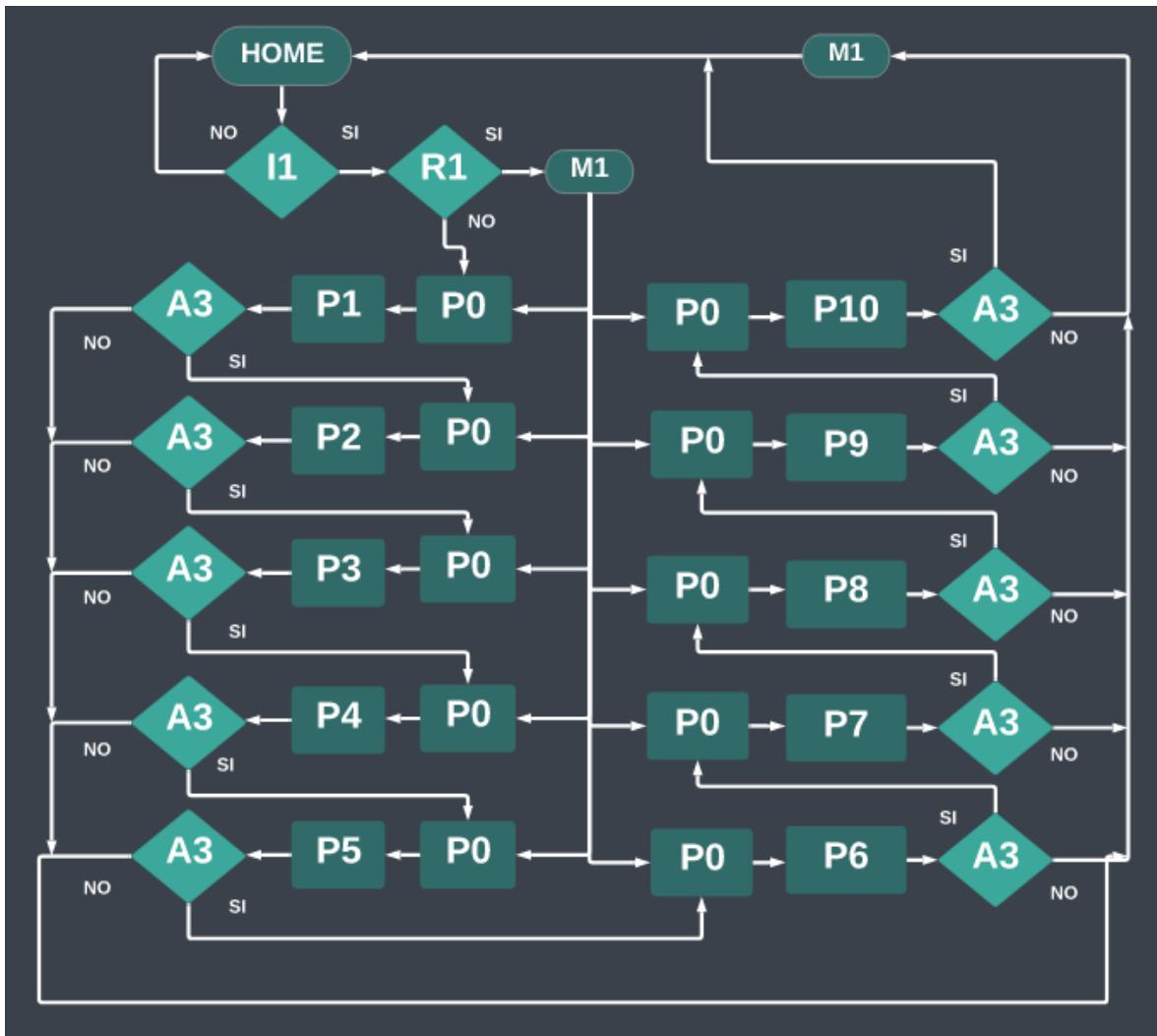


Fig. 9. Diagrama del Proceso de atornillado con alimentador

3.4. Guía GEMMA.

La guía GEMMA (siglas en inglés de "Genetic Evaluation Methods for Mediation Analysis") es una herramienta estadística utilizada en la investigación para analizar los efectos causales de las variables de exposición en las variables de resultado a través de las variables mediadoras.

