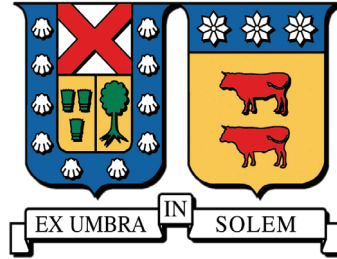


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA  
VALPARAÍSO - CHILE



## PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA LA SIMULACIÓN DE LA CARPINTERÍA DE ARMAR ROBOTIZADA

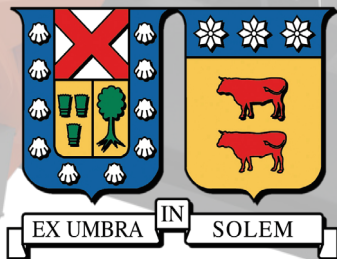
**LENIN ORLANDO CORTÉS LEDEZMA**  
MEMORÍA DE TITULACIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE ARQUITECTO  
MODALIDAD I+D

**PROFESOR REFERENTE**  
FRANCISCO QUITRAL

**PROFESOR CO-REFERENTE**  
LUIS FELIPE GONZÁLEZ

**JULIO 2022**

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA  
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA  
VALPARAÍSO - CHILE



## PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA LA SIMULACIÓN DE LA CARPINTERÍA DE ARMAR ROBOTIZADA

**LENIN ORLANDO CORTÉS LEDEZMA**  
MEMORÍA DE TITULACIÓN  
MODALIDAD I+D

**PROFESOR REFERENTE**  
FRANCISCO QUITRAL

**PROFESOR CO-REFERENTE**  
LUIS FELIPE GONZÁLEZ

**Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución**

**JULIO 2022**



# DEDICATORIA

Esta memoria de título va dedicada a mi madre Mafalda Ledezma, quien con tanto esfuerzo y dedicación me apoyó en todas las decisiones que he tomado a lo largo de mi vida, brindándome su amor incondicional por sobre todas las cosas.

Gracias.

# RESUMEN

Esta memoria de título I+D presenta la elaboración de un ambiente digital para la simulación de la carpintería de armar robotizada, obteniendo resultados gráficos automatizados de las capacidades de trabajo del robot industrial en un escenario virtual definido, para un mecanizado efectivo, su posible aplicación en el entorno real y sentar una base para el desarrollo y progreso de elementos ciber-físicos relacionadas con la carpintería de armar robotizada y la plataforma de simulación.

A través de análisis con diversos grados de complejidad, se desarrollan diferentes etapas de trabajo, explorando las capacidades de los robots industriales evaluados, los diversos complementos de trabajo digital, y los métodos para el diseño paramétrico y programación visual, existiendo también un progreso de la misma memoria, desarrollando criterios y definiciones para un trabajo estructurado y estandarizado.

La memoria es la evolución de la comprensión de las capacidades de mecanizado en madera, iniciando con una exploración manual, estableciendo condiciones y criterios a medida que se desarrolla un algoritmo para la construcción de la plataforma de simulación. Este algoritmo busca automatizar las capacidades de mecanizado de acuerdo a condiciones establecidas, tipo de madera, dimensiones, robot de trabajo, herramienta para el mecanizado y una celda de trabajo.

La implementación del diseño paramétrico y un lenguaje de programación visual, permiten obtener resultados y una retroalimentación a medida que se avanza en las etapas de trabajo, así mismo posibilita la creación de un ambiente interactivo en el espacio virtual gracias a los softwares de modelación y programación (Rhinoceros y Grasshopper). Este ambiente virtual parametrizado conecta cada etapa de trabajo, utilizando secuencias lógicas de programación, de esto modo se dejan de lado resultados aleatorios y se obtienen datos de acuerdo a una estructura, proponiendo una organización para el desarrollo efectivo del mecanizado en madera por medio de los robots industriales, con la ventaja de poder modificar y optimizar la plataforma de simulación e incluso añadir nuevas variables, herramientas y tecnologías digitales para su desarrollo.

# ABSTRACT

This memory presents the elaboration of a digital environment for the simulation of robotic arming carpentry, obtaining automated graphic results of the work capabilities of the industrial robot in a defined virtual scenario, for effective machining, its possible application in the real environment and lay a basis for the development and progress of cyber-physical elements related to robotic assembly carpentry and the simulation platform.

Through analyses with varying degrees of complexity different stages of work are developed, exploring the capabilities of the industrial robots evaluated, the various complements of digital work, and the methods for parametric design and visual programming, there is also a progress of the same memory, developing criteria and definitions for a structured and standardized work. The memory is the evolution of the understanding of wood machining capabilities, starting with a manual exploration where conditions and criteria are established as an algorithm is developed for the construction of the simulation platform. This algorithm seeks to automate machining capabilities according to set conditions, wood type, dimensions, work robot, tool for machining and a work cell.

The implementation of parametric design and a visual programming language, allow to obtain results and feedback as you advance in the stages of work, also enables the creation of an interactive environment in the virtual space thanks to modeling and programming softwares (Rhino and Grasshopper). This parameterized virtual environment connects each stage of work, using logical programming sequences, in this way random results are set aside, and data is obtained according to a structure, proposing an organization for the effective development of wood machining through industrial robots, with the advantage able to modify and optimize the simulation platform and even add new variables, digital tools and technologies for its development

# GLOSARIO

**Algoritmo:** Conjunto de operaciones lógicas para resolver una ecuación específica.

**Automatización:** Aplicación de máquinas o de procedimientos automáticos en la realización de un proceso o en una industria.

**Carpintería de armar:** Carpintería centrada en el diseño y construcción de uniones y ensamblajes para estructuras de madera.

**Carpintería de armar robotizada:** Diseño y manufactura asistida por computadora para la carpintería de armar por medio de la fabricación robótica industrial.

**Componente central:** *Core component* es el núcleo donde se contienen todas las funciones para la simulación y generación de códigos del robot virtual.

**Depuración:** Proceso de identificar y corregir errores de programación.

**Digitalización:** Registrar en forma digital números, dígitos, datos o información.

**Diseño paramétrico:** Es el proceso de diseño entorno a un algoritmo, bajo condiciones y reglas relacionadas con los requerimientos para determinar un resultado.

**Fresado:** El corte del material que se mecaniza con una herramienta rotativa de varios filos.

**Grado de libertad:** Referido a los robots corresponde a cada movimiento independiente que es capaz de realizar un articulación.

**Grasshopper:** Programador visual integrado como plugin para Rhinoceros.

**Hardware:** Corresponde a los componentes físicos del sistema informático.

**Madera contra laminada:** Producto estructural de madera compuesto por capas dispuestas perpendicularmente entre sí.

**Madera laminada:** Producto estructural de madera compuesto por capas dispuestas de forma paralela.

**Mecanizado:** Dar forma y acabo mediante la substracción a un material por medio de maquinaria.

**Plataforma:** En referencia al ambiente digital, es el sistema base de funcionamiento de un software o hardware.

**Plugin:** En informática corresponde al complemento de una aplicación para funciones específicas.

**Revolución 4.0:** Revolución que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se integrarán en las organizaciones, las personas y los activos.

**Rhinoceros:** Herramienta digital para el modelado en 3 dimensiones desarrollada por Robert McNeel & Associates.

**Robot industrial:** Robot programable de 3 o más ejes con diversos propósitos.

**Simulación:** Es la experimentación de situaciones reales diseñadas para comprender su funcionamiento.

**Sistema de coordenadas:** Sistema de referencia para expresar numéricamente la posición de un punto u objeto.

**Software:** Corresponde a las rutinas lógicas del sistema informático para su ejecución.

**Sustentable:** Habilidad de lograr una prosperidad económica sostenida en el tiempo protegiendo al mismo tiempo los sistemas naturales del planeta y proveyendo una alta calidad de vida para las personas.

**TCP:** *Tool center point* corresponde al punto central de la herramienta el cual es utilizado para el posicionamiento del robot hacía un objetivo definido en el espacio cartesiano.

# ÍNDICE

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>2</b>
<b>Glosario</b> .....	<b>3-4</b>
<b>Índice</b> .....	<b>5-7</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1 Prólogo</b> .....	<b>9</b>
<b>1.2 Hipótesis y Objetivos</b> .....	<b>9</b>
<b>1.3 Estado del arte</b> .....	<b>10</b>
<b>1.3.1 Las herramientas tecnológicas y digitales</b> .....	<b>10-12</b>
<b>1.3.2 El diseño digital</b> .....	<b>13-14</b>
<b>1.3.3 Proyección de resultados</b> .....	<b>15-19</b>
<b>1.4 Enfoque de investigación</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4.1 Problema</b> .....	<b>20</b>
<b>1.4.2 Área de aplicación</b> .....	<b>21</b>
<b>1.5 Metodología</b> .....	<b>22-23</b>
<b>1.5.1 Requerimientos de diseño</b> .....	<b>24</b>
<b>2. Entendimiento de las herramientas digitales y definición de procedimientos iniciales</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1 Comprensión del ambiente digital</b> .....	<b>26</b>
<b>2.1.1 Diseño paramétrico y algoritmos</b> .....	<b>27-28</b>

2.1.2	Recursos arquitectura USM	29
2.1.3	Robots industriales y complementos	30
2.1.3.1	Requerimientos de los complementos	31
2.1.3.2	Recopilación de complementos	32
2.1.3.3	Selección de complementos	32-33
2.1.4	Definiciones básicas	34
2.2	Simulación inicial	35
2.2.1	Replicación de características	35
2.2.2	procedimientos	36-48
2.2.3	Conclusiones parciales	49
2.2.4	Depuración de la etapa	50
<b>3.</b>	<b>Bases para el desarrollo de un algoritmo de mecanizado funcional</b>	<b>51</b>
3.1	Robot de evaluación	52
3.1.1	Configuración KR210 R3100-2	52-55
3.1.2	Mecanizado	56
3.1.2.1	Criterios	57-58
3.1.3	Condiciones de evaluación	59
3.1.3.1	Zonas y mapa de trabajo	60
3.1.3.2	Criterios de definición	61-65
3.2	Construcción de algoritmo	66-67
3.2.1	Conclusiones parciales	68
3.2.2	Depuración de la etapa	69

<b>4. Incorporación del algoritmo en celda de trabajo y desarrollo del mecanizado automatizado</b>	<b>70</b>
<b>4.1 Espacio digital</b>	<b>71</b>
4.1.1 Laboratorio de construcción y manufactura robotizada	71-72
4.1.2 Consideraciones y criterios	73-74
<b>4.2 Algoritmo y ambiente definido</b>	<b>75</b>
4.2.1 Reconfiguración	75-82
4.2.2 Mecanizado optimizado	83-86
4.2.3 Definición algoritmo de mecanizado	87-94
<b>4.3 Simulación en celda de trabajo</b>	<b>95-96</b>
4.3.1 Conclusiones parciales	97
4.3.2 Depuración de la etapa	98
<b>5. Construcción y puesta a prueba de la plataforma de simulación para el mecanizado</b>	<b>99</b>
5.1 Planteamiento de procedimiento adicional	100
5.2 Objetivos	101
5.3 Definición geométrica para el banco de trabajo	102
5.2.1 Consideraciones y construcción	102-107
5.4 Flujo de trabajo	108
5.5 Simulación y resultados	109-117
<b>6. Conclusiones</b>	<b>118-121</b>
<b>7. Referencias</b>	<b>122-125</b>
<b>8. Anexos</b>	<b>126-127</b>

# INTRODUCCIÓN



# HIPÓTESIS

Bajo la modalidad de investigación y desarrollo, este proyecto buscará implementar el uso de robots industriales para su estudio, comprensión y simulación, por medio de herramientas digitales, con un enfoque a la carpintería de armar robotizada. Se pretende elaborar una plataforma de simulación, a través de la cual se creará un entorno digital donde sea posible diseñar y comprender el espacio entorno al robot y sus capacidades de trabajo para la carpintería de armar robotizada.

## OBJETIVOS

### Objetivo General:

Desarrollar una plataforma para la simulación de la carpintería de armar robotizada en el laboratorio de construcción y manufactura robotizada del departamento de arquitectura USM campus San Joaquín.

### Objetivos específicos:

1. Establecer requerimientos para la definición de la plataforma de simulación y los criterios de mecanizado para el robot industrial y la celda de trabajo del laboratorio de construcción y manufactura robotizada.
2. Desarrollar algoritmos que permitan el análisis, comprensión y evaluación de las capacidades del robot industrial, su mecanizado y aquellos elementos que definen el entorno de trabajo.
3. Evaluar y simular las condiciones de trabajo para el mecanizado efectivo de la carpintería de armar robotizada.

