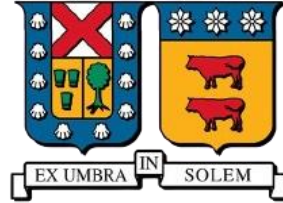


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
VALPARAISO – CHILE



**MODELO DE DISEÑO PARA ESTACIONES DE TRABAJO COLABORATIVO
HUMANO-ROBOT EN ENTORNOS INDUSTRIALES DE PREFABRICACIÓN
CON MADERA EN CHILE**

GIUSEPPE JOEL COPA VALDÉS

MEMORIA DE TÍTULACIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE ARQUITECTO
MODALIDAD I+D

PROFESOR REFERENTE
LUIS FELIPE GONZÁLEZ

DICIEMBRE 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: MODELO DE DISEÑO PARA ESTACIONES DE TRABAJO COLABORATIVO HUMANO-ROBOT EN ENTORNOS INDUSTRIALES DE PREFABRICACIÓN CON MADERA EN CHILE _____

Nombre del candidato(a): GIUSEPPE JOEL COPA VALDÉS _____

Carrera / Grado: ARQUITECTURA _____

Campus: CAMPUS CASA CENTRAL VALPARAÍSO _____ **Departamento:** ARQUITECTURA _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Luis Felipe González Böhme, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

X El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 29/07/2026 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29/07/2026 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
VALPARAISO – CHILE



**MODELO DE DISEÑO PARA ESTACIONES DE TRABAJO COLABORATIVO
HUMANO-ROBOT EN ENTORNOS INDUSTRIALES DE PREFABRICACIÓN
CON MADERA EN CHILE**

GIUSEPPE JOEL COPA VALDÉS

MEMORIA DE TÍTULACIÓN

MODALIDAD I+D

PROFESOR REFERENTE

LUIS FELIPE GONZÁLEZ

DICIEMBRE 2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, en especial a mi mamá y mi papá, que fueron el pilar fundamental para el término de este proceso. También a mis amigos arquitectos por todas las experiencias pasadas para culminar en esta memoria. Y a todas las personas que conocí que hicieron de la universidad un lugar más agradable.

GLOSARIO

3.1.1.2* Robot: Manipulador multipropósito reprogramable y controlado automáticamente, programable en tres o más ejes (3.1.2.1), que puede estar fijo en su lugar o fijado a una plataforma móvil para su uso en aplicaciones de automatización en un entorno industrial.

3.1.1.4* Aplicación de robot: Máquina que comprende un sistema de robots piezas de trabajo, programa de tareas y maquinaria y equipo para apoyar la aplicación (3.1.1.5) y las tareas previstas.

3.1.1.5* Aplicación: Uso previsto y finalidad del robot (3.1.1.2) o de la aplicación del robot (3.1.1.4), es decir, el proceso, la tarea o tareas.

3.1.2.1* Eje: Articulación mecánica accionada (por ejemplo, que gira alrededor de un pivote, se mueve linealmente) que proporciona al menos un grado de libertad.

3.1.2.2* Eje adicional: Eje (3.1.2.1) que no forma parte del manipulador (3.1.2.7)

3.1.2.3* Efecto final: Dispositivo diseñado específicamente para acoplarse a la interfaz mecánica (3.1.2.9) y permitir que la aplicación robótica (3.1.1.4) realice su tarea.

3.1.2.7* Manipulador: Mecanismo compuesto por una disposición de segmentos articulados o deslizantes entre sí.

3.1.2.9* Interfaz mecánica: Superficie de montaje en el extremo del manipulador (3.1.2.7) a la que se fija el efecto final (3.1.2.3).

3.1.2.13* Punto central de la herramienta (TCP): Punto definido para una aplicación determinada (3.1.1.5) en relación con el sistema de coordenadas de la interfaz mecánica (3.1.2.9).

3.1.9.2* Espacio máximo: Espacio al que pueden llegar las partes móviles del robot (3.1.1.2).

3.1.9.3* Espacio de operación: Porción del espacio que se utiliza al realizar todos los movimientos ordenados por el programa de tareas.

4.7 Eslabón:** Cuerpo rígido conectado a uno o más cuerpos rígidos mediante articulaciones (4.8).

4.8 Articulación:** Pieza mecánica que conecta dos cuerpos rígidos y permite un movimiento relativo restringido entre ellos.

4.9 Base:** Estructura a la que está unido el primer eslabón (4.7) del manipulador (4.14).

4.10 Superficie de montaje de la base:** Superficie de conexión del primer eslabón (4.7) del manipulador (4.14) que está conectado a la base (4.9).

2.18* Estación de trabajo:** Combinación y disposición espacial del equipamiento de trabajo, rodeado por el entorno laboral bajo las condiciones impuestas por las tareas de trabajo.

2.4* Trabajador:** Persona realizando una o más actividades para lograr una meta dentro del sistema de trabajo.

2.17* Tarea de trabajo:** Actividad o set de actividades requeridas del trabajador para lograr un resultado esperado.

2.9* Espacio de trabajo:** Volumen asignado a una o más personas en el sistema de trabajo para completar la tarea de trabajo.

3.6** Dirección:** Posición de un punto en el espacio con respecto a otro punto, independientemente de la distancia entre ambos puntos.

3.10** Observador:** Persona real o hipotética que observa un objeto objetivo desde fuera o desde dentro de este al determinar la dirección o el movimiento de un objeto objetivo (3.14).

3.15** Objeto Objetivo:** Objeto (incluso imágenes) cuya orientación espacial (3.14) o movimientos se van a definir, determinar o controlar.

3.18** Dirección de visión:** Dirección supuesta hacia la que mira un observador (3.10) al determinar la dirección (3.6) de un objeto objetivo (3.15)

* **2025—ISO 10218-2**—Safety requirements Part 2 Industrial robot applications and robot cells.

** **2021—ISO 8373**—Vocabulary.

*** **2016—ISO 6385**—Ergonomics principles in the design of work systems.

**** **2008—ISO 1503**—Spatial orientation and direction of movement — Ergonomic.

ÍNDICE

- 1. Problema 6
 - 1.1. Antecedentes internacionales 7
 - 1.2. Antecedentes nacionales 9
- 2. Solución propuesta 10
- 3. Estado del arte 11
 - 3.1. Soluciones alternativas actualmente investigadas 14
 - 3.2. Análisis de la propiedad intelectual e industrial 18
 - 3.3. Normas nacionales e internacionales 24
- 4. Objetivos 28
 - 4.1. Objetivo General 28
 - 4.2. Objetivos específicos 28
- 5. Metodología 29
 - 5.1. Método PRISMA 30
 - 5.2. Validación experimental en caso de uso: IGLÚ Modular 34
 - 5.3. Método BIM 43

5.4. Modelación paramétrica 3D y 4D: variables y restricciones.....	45
5.5. Modelo paramétrico	53
5.6. Prototipos	59
6. Evaluación de un prototipo del modelo de diseño	80
7. Trabajo futuro.....	83
8. Referencias	86

1. Problema

El problema técnico abordado en este trabajo radica en las persistentes barreras para la adopción temprana de automatización en PYMEs prefabricadoras con madera en Chile como, por ejemplo, costos en capacitación, tecnología y adaptación de la cultura interna. La colaboración humano-robot ofrece una alternativa a la automatización total, poniendo al humano en el centro de la producción. Esto requiere definir las variables de diseño y sus relaciones en la configuración de estaciones de trabajo colaborativo humano-robot para esta industria.

En Chile, de un global de 112 prefabricadoras en madera, 23 fueron analizadas a detalle y el 87% presentan niveles de industrialización medio, bajo y muy bajo (Parada et al, 2023) y no son elegibles para ofrecer proyecto de Vivienda Industrializada Tipo.

Por otro lado, la Industria 4.0, enfocada en la digitalización y automatización de los procesos de manufactura, genera un gran impacto social al sustituir el rol humano en diversos puestos de trabajo (Carro Suárez & Sarmiento Paredes, 2022). Es por ello que la transición hacia una Industria 5.0 (I5.0), centrada en el ser humano, se presenta como una alternativa más factible para estas prefabricadoras.

1.1. Antecedentes internacionales

La colaboración humano-robot (HRC, por sus siglas en inglés) constituye un campo de investigación en constante desarrollo a nivel internacional. Actualmente, existen diversos estudios y normativas que establecen formas seguras para una interacción y colaboración segura entre humanos y robots en entornos industriales.

No obstante, la transición desde la Industria 4.0, enfocada en la automatización y la productividad, hacia la Industria 5.0, centrada en el ser humano, aún enfrenta barreras para su implementación efectiva. Esto se debe principalmente a la incertidumbre respecto a la seguridad de las personas y a la naturaleza altamente dinámica de los entornos de construcción. Por consiguiente, esta temática se mantiene como objeto de ardua investigación, con el fin de garantizar una colaboración que sea tanto segura como eficiente en términos productivos.

Kramberger, en colaboración con distintas universidades, presenta un proyecto de celdas de enseñanza y ejecución para estructuras de madera. Esta propuesta integra la HRC mediante el aprendizaje por demostración, para luego efectuar la tarea de ensamblaje de dos piezas. Para su funcionamiento, el sistema requiere dos *cobots* y tres mesas de trabajo, sin embargo, a pesar de denominarse celda, el diseño carece de cierres perimetrales, lo que favorece una colaboración fluida. En las pruebas realizadas, el proyecto demostró la capacidad de ejecutar ensamblajes con las piezas de madera dispuestas en posiciones arbitrarias, completando con éxito 100 ejecuciones distintas.

Las universidades de Monash y British Columbia presentan una estación diseñada para disminuir la demanda física y el tiempo de ejecución en tareas específicas. Esta propuesta integra robots colaborativos (*cobots*) y realidad aumentada (AR), tecnología que permite otorgar una retroalimentación efectiva al usuario, dotando al proceso de control del robot de un carácter innovador y estimulante. Por su parte, Kyjanek y colaboradores también emplean AR, aunque su enfoque se centra en la implementación de un flujo de trabajo interoperable a través de múltiples plataformas de *software* y *hardware*. Esto permitió desarrollar una interfaz específica para el control del robot, caracterizada por su facilidad de uso para trabajadores sin conocimientos de programación, dándole herramientas para planificar trayectorias, intervenir en las secuencias de producción y obtener diagnósticos del sistema.

Kamezaki y colaboradores desarrollaron un espacio dinámico para la HRC con el objetivo de aumentar la productividad en las tareas, dado que el cumplimiento de la norma ISO/TS 15066 en entornos sin celdas obliga al robot a detenerse constantemente cuando el humano ingresa a su espacio operacional. Para abordar esto, proponen la implementación de espacios de trabajo dinámicos en los cuales el robot identifica el área de ocupación del humano y sus posibles interferencias mediante telémetros láser (LRF). Asimismo, el sistema utiliza indicadores visuales cromáticos en la base del robot para diferenciar estos espacios y evitar confusiones, junto con indicadores auditivos para alertar sobre la entrada humana.

1.2. Antecedentes nacionales

En Chile existe un déficit habitacional que supera los 640 mil hogares, lo que implica que más de 2 millones de personas no tienen acceso a una vivienda (CIM UC, 2024). En respuesta a esta problemática, el MINVU presentó en 2022 el Plan de Emergencia Habitacional, cuyo objetivo es entregar 260 mil viviendas en un periodo de cuatro años. Este escenario plantea la oportunidad de innovar en la industria de la construcción, transitando desde métodos tradicionales hacia formatos como diseños modulares y sistemas industrializados. En este contexto, la Resolución Ex. N°52, Anexo C, establece criterios de rendimiento productivo: se exige un mínimo de 15 viviendas semanales para obtener una calificación de 4 ("Bueno"), y una producción superior a 25 viviendas semanales para alcanzar un puntaje de 5 ("Muy Bueno").

Si bien la construcción industrializada ha experimentado un aumento en los últimos años según el CIM UC, este crecimiento resulta insuficiente para mitigar el déficit habitacional. Esto se debe a que gran parte de las empresas del sector operan con niveles de automatización bajos o muy bajos, lo que les impide alcanzar los rendimientos exigidos de 15 a 25 viviendas semanales.

Por otra parte, intentar alcanzar altos niveles de automatización resulta económicamente inviable debido a la elevada inversión requerida y a la amenaza que esto representa para los puestos de trabajo. Ante este escenario, adoptar un proceso más gradual y centrado en el humano bajo el enfoque de la Industria 5.0 permite una adaptación más adecuada para estas prefabricadoras.

2. Solución propuesta

La solución propuesta consiste en un modelo de diseño para estaciones de trabajo colaborativo humano-robot en entornos industriales de prefabricación de viviendas de madera en Chile, que permite crear configuraciones adaptadas a las necesidades específicas de cada empresa.

Se definen variables sobre la geometría y topología de cada estación, basada en los términos definidos por las normas ISO 10218-1:2025, ISO 10218-2:2025, ISO 8373:2021, ISO TS 15066:2016, ISO 6385:2016 e ISO 1503:2008. Asimismo, se utiliza el software de modelado 3D Rhinoceros junto con el entorno de programación visual Grasshopper con el objetivo de diseñar diferentes aplicaciones robóticas. Posteriormente, se analiza la cinemática directa del manipulador para observar los movimientos del robot, del efector final y de la pieza de trabajo, definiendo así los espacios de trabajo del robot y del trabajador.

3.Estado del arte

Colaboración humano-robot (HRC)

La colaboración humano-robot está transformando los sectores de la manufactura y la construcción mediante la integración de robots colaborativos (cobots). Una adecuada asignación de tareas permite disminuir la fatiga física excesiva en los trabajadores, lo que repercute positivamente en la productividad y la seguridad (Baratta et al., 2024).

Por su parte, los entornos de construcción, especialmente en prefabricadoras con bajo y muy bajo nivel de industrialización, se caracterizan por ser dinámicos y no estructurados (Liu et al., 2021). Si a esto se suma la alta aleatoriedad de los movimientos humanos (Yang et al., 2024), los riesgos y peligros latentes constituyen una barrera significativa para su integración en la práctica.

Aplicación de la colaboración humano-robot en manufactura, ensamblaje, prefabricación y construcción en madera

La colaboración humano-robot ha impulsado cambios significativos en la industria de la prefabricación, aportando flexibilidad a los entornos de trabajo mediante la combinación sinérgica de las fortalezas de las máquinas y los humanos. Por su parte, la madera se destaca como un material ligero y sostenible que ofrece un gran potencial para reducir la huella de carbono, presentando además una alta aptitud para la automatización en sus procesos constructivos (Yang et al., 2024).

Se ha propuesto un marco conceptual orientado a los retos y oportunidades de la HRC en el contexto de la prefabricación en madera (Yang et al., 2024). Este marco se estructura a partir de cuatro interrogantes fundamentales que abarcan la construcción conjunta, la contribución de cada actor, la metodología de trabajo y los logros del sistema. A su vez, estas interrogantes giran en torno a tres variables principales: el diseño, el sistema HRC y el ser humano.

Por otro lado, se ha planteado una taxonomía multidimensional para la interacción humano-robot en la construcción (Rodrigues et al., 2023). Si bien esta propuesta no se enfoca exclusivamente en la colaboración ni en la madera, sí integra roles colaborativos. Su estructura se define en tres dimensiones: el equipo, la tarea y el entorno; cuyas variables consideran tanto las características individuales del humano y del robot, como sus características compartidas.

Asimismo, se ha propuesto un modelo digital para el ensamblaje robótico robusto de estructuras de madera complejas (Kramberger et al., 2022). Este sistema se basa en un gemelo digital diseñado para facilitar los movimientos que requieren las uniones entrelazadas, integrando aprendizaje por demostración mediante una guía cinestésica operada por los trabajadores.

Modos de comunicación humano-robot

Existen distintas formas de comunicación entre máquinas y humanos, las cuales dependen de diversos factores. Por un lado, el aprendizaje por refuerzo consiste en una interacción continua con el entorno mediante algoritmos diseñados para maximizar una

recompensa o lograr un objetivo específico (Zhang et al., 2022); habitualmente, esta técnica se emplea en tareas repetitivas con pequeñas variaciones.

Por otro lado, la comunicación visual a través de símbolos dibujados a mano surge como un método novedoso para la fabricación robótica, ya que permite transmitir instrucciones a los robots para que estos puedan comprender las intenciones de los carpinteros y ebanistas (Aguilera-Carrasco et al., 2023). Este enfoque tiene la intención de mitigar la brecha de conocimiento existente entre el paradigma actual de instrucción robótica y los procesos artesanales (Pedersen & Reinhardt, 2025).

Industria 5.0

La transición de la Industria 4.0 a la 5.0 ofrece nuevas y grandes oportunidades para la innovación y la optimización de la interacción entre máquinas y humanos, permitiendo capitalizar el valor agregado que el trabajador aporta al proceso de construcción y al producto final (Suárez & Paredes, 2022). La Industria 5.0 pone un fuerte énfasis en la reincorporación del ser humano al proceso de fabricación; en este sentido, herramientas como la inteligencia artificial ayudan a fortalecer a los trabajadores en lugar de reemplazarlos (Dhanda et al., 2025). En este contexto sobresalen los robots colaborativos o cobots, ya que pueden ejecutar tareas repetitivas y físicamente exigentes, permitiendo así que los operarios se centren en actividades que requieren creatividad, toma de decisiones y resolución de problemas. De este modo, este nuevo paradigma industrial prioriza la seguridad y el bienestar de los trabajadores para garantizar una coexistencia segura en el espacio de trabajo (Rahman et al., 2024).

3.1. Soluciones alternativas actualmente investigadas

El trabajo colaborativo entre humano y maquinas que cumpla con los requisitos de la norma internacional ISO/TS 15066, no se ve en fábricas con ejemplos reales. Principalmente, por el equilibrio entre seguridad y productividad (Kamezaki et al., 2024). Los espacios de trabajos colaborativos son cada vez más dinámicos y es algo que la ISO/TS 15066 no tiene en cuenta, lo que reduce la productividad. Kamezaki y colaboradores, propone un espacio de trabajo colaborativo dinámico (DCW) que mejore la productividad sin comprometer la seguridad del trabajador, evitando paradas innecesarias del robot cuando un humano ingresa a zonas compartidas. Se realizan 4 experimentos (figura 1), de comparación para medir la productividad, seguridad y percepción humana.

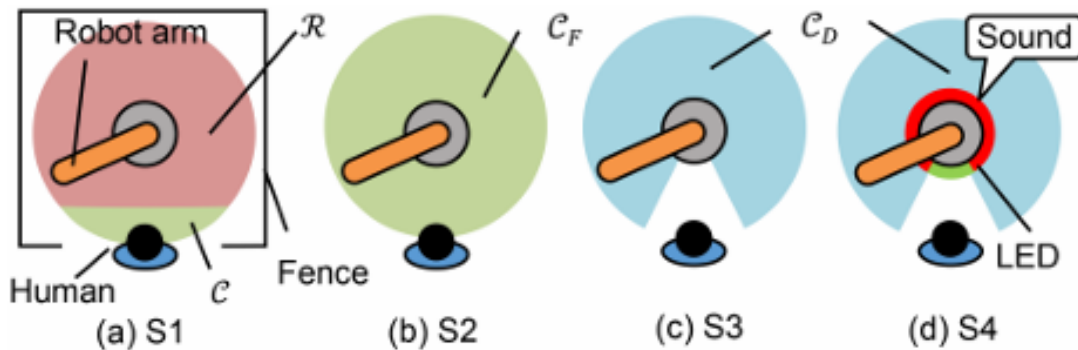


Figura 1. Cuatro condiciones de los experimentos comparativos. (a) S1: Con reja, (b) S2: Sin reja, (c) S3: Método propuesto sin indicador de estado, y (d) S4: Método propuesto con indicador de estado. Kamezaki et al., 2024

Se realizaron experimentos comparativos para obtener datos reales sobre una tarea de atornillado. En el estudio participaron 12 estudiantes que asumieron el rol de trabajadores, ejecutando la acción de atornillar mientras el robot realizaba rotaciones repetitivas en cinco puntos distintos.

Los resultados indicaron que el experimento S4 fue el mejor valorado por los participantes, dado que el uso de indicadores visuales generó una mayor confianza. Por el contrario, los sistemas con vallas resultan ser los más seguros y estos fueron percibidos como los más incómodos para trabajar. Finalmente, es evidente que estos ensayos no logran simular totalmente las tareas de una construcción real, caracterizada por un entorno más dinámico y menos controlado, sin embargo, constituyen un avance significativo en la comprensión de la percepción humana al trabajar en colaboración dentro del mismo espacio que un robot.