En particular, puede usarse para estudiar cómo las variables genéticas afectan las variables genéticas. El análisis de mediación lo ayuda a comprender cómo y por qué las variables de exposición afectan las variables de resultado. Al proporcionar un marco para implementar el modelo SEM, la guía GEMMA permite a los investigadores realizar análisis de mediación de manera más eficiente y precisa y subyace a las relaciones entre las variables observadas en los

estudios de investigación. Ayuda a desarrollar una mejor comprensión del mecanismo. El marco metodológico consta de las fases siguientes, que el operario debe realizar:

- Automatización.
- Supervisión.
- Interacción.
- Implementación.
- Pruebas.

En el caso de llevar a la práctica un proyecto de automatización, es necesario seguir las fases de la metodología presentada, así como indicar el operario o grupo de ellos encargados de llevar a cabo las fases por separado o el conjunto de ellas.

3.6. Normativas.

- **ISO 45001-2018.**

La normativa ISO 45001-2018 está diseñada para ser aplicable a cualquier tipo de organización, independientemente de su tamaño, sector o ubicación geográfica. Se basa en el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PDCA), y establece requisitos para la política de SSO, la gestión de riesgos, la identificación y evaluación de peligros y riesgos, la planificación y control operacional, la formación, la comunicación y la participación de los trabajadores, la gestión de emergencias, la medición del desempeño, la auditoría interna y la revisión del sistema de gestión de SSO.

- **ISO 14001.**

La Normativa ISO 14001 se basa en el ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar (PDCA) y establece requisitos para la política ambiental, la planificación, la implementación y la operación, la verificación y la revisión del sistema de gestión ambiental. Estos requisitos incluyen la identificación y evaluación de los aspectos ambientales de las actividades, productos o servicios, la gestión de los riesgos y oportunidades ambientales, la definición de objetivos, metas y programas ambientales, la capacitación y concienciación de los trabajadores, la gestión de las comunicaciones con los grupos de interés, la medición del desempeño ambiental y la auditoría interna.

- **ISO 13849-1:**

The objective of this norm is to reduce, on a large scale, the risks in the process of the machine operation . Therefore, to maintain low risk it's required that the different devices have a high security alarm. For another hand it has to prevent others' risk through acoustic and visual warning signs.

- **ISO 10208-1:**

The importance in the full accomplishment of this norm assures the client that the industrial robot fabricated is designed taking into account the dangers and hazards implied in the automation of the industrial process. This norm also indicates points of guidance that operators need to follow during the installation, functional testing, maintenance and integration of the product into the process in order to safeguard their integrity.

3.7. Costos de inversión.

Todos los precios son estimados, dado que hay que hacer una reunión con los diferentes proveedores para obtener precios exactos.

Tabla 3. Parámetros de un atornillador.

Equipo	Precio (USD)
Costos Robot	
UR10	\$37,450
Screwdriving system	\$1,000-1,500
Costos de equipos de soporte	
Rack	\$600
Soporte UR10	\$ 250
Costos de proceso	
Capacitaciones (si es que son necesarias)	\$200
Instalación de los equipos	\$50
Total	\$40,050

3.8. Área de trabajo del Manipulador Robótico.