# ESTADO DEL ARTE

## Herramientas tecnológicas y digitales

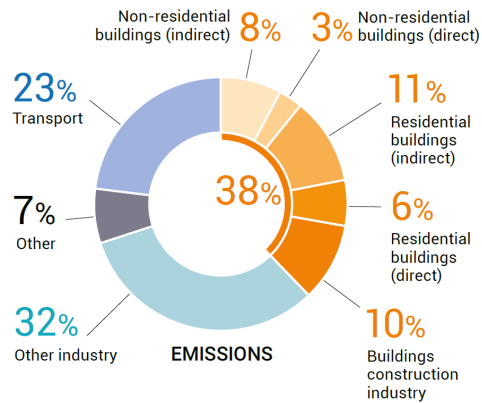
En la nueva era del desarrollo de tecnologías y procesos de automatización, el uso eficiente de los recursos y la preocupación por un crecimiento sustentable y un cuidado del medio ambiente, requiere de metodologías y alternativas para reducir la contaminación y aprovechar estas nuevas herramientas. Una de sus aristas es la construcción, tanto en sus procesos como su diseño, alrededor del 2/5 de la demanda energética y de las emisiones de gases del mundo corresponden a las construcciones [1], el continuo uso de carbón, petróleo y gas natural resulta en un aumento de las emisiones para el sector de la edificación, ya sea directa como indirectamente (gráfico 1) [2]. Como una respuesta ante dicha situación un material constructivo de bajo impacto es la madera, un elemento que ha tomado relevancia ante otros materiales convencionales tales como el hormigón y el acero. Gracias a la investigación, tecnologías y procesos de manufactura, la madera se vuelve un material competitivo, ya sea en su valor económico como su sustentabilidad, además de poseer un significativo impacto social, la madera es el nuevo foco de atención en la industria constructiva, debido a su sostenibilidad y maquinabilidad, le han dado ventajas sustanciales en el nuevo desarrollo tecnológico [3].

A mediados del siglo XX con la invención de las máquinas de control numérico por computadora (*CNC, computer numerical control*), nacen las tecnologías de fabricación digital, que mediante modelos virtuales permiten materializar piezas por medio de herramientas físicas computarizadas, con la creación de maquinaria para carpintería digital especializada y fresado CNC se hizo posible la producción de piezas complejas de madera [4]. Su desarrollo e integración con las posibilidades tecnológicas de la revolución 4.0, han significado un avance importante en la producción industrial de madera mediante máquinas de fresado CNC, sin embargo, no es el proceso óptimo para aprovechar el potencial de desarrollo en madera. Este método además de consumir una gran cantidad de tiempo, también resulta en la producción considerable de desechos del material. Debido al aumento en la demanda de estructuras complejas de madera, se

han explorado nuevos medios para los procesos de fabricación utilizando robots industriales, los cuales han demostrado tener un gran potencial en diversos proyectos [5].

La implementación de robots industriales en el campo de la construcción y la arquitectura, establece nuevas metodologías que vinculan lo virtual con lo real, la naturaleza de la revolución 4.0 es complementar la instancia física con representaciones digitales de sus activos, el producto y el sistema de producción [6]. Debido a esta conexión es que se crean herramientas digitales capaces de desarrollar ecosistemas para la integración de lo real y lo virtual, en estos proyectos, las tecnologías digitales permiten desarrollar ideas en un entorno virtual, analizando y gestionando una significativa cantidad de datos por medio de diversas simulaciones [7]. Gracias a los grandes avances tecnológicos, estos procesos pueden llevarse a cabo como un proyecto de análisis previo a la ejecución efectiva, o incluso integrarse a los procesos en tiempo real, donde se elabora un flujo de trabajo, determinando las instancias de acción para los elementos físicos y los componentes digitales dentro del proceso. El término "tiempo real" corresponde al sistema de fabricación robótico, el cual adquiere y reacciona a la información durante la ejecución de los procesos de fabricación en lugar de solo ejecutar un código compilado previo [8].

La fabricación en madera requiere de establecer vínculos de lo digital y el modelo físico, lo que es posible con tecnologías como escáneres 3D, drones o realidad virtual, elaborando un flujo de retroalimentación de este vínculo [9], condiciones que pueden ser viables por la capacidad adaptativa del robot industrial, la flexibilidad programática, la incorporación de sistemas sensorizados y retroalimentación son ventajas propias de los robots industriales [10]. El potencial en la industria de la construcción resulta significativo, los robots pueden acoplarse a una variedad de herramientas, capaces de ejecutar labores de montaje y fabricación e incluso tienen la capacidad para adaptarse a los entornos de trabajo ya sea en la línea de fábrica hasta situaciones in situ [11], esto muestra como la adaptabilidad juega un rol clave en el desarrollo de flujos de trabajo relacionados con la maquinaria y las herramientas a disposición [12].



El gráfico representa la estimación de las emisiones de la industria constructiva dedicada a la fabricación directa de los materiales de construcción e indirectamente a la generación de energía para electricidad y calefacción comercial.

Gráfico 1. Cuota global de emisiones de edificios y construcción, 2019. United Nations Environment Programme, 2020.

## El diseño digital

La digitalización tiene el potencial de ayudar a transformar la sociedad y los modelos comerciales hacia un mundo más sostenible y equitativo [13], en un principio los robots industriales poseían una escala que iba relacionada a otras áreas de producción [12], desarrollados con un uso específico centrados en la automatización de tareas individuales [14], con la masificación de procesos industriales y uso de nuevas y sofisticadas herramientas digitales de mayor accesibilidad, ha provocado un cambio en los procesos de producción en diferentes escalas. La implementación de tecnologías y sistemas digitales está ligado a los procesos de automatización y producción de construcción en madera, la fabricación digital expande las posibilidades de manufactura, esto fundamenta la producción personalizada en masa [15]. Para llevar a cabo los procesos efectivos de manufactura se utilizan los medios digitales, donde se crean modelos con la mayor precisión posible y aquí es donde se integra el diseño asistido, el cual permite la creación, modificación, análisis u optimización de un diseño digital, así se crea un ambiente donde se controla cada instancia del proceso de diseño hasta su ejecución y el manejo de datos para la toma de decisión.

La simulación es un factor importante al momento de visualizar y obtener información sobre el proceso, es un método seguro para comprobar el diseño de algoritmos y el funcionamiento de los robots industriales [16]. Para crear un ambiente de simulación ideal es necesario definir el alcance del robot industrial y las capacidades para el manejo de la información, tanto de la información de entrada como la de salida, donde se debe considerar las características propias del robot, aquellos elementos externos con los que interactúa, un espacio de trabajo, la parametrización dentro del diseño de algoritmos y los casos de aplicación para dicho robot industrial. Un análisis apropiado es iniciar por la evaluación de los resultados esperados del producto terminado, se orientan los requisitos del diseñador de acuerdo a los análisis de la forma y especificaciones respecto del mismo proceso de fabricación [17].

Un proceso de diseño paramétrico, directo y automatizado es esencial para la generación de datos en el proceso de fabricación [12], en la industria de la construcción, muchas de las aplicaciones a las que van dirigidas son impulsadas por modelos paramétricos [18]. Junto al diseño paramétrico va de la mano un flujo de trabajo, estableciendo labores específicas para cada fase

o etapa las cuales en su conjunto se complementan y relacionan. Un correcto flujo de trabajo permite vincular las fases de diseño y optimización [19]. Con el uso del diseño asistido por computador (*Computer Aided Desing, CAD*) se puede graficar y producir diversas formas, que con el uso de ecuaciones matemáticas; análisis y aplicación de diferentes tipos de criterios establecidos, correctamente definidos y controlados, conforman la programación paramétrica [20]. Estos procesos están en constante evaluación, para ello se necesita una retroalimentación de todas sus instancias y una correcta estructura brinda la capacidad de adaptabilidad y flexibilidad de las metodologías digitales, es posible ajustar las decisiones en el diseño del proyecto una vez terminado, incluso en sus instancias iniciales y ese es el papel que juega la retroalimentación [21].

Con una estructura organizada y el diseño de algoritmos ejecutados correctamente es posible poner a prueba la simulación para las instancias pensadas en un proyecto, así como existe un flujo de trabajo con diversas fases del proceso, el proyecto paramétrico requiere de puntos de control para los cambios pertinentes en su diseño [20], estos puntos de control van ligados en la puesta a prueba de la simulación, esto permite la consideración de los parámetros más relevantes para una fabricación exitosa y más aún en las instancias iniciales del proyecto [22]. La información obtenida de estos procesos permite construir diferentes escenarios y seleccionar aquellos óptimos o relevantes para el diseño del proyecto [23], es el objetivo de las herramientas digitales, instaurar una posición estratégica frente al abanico de resultados y facilitar su materialización [24]. La simulación es una herramienta que permite evaluar diversos escenarios en un entorno virtual, con evidencia empírica y análisis cuantitativos de sus resultados posibles y optar por aquellos que beneficien el proyecto de acuerdo a sus requerimientos antes de su ejecución [23].

## Proyección de resultados

La proyección de resultados busca determinar una conceptualización general del proyecto final y desde este punto comenzar a desglosar todos los requerimientos necesarios para fijar un curso de acción, estableciendo comparaciones con proyectos referentes y utilizando los recursos disponibles para dar solución a la problemática planteada y los objetivos propios del proyecto.

La creación de una plataforma de simulación se basa en los recursos y capacidades de desarrollo de la entidad, como es el caso del *Multifunctional research laboratory for digital design and robotic construction* (figura 1), se basa en la mejora de una instalación preexistente que, por medio de los avances tecnológicos en el área de la robótica y construcción en madera, garantiza a la instalación con múltiples herramientas para diversos procesos de fabricación, además de desarrollar la estructura necesaria para sustentar el trabajo del mismo robot. Esta plataforma multifuncional se centra en el proceso físico como configuración inicial del proyecto, para así centrar los procesos virtuales en experimentos concretos de acuerdo a la necesidad de integrar el proceso de fabricación con el proceso de diseño, elaborando un flujo de trabajo que permita la conexión de la información en tiempo real del entorno ciber-físico, concepto que integra el ámbito de la producción física con el dominio virtual de la computación [7].

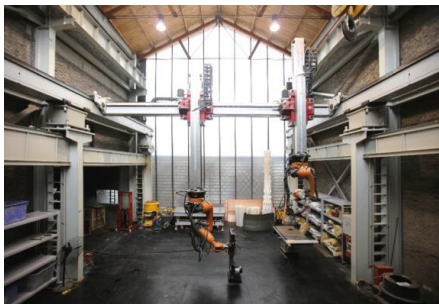


Figura 1. La infraestructura inicial de la plataforma de construcción de madera.  
Chai, Zhang & Yuan, 2019.

Con una estructura física montada y definida para dar soporte al laboratorio multifuncional, se integran los procesos digitales para unificar ambos sistemas, a través de un núcleo de control para la simulación del robot, crean un gemelo digital (*digital twin*) desarrollado en Grasshopper, esto permite la operación online u offline del sistema. El diseño paramétrico se construye con el complemento Furobot (figura 2), al cual posteriormente se integran diversos elementos sensorizados para completar el sistema del gemelo digital y obtener un modelo virtual de la plataforma y sus herramientas (figura 3) [25].

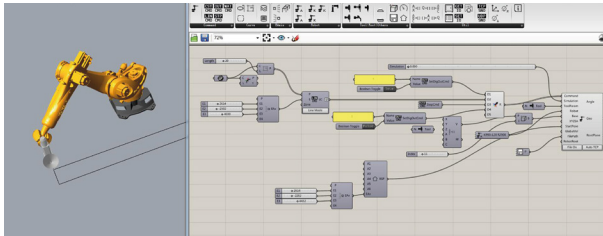


Figura 2. La interfaz de FURobot.  
Chai, Zhang & Yuan, 2019.

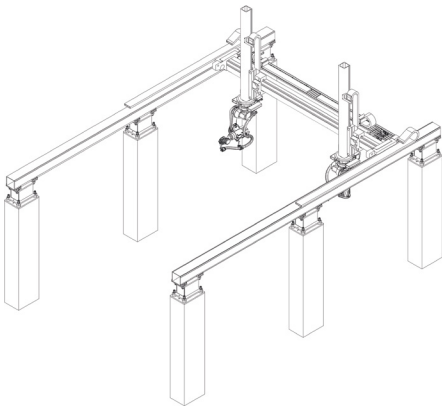


Figura 3. Modelo del sistema del robot de pórtico múltiple.  
Chai, Zhang & Yuan, 2019.