La siguiente solución está enfocada en una tarea compleja como los una unión ajustada y entrelazada (tight interlocking joints). Las programaciones para esta unión requieren mucho tiempo y un lugar controlado para su práctica (Kramberger et al., 2022). La metodología empleada se basa en un gemelo digital de ensamblaje y contempla cuatro fases. La primera consiste en el diseño 3D de una estructura recíproca de uniones entrelazadas de madera, el cual proporciona los datos geométricos de cada pieza. La segunda fase aborda el aprendizaje por demostración, utilizando el método de guía cinestésica para transferir las habilidades de ensamblaje humanas al robot. Esta guía genera una trayectoria en la cual se registran la posición, la orientación y los ángulos de

las articulaciones, datos que son codificados en Primitivas de Movimiento Dinámico Cartesiano (CDMPs); esto permite ejecutar las tareas en cualquier ubicación u orientación arbitraria dentro del diseño global. Finalmente, la cuarta fase tiene como objetivo garantizar una ejecución segura y fiable mediante el control de la fuerza y el torque del robot, adaptando así su movimiento.

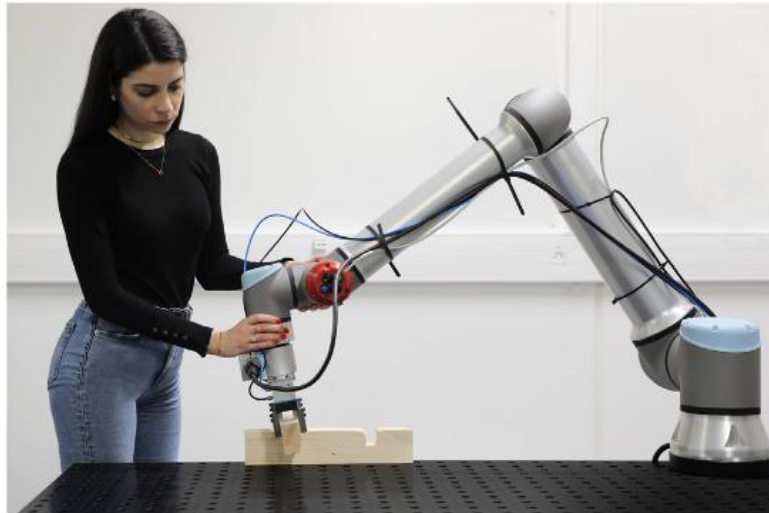


Figura 2. Demostración de la política de montaje basada en robots para estructuras de madera. Kramberger, 2022.

En cuanto a los resultados, el proyecto demostró una alta tasa de éxito del 93% en 100 demostraciones de ensamblaje. Se destaca especialmente el control de fuerza y torque, lo que generó un mejor rendimiento general. Las principales fallas detectadas se atribuyeron a piezas mal posicionadas o a imperfecciones de fabricación. Por otro lado, se validó la capacidad de ensamblaje en posiciones arbitrarias dentro del espacio operacional del robot. No obstante, a pesar de los buenos resultados, es fundamental considerar los errores como un factor común en la construcción industrializada donde

todas las piezas de trabajo requieren ser recalibradas para asegurar su efectiva ejecución final.

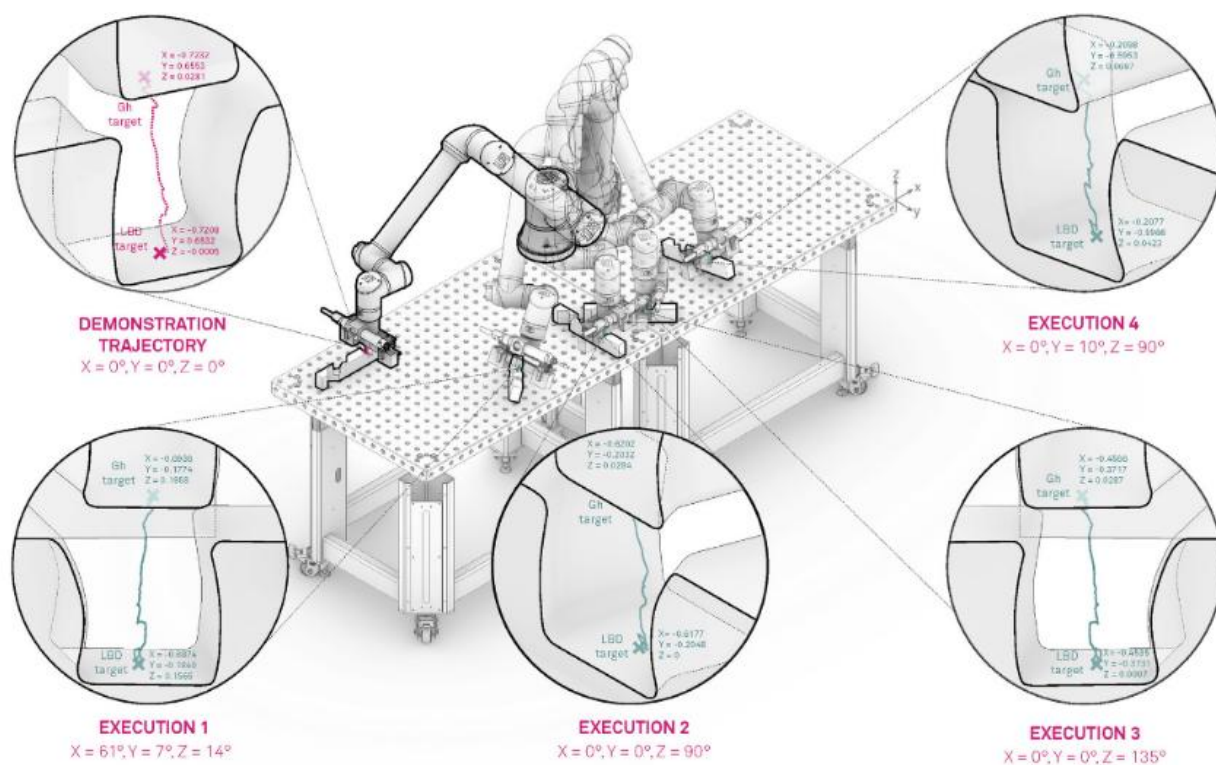


Figura 3. Modulación y ejecución del movimiento demostrado en diversas ubicaciones del espacio de trabajo del robot. Kramberger, 2022

3.2. Análisis de la propiedad intelectual e industrial

En el mercado actual no existe un producto específico que permita el trabajo colaborativo para tareas de prefabricación en madera. Si bien se dispone de robots colaborativos, como los de la empresa Universal Robots, certificados con 17 funciones de seguridad, estos se encuentran limitados por sus capacidades de carga, las cuales oscilan entre los 3 y los 20 kilogramos. Estos rangos resultan insuficientes para trabajos que implican una alta exigencia física, como por ejemplo el levantamiento de paneles de madera. Por consiguiente, se hace necesario el desarrollo de métodos y sistemas que habiliten la colaboración humano-robot utilizando robots industriales de alta capacidad de carga.

La siguiente tabla muestra distintas patentes agrupadas por un desarrollo común, que van de teorías de sistemas y métodos colaborativos a diseños físicos y puestos en práctica de estacione de trabajo colaborativo humano-robot.

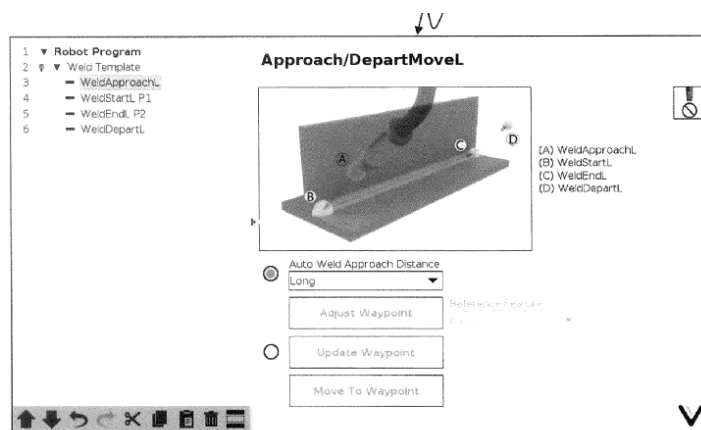
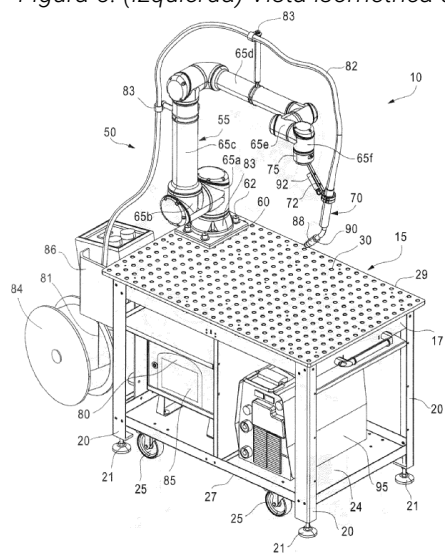
Patentes	Desarrollo común
US20210173377	Enfoque en 3 distintos modelos para optimizar la velocidad y calidad de la tarea. Un modelo para el trabajador, otro para la interacción humano-robot y finalmente un modelo para el proceso de fabricación.
US20230086122 US20210252699	Enfoque en la creación de sistemas de Programación por Demostración (PbD) avanzados, intuitivos y flexibles que permiten a los robots colaborar con humanos y ejecutar tareas complejas de fabricación de manera adaptativa y robusta, superando la necesidad de programación manual y rígida.
WO2021154407 US20250058473 US20230173682 US20240375273 US20240261909 US20250041980 US20250083296	Enfoque en colaboración segura, programable de forma intuitiva para trabajadores sin conocimiento previo y estaciones altamente flexibles y modulares para adaptarse a entornos dinámicos. Patentes con un gran desarrollo tecnológico y puesta en práctica con experimentos reales.

Las patentes seleccionadas son un gran apoyo para poder generar un modelo de diseño adecuado, considerando el contexto de prefabricación con madera. Principalmente las que son enfocadas para entornos dinámicos y que sean flexibles y modulares.

MODELO DE DISEÑO DE ESTACIONES DE TRABAJO COLABORATIVO HUMANO-ROBOT PARA ENTORNOS INDUSTRIALES DE PREFABRICACIÓN CON MADERA EN CHILE

La patente US20240261909 describe un sistema de soldadura colaborativo, móvil y reconfigurable. Este sistema robótico se distingue por su capacidad de ser transportado y reubicado directamente junto a la pieza de trabajo. Su programación se efectúa a través de una interfaz intuitiva, mediante la cual el operario realiza un guiado manual del robot a lo largo de la trayectoria de soldadura deseada. Además, el sistema emplea flujos de trabajo (workflows) para generar movimientos complejos, tales como la soldadura multipaso.

Figura 5. (Izquierda) Vista isométrica de los elementos de un sistema de soldadura robótica colaborativa con



una base móvil. (Derecha) Representación gráfica de un flujo de trabajo de Weld Template que ilustra un punto de aproximación y una distancia de soldadura. US20240261909.

La patente US20250041980 se enfoca en un sistema modular e intercambiable de ensamble de mesas giratorias, diseñado para diversas aplicaciones tales como pintura, soldadura o inspección. Su objetivo principal radica en garantizar una distancia definida y precisa entre la mesa giratoria, el marco de soporte y las herramientas de trabajo. Esta característica permite la instalación de distintos dispositivos modulares o de diferentes modelos de robots sin la necesidad de recalibrar el sistema. Además, incorpora una mesa modular con capacidad de adaptación a la pieza de trabajo

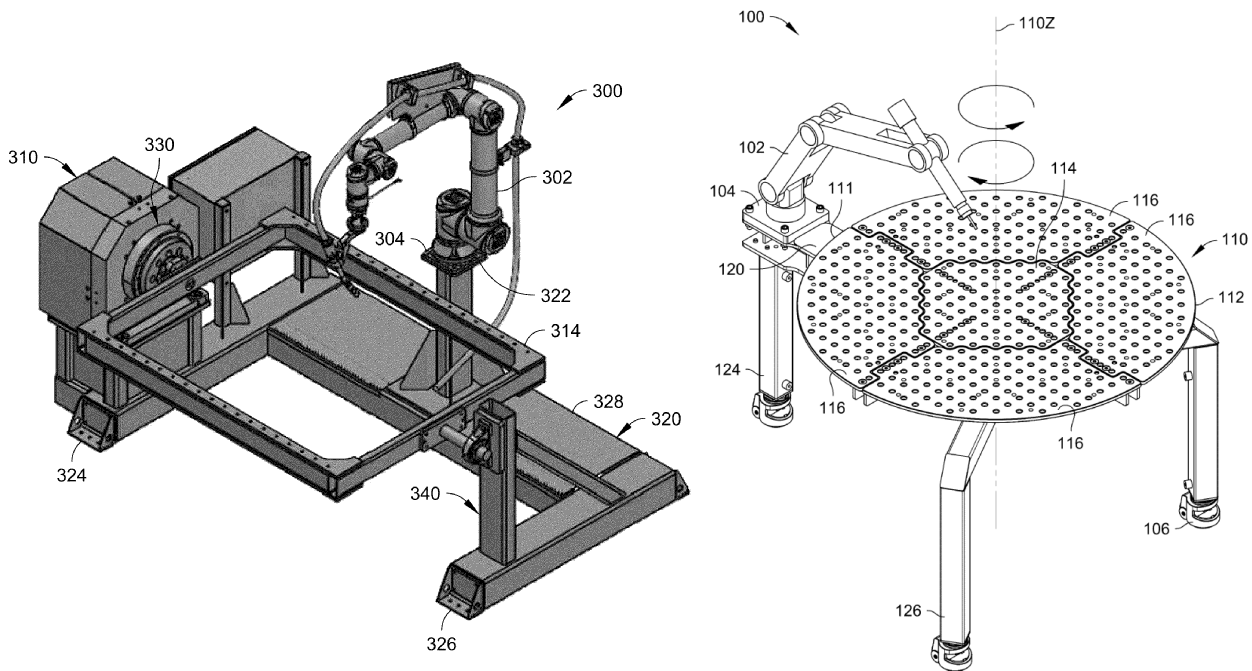


Figura 6. (Izquierda) Vista isométrica del conjunto posicionador del cabezal giratorio y del dispositivo robótico. (Derecha) Vista isométrica del conjunto de la mesa giratoria. US20250041980.

La patente US20250083296 se enfoca en un sistema modular de robot colaborativo para aplicaciones de soldadura, cuyo propósito es mejorar la flexibilidad, la movilidad y el alcance en entornos de fabricación. El diseño permite que un robot montado sobre una mesa principal se conecte con distintas mesas modulares secundarias, configurando así un área de trabajo definida por el trabajador. Esta modularidad permite al robot adaptarse a diversas tareas de trabajo. Cabe destacar que las mesas se conectan mediante soportes en las patas para asegurar un plano uniforme, e incluyen patrones de agujeros diseñados para fijar con precisión la pieza de trabajo.

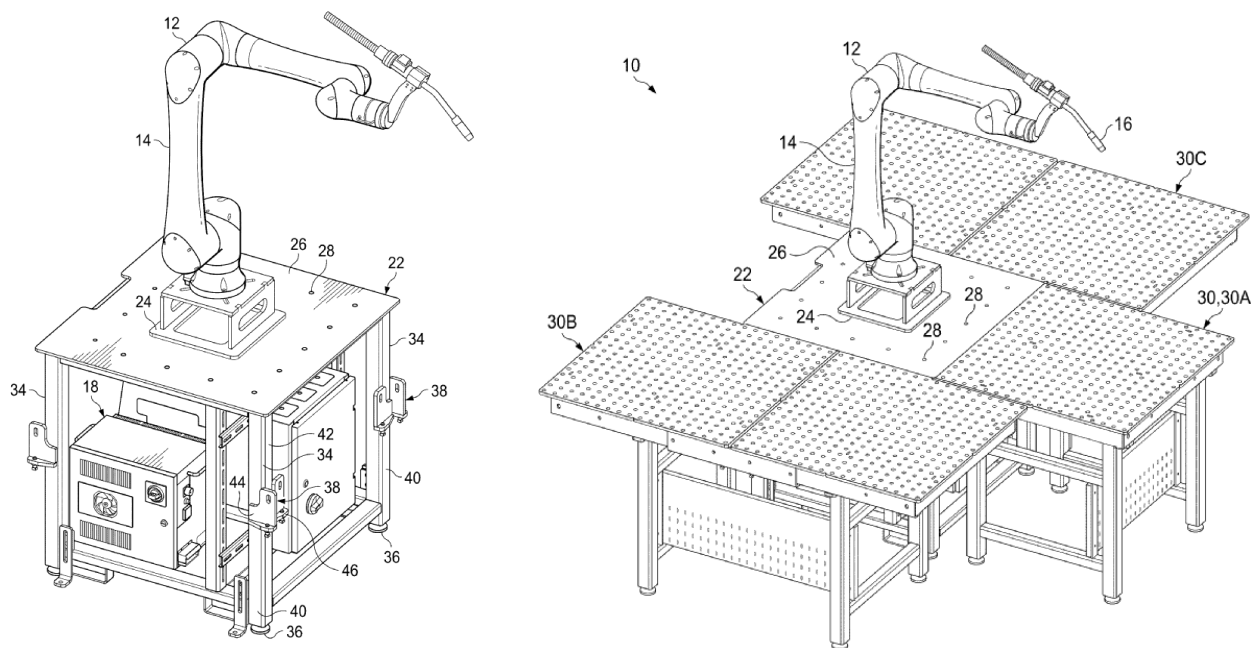


Figura 7. (Izquierda) Vista en isométrica de la mesa principal y el cobot. (Derecha) Vista en isométrica de un sistema de cobot modular. US20250083296.

3.3. Normas nacionales e internacionales

La norma ISO/TS 15066:2016 es una especificación técnica que establece los requisitos de seguridad para robots colaborativos (cobots), complementando las normas ISO 10218-1 y 10218-2. Define cuatro modos de operación segura: parada monitorizada, guía manual, control de velocidad y separación, y limitación de potencia y fuerza, asegurando que el robot no cause daño al interactuar con humanos. Además, proporciona límites biomecánicos de fuerza y presión para diferentes partes del cuerpo, basados en estudios de impacto, evitando lesiones en caso de contacto accidental. La norma exige una evaluación de riesgos específica para cada aplicación colaborativa, incluso si el cobot cumple con los requisitos generales. También incluye métodos para validar que las fuerzas y velocidades del robot no superen los umbrales seguros durante la operación. Su objetivo es garantizar la seguridad en entornos donde humanos y robots trabajan juntos sin barreras físicas, siendo clave para fabricantes, integradores y usuarios de sistemas robóticos colaborativos.

La norma ISO 10218-2:2025 que sustituye a la versión de 2011, establece los requisitos de seguridad para la integración de aplicaciones y células de robots industriales en entornos productivos. Esta normativa, clasificada como de tipo C, abarca el ciclo de vida completo: diseño, integración, puesta en marcha, operación, mantenimiento y retiro del servicio de dichas aplicaciones. Entre las revisiones más significativas destaca el énfasis en los requisitos de seguridad para la aplicación del robot en su conjunto (incluyendo piezas de trabajo y tareas), superando el enfoque anterior centrado únicamente en el

sistema robótico individual. Asimismo, incorpora de manera integral las disposiciones para aplicaciones colaborativas, las cuales eran previamente cubiertas por la especificación técnica ISO/TS 15066.

La norma BS EN ISO 6385:2016 establece los principios ergonómicos fundamentales y define los términos básicos que sirven como directrices para el diseño de sistemas de trabajo. Su propósito principal es orientar la toma de decisiones y proporcionar un marco ergonómico integral para los profesionales involucrados en el diseño o rediseño de estos sistemas, aplicando un enfoque centrado en el ser humano. El objetivo central de esta normativa radica en optimizar las condiciones laborales para garantizar el bienestar, la seguridad y la salud de los trabajadores, equilibrando estos factores con la efectividad y eficiencia técnica y económica del sistema. Para ello, la norma describe un proceso de diseño estructurado aplicable durante todo el ciclo de vida del sistema de trabajo. Este proceso abarca desde la formulación de objetivos y la asignación de funciones (entre personas y máquinas), hasta el diseño detallado de la organización del trabajo, las tareas, el equipamiento, el entorno y el puesto de trabajo.