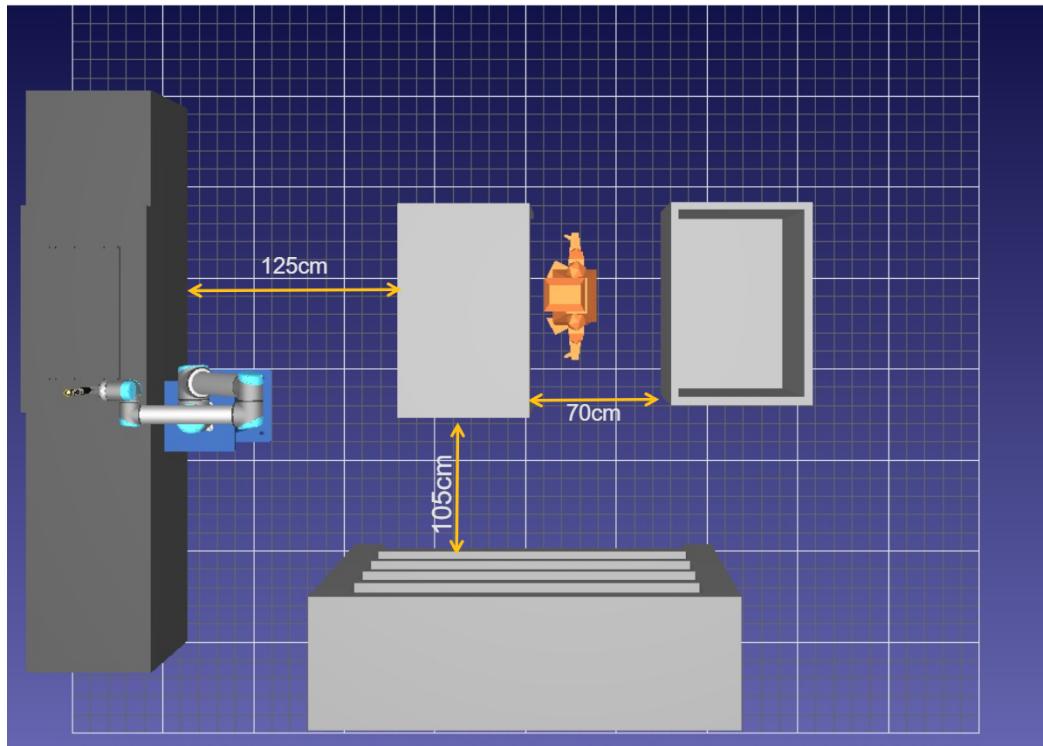


Fig. 10. Diagrama de la estación.

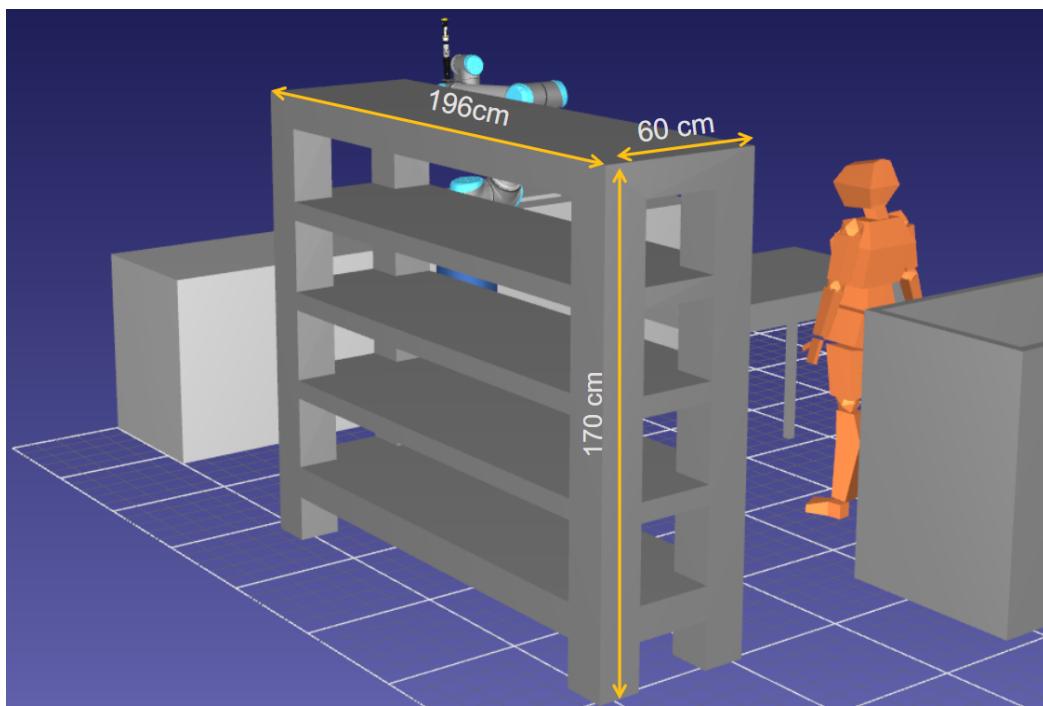


Fig. 11. Medidas del rack.