Con el uso del diseño paramétrico es posible elaborar un ambiente donde se posibilite la manipulación, control, precisión y complejidad del uso de robots industriales (figura 4), gracias a los modelos matemáticos se pueden administrar las iteraciones, y generar patrones es un rol importante, donde el todo es más que la suma de las partes individuales [26].

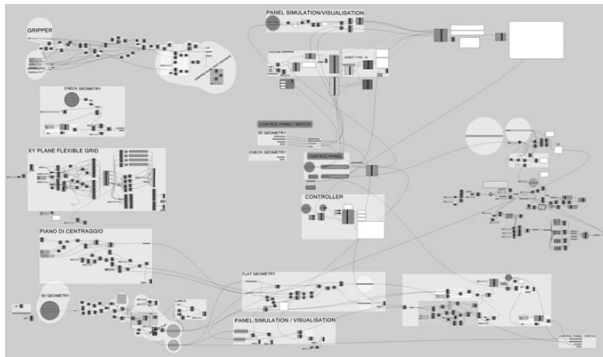


Figura 4. Plataforma de diseño algorítmico canvas - Grasshopper for Rhino. Indexlab, 2010, Politecnico di Milano. Ruttico, 2017.

Ligado al proceso de simulación se requiere de un flujo de trabajo (figura 5), esto ofrece la capacidad de visualizar la totalidad del proyecto como la de ejecutar soluciones ágiles del proceso [6]. El diseño de estos flujos de trabajo en el ambiente de Grasshopper permite modular las acciones específicas para cada instancia, así mismo provee de una retroalimentación de acuerdo a los vínculos de estas instancias y cómo van relacionadas desde el ambiente digital al real o viceversa (figura 6). La creación de un flujo de trabajo define la metodología para elaborar las plataformas de simulación y su integración con el ambiente real, a través de la proyección del proyecto se pueden desglosar diversos criterios y relaciones clave para su ejecución.

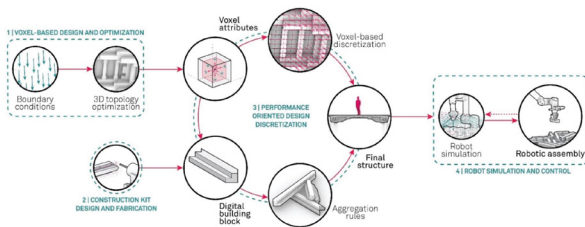


Figura 5. Esquema flujo de trabajo computacional el cual integra diseño, fabricación y proceso de ensamblaje. Naboni, Kunic, Kramberger & Schlette, 2021.

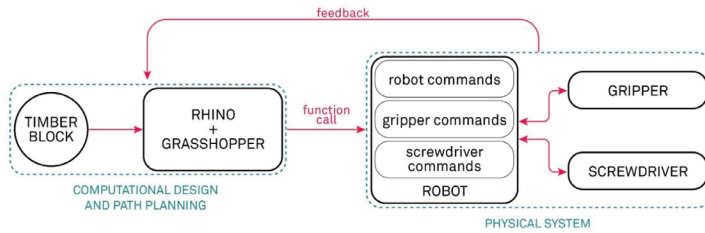


Figura 6. Simulación del robot y diagrama de control de flujo de trabajo. Naboni, Kunic, Kramberger & Schlette, 2021.

En la interacción con los robots, es esencial la visualización de los flujos de trabajo, las posiciones y el espacio de trabajo del robot [11]. Para los sistemas de operación de los robots se requieren de softwares especializados como lo es Rhinoceros/Grasshopper, que junto a sus complementos permiten explorar varios métodos de acuerdo a las necesidades específicas de su uso y programación (figura 7).

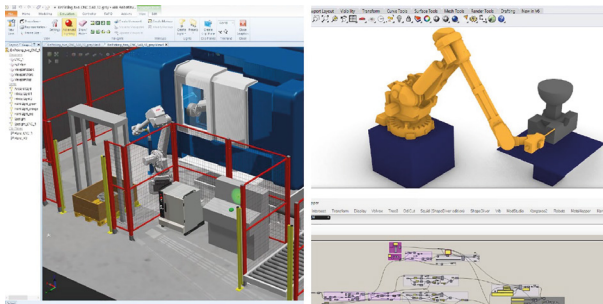


Figura 7. (Izquierda) RobotStudio con celda de trabajo robótica. (Derecha) Simulación brazo robótico en Mcneel Rhinoceros & Grasshopper 3d. Pedersen, Neythalath, Hesslink, Søndergaard & Reindhardt, 2020.

El uso del lenguaje de programación visual (*Visual programming language, VPL*) es cada vez más frecuente en arquitectura, ingeniería y construcción en relación a labores de diseño de estructuras y geometrías complejas; este lenguaje es una herramienta que permite expresar convenientemente los modelos paramétricos [18].

El conjunto de todas estas estrategias y herramientas buscan desarrollar al máximo las capacidades de trabajo de un robot industrial, permitiendo la visualización de análisis paramétricos del lenguaje de programación. Uno de los paramétricos críticos en la evaluación y configuración de las capacidades del robot industrial es su envolvente de trabajo (*Work envelope*) [27], tanto la envolvente máxima de las capacidades, como la envolvente efectiva de acuerdo a los fines e integración con otros elementos (figura 8).

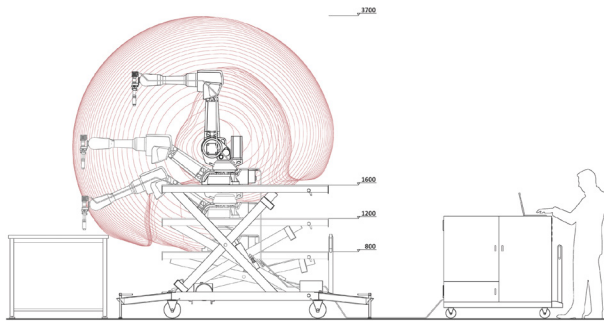


Figura 8. Vista en elevación del sistema móvil incluyendo la envolvente de trabajo en la brida desde el nivel fijo desde el suelo. Dritsas & Soh, 2019.

El robot se evalúa como una unidad, es decir, el conjunto de los elementos que colaboran en sus fines de trabajo y aquellos con los que interactúa y colisiona, son consideraciones pertinentes para la ejecución de una correcta simulación, el despliegue en un espacio concreto tridimensional para la planificación del movimiento óptimo de un robot industrial [27].

# ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

## Problema

Las simulaciones son un método práctico para visualizar y analizar ejecuciones de proyectos, el uso de robots nos brinda datos empíricos de sus acciones y prevén posibles fallos o incongruencias, si bien existe una variedad de investigaciones que nos demuestran la efectividad de su aplicación en el campo de la arquitectura y el uso de la madera, son proyectos de gran desarrollo que requieren de preparación, el equipo necesario y del conocimiento suficiente para comprender no solo aspectos propios de la arquitectura y la madera, sino también de los propios robots, programación y herramientas tecnológicas. Estos proyectos e investigaciones demuestran la aplicación y efectividad de los robots industriales, como las simulaciones y sistemas integrados en tiempo real que facilitan la ejecución y retroalimentación instantánea de las obras, pero más allá del fundamento teórico y metodologías para el uso y aplicación de robots industriales, todos los proyectos responden a una situación particular de uso y en las cuales no se clarifica el proceso interno de la programación en la escala de un nuevo usuario de la materia. Por esto el presente proyecto busca ejemplificar una de las tantas maneras de programar y desarrollar una plataforma de simulación en un área de aplicación en vías de desarrollo.

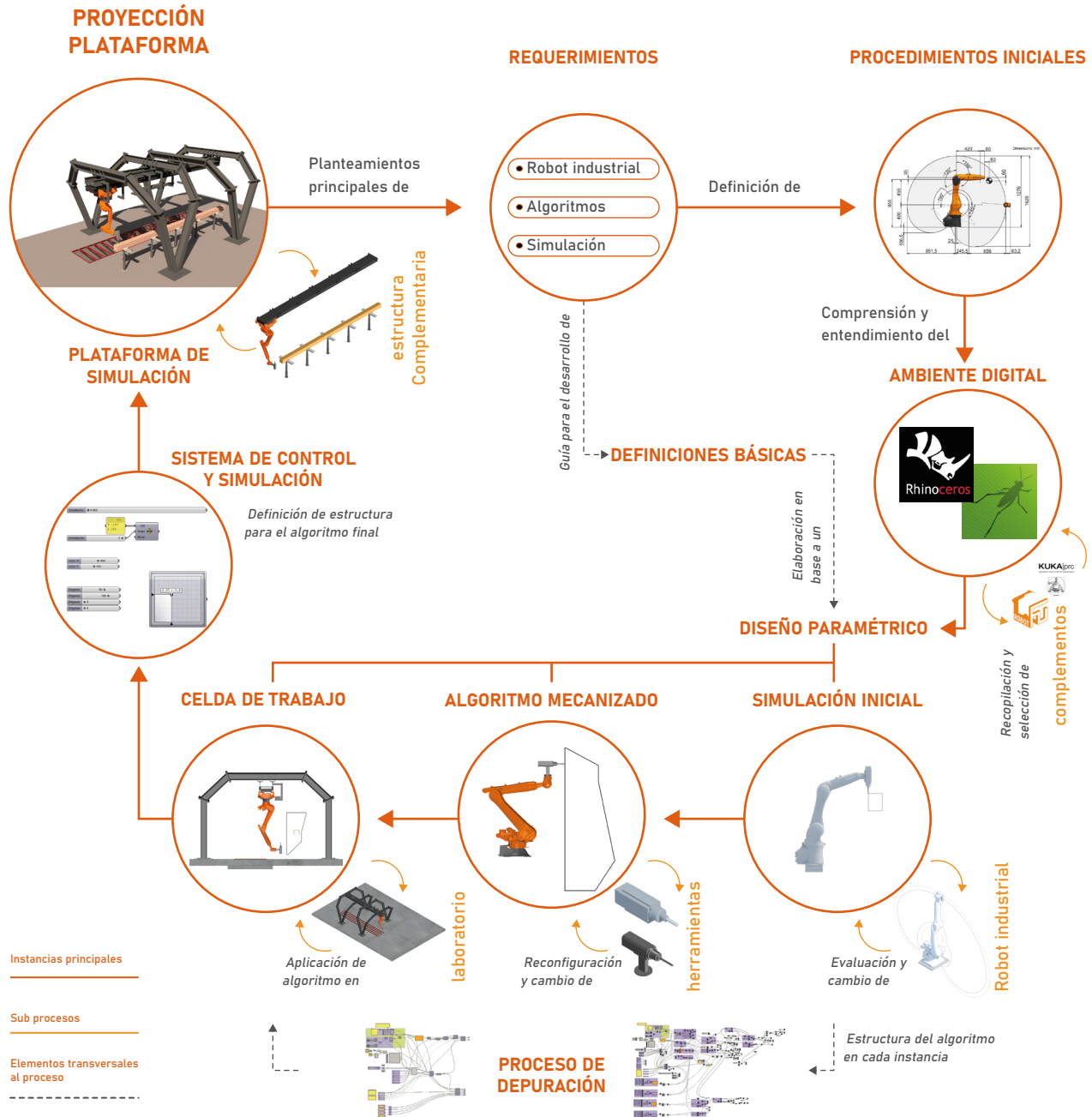
## Área de aplicación

Los laboratorios de fabricación robótica ahora están integrados en prácticas profesionales, instituciones educativas y centros de investigación en arquitectura, arte y diseño. Si bien se ha ampliado la aplicación de la fabricación robótica en los procesos de automatización, el desafío es expandir e influir en opciones para nuevos procesos de materiales en la fabricación robótica y el pensamiento de diseño [28].

La línea de investigación está orientada a aportar al desarrollo del área de robots del departamento de arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María, por medio de la capacidad para comprender y proyectar en el espacio tridimensional, con los recursos disponibles de la escuela, se busca dimensionar las capacidades de trabajo del robot industrial, haciendo uso de las herramientas digitales, aplicando y desarrollando conceptos para el diseño parametrizado y la construcción de algoritmos, y la manipulación de robots industriales aplicados a la carpintería robótica, añadiendo una mirada técnica sobre la elaboración de la plataforma de simulación, construyendo un vínculo interdisciplinar entre la arquitectura y el uso de robots industriales.