La norma BS ISO 1503:2008 establece los principios de diseño, procedimientos, requisitos y recomendaciones ergonómicas esenciales para la orientación espacial y la dirección de movimiento de los controles y dispositivos de visualización. Su alcance abarca una amplia gama de sistemas y productos, incluyendo la robótica industrial, maquinaria de movimiento de tierras, transporte y sistemas de tecnología de la información (IT). El propósito fundamental de esta normativa radica en mejorar la

seguridad y la usabilidad del sistema, estandarizando la relación esperada entre la dirección de accionamiento de los controles y el movimiento resultante (o cambio de estado) del objeto controlado. Este enfoque tiene como fin explícito prevenir el error humano, así como aumentar la eficacia, eficiencia y satisfacción del usuario. Para alcanzar estos objetivos, la norma define conceptos básicos de referencia espacial, tales como los ejes tridimensionales y los sistemas de visualización interna y externa (IVS/EVS). Asimismo, proporciona requisitos detallados para el diseño de interfaces humano-máquina (HMI), priorizando la compatibilidad entre la operación y la dirección del movimiento, la consistencia entre controles similares y la consideración de los estereotipos poblacionales (expectativas naturales de movimiento). Finalmente, aborda los requisitos específicos para interfaces gráficas de usuario (GUI) y sistemas de control combinado que gestionan múltiples movimientos simultáneamente, asegurando una aplicación práctica y segura en entornos reales.

La Norma de Construcción de Vivienda Industrializada, oficializada en Chile en septiembre de 2024, tiene como propósito fundamental establecer los requerimientos mínimos aplicables a todo el ciclo de producción de viviendas industrializadas. Su alcance abarca explícitamente la planificación, el diseño, la fabricación, el transporte y el montaje de componentes, elementos y unidades volumétricas producidos fuera del sitio de la obra (*off-site*). Este marco regulatorio se alinea con la Ley N°21.558, apoyando el desarrollo del Plan de Emergencia Habitacional con el objetivo de mejorar el desempeño constructivo y acelerar los plazos de ejecución mediante la estandarización de procesos y el aseguramiento de la calidad. Entre sus disposiciones principales, destaca la

obligatoriedad de diferenciar claramente en la documentación técnica los elementos industrializados de aquellas ejecutadas *in situ*. Asimismo, exige la implementación de un Plan de Aseguramiento y Control de la Calidad, el cual debe ser verificado por la autoridad competente directamente en la planta industrializadora. Finalmente, la norma establece requisitos específicos para el diseño estructural incluyendo la verificación de la rigidez de las unidades volumétricas para resistir las sollicitaciones de transporte y montaje, define protocolos para el almacenamiento y traslado, y estipula fiscalizaciones obligatorias tanto en fábrica como en obra para garantizar la conformidad, la integridad de las conexiones y la hermeticidad de los sellos.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo paramétrico para estaciones de trabajo colaborativo humano-robot para tareas de construcción fuera de sitio de viviendas industrializadas con madera.

4.2. Objetivos específicos

OE1: Definir un conjunto de variables y restricciones que especifican la geometría, topología y cinemática de estaciones de trabajo colaborativo humano-robot para ejecutar tareas de construcción fuera de sitio de viviendas industrializadas en madera.

OE2: Validar experimentalmente alternativas de configuración del modelo para distintas tareas, en un caso de uso aplicado a una prefabricadora con madera en Chile.

5. Metodología

La metodología propuesta se estructura en cinco métodos diseñados para alcanzar los objetivos específicos y, por consiguiente, el objetivo general. Por un lado, se emplean los métodos PRISMA y BIM, estándares que facilitan la revisión sistemática y la gestión eficiente de la información, respectivamente. Por otro lado, la validación experimental, el modelado paramétrico 3D y 4D, y la creación de prototipos constituyen métodos específicos aplicados para cumplir los objetivos dentro del contexto del proyecto.

Una aproximación inicial a la empresa prefabricadora IGLÚ permitió obtener datos esenciales para el desarrollo de las etapas subsiguientes, tales como dimensiones, flujos de trabajo, entrevistas no estructuradas con los operarios sobre el funcionamiento general, insumos utilizados y la observación del proceso de montaje y carga de un módulo para su transporte a obra.

Además, el enfoque presentado adopta una metodología mixta que integra datos cuantitativos y cualitativos de las diferentes alternativas de diseño para estaciones de trabajo HRC, concentrándose en la elaboración de una tabla de variables geométricas y topológicas. Esta tabla se completa con datos extraídos de los programas Rhinoceros y Grasshopper, alineándose con los términos definidos en las normas ISO 10218-2:2025, ISO 8373:2021, ISO 6385:2016 e ISO 1503:2008.

5.1. Método PRISMA

El objetivo primordial del método PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) es asistir a los autores en la documentación transparente, completa y precisa de sus revisiones sistemáticas, detallando específicamente la justificación de la revisión, los procedimientos metodológicos implementados y los hallazgos obtenidos. Esta transparencia resulta crucial para garantizar que la revisión sistemática aporte valor a sus diversos usuarios (tales como investigadores, profesionales y tomadores de decisiones), al permitirles evaluar la confiabilidad de los hallazgos y la aplicabilidad de los resultados. Asimismo, favorece la replicación y actualización de las revisiones, lo que, en última instancia, facilita la toma de decisiones basada en evidencia (Page et al., 2021).

Para la revisión bibliográfica de este proyecto se tomó como referencia el método PRISMA, no obstante, no se aplicó su estructura de manera completa, dado que se realizó una adaptación acorde con los objetivos de esta investigación. El método original consta de 7 secciones y 27 ítems, algunos de los cuales incluyen subítems. Para efectos de este estudio, se seleccionaron únicamente los ítems de mayor relevancia bajo un criterio propio, con el fin de asegurar una recopilación de documentos efectiva. Además, se ocupan normativas nacionales e internacionales, que no están dentro de esta búsqueda realizadas en las fuentes. A continuación, la tabla presenta los métodos que se utilizarán para la revisión sistemática.

Sección/tema	Ítem n.º	Ítem de la lista de verificación
MÉTODOS		
Criterios de elegibilidad	5	Especifique los criterios de inclusión y exclusión de la revisión y cómo se agruparon los estudios para la síntesis.
Fuentes de información	6	Especifique todas las bases de datos, registros, sitios web, organizaciones, listas de referencias y otros recursos de búsqueda o consulta para identificar los estudios. Especifique la fecha en la que cada recurso se buscó o consultó por última vez.
Estrategia de búsqueda	7	Presente las estrategias de búsqueda completas de todas las bases de datos, registros y sitios web, incluyendo cualquier filtro y los límites utilizados.
Proceso de selección de los estudios	8	Especifique los métodos utilizados para decidir si un estudio cumple con los criterios de inclusión de la revisión, incluyendo cuántos autores de la revisión cribaron cada registro y cada publicación recuperada, si trabajaron de manera independiente y, si procede, los detalles de las herramientas de automatización utilizadas en el proceso.

Tabla 1. Lista de verificación PRISMA 2020. Page et al., 2021.

Criterios de elegibilidad

Los criterios de inclusión establecidos fueron los siguientes:

- Contener obligatoriamente una aplicación de colaboración humano-robot.
- Incluir el término "colaboración humano-robot" (o sus variaciones/truncamientos) en el título o en el resumen.
- Presentar una estación de trabajo física o un método que explique una aplicación - industrial específica (como soldadura, ensamblaje, entre otros).
- Incluir dibujos técnicos del prototipo físico descrito o propuesto.
- Presentar diagramas que detallen el funcionamiento del método a realizar.

Fuentes de información

Las fuentes de información son las siguientes:

- <https://www.lens.org/>

Búsqueda y análisis de patentes y publicaciones académicas.

- <https://patentscope.wipo.int/>

Búsqueda únicamente de patentes.

Estrategia de búsqueda

La estrategia de búsqueda se fundamenta en el diseño de una ecuación de búsqueda o cadena de búsqueda booleana. Este método emplea operadores lógicos y modificadores específicos: el operador OR para la disyunción o agrupación de sinónimos, el operador AND para la intersección de conceptos, las comillas ("") para la localización de frases exactas, el asterisco (*) para realizar truncamientos, permitiendo buscar la raíz de una palabra y todas sus derivaciones, y los paréntesis () para establecer la jerarquía y agrupación de los términos.

Ecuación de búsqueda aplicada:

- ("human-robot" OR "human-machine" OR "human-machine interaction" OR "human-robot collaboration" OR "human-robot interactive" OR "human-robot manufacturing" OR "human-robot device" OR HRC OR HRI) AND ("work station" OR "work system" OR "work task" OR "work environment" OR "work process" OR "workspace" OR "work equipment") AND ("collaborative work station" OR "collaborative* workspace*" OR "collaborative work environment" OR "collaborative human-robot*")

Proceso de selección de los estudios

El proceso de revisión se desarrolló conforme a las siguientes etapas

Revisión de un total de 84 patentes: 67 provenientes de la base de datos The Lens y 17 de WIPO Patentscope.

- Aplicación de los criterios de elegibilidad a cada patente, descartando aquellos documentos redactados en idiomas como chino, japonés o coreano, con el fin de evitar errores en los conceptos ocupados.
- Selección final de 10 patentes que presentan un aporte sólido y relevante para la investigación, validadas según el criterio de los investigadores.
- Identificación inicial de un global de 512 publicaciones académicas. De este total, se sometieron a revisión aproximadamente 100 documentos, y de estos se hace una revisión preliminar según criterios de elegibilidad.
- Selección final de 23 publicaciones académicas consideradas pertinentes para el desarrollo del estudio.
- El equipo de revisión estuvo conformado por dos investigadores (estudiantes universitarios), quienes trabajaron tanto de manera independiente como grupal para validar los resultados.
- Utilización del software Zotero para la gestión bibliográfica, recopilación y agrupación de los resultados finales.

5.2. Validación experimental en caso de uso: IGLÚ Modular

El caso de uso a trabajar para esta investigación corresponde a la empresa nacional IGLÚ Modular, dedicada a la prefabricación de elementos modulares bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) para la construcción y es una de las tantas prefabricadoras en Chile que trabajan con un nivel muy bajo de automatización. Esta empresa proporcionará información relevante para el diseño de prototipos de estaciones de trabajo colaborativo humano-robot, considerando los sistemas y formas de trabajo que emplea actualmente en la ejecución de sus proyectos. El análisis se estructurará en tres puntos principales: el funcionamiento general, la secuencia de trabajo y la identificación de tareas relevantes para la aplicación de HRC.

Funcionamiento general

Se hizo una visita a la industria en las fechas 30/06/25 hasta 02/07/25, para hacer un reconocimiento general. La siguiente tabla muestra parte de los trabajadores.

Rol	Nombre
Administrador general	Nicolas Undurraga
Jefe Técnico	Carlos Rivera
Jefe de Proyectos	José garrido
Jefe finanzas-RRHH	Jesús Undurraga
Encargado Abastecimiento y control	Michael Silva
Líder de cuadrilla 1	Misael Carrasco
Líder de cuadrilla 2	Juan Opazo
Líder de cuadrilla 3	Fernando Carrasco

Los proyectos que son construidos llegan de oficinas externas donde son recibidos por una oficina técnica ubicada en el segundo nivel del taller, donde se le realiza primera revisión y filtro. Luego, se realizan observaciones y correcciones en base a su método constructivo determinado por un alto y ancho máximo permitido para su transporte en camión. Luego, se hace una segunda revisión en otra oficina de planta ubicada en el taller para llegar a un detalle constructivo mayor sobre planos o modelos CAD para situaciones complejas. Finalmente, se comienza con el trazado en terreno dentro del taller para determinar los límites y construcción de las unidades volumétricas.

Se realizo con un levantamiento de la fábrica para generar un modelo 3D de las instalaciones, que nos permitirá trabajar sobre este para dimensionar medidas y espacios. También, se genera un layout de la fábrica para visualizar la distribución de trabajo y se complementa con la secuencia constructiva.

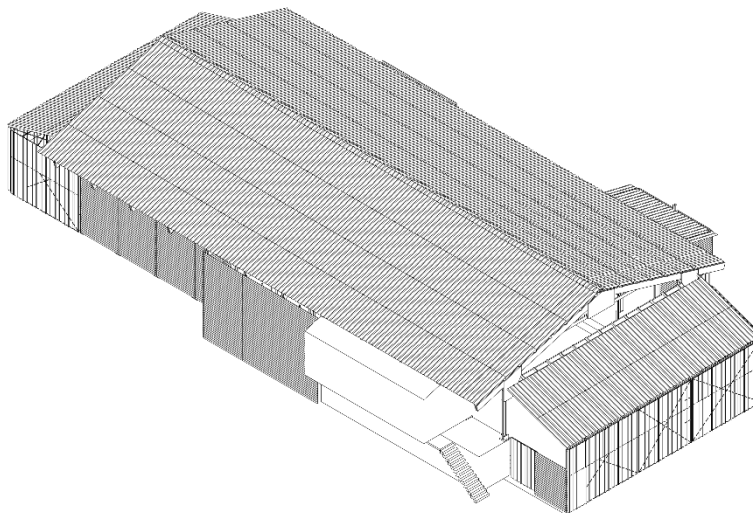


Figura 8. Modelo 3D del taller IGLU Modular. Elaboración propia.

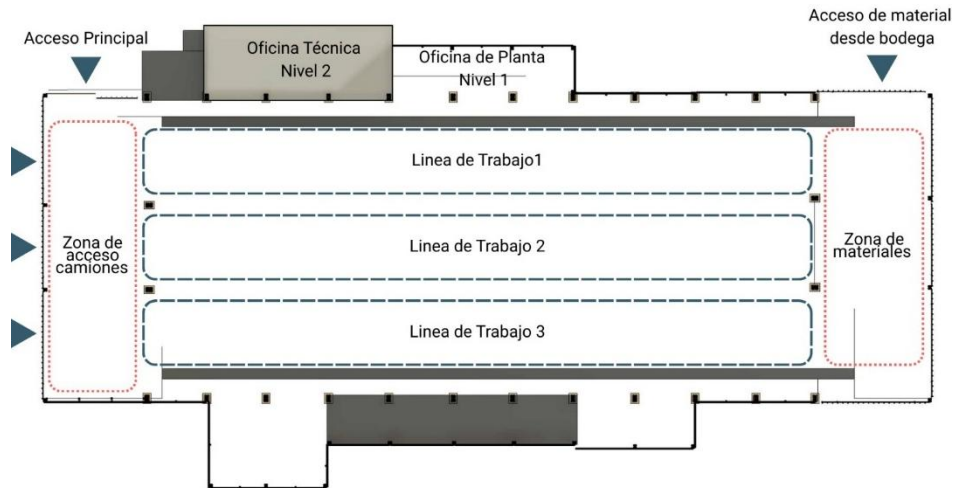


Figura 9. Layout de la planta del taller IGLÚ Modular. Elaboración propia.

Actualmente, se ha implementado un puente grúa para levantar y desplazar los paneles prefabricados, que según el administrador general aumenta la productividad en 20 a 30% los procesos de construcción. Se hicieron preguntas no estructuradas a los trabajadores del puente grúa y sin duda es una herramienta provechosa, ya que antes el desplazamiento de los paneles prefabricados era de forma manual entre 3 a 4 trabajadores exigiendo una alta demanda física.



Figura 10. Puente grúa de la prefabricadora Iglú. FONDEF ID25I10634. 2025

Secuencia de trabajo

Las materias primas que llegan al taller son almacenadas en una bodega donde la primera labor es calibrar y redimensionar los componentes constructivos (alto, ancho, largo). Esto para llegar a una medida estandarizada de todos los componentes.

En planta no existen estaciones de trabajo fijas, son armadas momentáneamente entre unidades volumétricas o módulos, zona de materiales o la línea de trabajo 2. En cuanto a la distribución de operación, los módulos son trabajos principalmente en las líneas de trabajo 1 y 3, dado que la línea de trabajo 2 sirve habitualmente para apilar paneles terminados y los materiales requeridos para el proceso.



Figura 11. Foto del taller que demuestra las líneas de trabajo 1, 2 y 3. FONDEF ID2510634. 2025

Primero se comienza con detalles de carpintería a ciertos perfiles de madera, como vigas maestras del panel piso y cielo y soleras superiores e inferiores. Se les realiza una entalladura de aproximadamente 1 centímetro para facilitar el encuentro entre piezas.

Este detalle de unión maximiza la rigidez de los módulos para el transporte de grandes distancias.



Figura 12. (Izquierda) Detalle de entalladura de encuentro entre vigas maestras. (Derecha). Detalle de entalladura de solera inferior. FONDEF ID25I10634. 2025.

En cuanto al ensamblaje, se comienza en construir el panel de piso que se apoya sobre el suelo sobre tacos y nivelado con láser. Estos son distribuidos a criterios de los trabajadores en las líneas de trabajo 1 y 3. Se arma la estructura para luego fijar planchas de OSB con corchetes. Luego se voltea usando el puente grúa y se rellena con celulosa proyectada para finalmente fijar con tornillos planchas de terciado.



Figura 13. Proyección de celulosa panel de cielo. FONDEF ID25I10634. 2025.

Utilizando el panel de piso como mesa de trabajo, se fabrica el panel de cielo, siguiendo el mismo método constructivo, para luego ser apilado en la línea de trabajo 2. Por su parte, los paneles de muro se ensamblan sobre el panel de piso, fijando únicamente la cara interior con placas de OSB. Según lo indicado por el administrador general de IGLÚ Modular, este método reduce los tiempos de producción en un 50%, ya que facilita la ejecutar de manera paralela las terminaciones interiores, las canalizaciones eléctricas y la instalación de la aislación. Los paneles de muro se izan con el puente grúa a su posición final y se atornillan al panel de piso con tornillos de 10 de profundidad penetrando hasta la viga maestra. La fijación de muro a muro es con tornillos y siempre con un refuerzo (pie derecho adicional) en la esquina. Finalmente se monta el panel de piso a los paneles de muro y se fijan con tornillos de arriba hacia abajo, que atraviesan completamente la viga maestra hasta llegar a la solera superior del panel del muro.



Figura 14. (Izquierda) Izaje de un panel de piso con el puente grúa. (Derecha) Módulos en distintas etapas de construcción. FONDEF ID25I10634. 2025.

Después, se instalan los conductos eléctricos que atraviesan la estructura y se distribuyen por dentro de los muros. En el techo, se utiliza un cielo falso de 4 centímetros para el alumbrado interior, con listones de madera de 2x2 pulgadas. Por otro lado, las instalaciones sanitarias van sobre el panel de muro con un tabique técnico de 4 cm, fijándose con espuma de poliuretano expandido. El alcantarillado habitualmente suele ir enterrado en el terreno, cuando este método no es realizable se utiliza un zócalo técnico donde se encuentran todas las descargas sanitarias, las cuales se posicionan siempre por encima de las vigas maestras evitando perforarlas y comprometer su integridad estructural.



Figura 15. Vista desde abajo al techo del cielo falso. FONDEF ID25I10634. 2025.

Una vez terminada las instalaciones, se cierran los paneles de muro con OSB y se realizan perforaciones de 10 centímetros para inyectar la celulosa dentro de estos como aislante térmico, para luego colocar una membrana hidrofuga. Los módulos cuentan con una fachada ventilada de listones verticales de 2x1 pulgadas corcheteados a eje de los pies derecho y listones de 2x2 pulgadas fijados con tornillos de 10cm que atraviesan el muro hasta la estructura del muro.



Figura 16. Módulo con fachada ventilada. FONDEF ID25I10634. 2025.

Finalmente, para el transporte y montaje se utilizan seis canalizaciones temporales (tres en cada lado longitudinal del módulo). Estas se instalan antes del cierre exterior con OSB y permiten el paso de los cables de acero necesarios para izar el módulo de manera equilibrada. Una vez finalizado el montaje en obra, las canalizaciones son retiradas.



Figura 17. Canalizaciones temporales en lado longitudinal del módulo. FONDEF ID25I10634. 2025.



Figura 18. Montaje de módulo a camión. FONDEF ID25I10634. 2025.

Tareas relevantes para la aplicación HRC.

- Corcheteado y atornillado de paneles de piso, cielo y muros.
- Proyección e inyección de celulosa de paneles de piso, cielo y muro.
- Entalladuras de perfiles de madera de vigas maestras y soleras inferiores y superiores.

Estas tareas son sumamente repetitivas y requieren posturas que perjudican la salud física del trabajador.

5.3. Método BIM

El método Building Information Modelling (BIM), según la serie ISO 19650, se define como el uso de una representación digital compartida de un activo construido (como edificios, puentes o carreteras) para facilitar los procesos de diseño, construcción y operación, proporcionando una base confiable para la toma de decisiones.

Los conceptos y principios de BIM se centran en la gestión y producción de información a lo largo de todo el ciclo de vida del activo, desde la planificación estratégica hasta su fin de vida. La implementación de este método requiere un trabajo colaborativo entre todas las partes involucradas para lograr un entendimiento mutuo y un nivel más profundo de proceso estandarizado, lo que permite la comunicación, reutilización y uso compartido eficiente de la información, reduciendo el riesgo de pérdida o mala interpretación.