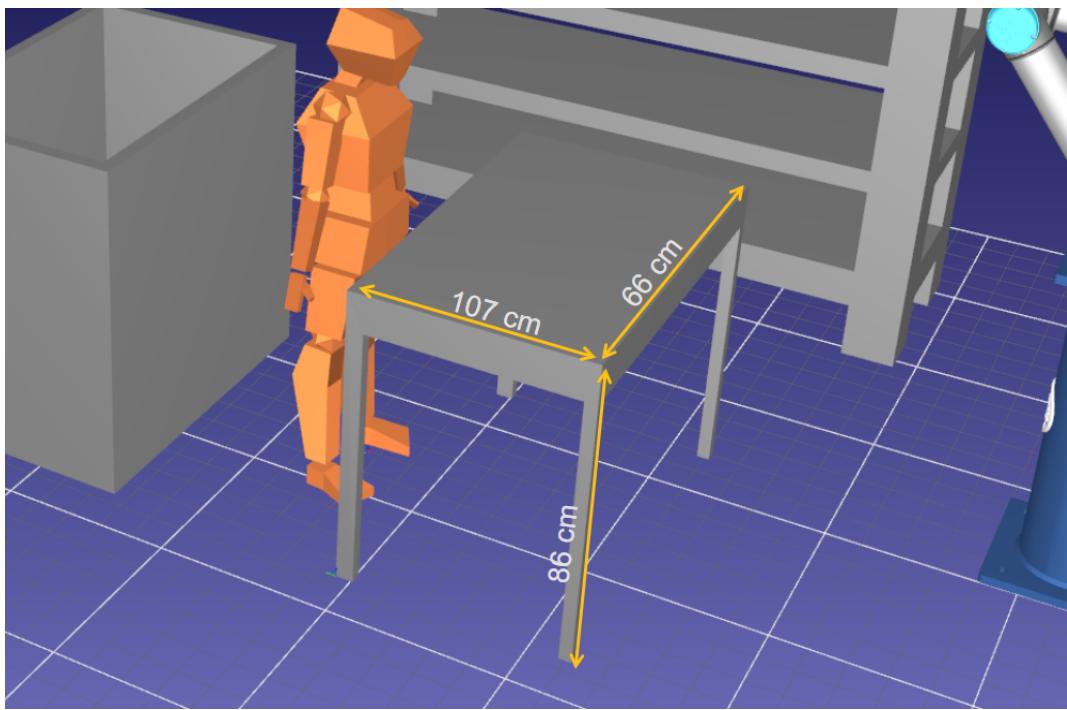


Fig. 12. Medidas mesa de pre ensamblado.

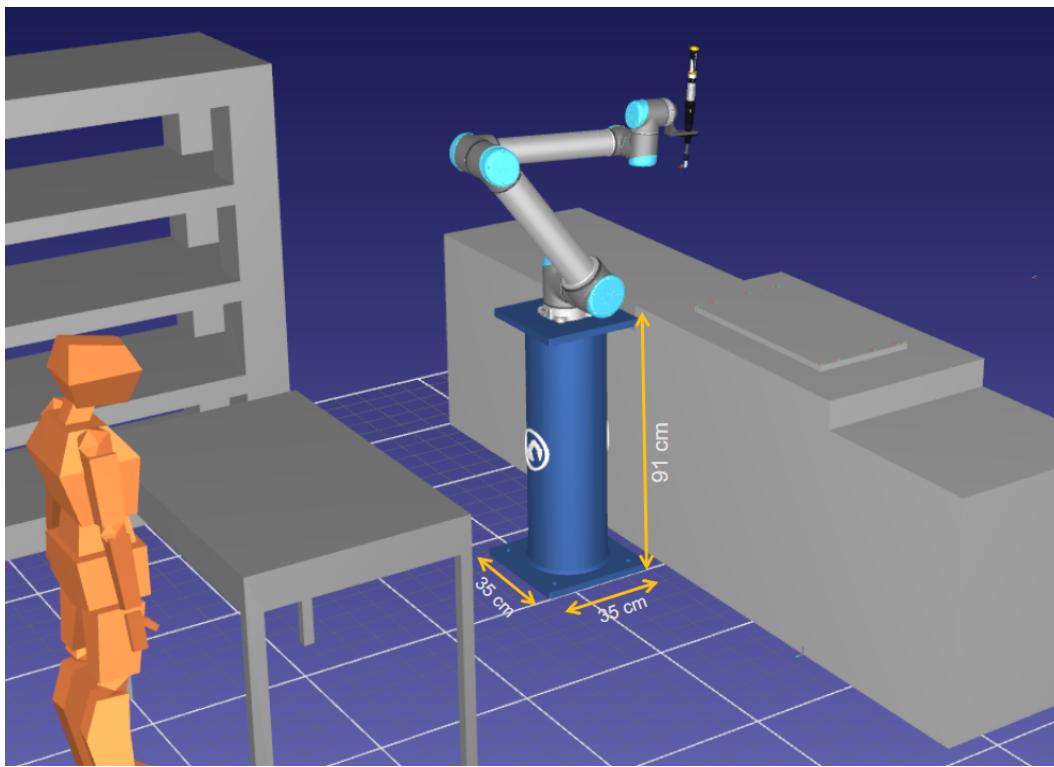


Fig. 13. Base de UR10.