# METODOLOGÍA

El proyecto de plataforma de simulación se desarrolla en un entorno digital, en base a una proyección del producto final a elaborar, se determinan requerimientos y los agentes que involucran su desarrollo. Una vez establecidos los requerimientos, existe una instancia inicial para comprender y explorar el funcionamiento del ambiente digital y el robot industrial junto a sus características. Para la construcción de un entorno de simulación, se desarrollan algoritmos con el fin de obtener datos y graficar las capacidades de movimiento y mecanizado del robot, además de elementos adicionales para el control y apoyo de la plataforma, los cuales, al estar diseñados paramétricamente, se vinculan y unifican el sistema. A través de la plataforma Rhinoceros/Grasshopper y los complementos adicionales para elaborar el ambiente virtual, se exploran diferentes vías para obtener los resultados, con lo que se estructura el desarrollo en etapas de acuerdo a la complejidad e integración de elementos. Las etapas corresponden a los puntos de control en el diseño paramétrico que irán conformando un flujo de trabajo, estos puntos de control desarrollarán y complejizarán aún más cada instancia, para luego evaluar la simulación, depurar el funcionamiento del algoritmo construido y vincularlo con el proceso siguiente, para finalmente conformar un sistema unificado que permite el trabajo óptimo de una pieza de madera y llevar a cabo las labores de mecanizado a través de una plataforma de simulación para carpintería robotizada.



## Requerimientos de diseño

A fin de establecer un curso de acción, la construcción del proyecto de la plataforma de simulación necesita cumplir con una serie de requerimientos de acuerdo a la proyección y su enfoque.

- **Establecer condiciones y orientación del proyecto al trabajo de carpintería robotizada**
- **Utilizar recursos accesibles para el desarrollo del proyecto**
- **Desarrollo de algoritmo estructurado y modificable:**
  - Diseño parametrizado del proyecto
  - Criterios y definiciones para ejecutar secuencias lógicas
  - Agrupación de elementos de acuerdo a tareas y objetivos
- **Garantizar el funcionamiento de la plataforma de simulación:**
  - Las evaluaciones no deben presentar colisiones o conflictos
  - No se puede generar incongruencias o redundancias en la programación
  - Establecer controles y comandos para la operación de la plataforma
  - Proporcionar la visualización de las capacidad del robot
- **Evaluar y depurar la estructura del algoritmo y la plataforma de simulación**

The background of the slide features a semi-transparent, light gray illustration of industrial machinery. On the left side, a prominent orange robotic arm is shown in a curved position, reaching towards the center. The rest of the machinery consists of various structural beams, supports, and joints, creating a complex industrial framework. The overall aesthetic is clean and technical.

# **ENTENDIMIENTO DE LAS HERRAMIENTAS DIGITALES Y DEFINICIÓN DE PROCEDIMIENTOS INICIALES**

# COMPRESIÓN DEL AMBIENTE DIGITAL

Para el diseño y desarrollo de la plataforma de simulación es necesario el conocimiento y manejo de las herramientas digitales pertinentes para modelar, programar y evaluar un robot industrial y aquellos componentes que estén involucrados en el proceso.

En la industria creativa del diseño digital y aplicación de robots existen flujos de trabajo para interactuar con los robots, divididos en programación y ejecución, el primero es la visualización de la programación a través de Grasshopper y luego simulados de acuerdo a los complementos de control, la secuencia de ejecución es transferir la información al robot real [29], el proyecto se enfoca en la primera secuencia de programación para la simulación. Este desarrollo se sitúa bajo el software de modelación tridimensional Rhinoceros (ilustración 1), el cual permitirá la visualización de todo el proceso de la plataforma. Acompañado a esto se utiliza el complemento Grasshopper el cual dará soporte a la programación de la simulación (ilustración 2). Los programas Rhino/Grasshopper permiten parametrizar el diseño y virtualizar cualquier forma a través de diversas herramientas matemáticas [20].

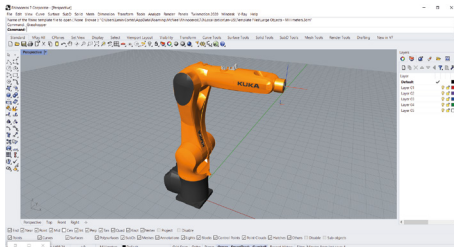


Ilustración 1. Modelador 3D Rhinoceros.  
Elaboración propia.

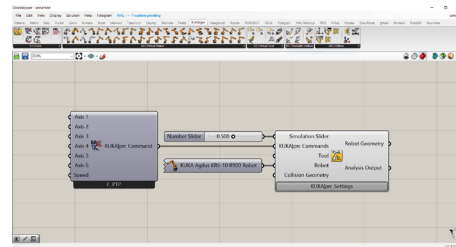


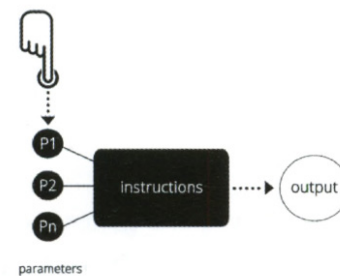
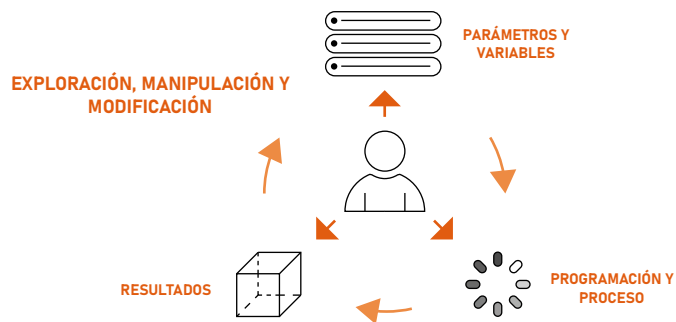
Ilustración 2. Programador visual Grasshopper.  
Elaboración propia.

Las ilustraciones muestran una programación básica ejecutada en Grasshopper para establecer un robot industrial (complemento KUKA|prc) y el modelador Rhinoceros permite visualizar dicha programación en su espacio virtual.

## Diseño paramétrico y algoritmos

El diseño paramétrico se basa a partir de condiciones geométricas y matemáticas, establecidas como parámetros, que por medio de un proceso de programación se logra obtener uno o más resultados de manera visual, en donde los parámetros pueden ser alterados para obtener una nueva serie de resultados para la comparación y toma de decisiones (Diagrama 1). El Diseño Algorítmico (*Algorithmic design, AD*) permite crear formas a través de los algoritmos, su inherente flexibilidad fomenta la exploración de un espacio de diseño más amplio, la automatización de las tareas de diseño y la optimización del diseño, lo que reduce considerablemente los costos del proyecto y el impacto ambiental [30].

La creación de un algoritmo simplifica la resolución de problemas, dividiéndolos en secuencias lógicas a través de instrucciones que manipularán la información de entrada, para un posterior análisis y generación de resultados como información de salida (Diagrama 2). El diseño asistido por algoritmos (*Algorithmic aided design*) aprovecha la naturaleza de las computadoras explotando las características de la fabricación digital, ampliando el dominio de la modelación digital racional [15]. Aunque los algoritmos a menudo se estudian de manera abstracta, aprovechan este potencial que tiene la capacidad de realizar tareas de acuerdo a un conjunto de instrucciones [31].



Estos procesos son secuencias capaces de una retroalimentación inmediata, al ser un lenguaje de programación visual permite la observación de los resultados al momento de ejecutar los algoritmos, introducir la información necesaria para su procesamiento y generar la información de salida (Diagrama 3), a esto se le denomina programación en tiempo real, un sistema capaz de arrojar los resultados inmediatos de un algoritmo, limitado únicamente por la capacidad de procesamiento de la fuente [32].

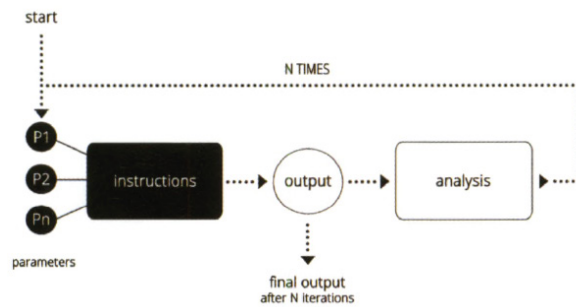


Diagrama 3. Representación conceptual del acercamiento a la búsqueda de formas. Tedeschi, 2014.

## Recursos del Área Robots en Arquitectura USM

La plataforma está enfocada en los recursos que posee el departamento de arquitectura.

Los recursos se encuentran divididos en dos secciones:

**Hardware:** Aquellos elementos tangibles que se utilizarán en el proceso de diseño de la plataforma de simulación

**Software:** Corresponden a las herramientas digitales que posibilitarán la creación del gemelo digital de los elementos físicos y virtualizarán la plataforma de simulación.

**Hardware.**

- Robots industriales
  - KUKA Agilus KR6 R900
  - KUKA KR210 R3100-2
  - Universal Robot UR5 (2 unidades)
- Herramientas
  - Electro husillos (60mm y 200mm)
- Celda de trabajo
  - Laboratorio de construcción y manufactura robotizada

**Software.**

- Modelador 3D Rhinoceros
  - Complemento incorporado Grasshopper (versión Rhino 7)
- Complemento KUKA|prc

## Robots industriales y complementos

La implementación de tecnologías digitales y el uso de robots para la fabricación y construcción han posibilitado diseños innovadores en arquitectura; los robots industriales son un beneficio para el ecosistema de la arquitectura, ingeniería y construcción, tomando en cuenta estructuras sustentables, flexibilidad, personalización, estandarización y la interoperabilidad de la información [33].

Para lograr este desarrollo es necesario comprender y manipular los robots industriales, a través de la plataforma de simulación se busca entender las capacidades y cumplir con una serie de requisitos para el manejo óptimo de estos.

En el ambiente de programación de Grasshopper se encuentra un “*plugin*” o complemento para la manipulación de robots industriales en un entorno digital que es KUKA|prc, los brazos robóticos aplicados a la arquitectura operan comúnmente a través de un software específico, con la programación de un robot en particular [8]. Para la elaboración de la plataforma es necesario explorar otros complementos que faciliten la manipulación e interacción con el robot en el entorno digital, por lo que se plantean requerimientos para la selección de los complementos que más se adecuen a los lineamientos del proyecto.

## Requerimientos de los complementos

- Soporte para robots industriales:

La biblioteca de robots integrada en los complementos debe coincidir con los robots de trabajo disponibles (KUKA y UR).

- Composición eje externo:

El eje externo simula un riel sobre el cual se posicionarán los robots de trabajo, esto con la finalidad de otorgar un grado de libertad extra para su desplazamiento.

- Incorporar elementos personalizados:

Se refiere a la incorporación de geometrías realizadas en Rhinoceros o Grasshopper que puedan ser montadas en el robot como herramientas de trabajo.

- Reconocimiento y manipulación de geometrías:

Las geometrías por las cuales está compuesto el robot deben de ser reconocibles dentro del entorno de Grasshopper, que puedan interactuar con otras geometrías realizadas o funciones de análisis proporcionadas por Grasshopper.

- Conexión remota:

Esto con la finalidad de programar los comandos asignados al robot y que sean ejecutables para un posible entorno real.

## Recopilación de complementos



Figura 9. RFD.  
MXM-Architects.



Figura 10. HAL Robotics.  
HAL Robotics.



Figura 11. Cobra  
Easyrobot.



Figura 12. Scorpion.  
Scorpion.

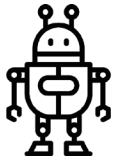


Figura 13. Machina.  
Garcia del Castillo.



Figura 14. Robots.  
Visose.



Figura 15. KUKA|prc.  
Robots in architecture.

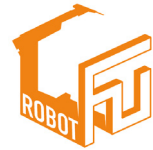


Figura 16. FURobot.  
Fab Union.

## Selección de complementos

Se evalúan las opciones con el objetivo de determinar el complemento más favorable de acuerdo a los recursos y herramientas disponibles.

Con la exploración de los complementos recopilados se opta por 2 opciones viables para el desarrollo del proyecto de la plataforma de simulación (anexo A).

## Complemento 1

**KUKA|prc**  
parametric robot control for grasshopper



Versión.  
Community\_20210714

### Criterios de selección.

- Desarrollo arquitectura USM
- Incorporación de herramientas personalizadas
- Trazado y movimiento optimizado para herramientas personalizadas

### Campo de aplicación.

- Evaluación de mecanizado

## Complemento 2



Versión.  
v 08.11

### Criterios de selección.

- Biblioteca incorporada KUKA/UR
- Geometrías definidas para análisis
- Incorporación de geometrías personalizadas
- Herramientas y componentes en versión gratuita

### Campo de aplicación.

- Evaluación de mecanizado
- Interfaz de trabajo

Furobot soporta una variedad de robots y para mantener una uniformidad en los parámetros de sus posiciones, utiliza la convención oficial designada por los respectivos fabricantes (34).