La información necesaria para la toma de decisiones se almacena en repositorios estructurados: el Modelo de Información del Activo (AIM) para la fase operacional y el Modelo de Información del Proyecto (PIM) para la fase de entrega. La coordinación, gestión y difusión de los contenedores de información se realiza mediante un Entorno Común de Datos (CDE), que actúa como la fuente acordada de información para el proyecto o activo. Estos conceptos deben aplicarse de manera proporcionada a la escala y complejidad del activo o proyecto.

Para la investigación se ocupa parte del método BIM, principalmente en la modelación de un módulo 3D y un entorno común de datos para compartir toda la información. Se nos compartió un modelo digital del caso de uso con toda su información para la construcción como imágenes y videos de la fábrica en físico.

Esto nos permite, tener un caso real de como evaluar las actividades que realizarán las estaciones de trabajo colaborativo humano-robot.

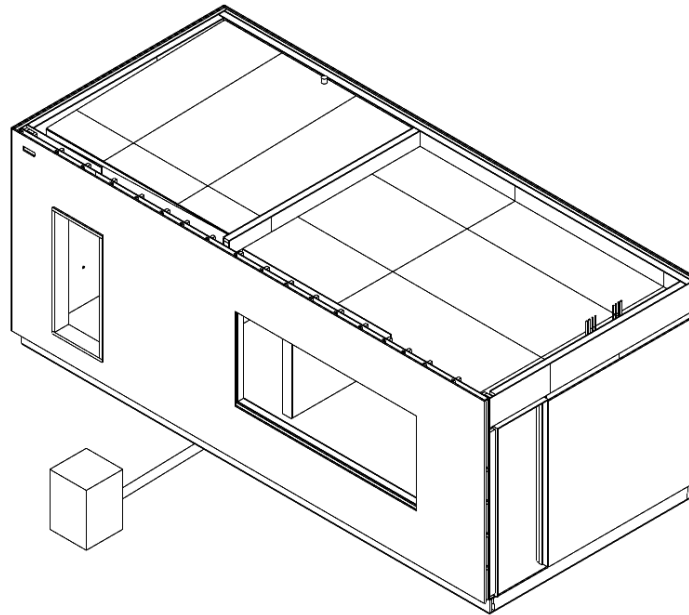


Figura 19. Módulo BIM caso de uso. FONDEF ID25I10634. 2025.

5.4. Modelación paramétrica 3D y 4D: variables y restricciones

La modelación paramétrica para el modelo de diseño, se trabajarán en un entorno virtual de modelado 3D, **Rhinoceros** y un entorno de programación visual 4D, **Grasshopper** adicionalmente del complemento **Robots**, para crear programas robóticos de Universal Robots y sus componentes para una simulación de la cinemática.

Se presentarán los puntos clave para llevar a cabo esta modelación paramétrica, siendo estos como, la elección del robot colaborativo, elección de efectores finales en base a las aplicaciones, interfaz del plugin Robots, cinemática del robot y finalmente las variables de diseño.

Elección del robot colaborativo

Se utilizarán robots colaborativos o cobots de la empresa Universal Robots, específicamente el UR20, para todos los prototipos que se realizarán. Esta elección es principalmente por el alcance del cobot, para abarcar una superficie mayor para la aplicación. Además, los cobots son están diseñados para compartir un espacio de trabajo con humanos, lo que hace que la automatización sea más fácil para empresas con un nivel muy bajo de automatización. Permiten una programación sencilla, una configuración rápida, una automatización flexible y una colaboración segura. *(Automatización robótica colaborativa | Universal Robots Cobots, s. f.).*

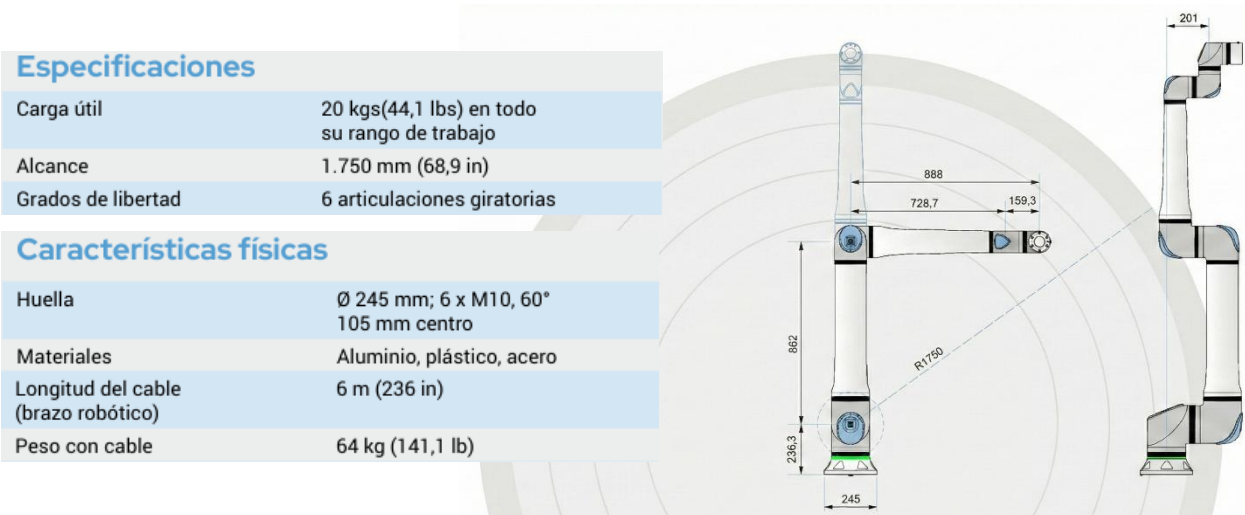


Figura 20. (Izquierda) Especificaciones y características físicas relevantes del cobot. (Derecha) Medidas y alcance máximo del cobot. Universal Robots Cobots, 2023.

Elección de efectores finales

Se escogieron efectores finales para la aplicación de atornillado y fresado. Cada uno de estos están seleccionado para una integración sencilla y certificada con los robots colaborativos de Universal Robots.

La fresadora (Compact Line Module, nombre técnico) de la empresa Alemana Tool Drives, Intelligent services for Smart processes,

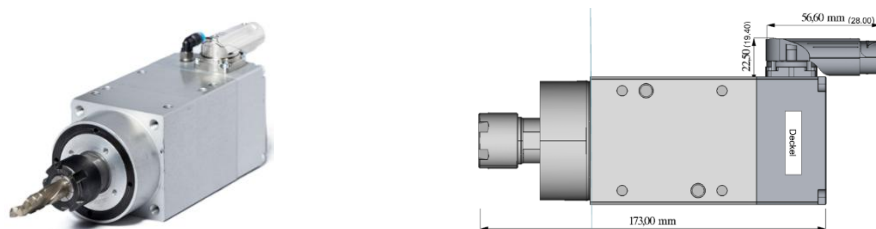


Figura 21. (Izquierda) Herramienta física. (Derecha) Medidas de la herramienta. Tool Drives.

El desatornillador de la empresa de Dinamarca On robot, se caracteriza fácil configuración, programación e implementación inmediatas en cualquier robot y altamente versátil y flexible, con cambios rápidos para una amplia gama de tamaños y longitudes de tornillos.

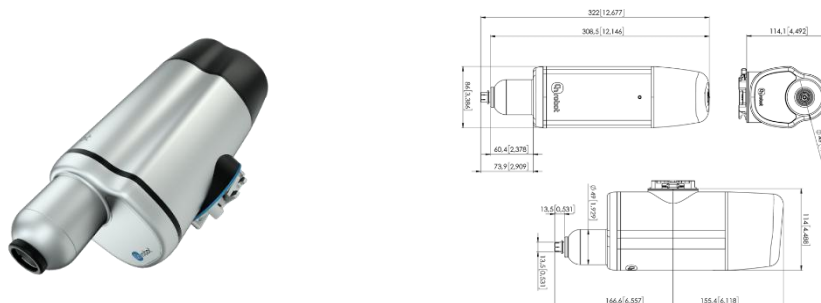


Figura 22. (Izquierda) Herramienta física. (Derecha) Medidas de la herramienta. On robot.

Plugin Robots

Robots es un complemento (plug-in) para la interfaz de programación visual Grasshopper de Rhinoceros. Permite crear y simular programas robóticos para robots ABB, KUKA, UR y Staubli. Para la investigación se enfocará en los robots colaborativos UR.

El Plug-in nos entrega comandos, componentes, parámetros y utilidades. Solo ocuparemos los componentes para la simulación de movimientos.



Figura 23. Pestaña de componentes de Grasshopper. Elaboración propia.

Cinemática del robot

Para una simulación se utilizan los siguientes componentes dentro del programador visual Grasshopper.

1. Tiempo de simulación. 2. Librería de robots. 3. Sistema del robot. 4. Crear programa. 5. Simulación del programa. 6. Crear objetivo. 7. Configuración del robot. 8. Tipo de movimiento. 9. Entrada de planos.

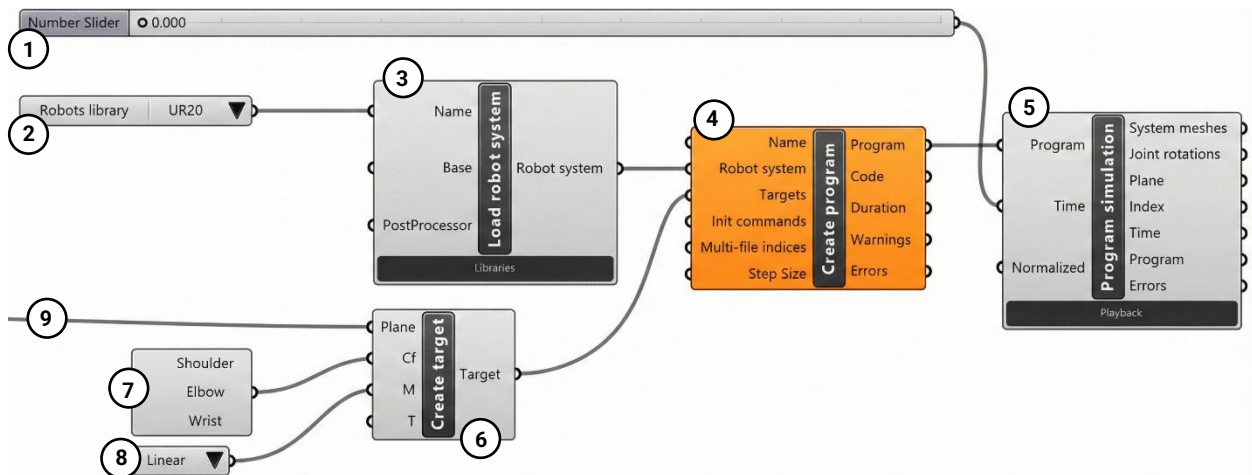


Figura 24. Programación dentro de Grasshopper para simular el movimiento del robot. Elaboración propia.

Se le entrega una trayectoria simple para la simulación del robot dentro del modelado 3D Rhinoceros.

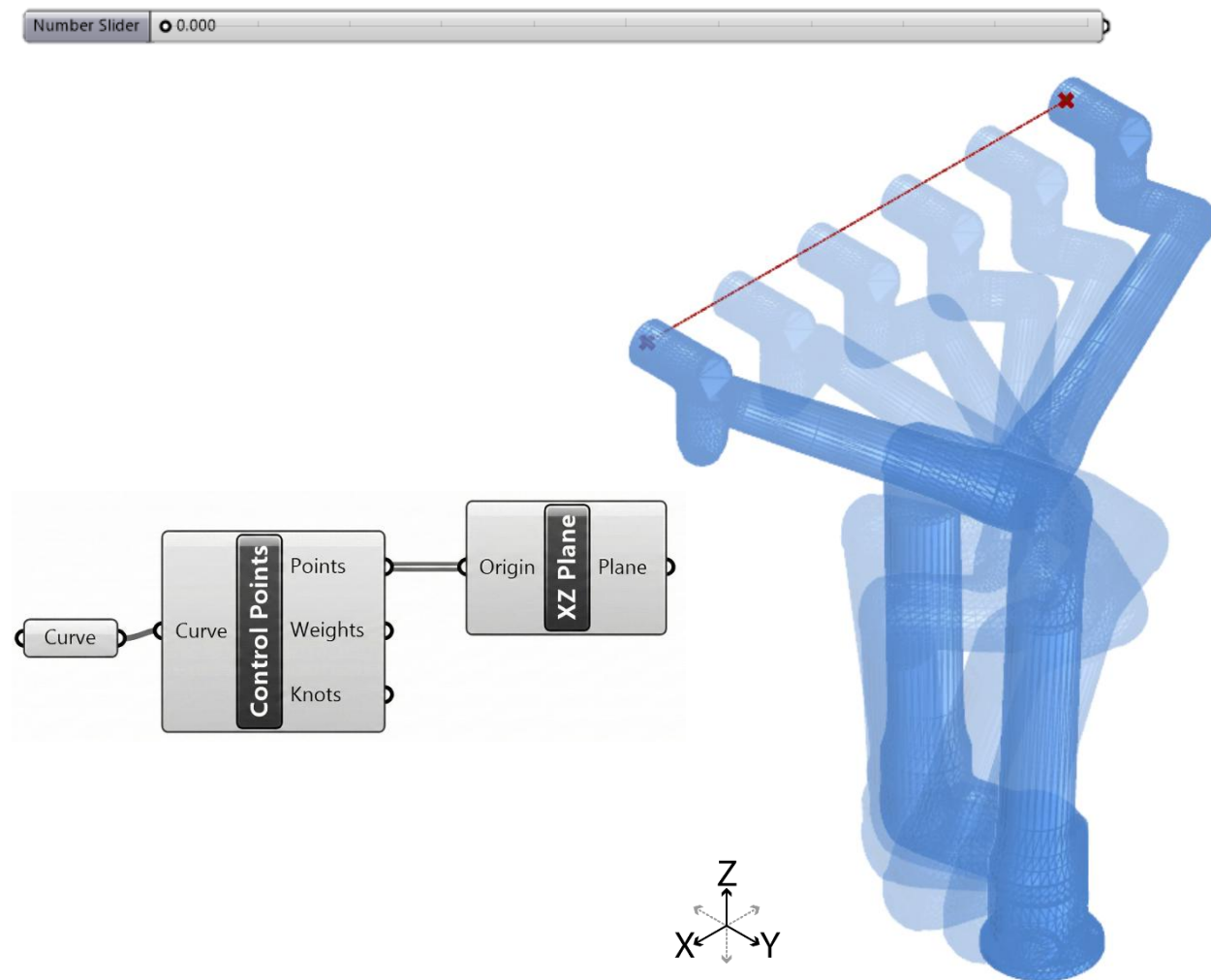


Figura 25. (Derecha) Tiempo de simulación y trayectoria de dos planos. (izquierda) Movimiento de robot en distintos tiempos. Elaboración propia

Para este caso se usará un método más elaborado y adecuado para poder visualizar la cinemática del robot en un entorno virtual. Este se enfoca en una zona de trabajo donde el robot pueda alcanzar, con distintos parámetros para cambiar el espacio de operación.

A través de una esfera, donde su radio depende del alcance del robot, se puede extraer una sección y transformarla en una superficie para luego evaluar un punto sobre esta.

Este punto es el necesario para poder ubicar el punto central de la herramienta (TCP, tool center point).

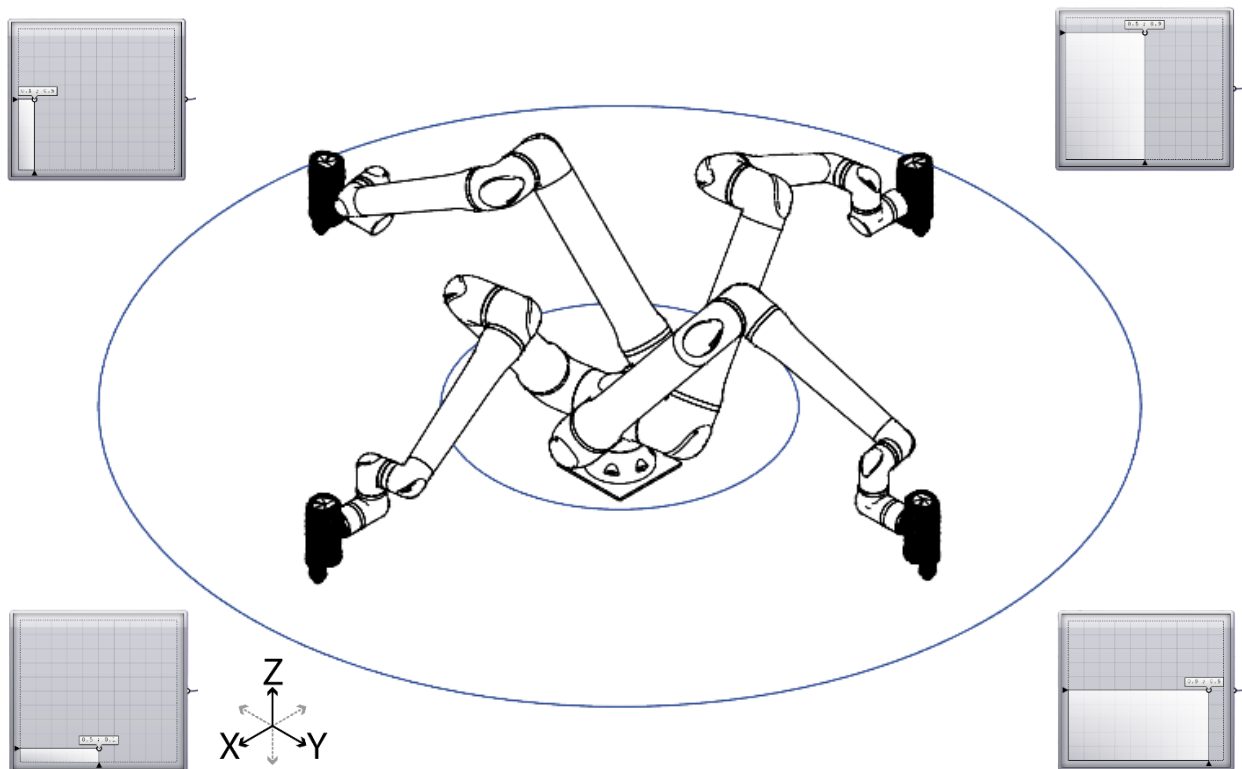


Figura 26. Evaluación de cuatro puntos sobre una superficie para orientar el TCP. Elaboración propia.

Variables de diseño

Las variables de diseño para la configuración de estaciones colaborativo humano-robot son en base a las siguientes normas internacionales.

*2025—ISO 10218-2—Safety requirements Part 2 Industrial robot applications and robot cells

**2021—ISO 8373—Vocabulary

***2016—ISO 6385—Ergonomics principles in the design of work systems

****2008—ISO 1503—Spatial orientation and direction of movement — Ergonomic requirements

Variables topológicas

2.4 *** Trabajador

- 3.18 **** Dirección de visión (X, Y, Z)

4.14 ** Manipulador

- 4.10 ** Superficie de montaje de la base
- Desplazamiento

3.1.1.4 * Aplicación del robot

- Tipos
- 3.1.2.2 * Eje adicional

Variables geométricas

Trabajador

- 2.9 *** Espacio de trabajo

Manipulador

- 3.9.1.2 * Espacio máximo en X, Y, Z
- Espacio de operación

Variables funcionales

Aplicación del robot

- 3.1.1.5 * Aplicación

Todas estas variables se relacionan entre sí para configurar estaciones de trabajo colaborativo humano-robot. Donde existe un orden jerárquico para establecer unos parámetros para una aplicación o actividad requerida. El tipo de robot, por su alcance y la aplicación son el eje principal donde se desarrollan las demás variables.