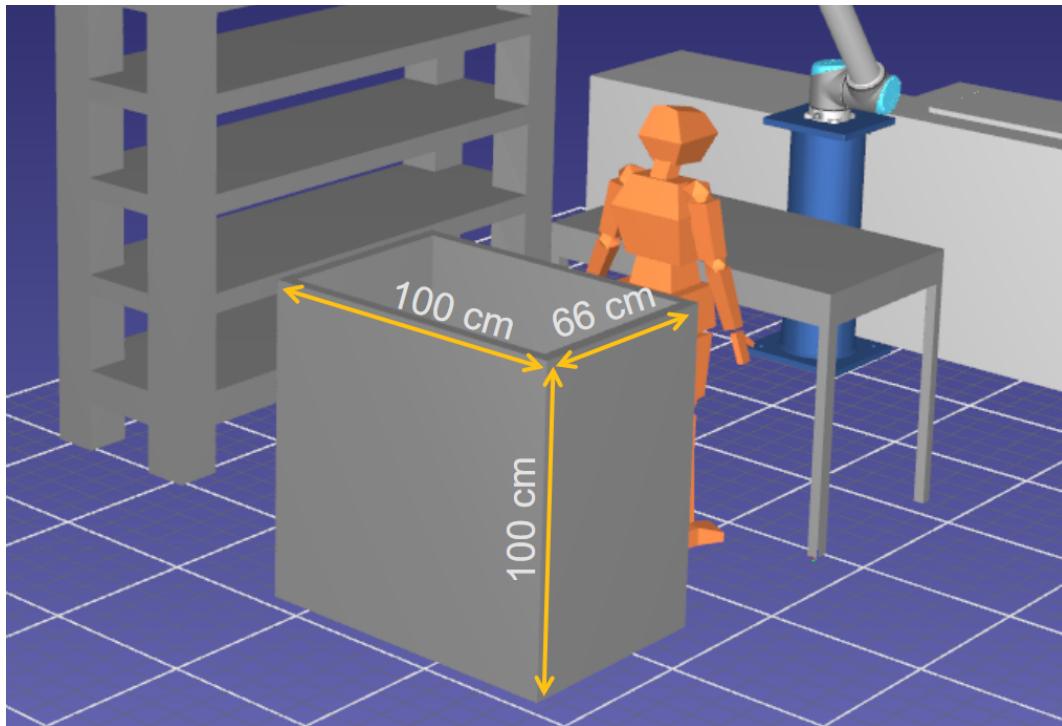


Fig. 14. Caja de los asientos.

4. Definición de la Solución.

4.1. Beneficios de la automatización mediante el uso de RoboDK.

RoboDK es un software de simulación y programación para robots industriales. Este software se puede utilizar para numerosos proyectos de fabricación, incluidos soldadura, extracción y colocación, empaque y etiquetado, paletización, pintura, calibración de robots, y más. El uso de RoboDK en este proyecto nos permitirá programar, diseñar y simular, diferentes modelos de bases de trabajo con el robot cooperativo UR10 que cumplan con los requisitos del socio formador. Debajo se enumera una lista de las ventajas de usar este software como medio de automatización para el proyecto.

1. Aumento de la productividad: Al automatizar tareas repetitivas y precisas, se pueden aumentar los ciclos de producción y la velocidad de la línea de ensamblaje.

2. Reducción de los costos: La automatización puede ayudar a reducir los costos de producción al minimizar los errores y los tiempos de inactividad, así como al mejorar la eficiencia y la calidad del producto.
3. Mejora de la calidad del producto: La automatización mediante RoboDK puede mejorar la precisión y la repetibilidad del proceso de producción, lo que puede conducir a una mejora en la calidad del producto final.

4.2. Grados de libertad del Manipulador Robótico (límites de movimiento del UR10).

Tomando las medidas del UR10 que cuenta con seis grados de libertad, se quiere evitar que estorbe el paso de los trabajadores así como se muestra en la figura 12, cuyo largo máximo será de 125 cm.