## Definiciones básicas

La elaboración de los algoritmos necesarios para el funcionamiento de la plataforma de simulación requiere del análisis y reconocimiento de las capacidades del robot industrial, y si bien estará elaborado en un ambiente virtual, se deben tener consideraciones físicas del mundo real aplicadas en este ambiente. Con la intención de integrar el gemelo digital de los elementos de trabajo al mundo real, se definen criterios básicos para comenzar la exploración y comprensión tanto del robot industrial como las posibilidades que brinda el diseño digital. Por otra parte, la definición de criterios sigue el principio del diseño paramétrico, estableciendo una secuencia lógica y racional para procesar la información y generar resultados, la definición de criterios es un mecanismo para guiar el desarrollo de la plataforma de simulación.

Como guía de desarrollo del algoritmo, se definen los siguientes criterios básicos:

- Definir un sistema de referencia en el espacio
- Permitir el cambio de orientación del robot en el espacio
- Integrar las geometrías que interactúan con el robot en el desarrollo del algoritmo
- El algoritmo debe estar parametrizado y no depender de definiciones externas

# SIMULACIÓN INICIAL

Esta primera instancia del proceso de la plataforma de simulación busca replicar condiciones sobre el movimiento y alcance del robot industrial, comprender las características de desplazamiento del robot en relación a labores de fresado y la integración con geometrías externas para un desarrollo integral de la plataforma.

## Replicación de características

La intención de replicar una ficha técnica confeccionada por el fabricante (fig. 9 [35]) es explorar las capacidades para desarrollar un gemelo digital, obteniendo también un modelo en un ambiente interactivo y manipulable, analizando y entendiendo las piezas y dimensiones del robot industrial, además de sentar una base para los siguientes procesos de programación. La programación en tiempo real permite a los usuarios explorar relaciones trabajando interactivamente en el modelo paramétrico y analizando los resultados [32].

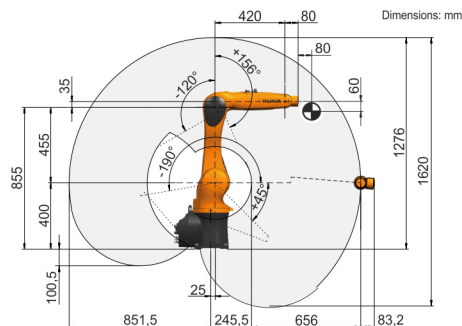


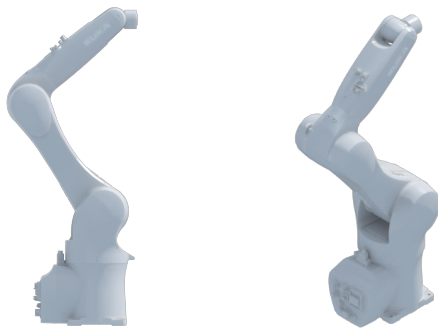
Figura 17. KR6 R900 sixx Workspace graphic. KUKA robots.

## Procedimientos

Para la evaluación y entendimiento de las funciones básicas de los robots industriales, se componen diferentes etapas que cumplan con los requisitos anteriormente definidos a través de la exploración de las funciones en Grasshopper.

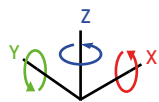
### Robot de desarrollo

Para el desarrollo y comprensión inicial se utiliza un robot KUKA Agilus KR6 R900, en donde se analizan sus geometrías, ejes de rotación y grados de libertad.



*Ilustración 3. KUKA Agilus KR6 R900.  
Elaboración propia.*

Los grados de libertad de un robot industrial vienen determinados por la cantidad de ejes en los que puede rotar, en el caso del Agilus KR6 el número de ejes de rotación corresponden a 6, por lo que sus grados de libertad son 6.



Componente	Sentido de rotación	
Eje 6		
Eje 5		
Eje 4		
Eje 3		
Eje 2		
Eje 1		
Base		

Ilustración 4. Composición Agilus KR6.  
Elaboración propia.

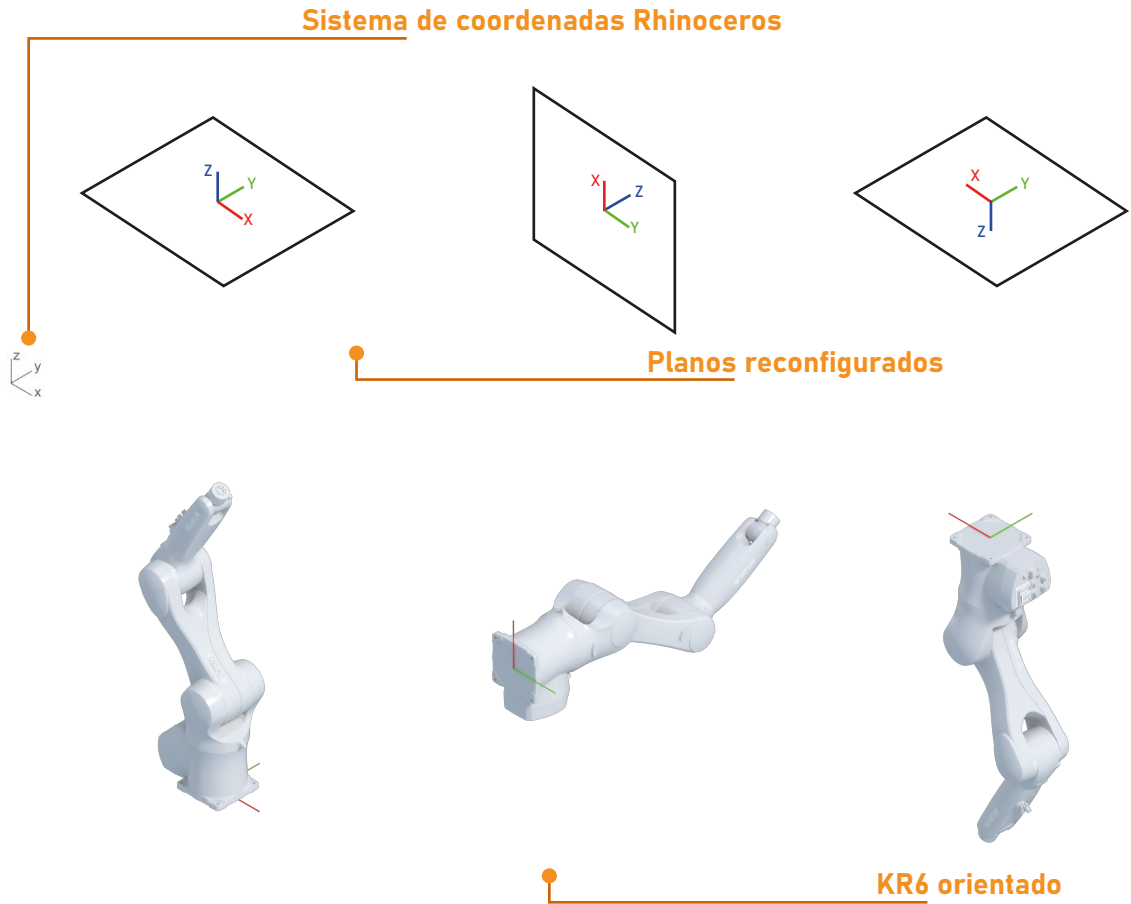
## Planos de orientación

Corresponde al sistema de referencia sobre el cual está situado el robot para determinar su ubicación en el espacio, por defecto corresponde a un plano X,Y, con origen en el centro de su base en el punto 0,0,0 de dicho plano, en el sistema de referencias del entorno de Rhinoceros.



*Ilustración 5. Referencia en el espacio de Rhinoceros.  
Elaboración propia.*

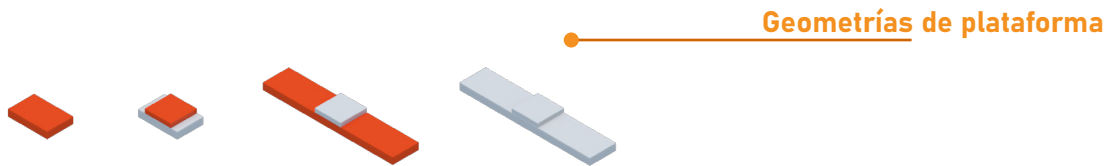
Dentro del sistema de referencia de Rhinoceros se reconfigura la orientación del plano de origen que posiciona al agilus KR6 en el espacio virtual, se aplica un ajuste a una serie de planos que busca crear un sistema independiente de evaluación, donde al seleccionar un plano de origen los valores de X,Y,Z sean invariables y se encuentren referenciados a la orientación del plano del robot. Estos cambios de posición permiten orientar al brazo robótico según se estime conveniente, ya sea en piso, muro o techo, creando así un sistema de coordenadas propia para el robot de evaluación (anexo B).



*Ilustración 6. Configuración de planos.  
Elaboración propia.*

## Eje externo

Parte de la configuración del robot industrial y el desarrollo de la plataforma de simulación, es incorporar elementos adicionales para integrar el sistema, la adición de un eje externo brinda un soporte para el posicionamiento del robot e incrementar las posibilidades de desplazamiento, añadiendo un grado extra de libertad a su composición, así como también integrar estas geometrías y replicar un gemelo digital correspondiente a la realidad.



### Geometrías de plataforma

*Ilustración 7. Diseño de geometrías para eje externo.  
Elaboración propia.*

### Montaje KR6

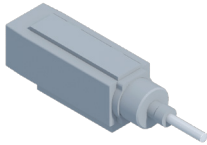


*Ilustración 8. Agilus KR6 en eje externo.  
Elaboración propia.*

Las geometrías que componen este eje externo, permiten el desplazamiento sobre la plataforma simulando un riel. El principio consta de dos elementos, uno fijo y otro variable que se desplaza sobre su largo, estos elementos pueden ser geometrías diseñadas en Grasshopper o incorporando diseños realizados en Rhinoceros y traducirlos al formato de geometría en Furobot.

## Herramienta

La herramienta base para completar el robot de trabajo es un electro husillo utilizado en el departamento de arquitectura. La herramienta está diseñada en Grasshopper y configurada para el complemento KUKA|prc, al igual que en el proceso del eje externo, las geometrías pueden ser incorporadas al complemento de trabajo Furobot.

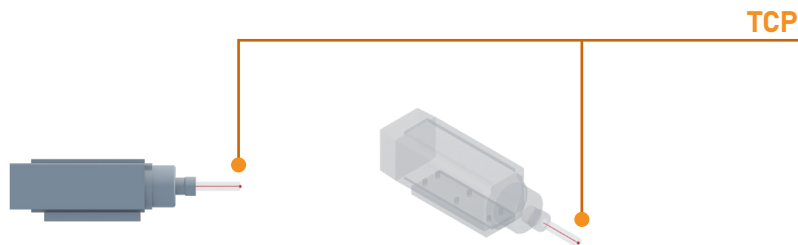


*Ilustración 9. Electro husillo (60mm).  
Elaboración propia.*



*Ilustración 10. Montaje electro husillo en agilus KR6.  
Elaboración propia.*

Se realiza un análisis geométrico del electro husillo para determinar el “Tool center point” (TCP) o punto central de la herramienta, elemento guía para el trazado de las operaciones de trabajo que puede realizar el robot.



*Ilustración 11. Análisis TCP electro husillo (60mm).  
Elaboración propia.*

## Eje de referencia

Con el reconocimiento de las partes que componen el Agilus KR6, se establece un componente clave para reconstruir la envoltura de trabajo (*Work envelope*) trazadas por el fabricante, en conjunto a las especificaciones de los radios de giro de cada eje, a través del algoritmo en desarrollo es posible interactuar con piezas específicas del robot industrial y establecer un punto referenciado en el espacio para recrear dicha envoltura y comprender sus capacidades en el espacio tridimensional.

De acuerdo a las especificaciones, el centro del eje 5 simboliza el límite de desplazamiento del robot, mediante el algoritmo se determina la ubicación de dicho punto para desarrollar la interfaz que grafique la envoltura de trabajo definida en el documento (fig. 17).