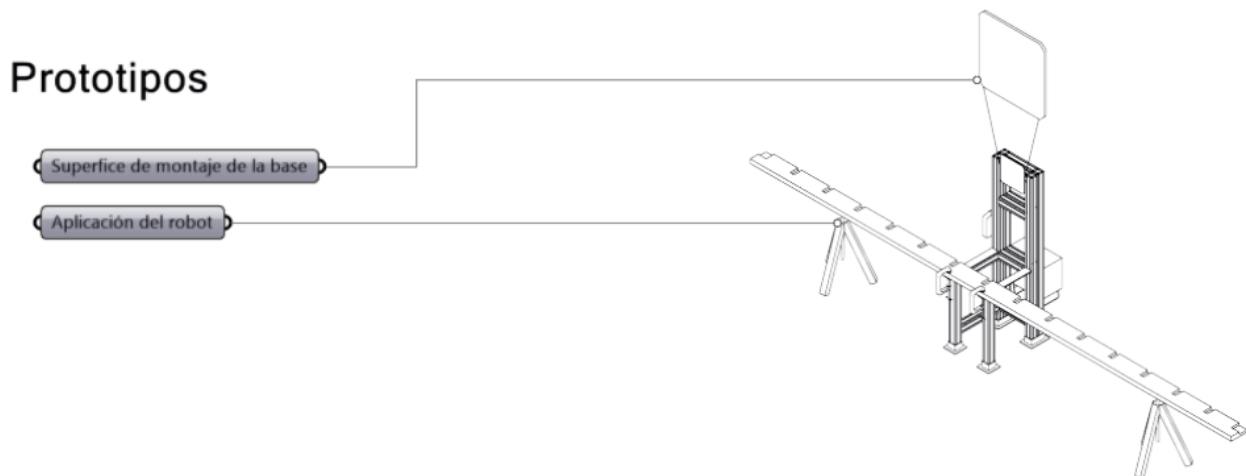
El porqué de estas variables recae en las principales necesidades que se necesitan para poder crear un modelo paramétrico, es decir, todas estas variables pueden ser interpretadas dentro de un entorno virtual. Cabe destacar que existen una amplia gama de variables para la configuración de estaciones, que se pueden extraer de las normas ISO, como también crear nuevas para un uso en específico. Las variables elegidas son más factibles para la investigación por ser conocidas y estudiadas en el estado del arte. Son esenciales para poder llegar a una configuración de colaboración humano-robot. Principalmente para observar y anticipar el movimiento del robot y poder evitar peligros y riesgos manteniendo una seguridad hacia el trabajador.

El modelo está diseñado para trabajar de diferentes maneras. Existen 2 formas de trabajar, la primera se enfoca en crear una aplicación del robot desde el movimiento del robot, considerando que límites físicos necesita y que tarea o tareas realizará. La segunda forma puede ser entregándole una aplicación del robot ya diseñada y luego observar cómo se comporta con el robot en el espacio. Ambas funcionan para generar una estación de trabajo humano-robot.

Funcionamiento

Tomaremos la segunda forma de trabajar el modelo paramétrico, ya que fue con la que se trabajó los prototipos que serán presentados más adelante.

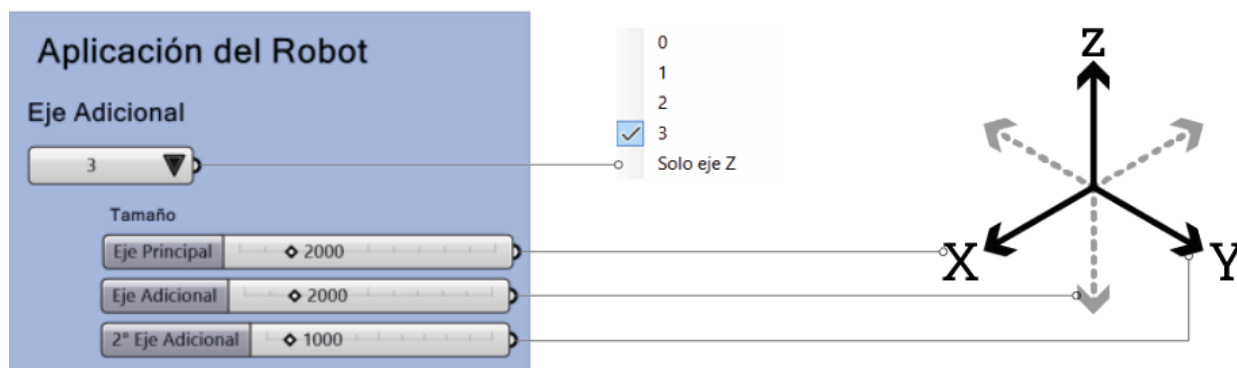
La aplicación del robot ya diseñada necesita tener obligado una plataforma de base para el robot. Esta es necesaria para orientar bien las siguientes variables.



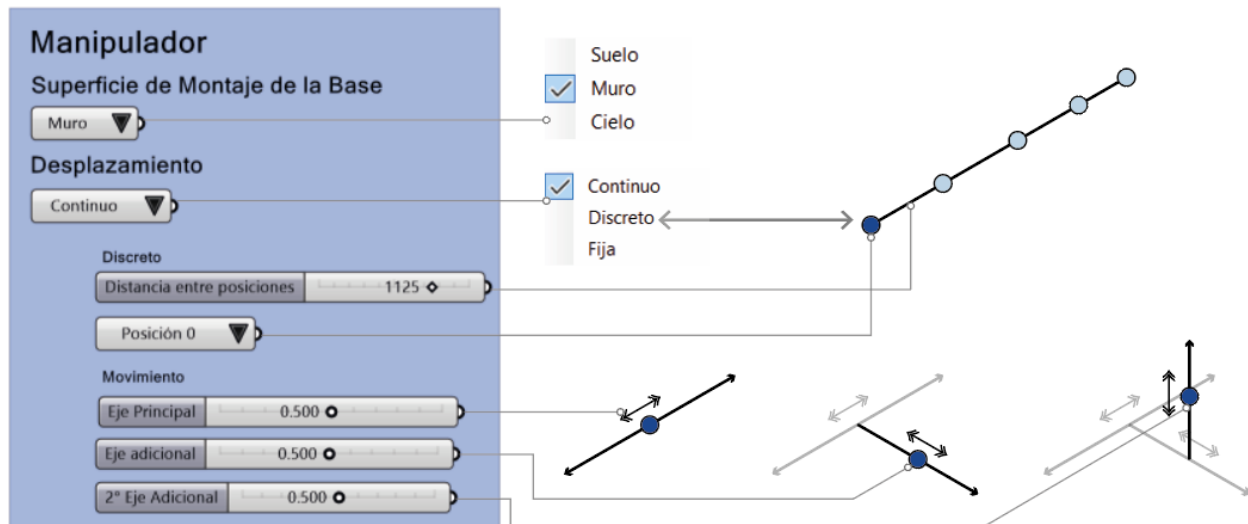
Este modelo 3D tiene que establecerse (Set) dentro de los parámetros siendo una geometría para la superficie y múltiples geometrías para la aplicación del robot.

Luego se configuran las variables topológicas. Para el ejemplo se usa una aplicación del robot sencilla para entender el funcionamiento del modelo paramétrico. Lo primero es considerar si la aplicación del robot tendrá un eje adicional, para el ejemplo no tiene y a la lista se le agrega el 0. Existen hasta 3 ejes adicionales que se le pueden agregar con sus respectivos tamaños. Es importante tener en cuenta que cada eje tiene una orientación específica dentro del entorno virtual. El eje principal está orientado sobre X, el eje adicional sobre Y y el segundo eje adicional sobre Z. También existe la posibilidad de tener solo un eje Z adicional para un caso en específico.

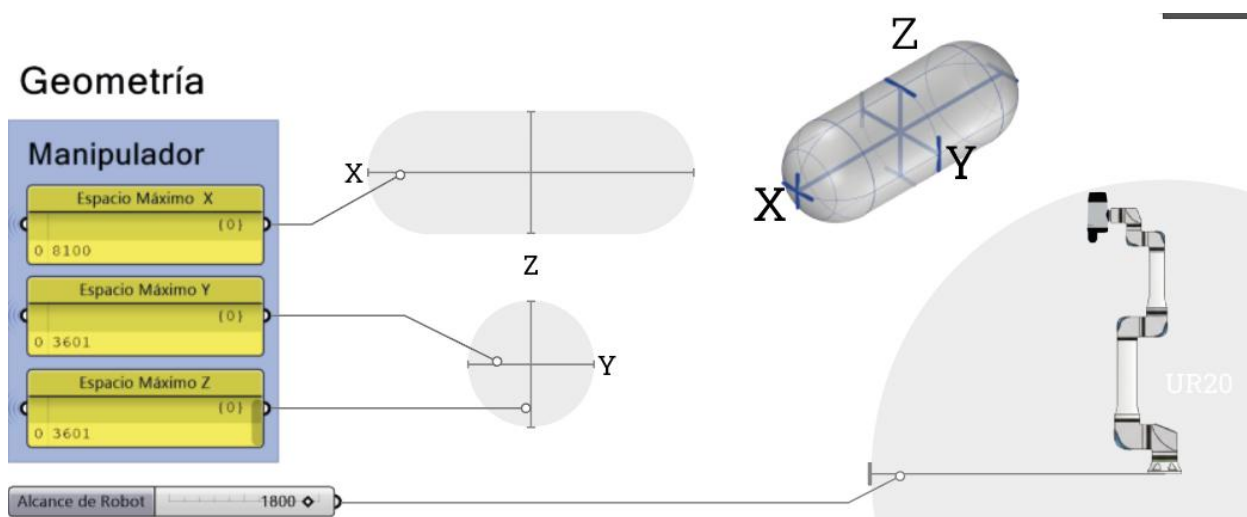
Topología



La topología del robot o manipulador contiene la superficie de montaje de la base y su desplazamiento. Este se divide en continuo, discreto y fijo. Para el continuo se entregan los desplazamientos para cada eje adicional evaluando la curva en un punto. En el caso del desplazamiento discreto existen distintas posiciones dependiendo del tamaño del eje y su distanciamiento, es por esto que se entregan los parámetros para su configuración.



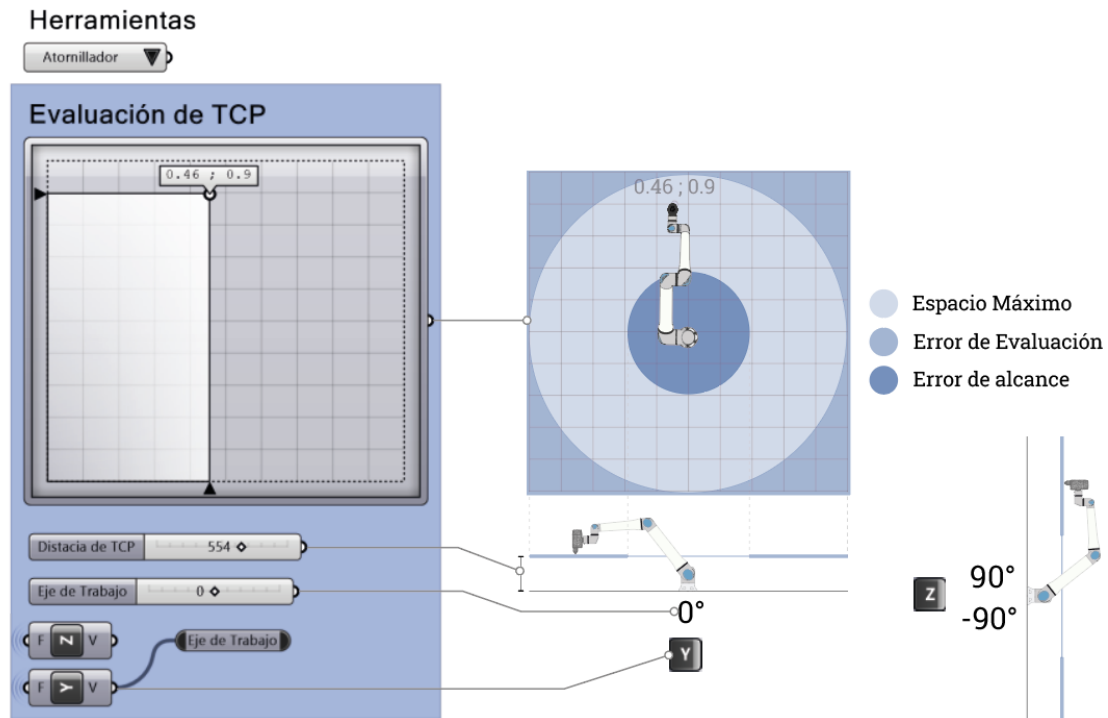
Para la geometría del robot contiene el espacio máximo, donde se habla de un espacio tridimensional que se puede medir en metros cúbicos. Para efectos de entendimiento de desglosa en 3 medidas en metros en cada uno de sus ejes. Existe un espacio máximo en X, Y y Z que depende del alcance del robot y si contiene un eje adicional en cualquiera de sus ejes. También está la posibilidad de cambiar el alcance del robot, esto es solo para efectos de cinemática, es diferente a cambiar el robot con el que se trabaja que también es posible.



Finalmente, la orientación del TCP que es la encargada del movimiento del robot sobre una superficie. Visualmente se puede observar un espacio circular donde el robot puede trabajar, pero esta superficie se evalúa mediante un parámetro de Grasshopper (MD slider) por lo que existen ciertos lugares donde ocurrirá un error en la programación, ya que el robot no alcanzará el punto.

También tiene parámetros de distancias del TCP según la base del robot. Esto dependerá de la ubicación de la pieza de trabajo y el eje de trabajo es simplemente para cambiar su plano en el cual esta trabajando, es decir, que puede adaptarse para realizar tareas horizontales y verticales, como también si esta trabando a cielo orientar el TCP a suelo.

Orientación del TCP



5.6. Prototipos

Se realizaron 13 prototipos de los cuales 4 se presentarán detalladamente ya que presentan diferentes variables de configuración y aplicaciones.

Prototipo 1

Topología

Aplicación del Robot

Eje Adicional

1 ▼

Tamaño

Eje Principal 4500

Eje Adicional 1

2º Eje Adicional 1

Manipulador

Superficie de Montaje de la Base

Muro ▼

Desplazamiento

Continuo ▼

Discreto

Distancia entre posiciones 1

Posición 0

Movimiento

Eje Principal 0.000

Eje adicional 0.000

2º Eje Adicional 0.000

Geometría

Manipulador

Espacio Máximo X (0) 8100

Espacio Máximo Y (0) 3601

Espacio Máximo Z (0) 3601

Alcance de Robot 1800

Orientación del TCP

Herramientas

Atomillador ▼

Evaluación de TCP

0.3 : 0.8

Distacia de TCP 79

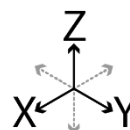
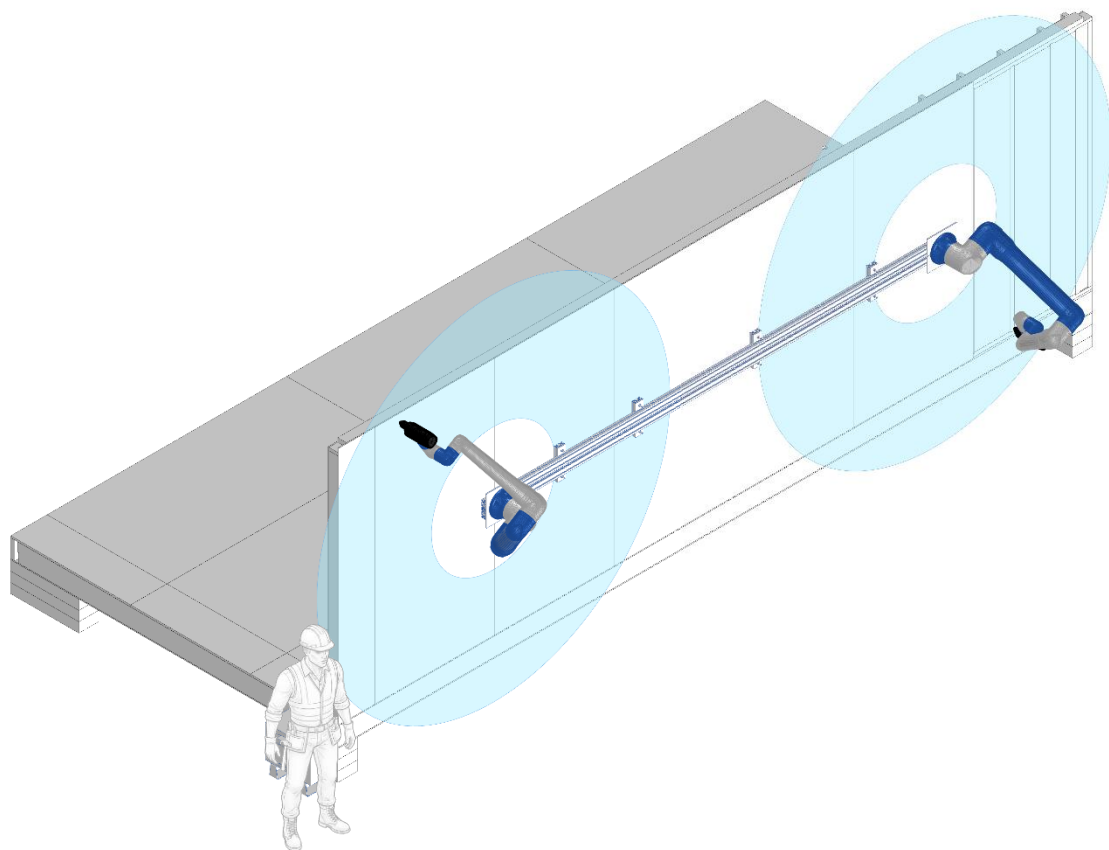
Eje de Trabajo 0