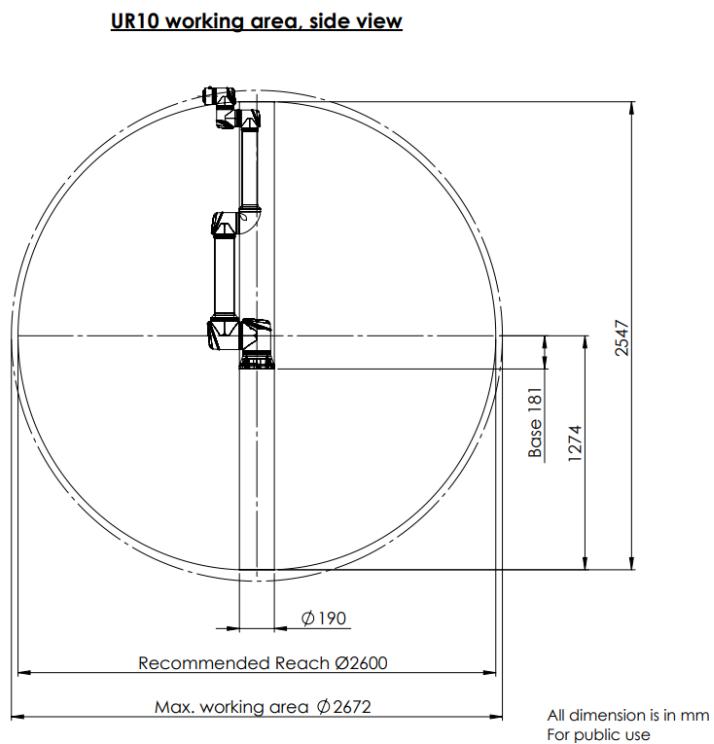


Fig. 15. Vista lateral UR10, alcance máximo.

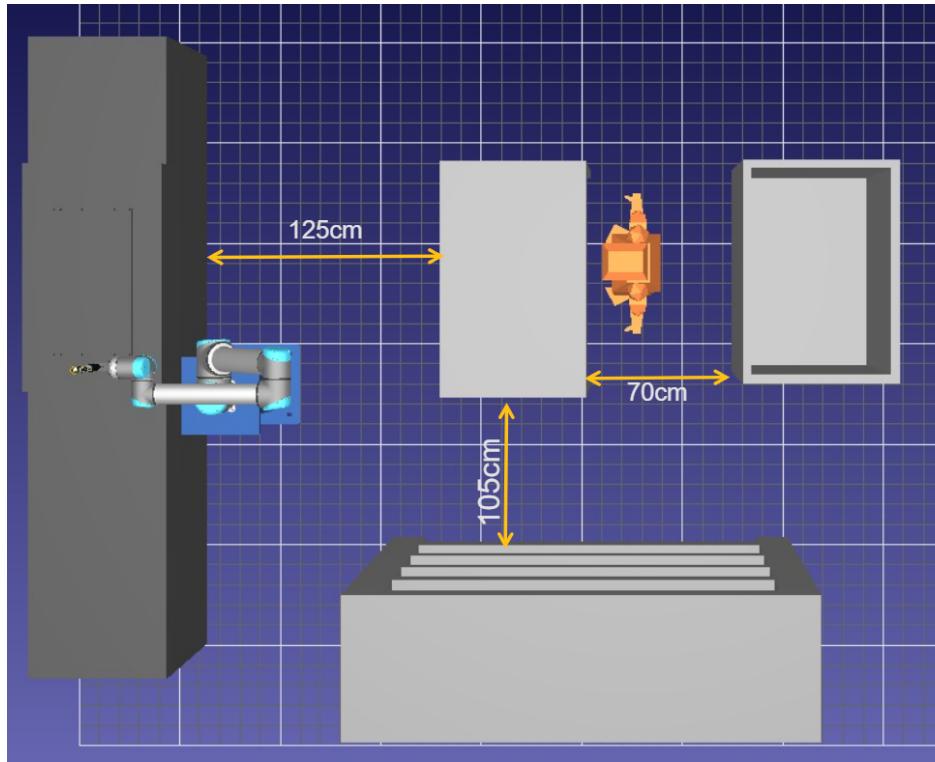


Fig. 16. Diagrama de la estación.

4.3. Generación de trayectorias utilizando MATLAB/RoboDK.

- Propuesta 1.