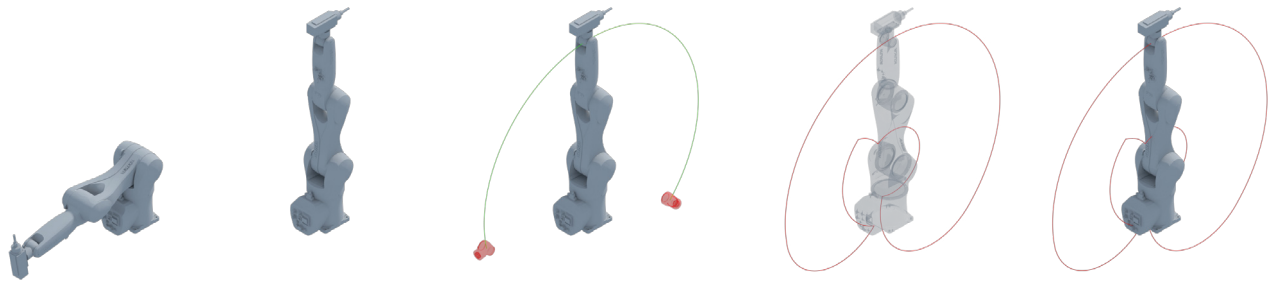


Ilustración 12. Definición punto central eje 5.  
Elaboración propia.

**Punto de trazado eje 5**

## Área de trabajo

Una vez determinado el punto de referencia, a través de la evaluación de diferentes posiciones de acuerdo a los radios de giro límites del robot y sus ejes, se establecen puntos en el espacio para conformar la envoltura que determinará el área máxima de trabajo.



### Evaluación de posiciones

*Ilustración 13. Evaluación de posiciones para envoltura de trabajo.  
Elaboración propia.*

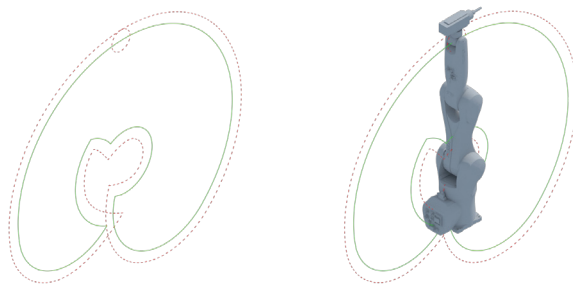
## Área extendida

El área extendida corresponde a la fracción de alcance adicional del robot, el área anteriormente definida corresponde al punto central del eje 5, lo cual no representa el alcance potencial que podría brindar el robot.

Esta área adicional se calcula en base al TCP por el cual se desplaza el robot. Para el caso de las características predeterminadas de un robot industrial, el TCP se posiciona en el eje 6, donde se acopla a otros elementos externos para aumentar las capacidades de trabajo del robot.



*Ilustración 14. Configuración de área extendida.  
Elaboración propia.*

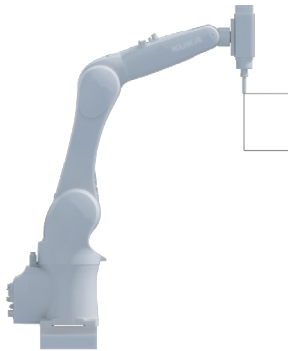


## Área óptima de trazado

Una vez completada la secuencia básica de análisis, se procede a realizar una evaluación manual de las capacidades de trazado efectivo. Esta evaluación corresponde a un trazado de una sección rectangular de ancho por alto indefinido, que mediante la exploración de las capacidades de trazado se busca determinar.

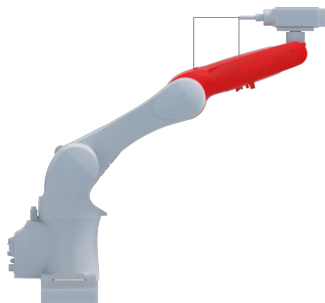
Para aquello se definen criterios que debe cumplir el trazado.

- Aproximación ortogonal a la figura.
- No generar incongruencias ni colisiones en todo el trazado.
- Trazado a través de las 4 aristas de la figura.

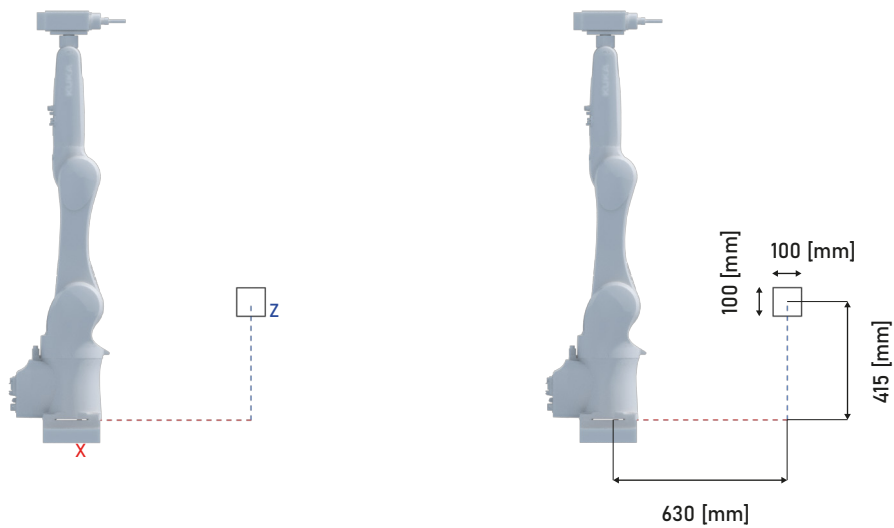


*Ilustración 16. Exploración área óptima agilus KR6.  
Elaboración propia.*

La posición de la figura está referenciada en un plano con valor X,Z, con origen 0,0,0 en el centro de la base del robot. El sistema de referencia cumple con las condiciones de los planos de orientación y la posición del robot, por lo que los valores obtenidos están situados en el sistema de referencia interno del mismo robot.



*Ilustración 17. Colisión en la exploración de capacidades.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 18. Resultados exploración de área optima.  
Elaboración propia.*

## Cambio de robots

Para evaluar el funcionamiento del algoritmo básico, se cambian los robots de evaluación replicando el proceso, en esta instancia para el KUKA KR210 R3100-2 y el UR5, manteniendo los elementos de desarrollo inicial (geometrías de la plataforma y herramienta de trabajo).

Se realiza el mismo procedimiento para los cambios de robot, considerando las diferentes capacidades y dimensiones, ajustando las áreas de trabajo, el área extendida y realizando una evaluación manual para determinar el trazado óptimo para cada robot.

### KR210 R3100-2

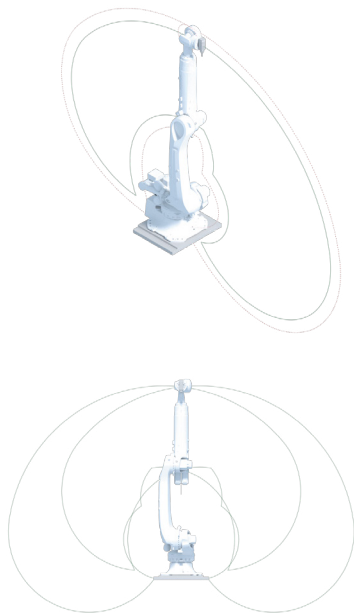


Ilustración 19. Aplicación de algoritmo base en KR210.  
Elaboración propia.

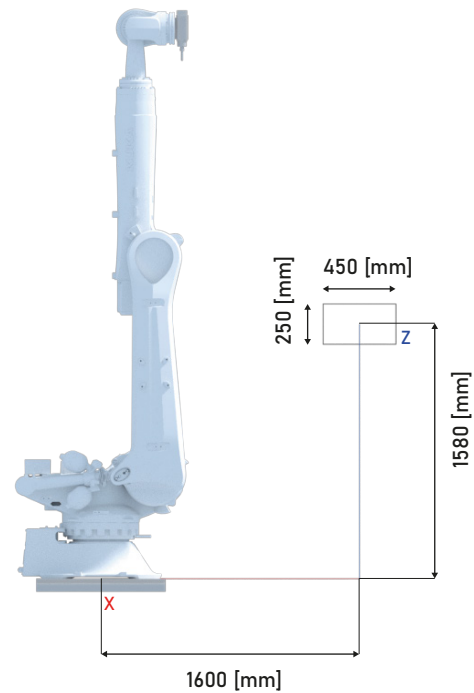
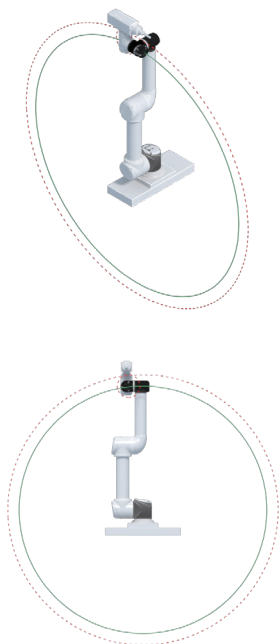
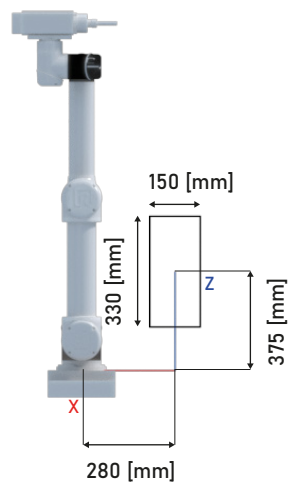


Ilustración 20. Resultados exploración de área óptima en KR210.  
Elaboración propia.

## UR5



*Ilustración 21. Aplicación de algoritmo base en UR5.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 22. Resultados exploración de área óptima en UR5.  
Elaboración propia.*

## Conclusiones parciales

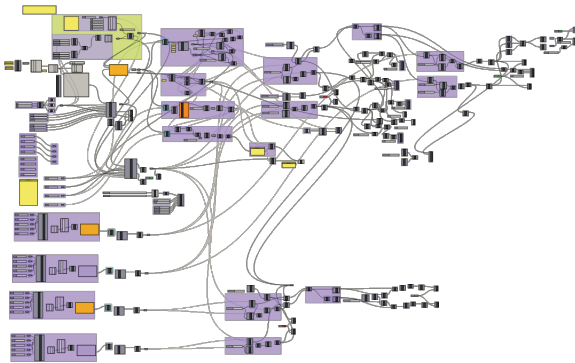
Si bien las dimensiones, características y capacidades de los robots evaluados están disponibles por el fabricante, estos sirven como antecedentes para la toma de ciertas decisiones, guiando el proceso y reconociendo las características principales de los propios robots, lo cual fija un curso de acción, sin embargo, acciones como el diseño del algoritmo, que permite la visualización tridimensional, el montaje de herramientas y el desplazamiento óptimo de los robots no están disponibles en aquella documentación.

El algoritmo integra todos estos componentes para diseñar entorno al robot, alterando y analizando sus componentes, creando un ambiente digital interactivo que permita explorar diferentes instancias de aprendizaje y entendimiento de los robots industriales. Una vez se cuenta con las herramientas y el material necesario, el desarrollo del algoritmo en Grasshopper requiere de organización y un manejo en los comandos que proporciona para el desarrollo de diversos análisis, creación de elementos (puntos, planos, geometrías, curvas, etc.), la recopilación e interpretación de datos y la manera en que se resuelven, puesto que existen diferentes alternativas para realizar una acción. Es por ello que la creación del algoritmo es un constante entorno de aprendizaje tanto del mismo algoritmo como de los recursos con los que se trabajan, los robots, los complementos e incluso el software de Rhinoceros.

## Depuración

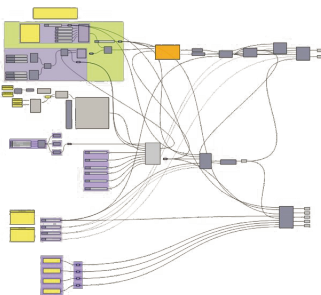
Se analiza el conjunto del algoritmo desarrollado, con la intención de generar un diseño organizado y de mejor entendimiento.

El tener una estructura organizada y debidamente distribuida, facilita el entendimiento y la edición del algoritmo, es por ello que se depura el diseño de este mismo. Se necesita de un orden comprensible para identificar la programación y las entradas de información de los procesos en Grasshopper. A medida que se extiende el desarrollo del algoritmo es necesario reinterpretar, ajustar o modificar ciertos parámetros en la ecuación, por lo que todo el proceso estará sometido a constantes cambios para lograr un trabajo claro y de fácil comprensión.



*Ilustración 23. Algoritmo base.  
Elaboración propia.*

Se agrupan los elementos por objetivo de desarrollo y sus resultados, creando componentes que albergan el conjuntos de programación, señalizando la entrada y salida de datos necesaria para su funcionamiento, evitando tener un exceso de comandos en pantalla y en el caso de que se requiera modificar algún componente, se pueda acceder al conjunto específico de la programación.