F Z V Eje de Trabajo

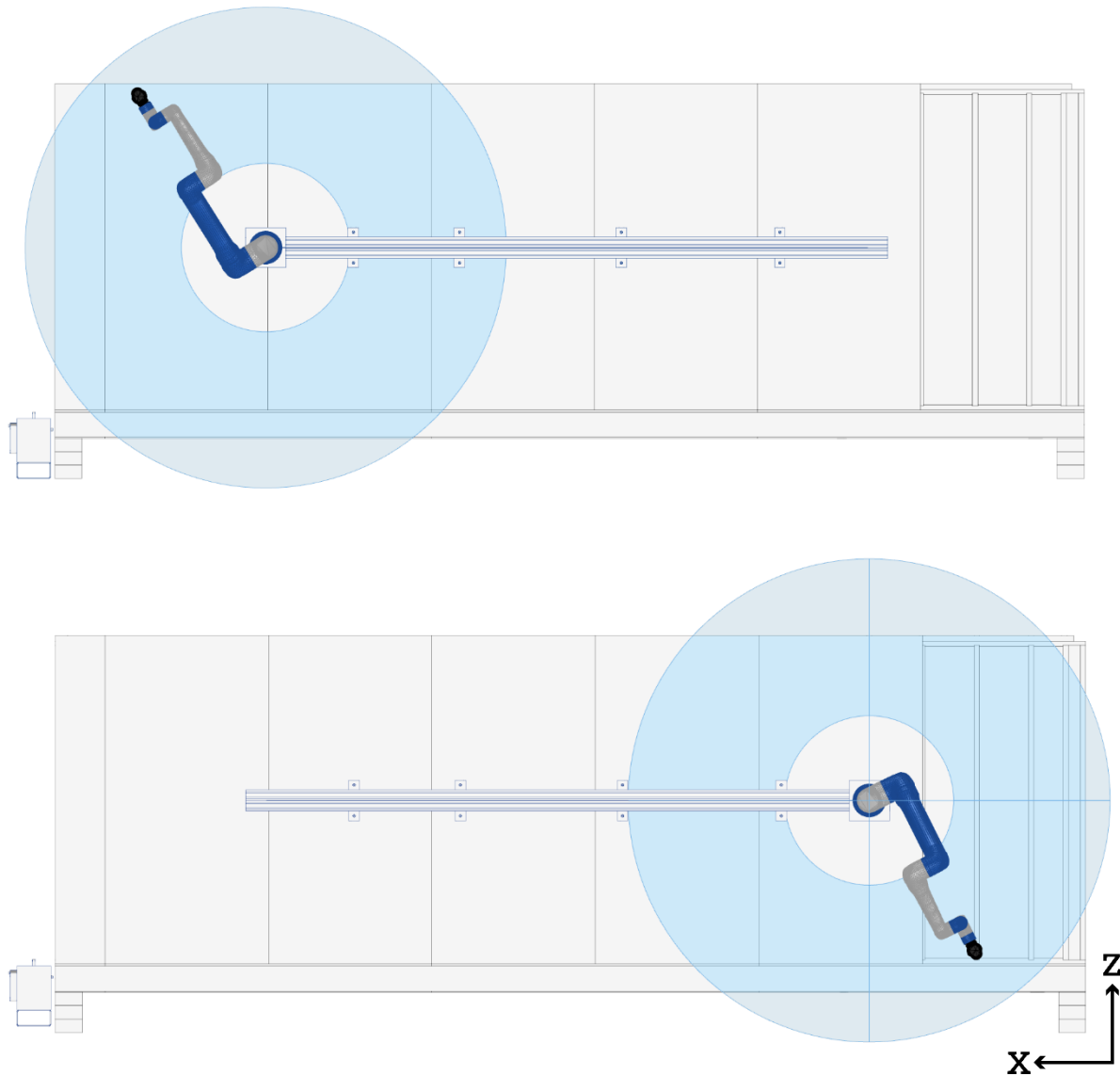
F Y V

Isométrica

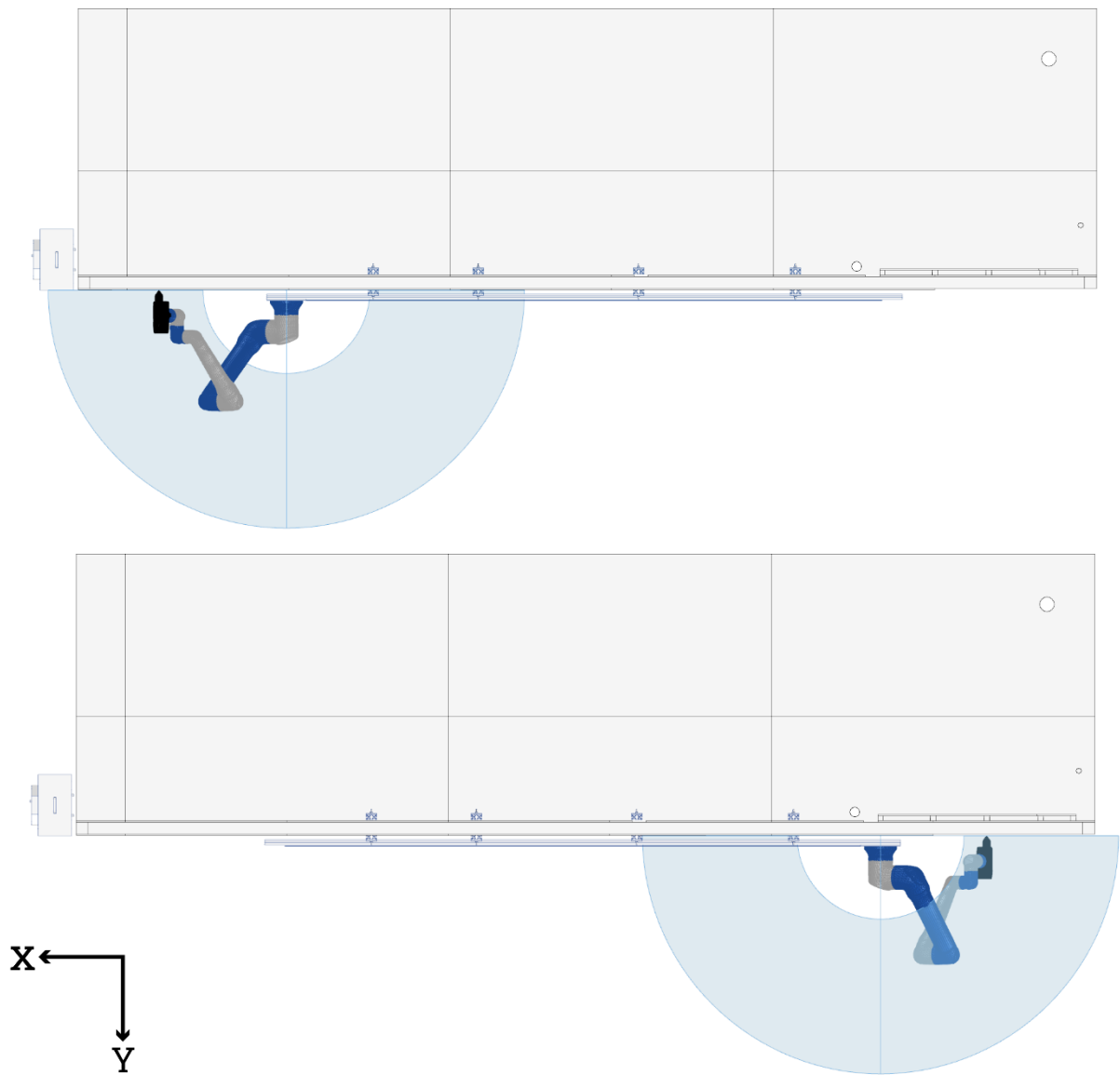
Aplicación/Actividad: Atornillado
UR20



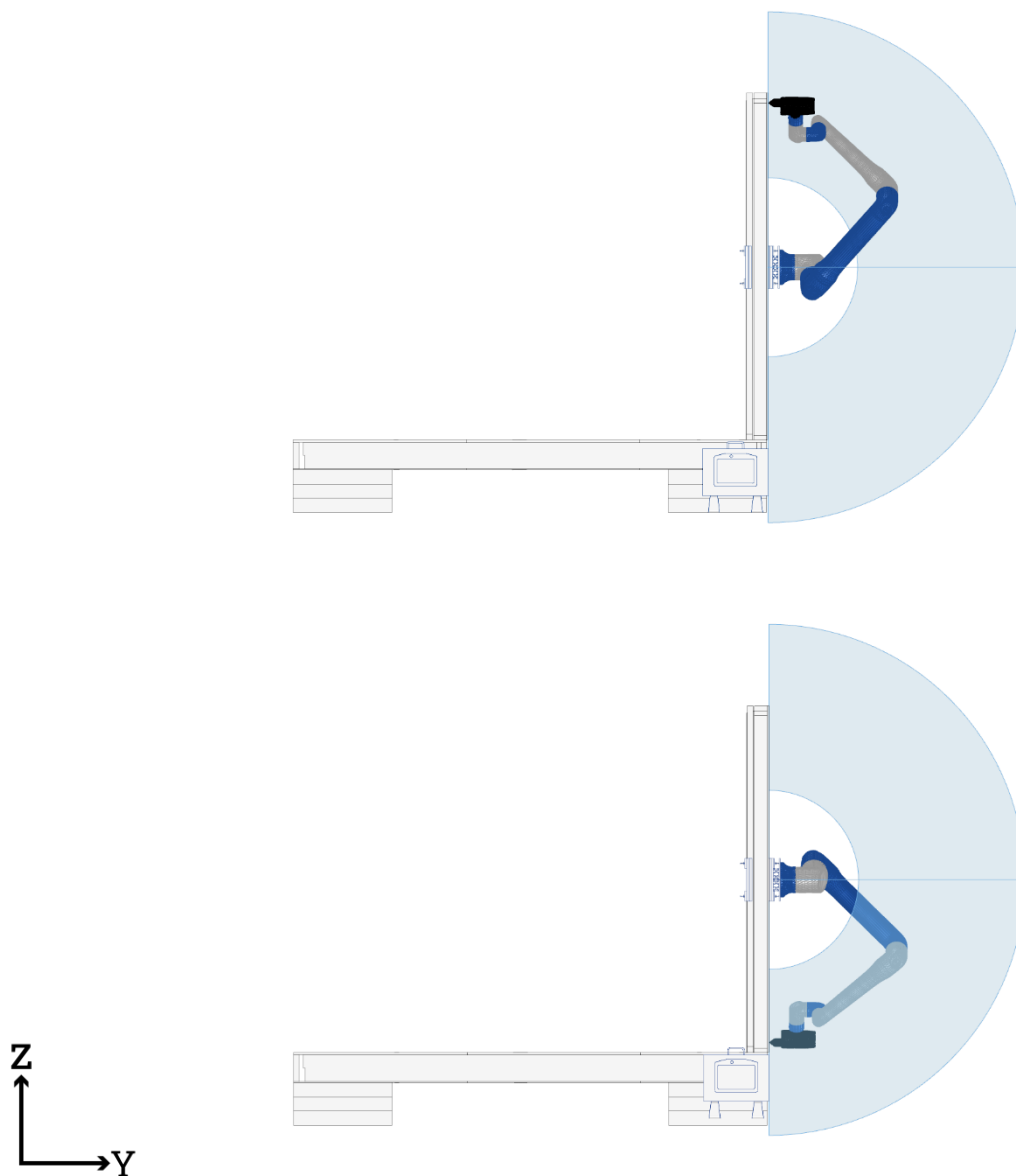
Vista Frontal



Planta



Vista lateral



Prototipo 2

Topología

Aplicación del Robot

Eje Adicional

0

Tamaño

Eje Principal

1

Eje Adicional

1

2° Eje Adicional

1

Manipulador

Superficie de Montaje de la Base

Muro

Desplazamiento

Fija

Discreto

Distancia entre posiciones

1

Posición 0

Movimiento

Eje Principal

0.000

Eje adicional

0.000

2° Eje Adicional

0.000

Geometría

Manipulador

Espacio Máximo X

0.2901

{0}

Espacio Máximo Y

0.2901

{0}

Espacio Máximo Z

0.2901

{0}

Alcance de Robot 1450

Orientación del TCP

Herramientas

Fresadora

Evaluación de TCP

0.21

0.31

Distacia de TCP

-867

Eje de Trabajo

-90

F

Z

V

F

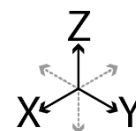
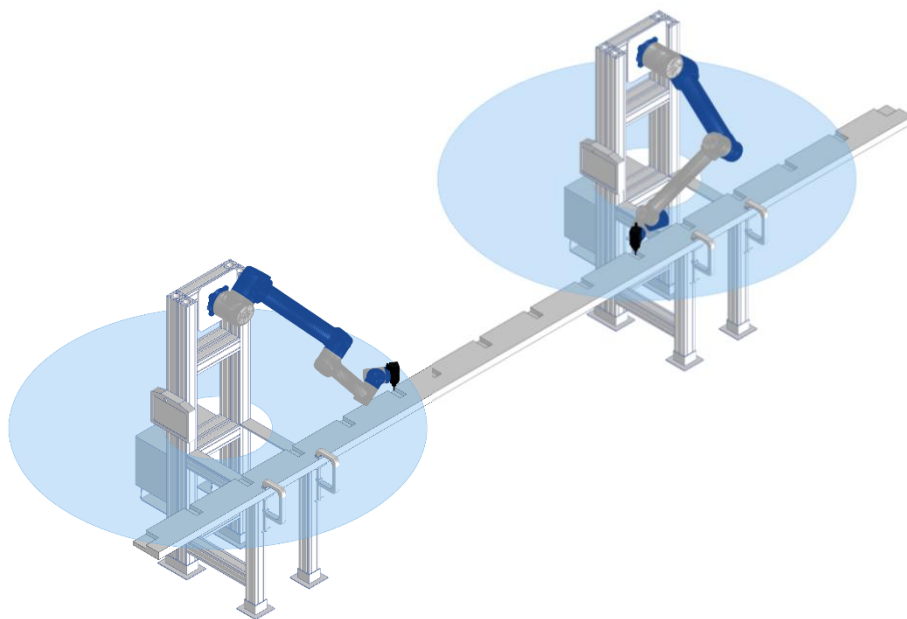
Y

V

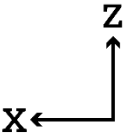
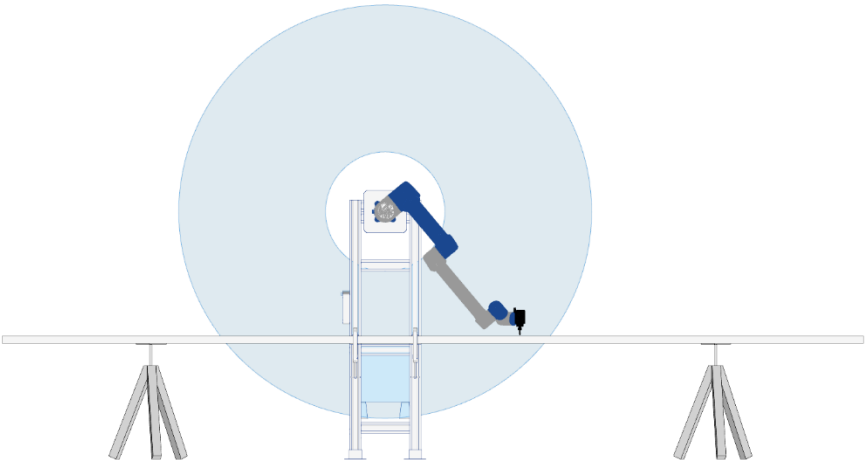
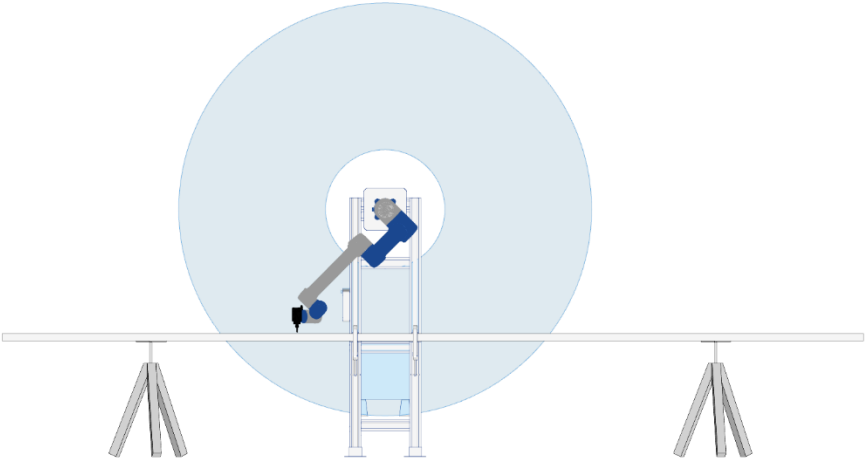
Eje de Trabajo

Isométrica

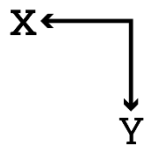
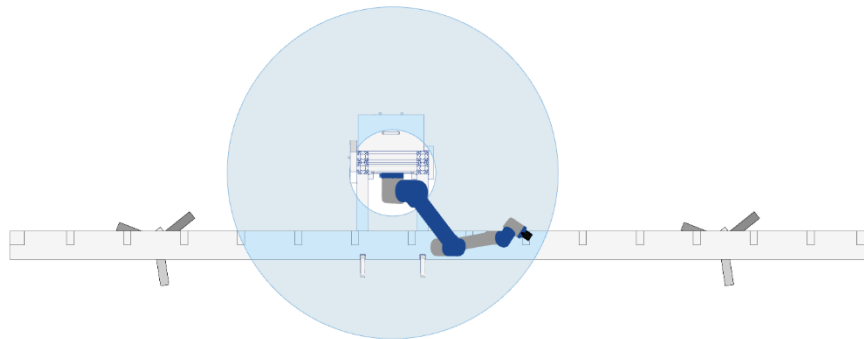
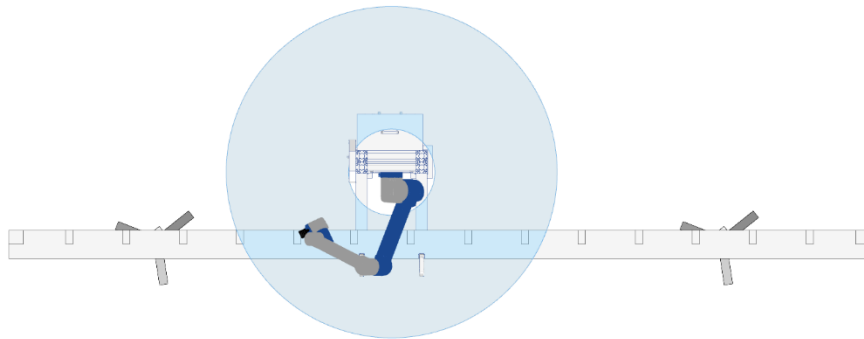
Aplicación/Actividad: Atornillado
UR10



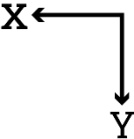
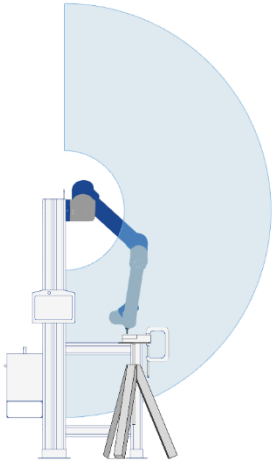
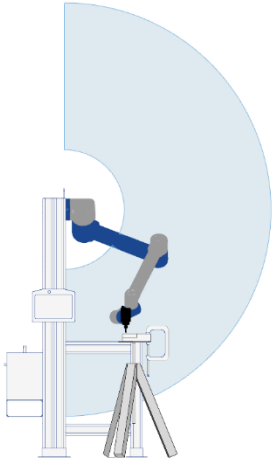
Vista Frontal



Planta



Vista lateral



Prototipo 3

Topología

Aplicación del Robot

Eje Adicional

2

Tamaño

Eje Principal6500

Eje Adicional3500

2º Eje Adicional1

Manipulador

Superficie de Montaje de la Base

Suelo

Desplazamiento

Continuo

Discreto

Distancia entre posiciones1

Posición 0

Movimiento

Eje Principal0.200

Eje adicional0.000

2º Eje Adicional0.000

Geometría

Manipulador

Espacio Máximo X

010100

Espacio Máximo Y

07100

Espacio Máximo Z

03601

Alcance de Robot1800

Orientación del TCP

Herramientas

Atomillador

Evaluación de TCP

0.510.91

Distacia de TCP149

Eje de Trabajo-90

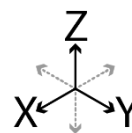
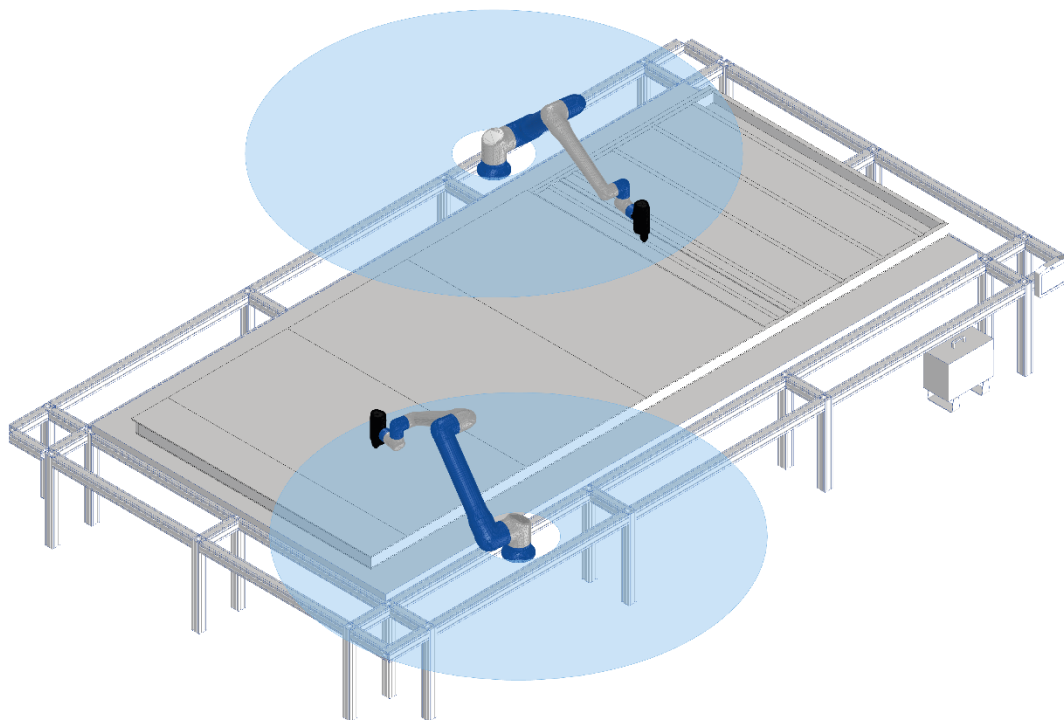
FZV