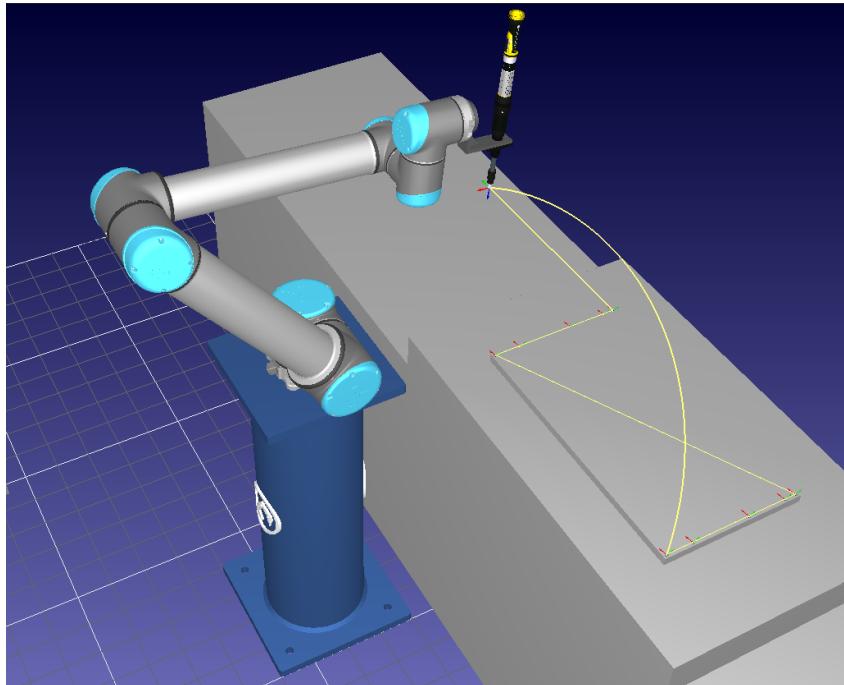


Fig. 17. Vista superior trayectoria de UR10 con preatornillado.

Para la primera propuesta, se toma en cuenta que la pieza fue previamente ensamblada y pre atornillada por un operador y posteriormente colocada en la banda corrediza, donde el cobot realiza toda la secuencia de atornillado la cual toma 11.4 segundos. Esta secuencia de atornillado empieza con la posición en reposo, posteriormente pasa al primer tornillo, se detiene a atornillar y se desplaza al siguiente tornillo, así hasta terminar en posición de reposo.