*Ilustración 24. Algoritmo base depurado.  
Elaboración propia.*

A 3D rendered image of an industrial robotic arm, colored in a bright orange, mounted on a complex grey metal frame. The arm is positioned vertically, with its end effector pointing downwards. The background is a plain white color. The text is overlaid on the upper portion of the image.

# **BASES PARA EL DESARROLLO DE UN ALGORITMO DE MECANIZADO FUNCIONAL**

# ROBOT DE EVALUACIÓN

La replicación de una envoltura de trabajo y exploración de funciones de mecanizado es el preámbulo en el desarrollo de algoritmos, con su efectividad comprobada en varios robots es posible iniciar un nuevo proceso centrado en el robot de evaluación para la plataforma de simulación y crear un entorno virtual con un gemelo digital concreto de las capacidades y herramientas que envuelven al robot industrial.

La siguiente etapa está orientada a elaborar los algoritmos en base al robot KUKA KR210 R3100-2, implementado criterios específicos para la exploración de sus capacidades y el funcionamiento correcto de la programación (anexo C).

## Configuración KR210 R3100-2

Parte de la creación de la plataforma de simulación es comprender los agentes que están involucrados, así como las posibilidades que brindan los complementos y el desarrollo de los algoritmos, para ello es necesario conocer como está compuesto el KUKA KR210 y configurar este robot a las condiciones del proyecto (fig. 18. [36]).

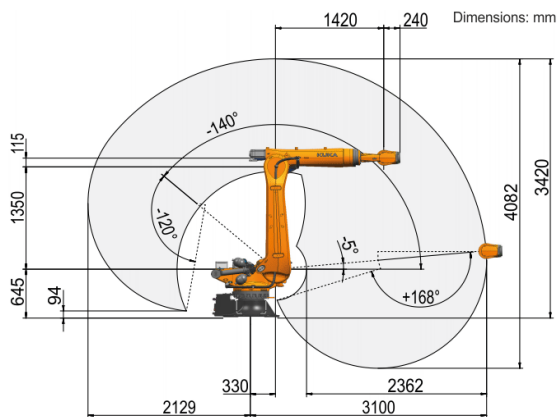


Figura 18. KR210 R3100-2 Gráfica del campo de trabajo. KUKA robots.

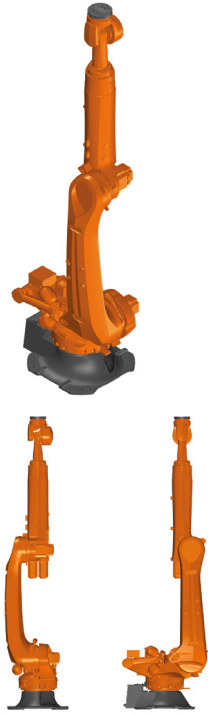


Ilustración 25. KUKA KR210 R3100-2, visualizaciones.  
Elaboración propia.



Componente	Sentido de rotación	
Eje 6		
Eje 5		
Eje 4		
Eje 3		
Eje 2		
Eje 1		
Base		

Ilustración 26. Composición KR210.  
Elaboración propia.

## Herramienta de trabajo

Se realiza un cambio en la herramienta efectiva de trabajo, el electro husillo utilizado (60mm) inicialmente es reemplazado por uno de mayores dimensiones (200mm). Gracias a los procesos de optimización se analiza la herramienta para determinar su nuevo TCP y mejorar el proceso del algoritmo.

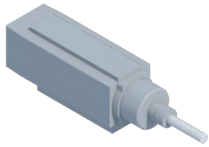


Ilustración 27. Electro husillo inicial (60mm).  
Elaboración propia.

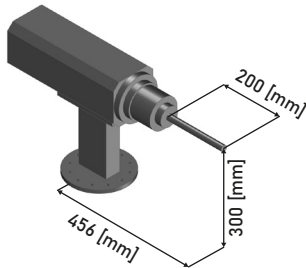


Ilustración 28. Nuevo electro husillo (200mm).  
Elaboración propia.

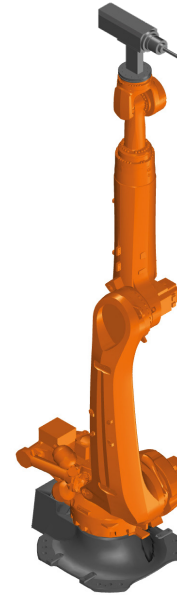
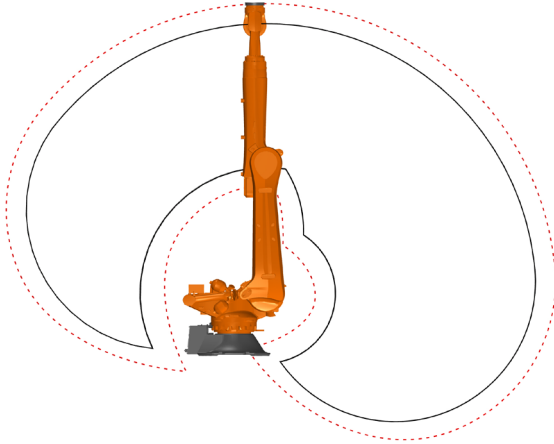


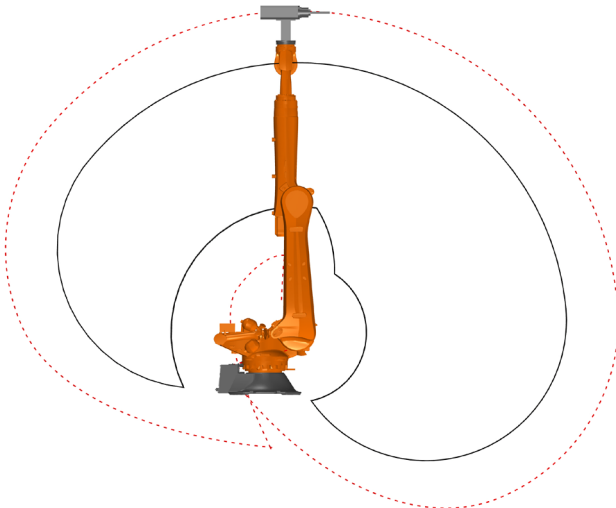
Ilustración 29. Incorporación herramienta.  
Elaboración propia.

## Área de trabajo

Con el cambio de herramienta, las capacidades de trabajo del KR210 se ven modificadas, bajo esta condición, se modifica su área de trabajo extendida.



*Ilustración 30. Área de trabajo predeterminada KR210.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 31. Reconfiguración área extendida KR210.  
Elaboración propia.*

## Mecanizado

En esta instancia la exploración del mecanizado busca establecer un resultado de una sección de ancho por alto, al igual que en el primer proceso exploratorio. Para esta parte del proceso, la obtención de los resultados se plantea mediante la definición de criterios lógicos, que, a pesar de seguir siendo un proceso manual para producir una figura visible, no sigue condiciones aleatorias, lo cual posibilita el progreso del algoritmo para automatizar la resolución de una figura variable en el espacio de trabajo del robot industrial.

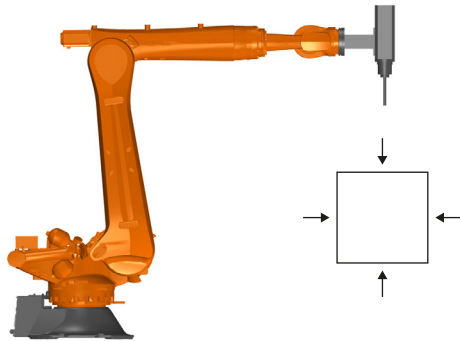
Criterios de la etapa:

- Definición de un sistema de coordenadas en el plano XZ, con origen 0,0,0 en el centro de la base del robot.
- Aproximación ortogonal a la figura.
- Desplazamiento de 3 aristas entorno a la figura
- Orientación del trazado

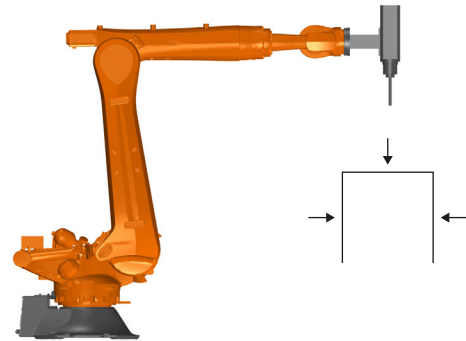
## Crterios

### Desplazamiento

En el proceso de exploración inicial, se establece un trazado a lo largo de las 4 aristas de la figura, con el fin de ajustar la precisión y aproximación a una posible instancia real, los análisis del mecanizado se realizan en torno a 3 de las 4 aristas de la figura resultante, teniendo en cuenta que dicha figura se pueda sustentar en el espacio.



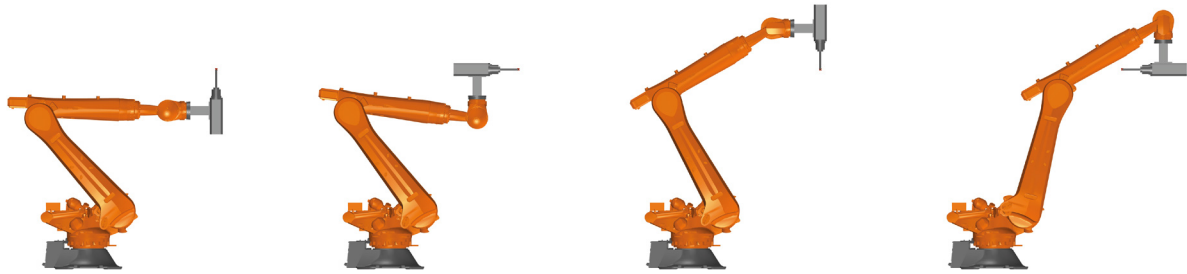
*Ilustración 32. Desplazamiento de 4 aristas.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 33. Desplazamiento de 3 aristas.  
Elaboración propia.*

### Orientación

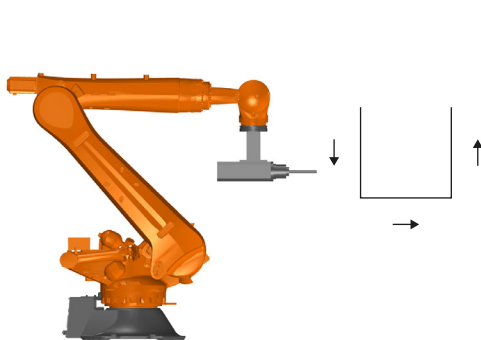
La orientación de mecanizado se refiere a la posición y dirección con la que se efectúa. Así como se realiza la definición de un nuevo trazado para el mecanizado, también es necesario establecer la orientación con la que se realiza, lo que afecta directa y significativamente las capacidades de trabajo. Para el proceso inicial la orientación se define en 2 valores para la exploración de las zonas de trabajo, las cuales van relacionadas directamente con las condiciones de evaluación.



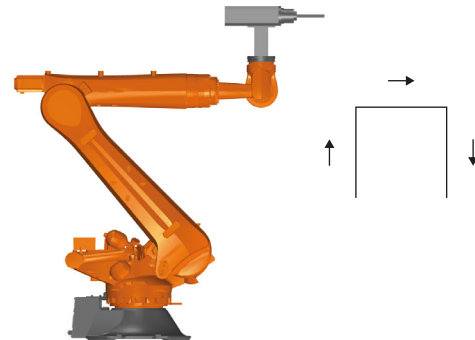
*Ilustración 34. Demostración de capacidades.  
Elaboración propia.*

De acuerdo a la orientación del mecanizado la configuración de la posición del robot varía para un mismo punto referenciado en el espacio.

Si bien se permite manipular el ángulo de cada eje del robot, se estandariza y limita las posibilidades de desplazamiento para simplificar el proceso de trazado y evitar una saturación de datos. Con la aplicación de estas reglas y condiciones se pretende crear un algoritmo estandarizado y organizado.



*Ilustración 35. Posición orientación 0.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 36. Posición orientación 1.  
Elaboración propia.*

## Condiciones de evaluación

Estas condiciones consisten en formar una serie de especificaciones que orienten el proceso de mecanizado, explorando las capacidades de trazados límites posibles según los criterios definidos, ubicando y definiendo diferentes puntos en el espacio de trabajo, restringiendo el área de desplazamiento a través de criterios relacionados directamente con las capacidades del robot y las mismas secciones de mecanizado, creando un proceso dependiente de estas condiciones. Para elaborar esta etapa de desarrollo del algoritmo, se definen 3 conceptos, que conforman una definición global para la evaluación y entendimiento de una propuesta de algoritmo para el mecanizado.