FYV

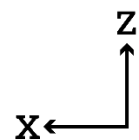
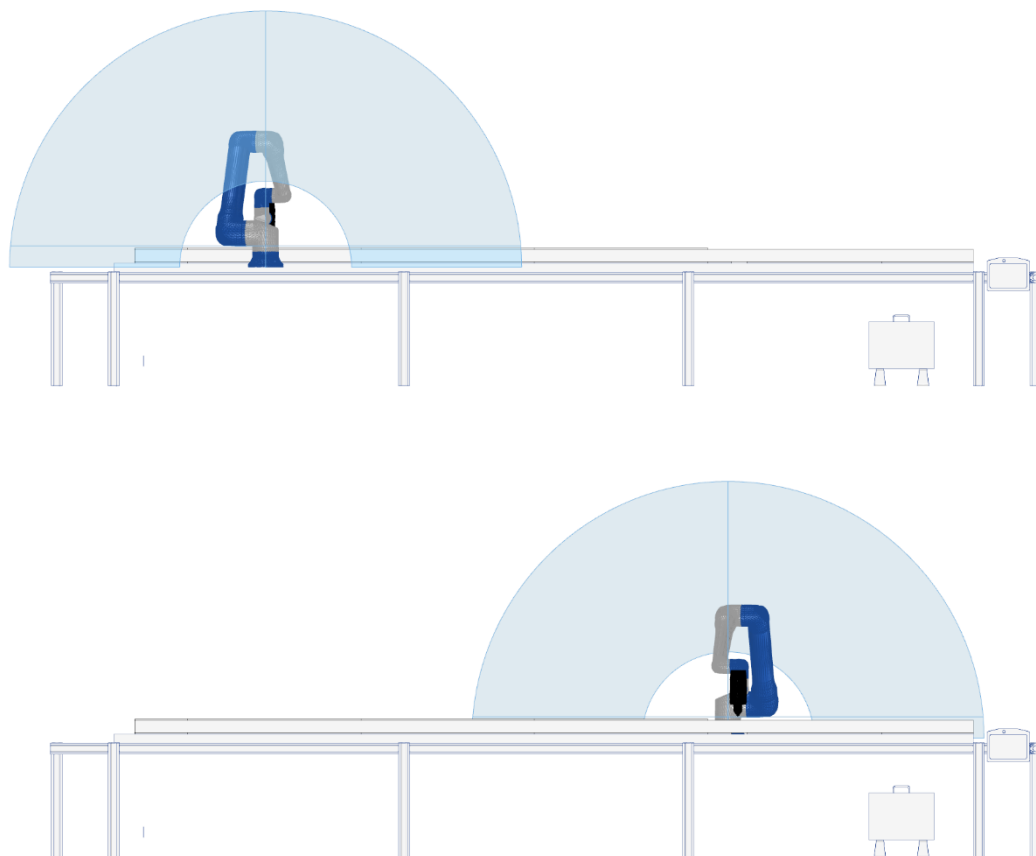
Eje de Trabajo

Isométrica

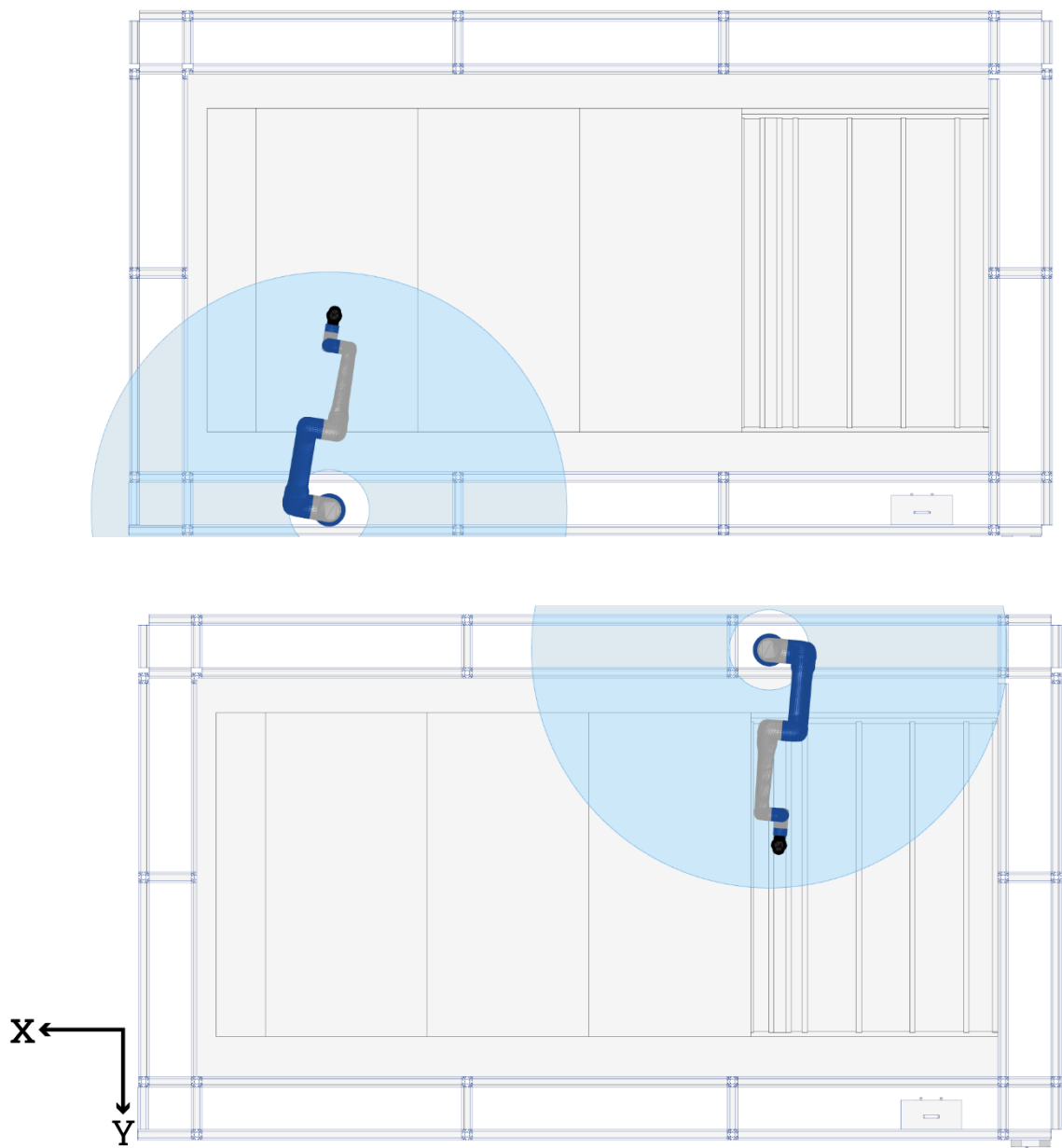
Aplicación/Actividad: Atornillado
UR20



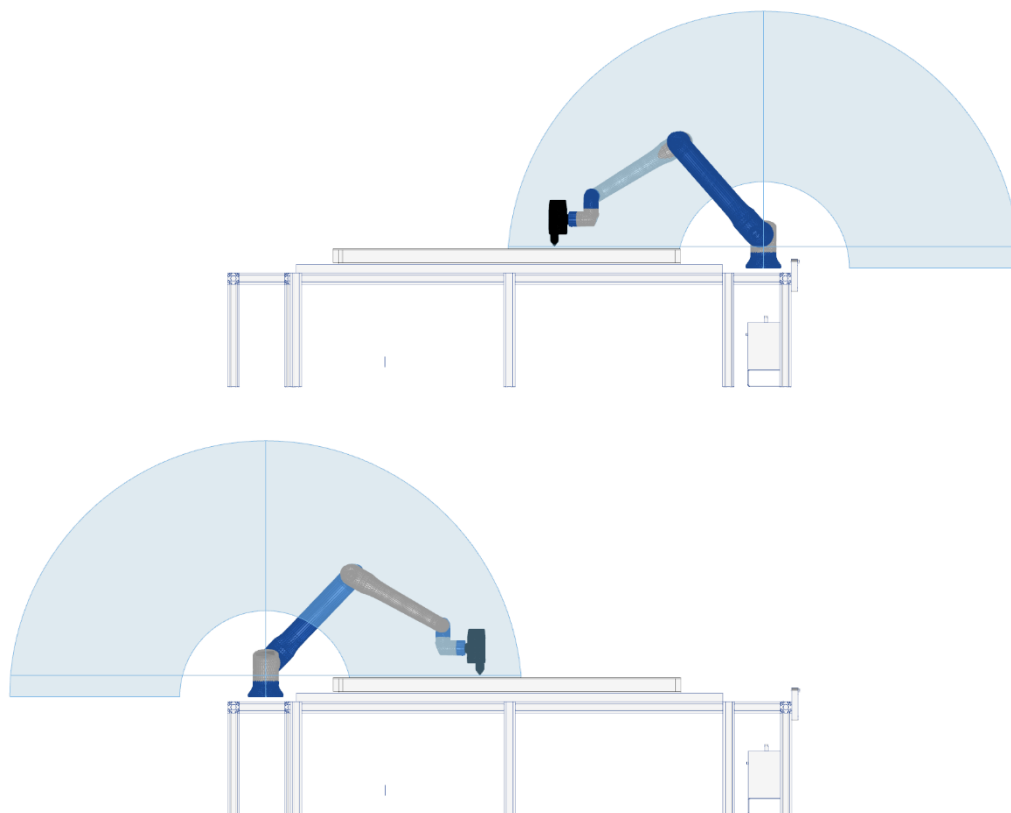
Vista Frontal



Planta

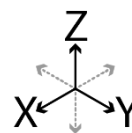


Vista lateral

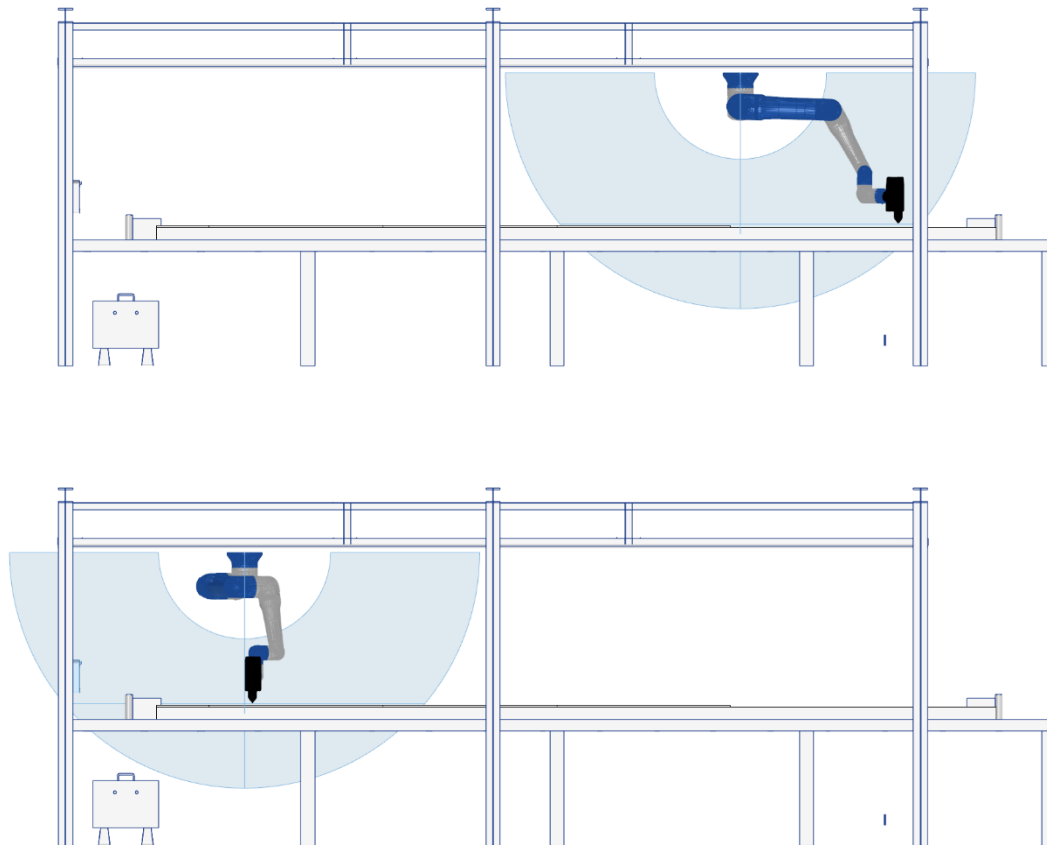


Prototipo 4

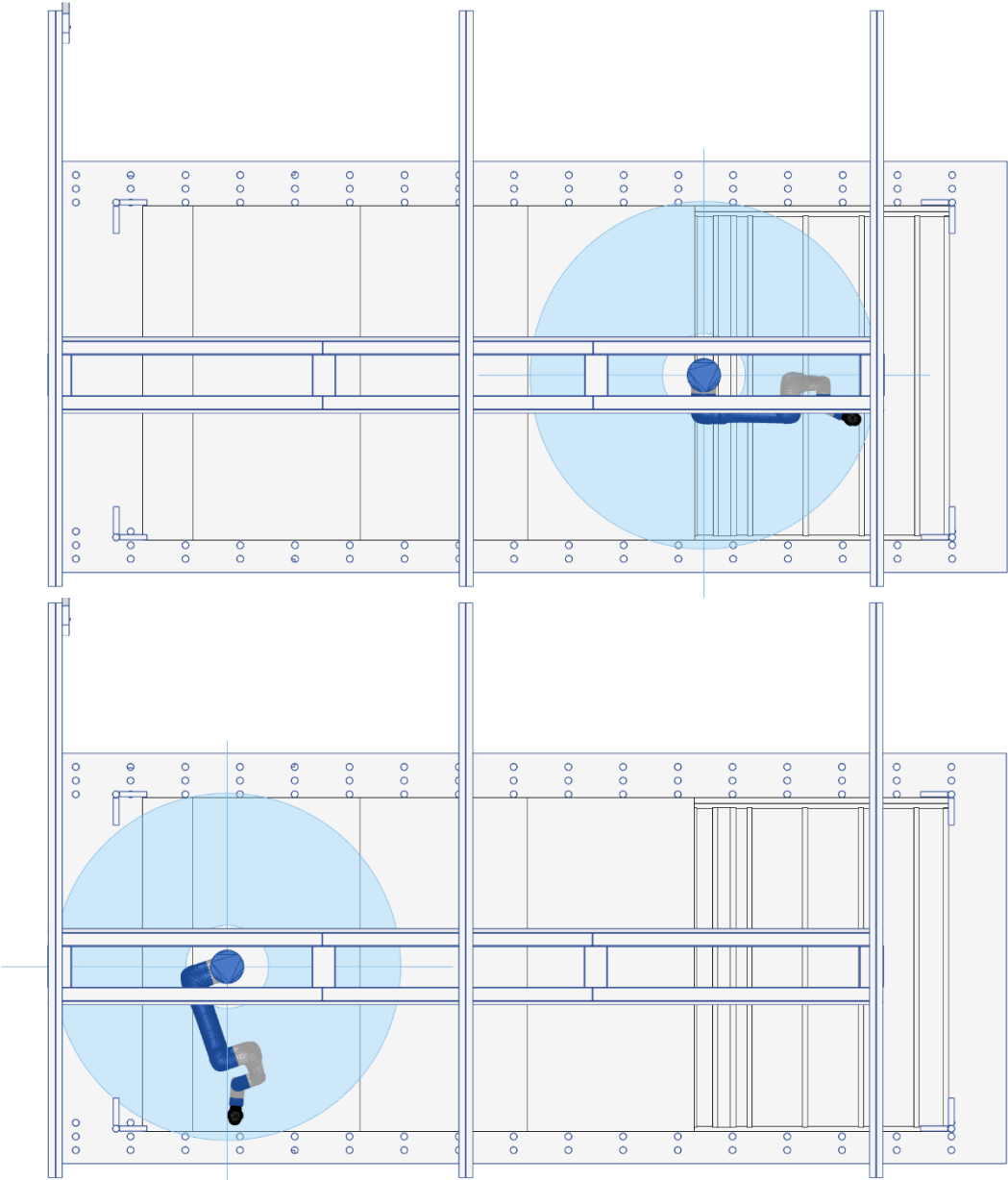
Aplicación/Actividad: Atornillado
UR30



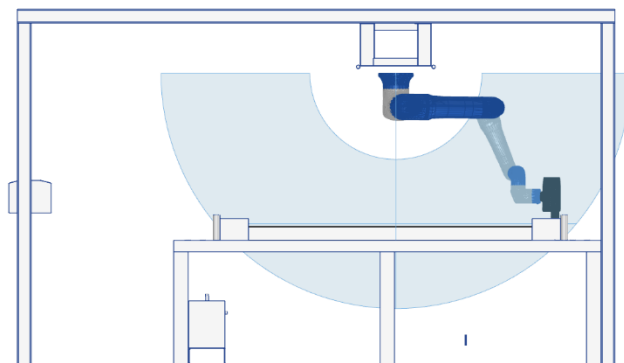
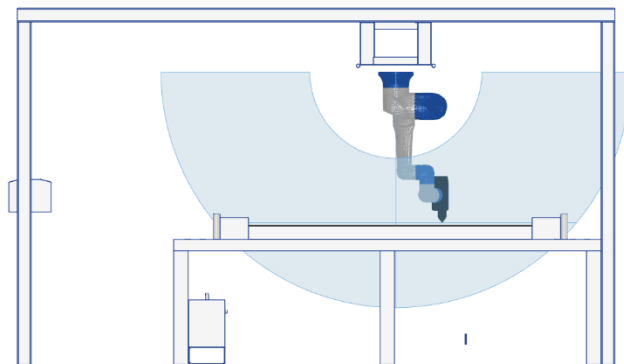
Vista frontal

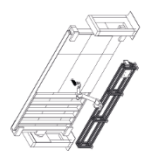
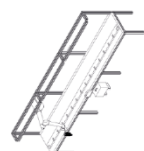


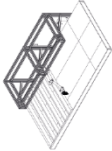
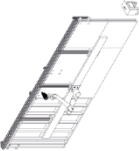
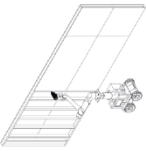
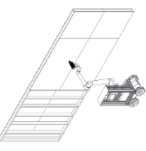
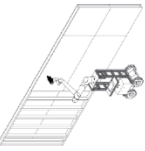
Planta



Vista lateral



	Geometría		Topología		Función							
	4.1.4** Manipulador		Aplicación del robot		Trabajador	Aplicación del robot						
	3.1.1.4* Aplicación del robot	3.1.1.3* Espacio máximo X (m)	3.1.1.2* Espacio máximo Y (m)	3.1.1.1* Espacio máximo Z (m)			Tipos	3.1.2.2* Eje adicional				
      	3.1.1.4* Aplicación del robot	3.6	8.1	3.6	0.4	Montable	Eje lineal Y	A muro	Discreto	Frente	Atornillado / Corcheado	
		2.9	2.9	2.9	1.4	Fija	N/A	A cielo	Fija	Detras	Fresado	
		10.1	7.1	3.6	3.6	1.8	Fija	Eje lineal X, Y	A suelo	Continuo	Frente/Detras/Derecha/izquierda	Atornillado / Corcheado
		9.6	3.3	3.3	3.3	1.8	Fija	Eje lineal Y	A cielo	Continuo	Frente / Detras	Atornillado/ Corcheado/ Proyectado de Aluminio
		3.6	8.2	1.8	1.8	2.6	Fija	Eje rotativo/ Eje lineal Y	A suelo	Continuo	Frente / Detras	Atornillado / Corcheado
		6.6	10.1	1.8	1.8	1.8	Fija	Eje lineal X, Y	A suelo	Discreto	Frente / Detras	Atornillado / Corcheado
		1.8	9.3	1.8	1.8	9	Fija	Eje lineal Y	A cielo	Continuo	Frente	Fresado

	3,6	7,2	1,8	18	Fija	Eje lineal Y	A cielo	Continuo	Fronte	Atornillado / Cortado
	3,6	7,4	1,8	18	Fija	Eje lineal Y	A cielo	Continuo	Fronte/Detra/Derecha/Izquierda	Atornillado/Coche/aseo/Proyectado de asiente
	1,8	8,1	3,6	0,4	Montable	Eje lineal Y	A muro	Discreto	Fronte	Atornillado / Cortado
	3,6	3,6	5,6	No aplica	Móvil	Eje lineal Z	A suelo	Continuo	Fronte/Detra/Derecha/Izquierda	Atornillado/Coche/aseo/Proyectado de asiente
	3,6	3,6	4,2	No aplica	Móvil	Eje lineal Z	A muro	Discreto	Fronte/Detra/Derecha/Izquierda	Atornillado/Coche/aseo/Proyectado de asiente
	3,6	3,6	4,4	No aplica	Móvil	Eje lineal Z	A suelo	Discreto	Fronte/Detra/Derecha/Izquierda	Atornillado/Coche/aseo/Escano/Proyectado de asiente/Asiente/Puerta

* 2025—ISO 10218-2—Safety requirements Part 2 Industrial robot applications and robot cells
 ** 2021—ISO 8373—Vocabulary
 *** 2016—ISO 6385—Ergonomics principles in the design of work systems
 **** 2008—ISO 1503—Spatial orientation and direction of movement—Ergonomic

6. Evaluación de un prototipo del modelo de diseño

La evaluación se hará bajo los siguientes puntos críticos para una evaluación cualitativa. Adaptabilidad, seguridad, ergonomía, colaboración. Se realizará del prototipo 1 a elección propia.