○ **Propuesta 2.**

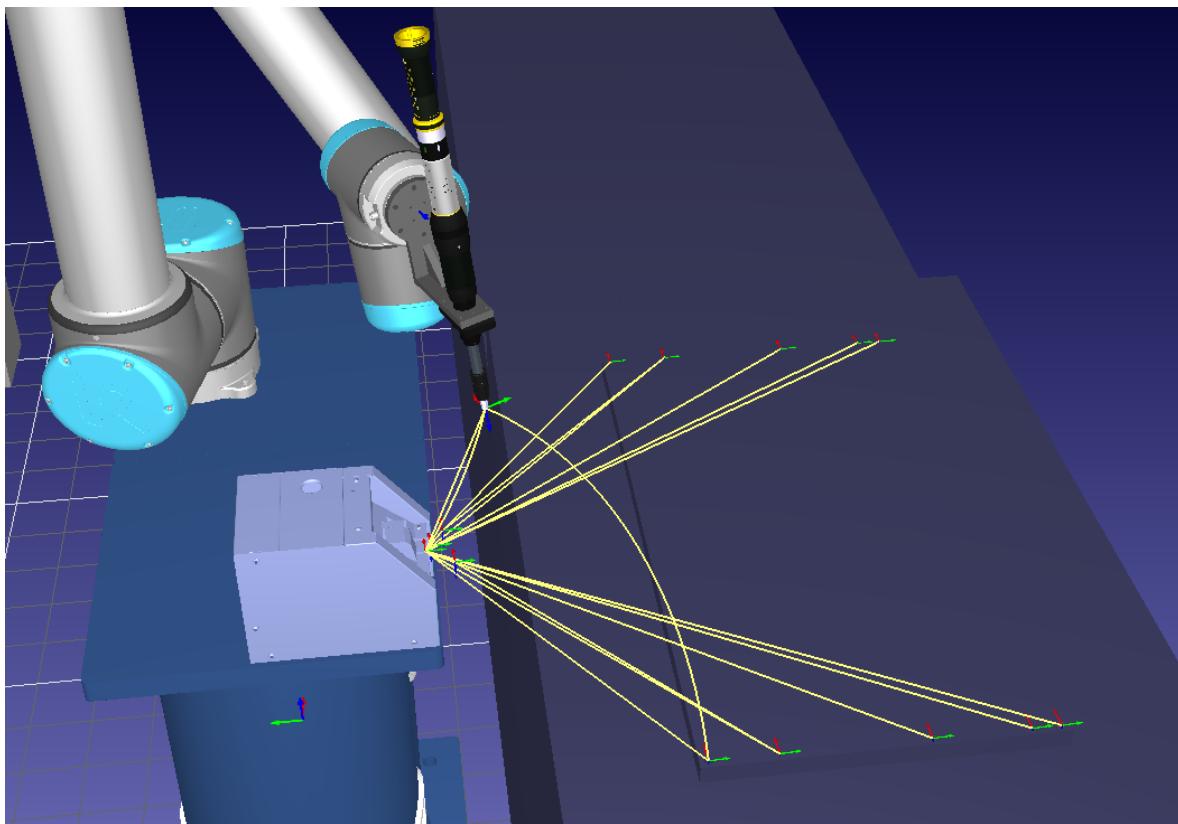


Fig. 18. Vista superior trayectoria de UR10 con feeder.

Para esta segunda propuesta, la pieza solo es ensamblada y se fija en la banda corrediza, el cobot se encuentra en posición de reposo, cuando inicia la secuencia de atornillado el cobot se mueve al dispensador para tomar un tornillo y colocarlo en la primera posición, este mismo movimiento lo hace para cada tornillo el proceso total tarda 27.8 segundos desde que parte de reposo hasta que regresa a la posición de reposo.

5. Conclusión.

Los robots colaborativos, se están volviendo cada vez más importantes en la industria automotriz debido a su capacidad para trabajar junto con trabajadores humanos para mejorar la productividad y la eficiencia al tiempo que garantizan la seguridad de los trabajadores. Al realizar la propuesta presentada se concluyó que existen dos opciones distintas como se describe en los puntos 2.4. y 3.3. La primera opción cuenta con los requerimientos de la empresa y es más accesible, sin embargo toma más tiempo y distancia al ser pick and place. La segunda opción también cumple con los requerimientos y esta es más rápida pues cuenta con alimentación automática, sin embargo es menos accesible pues se hacen bajo pedido y ajustable a las necesidades de cada proceso. Ya sea que se elija la primera o segunda solución, permitirá a los fabricantes de automóviles adaptarse rápidamente a las demandas cambiantes del mercado y mejorar la eficiencia de su producción. La idea de este trabajo es establecer las bases tanto físicas como matemáticas para generar de manera estratégica una propuesta tecnológica factible, por lo que distinguimos que se necesita un estudio más profundo para mejorar dicha solución.

6. Referencias.

- Robotnik. (2022). ¿Qué es un robot industrial? Robotnik: <https://robotnik.eu/es/que-es-un-robot-industrial-definicion-y-caracteristicas/>
- nqa. (2022). ISO 45001:2018. nqa: <https://www.nqa.com/medialibraries/NQA/NQA-Media-Library/PDFs/Spanish%20QRFs%20and%20PDFs/NQA-ISO-45001-Guia-de-implantacion.pdf>
- Anónimo. (2015). ¿Qué es y para qué sirve la norma ISO 14001? Nueva iso: <https://www.nueva-iso-14001.com/2018/04/norma-iso-14001-que-es/>
- RoboDK. (2022). API de RoboDK. RoboDK: <https://robodk.com/doc/es/RoboDK-API.html>
- UR. (2023). SCREWDRIVING SYSTEM DEPRAG PLUS. UR: <https://www.universal-robots.com/plus/products/deprag/screwdriving-system-deprag-plus/>
- Kolver. (2022). Manual KDS Screwdriver. Kolver: <https://kolverusa.com/upl/KDS%20Manual%20101221%20ENG.pdf>
- Villalobos, J.; Sanchez, I.Y.; Martell, F. Singularity Analysis and Complete Methods to Compute the Inverse Kinematics for a 6-DOF UR/TM-Type Robot. Robotics 2022, 11, 137. <https://doi.org/10.3390/robotics11060137>

7. Anexos.

Video demostrativo.

https://drive.google.com/file/d/1j443v79s_oapn_ajMIS_nUR8OseJTrTU/view?usp=share_link