Adaptabilidad

El Prototipo 1 presenta una elevada capacidad de adaptación ante entornos dinámicos. Gracias a su configuración lineal, posee la flexibilidad necesaria para ajustarse a paneles de distintas dimensiones. Esta característica resulta esencial, dado que en el caso de uso la única variable geométrica de los módulos es la longitud. Asimismo, el diseño destaca por su escala compacta, lo cual no impide que cubra una extensa área de trabajo sobre el panel. Finalmente, su morfología permite un almacenamiento apilable, optimizando así el uso del espacio cuando el dispositivo no se encuentra en operación.

Seguridad

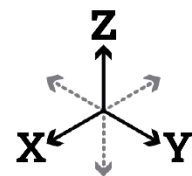
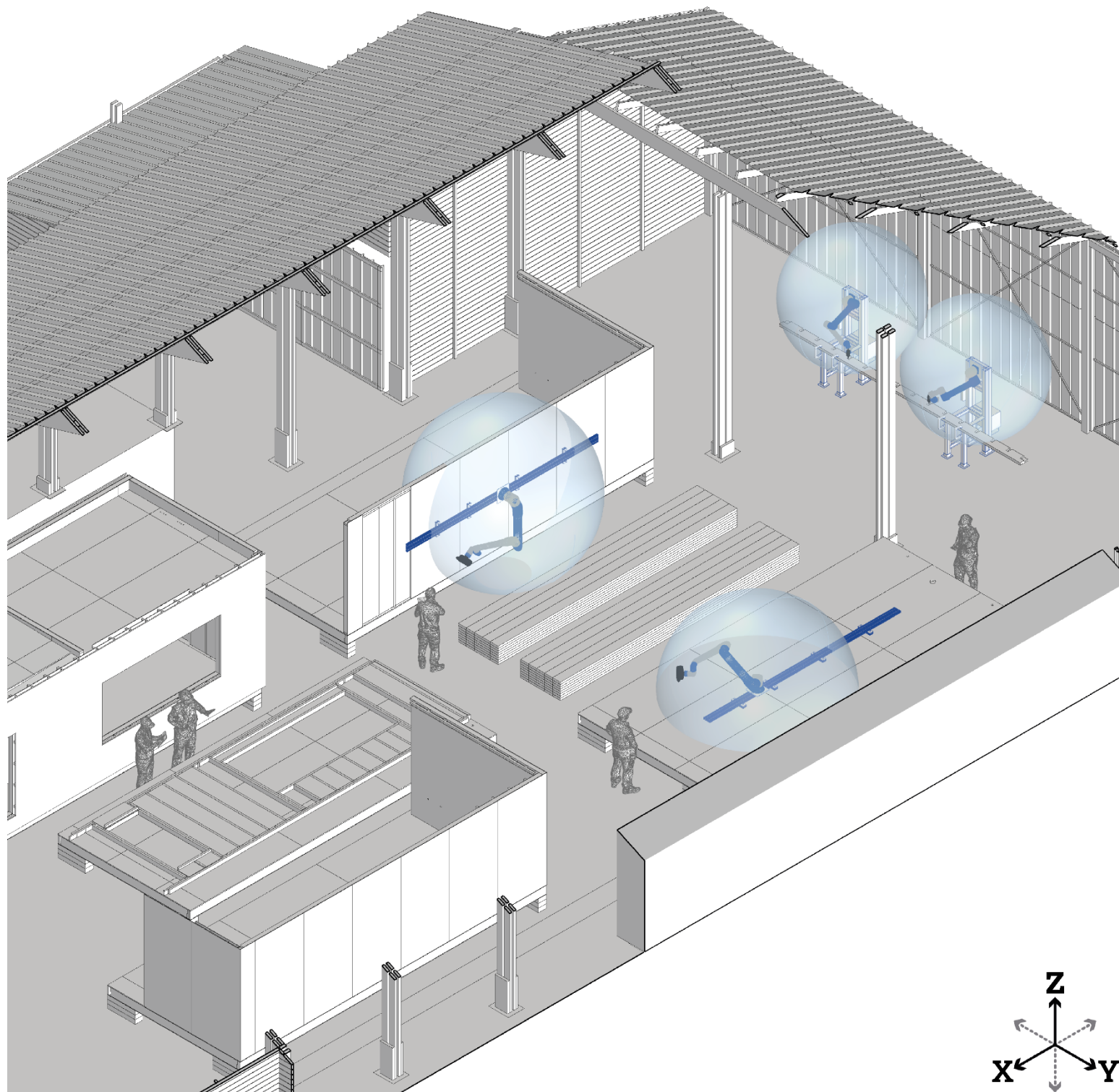
Se infiere que el prototipo aporta seguridad mediante la visualización permanente de su espacio máximo de trabajo. Aun así, puede tener una mejora si se optimiza la señalización para delimitar exclusivamente el espacio operativo real de la tarea. Por otro lado, la integración de un robot colaborativo aumenta los estándares de seguridad durante la interacción con el personal. Finalmente, al no contemplar tareas de colaboración simultánea dentro del mismo espacio físico se garantiza un entorno donde los operarios pueden ejecutar sus actividades con mayor confianza y tranquilidad.

Ergonomía

El desempeño ergonómico del sistema depende directamente de la ubicación y orientación de la pieza de trabajo, dado que el dispositivo se ancla a la misma (en el caso de los paneles). En una disposición vertical, resulta obligatorio el uso de medios auxiliares (como escaleras) para manipular el robot en su rango operativo superior, lo cual puede inducir fatiga y aumentar el riesgo de seguridad para los trabajadores. Por el contrario, en una disposición horizontal, el acceso a los extremos del rango de trabajo es más accesible. No obstante, la altura del plano de trabajo queda condicionada a la posición del panel: si este se encuentra a nivel del suelo, obliga al operario a adoptar una postura de flexión forzada, lo que puede derivar en fatiga física y riesgos musculoesqueléticos.

Colaboración Humano-Robot

Existen diversas vías para consolidar el prototipo como una estación de trabajo colaborativa humano-robot. Una de ellas radica en la implementación de un Gemelo Digital (*Digital Twin*) para la visualización y validación de la cinemática del robot durante la ejecución de las actividades. Asimismo, es factible integrar sistemas como los propuestos por Kamezaki et al., incorporando indicadores de estado visuales para incrementar la seguridad y facilitar un flujo de trabajo colaborativo ininterrumpido. Finalmente, se podría dotar al robot de sistemas de visión artificial capaces de interpretar dibujos técnicos directamente sobre el panel, permitiendo así la ejecución de tareas sin necesidad de una programación manual, como lo hace la patente US20250058473.



7.Trabajo futuro

El desarrollo de la Colaboración Humano-Robot (HRC) abarca amplias áreas de importancia, tales como la implementación de tecnologías avanzadas, el modelado del comportamiento del trabajador y el diseño de herramientas específicas (Dhanda et al., 2025). Cabe señalar que estas tecnologías aún se encuentran en una etapa de desarrollo para su incorporación óptima en la industria de la prefabricación. No obstante, profundizar en una variable específica y potenciarla constituye un paso fundamental para avanzar hacia el paradigma de la Industria 5.0.

En cuanto a las limitaciones de esta investigación, se identifica la oportunidad de aumentar los prototipos dentro del modelo paramétrico. Asimismo, la incorporación directa del trabajador digital en el entorno de simulación permitiría un análisis dinámico de las posibles colisiones, definiendo con mayor precisión los espacios de restricción. De igual manera, resultaría altamente beneficioso realizar una actividad para recolectar datos cuantitativos y compararlos con datos reales de ejecución manual (sin el uso de la estación robótica), estableciendo así una línea base comparativa.

Como línea de trabajo futura, se propone la integración de la Realidad Aumentada (RA) vinculada a un Gemelo Digital. Esta tecnología permitiría visualizar los movimientos y trayectorias del robot en tiempo real ante el ojo humano, incrementando significativamente la percepción de seguridad y la confianza de los operarios.

Finalmente, se reconoce que abarcar la totalidad de las áreas de la HRC en un único estudio es difícil dada la complejidad del campo. El valor de esta investigación radica en extraer de datos relevantes futuras investigaciones científicas.

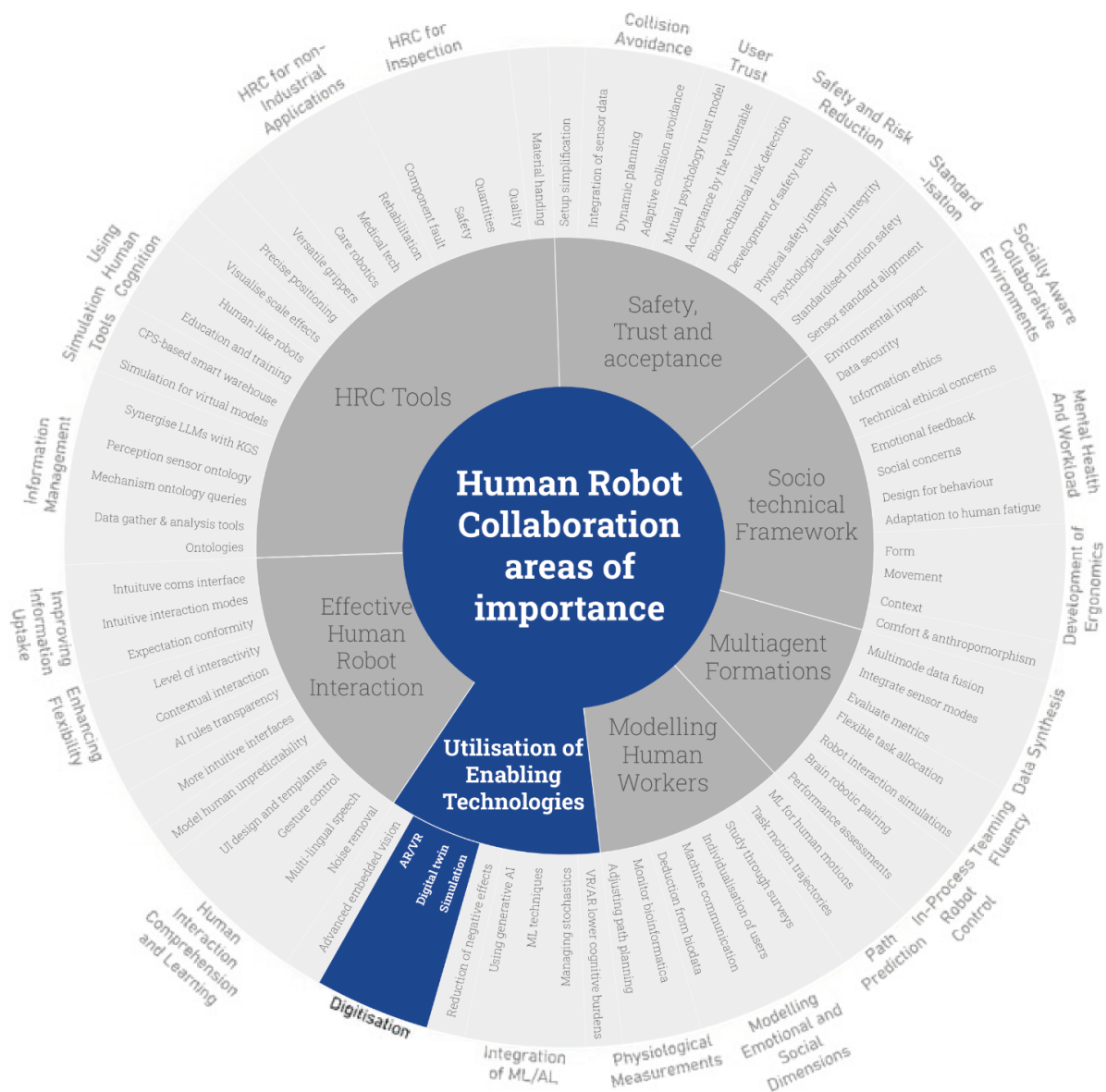


Figura 28. Áreas de importación de la colaboración humano-robot. Dhanda et al, 2025

8. Referencias

- [1] Parada, S., López, V., Mesa, H., & Mac Cawley, A. (2023). *Catastro de capacidades y brechas de industrialización de prefabricadoras con madera en Chile* [Informe de investigación]. Centro UC de Innovación en Madera.
- [2] Instituto Nacional de Normalización. (2025). Construcción industrializada – Requisitos para la evaluación de la conformidad (NCh3900).
- [3] Akhavan, M., Alivirdi, M., Jamalpour, A., Kheradranjbar, M., Mafi, A., Jamalpour, R., & Ravanshadnia, M. (2025). Impact of Industry 5.0 on the Construction Industry (Construction 5.0): Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis. *Buildings*, 15(9), 1491. <https://doi.org/10.3390/buildings15091491>
- [4] Carro Suárez, J., & Sarmiento Paredes, S. (2022). El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0: Una revisión sistemática y perspectivas futuras. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 10(24). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81727>
- [5] Dhanda, M., Rogers, B. A., Hall, S., Dekoninck, E., & Dhokia, V. (2025). Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
- [6] Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para

- la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología*, 74(9), 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016>
- [7] Rahman, Md. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, Md. A.-A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles and Prospects of Next-Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. *Journal of Robotics*, 2024(1), 2918089. <https://doi.org/10.1155/2024/2918089>
- [8] Aguilera-Carrasco, C. A., González-Böhme, L. F., Valdes, F., Quitral-Zapata, F. J., & Raducanu, B. (2023). A Hand-Drawn Language for Human–Robot Collaboration in Wood Stereotomy. *IEEE Access*, 11, 100975–100985. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3314337>
- [9] Albeaino, G., Jeelani, I., Gheisari, M., & Issa, R. R. A. (2025). Assessing proxemics impact on Human-Robot collaboration safety in construction: A virtual reality study with four-legged robots. *Safety Science*, 181, 106682. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2024.106682>
- [10] *Automatización robótica colaborativa | Universal Robots Cobots*. <https://www.universal-robots.com/es/insights/por-que-cobots/>
- [11] Baek, F., Kim, D., Lee, G., Choi, B., & Lee, S. (2024). Effect of human emotional responses on human-robot team pty in construction. *Automation in Construction*, 166, 105608. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105608>
- [12] Baratta, A., Cimino, A., Longo, F., Mirabelli, G., & Nicoletti, L. (2024). Task Allocation in Human-Robot Collaboration: A Simulation-based approach to optimize Operator's

Productivity and Ergonomics. *Procedia Computer Science*, 232, 688–697.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.068>

- [13] Chan, W. P., Hanks, G., Sakr, M., Zhang, H., Zuo, T., van der Loos, H. F. M., & Croft, E. (2022). Design and Evaluation of an Augmented Reality Head-mounted Display Interface for Human Robot Teams Collaborating in Physically Shared Manufacturing Tasks. *J. Hum.-Robot Interact.*, 11(3), 31:1-31:19. <https://doi.org/10.1145/3524082>
- [14] Fu, Y., Chen, J., & Lu, W. (2024). Human-robot collaboration for modular construction manufacturing: Review of academic research. *Automation in Construction*, 158, 105196. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105196>
- [15] Kamezaki, M., Wada, T., & Sugano, S. (2024). Dynamic Collaborative Workspace Based on Human Interference Estimation for Safe and Productive Human-Robot Collaboration. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 9(7), 6568–6575. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3405352>
- [16] Kramberger, A., Kunic, A., Iturrate, I., Sloth, C., Naboni, R., & Schlette, C. (2022). Robotic Assembly of Timber Structures in a Human-Robot Collaboration Setup. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 768038. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.768038>
- [17] Kyjanek, O., Al Bahar, B., Vasey, L., Wannemacher, B., & Menges, A. (2019, mayo 24). *Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication*. 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Banff, AB, Canada. <https://doi.org/10.22260/ISARC2019/0164>

- [18] Liu, Y., Habibnezhad, M., & Jebelli, H. (2021). Brainwave-driven human-robot collaboration in construction. *Automation in Construction*, 124, 103556. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103556>
- [19] Rodrigues, P. B., Singh, R., Oytun, M., Adami, P., Woods, P. J., Becerik-Gerber, B., Soibelman, L., Copur-Gencturk, Y., & Lucas, G. M. (2023). A multidimensional taxonomy for human-robot interaction in construction. *Automation in Construction*, 150, 104845. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104845>
- [20] Yang, X., Amtsberg, F., Sedlmair, M., & Menges, A. (2024). Challenges and potential for human-robot collaboration in timber prefabrication. *Automation in Construction*, 160, 105333. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105333>
- [21] Yao, B., Li, X., Ji, Z., Xiao, K., & Xu, W. (2024). Task reallocation of human-robot collaborative production workshop based on a dynamic human fatigue model. *Computers & Industrial Engineering*, 189, 109855. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109855>
- [22] Zhang, R., Lv, Q., Li, J., Bao, J., Liu, T., & Liu, S. (2022). A reinforcement learning method for human-robot collaboration in assembly tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 73, 102227. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102227>
- [23] Laftchiev, E. & Romeres, D. (2021). *Systems and methods for advance anomaly detection in a discrete manufacturing process with a task performed by a human-robot team* (U.S. Patent No. 16705621). Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US326381014&_cid=P21-MJ16CB-47447-1

- [24] Gombolay, M., Johnson, M., Liu, R., Gopalan, N. (2023). *Human-robot collaborative flexible manufacturing system and method*. (U.S. Patent No. 17933323). Georgia Tech Research Corporation.
https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US394064482&_cid=P21-MJ16RL-61022-1
- [25] Ramani, K., Huo, K., Cao, Y., Wang, T. (2021). *System and method for embodied authoring of human-robot collaborative tasks with augmented reality*. (U.S. Patent No. 17022216). Purdue Research Foundation.
https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US333828680&_cid=P21-MJ16Y5-66149-1
- [26] Stone, K. (2021). *System and method for using virtual/augmented reality for interaction with collaborative robots in manufacturing or industrial environment*. (W.O. Patent No. WO/2021/154407). Raytheon Company.
https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=WO2021154407&_cid=P21-MJ170R-68116-1
- [27] GONZÁLEZ, L., QUITRAL, F., AGUILERA, C. (2025). *Carpentry tool for human-robot collaborative stereotomy using a collaborative industrial robot system controlled by artificial vision capabilities that locates, recognises and executes machining instructions hand-drawn by a carpenter on a work piece, and operating method*. (U.S. Patent No. 18724943). Universidad Técnica Federico Santa María.
https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US449214366&_cid=P21-MJ174G-71124-1

- [28] WARTENBERG, M., VU, C., DENENBERG, S., KRIVESHKO, I., SEKER, Z. (2023). *Context-sensitive safety monitoring of collaborative work environments*. (U.S. Patent No. 18106619).https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US399232286&_cid=P21-MJ1789-74427-1
- [29] Kyle, J., Kenneth, A., Castelli, P. (2024). *Linear Transfer System for a Collaborative Robot*. (U.S. Patent No. 18314856). Thomson Industries, Inc. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US442709297&_cid=P21-MJ17D0-78545-1
- [30] Akey, A., Pawley, J., Rhoda, D., Bailey, A. (2024). *Collaborative robot welding system and method*. (U.S. Patent No. 18641396). Vectis Automation, LLC. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US436329882&_cid=P21-MJ17FT-81637-1
- [31] Barglof, M., Post, K., Pappas, T. (2025). *Robot-controlled modular rotary table assembly and modular rotary headstock positioner assembly*. (U.S. Patent No. 18794468). Kinetic Technologies, L.L.C. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US447970867&_cid=P21-MJ17IP-84083-1
- [32] Wengerd, J., Weaver, L. (2025). *Modular cobot system and method thereof*. (U.S. Patent No. 18652882). FLEXTUR CORP. https://patentscope.wipo.int/search/es/detail.jsf?docId=US451302280&_cid=P21-MJ17LG-86540-1

- [33] International Organization for Standardization. (2025). *Safety requirements – Part 1: Industrial robot applications and robot cells* (ISO Standard No. 10218-1).
- [34] International Organization for Standardization. (2025). *Safety requirements – Part 2: Industrial robot applications and robot cells* (ISO Standard No. 10218-2).
- [35] International Organization for Standardization. (2021). *Vocabulary* (ISO Standard No. 8373).
- [36] International Organization for Standardization. (2016). *Collaborative robots* (ISO Standard No. TS15066).
- [37] International Organization for Standardization. (2016). *Ergonomics principles in the design of work systems* (ISO Standard No. 6385).
- [38] International Organization for Standardization. (2008). *Spatial orientation and direction of movement – Ergonomic Spatial orientation and direction of movement – Ergonomic* (ISO Standard No. 1503).