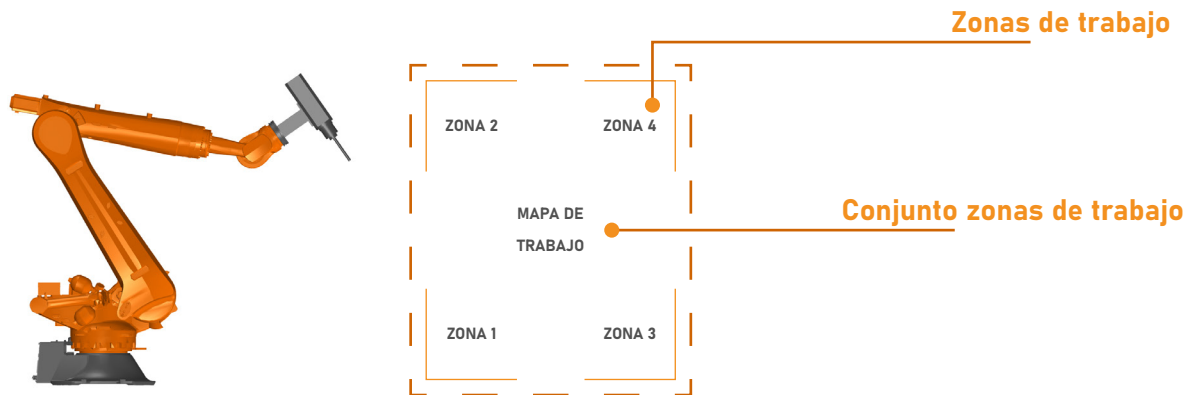
Conceptos clave:

- Zonas de trabajo
- Mapa de trabajo
- Criterios de definición

Por medio de esta etapa de busca comprender y limitar las capacidades de trabajo, sin dejar interpretación de datos y basarse en criterios para el mecanizado, puesto que lo siguiente será integrar estas condiciones con un ambiente virtual ya definido, utilizando como base la propuesta de algoritmo para el mecanizado.

## Zonas y mapa de trabajo

El proceso de zonificación y creación de un mapa de trabajo corresponde a una serie de evaluaciones manuales de mecanizado, situadas en posiciones límites con la intención de formar varios puntos de análisis, que se definen como zonas de trabajo. Cada trazado corresponde a una zona de trabajo y para esta etapa se deben situar 4 zonas consideradas como las límites para labores de mecanizado, las cuales comprenderán un espacio mayor de trabajo para su posterior análisis y desarrollo del algoritmo. Este conjunto de zonas define un mapa de trabajo, un área conjunta en donde el robot puede desplazarse y mecanizar, donde el ancho y el alto de la figura variará dependiendo del punto de evaluación dentro de este mapa de trabajo.



*Ilustración 37. Esquema zonas y mapa de trabajo.  
Elaboración propia.*

Las zonas de evaluación se establecen en 4 aristas las cuales compondrán una superficie correspondiente al mapa de trabajo, donde se encuentran todas las dimensiones de mecanizado posible en dicho espacio

## Criterios de definición

Para componer cada zona de trabajo, se establece una condición limitante para el desarrollo de la evaluación de cada una de estas, el proceso siguiente es evaluar manualmente cada una de ellas con el fin de conocer las capacidades en cada arista del mapa de trabajo a componer y obtener el resultado visible de dicho proceso. Al igual que en el caso de evaluación del área óptima de mecanizado, el robot no puede generar colisiones en sí mismo o con la figura resultante de la evaluación y del mismo modo el algoritmo no debe producir incongruencias en su programación.

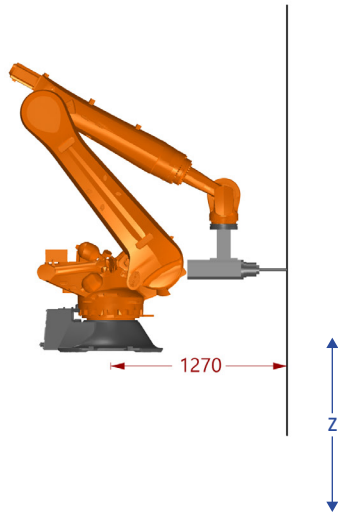
Los criterios se definen por medio de las mismas capacidades de desplazamiento del robot y son consecuentes con el desarrollo de los criterios de la siguiente zona de evaluación, con la intención de elaborar un proceso totalmente dependiente del primer resultado de evaluación para evitar la generación de datos y resultados aleatorios en el proceso del algoritmo y la plataforma de simulación.

Para procesos prácticos de evaluación, los valores se establecen en múltiplos de 5[mm] y las figuras de mecanizado se sitúan frente a la posición del robot.

### Zona 1

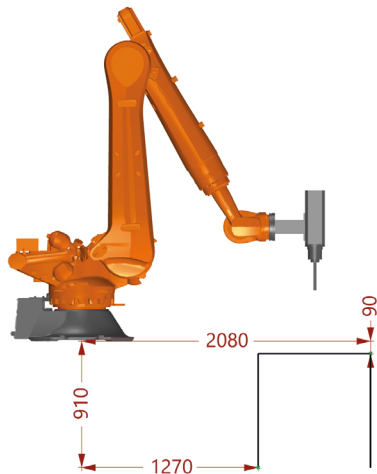
Los criterios para definir la evaluación de la zona 1 consideran la distancia mínima posible en el eje X respecto de la posición 0,0,0 referenciada del robot, siguiendo el orden establecido en el esquema de zonas y mapa de trabajo (ilustración 37), una vez determinada la distancia mínima se procede a localizar la primera zona de evaluación, esto mediante la evaluación del desplazamiento entorno al eje Z comprobando los movimientos límites permitidos para el robot.

El proceso se lleva a cabo de manera manual, visualizando el movimiento del robot e identificando zonas críticas de acuerdo a su desplazamiento para conformar los criterios con que se evalúan las zonas de trabajo.



*Ilustración 38. Criterios para zona 1.  
Elaboración propia.*

La exploración se realiza situando un eje vertical que se desplaza en la dirección X, orientando el mecanizado según corresponde a valor 0 o 1. Se evalúa a lo largo del eje Z la posición para establecer las zonas de conflicto con el robot para así determinar el punto inicial de la zona 1, dando como resultado un distanciamiento mínimo de 1270 [mm] en el cual el robot puede empezar a mecanizar ortogonalmente sin generar ningún tipo de conflicto.

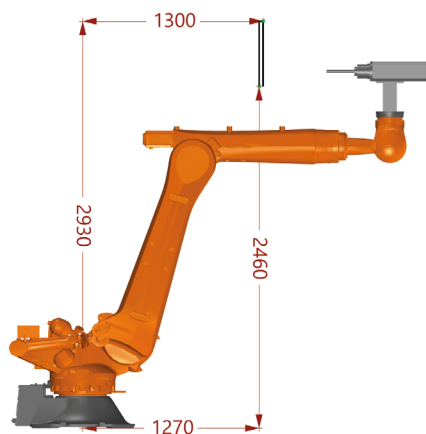


*Ilustración 39. Resultado evaluación zona 1.  
Elaboración propia.*

Manteniendo un recorrido del trazado en la distancia de criterio definida, se comienza a configurar la figura máxima posible, determinando el mayor desplazamiento posible en el punto inferior del eje Z y evaluando los conflictos generados al aumentar la distancia en el eje X.

## Zona 2

Empleando el criterio resultante de la zona 1, se evalúa en el eje Z la posición máxima que corresponde a la zona 2, con el cambio de orientación correspondiente con el fin de desarrollar la configuración de la nueva figura máxima posible, comprendiendo las capacidades, límites y conflictos en dicha posición.



Conservando la distancia de trazado definida por el criterio, se realiza la evaluación en el sector opuesto a la zona 1, demostrando el cambio de capacidades de desplazamiento entorno a un mismo eje de evaluación.

*Ilustración 40. Resultado evaluación zona 2.  
Elaboración propia.*

### Zona 3

Para el caso de evaluación de la zona 3, se dispone de un criterio diferente al realizado en la zona 1 y 2, pero que aún mantenga relación con estos. A través de los resultados obtenidos de la figura en la zona 1, se determina un nuevo eje de desplazamiento, para este caso se plantea un eje horizontal sobre el cual se desplaza el robot en X. Por medio de la figura resultante en la zona 1, se utiliza una de sus aristas como referencia para crear un transición de áreas de mecanizado, con esto se pretende configurar diversas dimensiones de mecanizado a través de las zonas de trabajo y que sea un proceso resultante y consecuente de los procedimientos bases desarrollados.

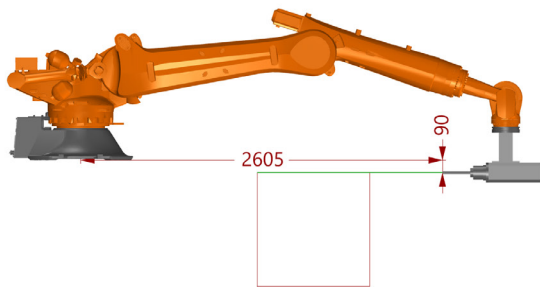


Ilustración 41. Criterios para zona 3.  
Elaboración propia.

Se establece como eje guía de evaluación, la arista superior de la figura resultante en la zona 1, donde se evaluarán las condiciones posibles de mecanizado. Desde este eje guía en dirección de X, se busca el punto más lejano de mecanizado y se posiciona como el inicio de la evaluación, en donde la figura resultante no debe de superar verticalmente este eje, es decir, la figura máxima posible tiene como límite superior el eje guía.

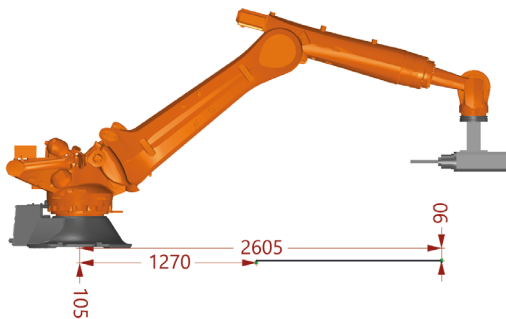


Ilustración 42. Resultado evaluación zona 3.  
Elaboración propia.

En el caso contrario a los criterios de la zona 1 y 2, esta evaluación busca el punto más lejano posible del robot, a partir del resultado de la zona 1, el criterio se vuelve dependiente para el desarrollo de la zona 3 y gracias a este punto inicial se traza el alto máximo posible y el ancho que coincide justamente con el límite definido en las zonas 1 y 2.

## Zona 4

Siguiendo con la lógica de evaluaciones y análisis de las zonas de trabajo, para determinar la figura de mecanizado en la zona 4, se replica el uso de exploración de las capacidades límites entorno al eje X, esta vez volviéndolo dependiente de la zona 2, ubicando el punto más lejano para la prueba de figuras posibles de mecanizado.

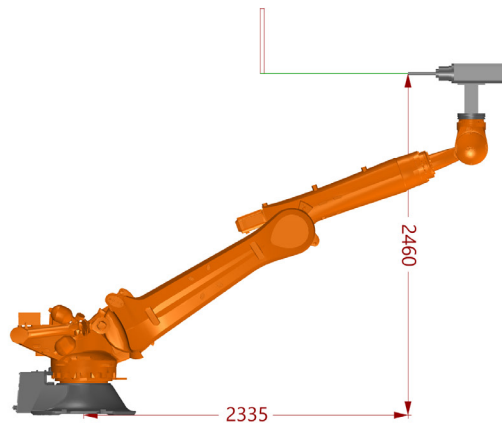


Ilustración 43. Criterios para zona 4.  
Elaboración propia.

El eje guía para la evaluación de la zona 4, corresponde a la arista imaginaria que genera la figura resultante de la zona 2, evaluando las condiciones límites desde a su extremo derecho más alejado del robot. Al igual que en el procedimiento anterior, el eje X crea un límite de mecanizado, donde cada figura posible no puede superar dicha línea verticalmente, tomando como inicio de evaluación, el punto más alejado en el eje X.

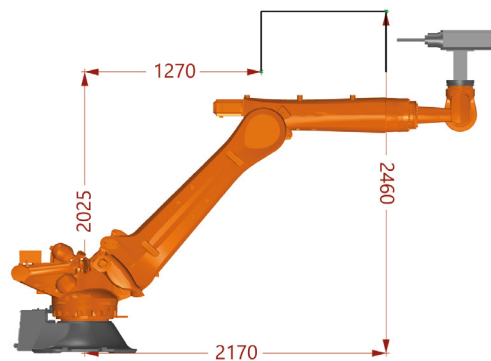


Ilustración 44. Resultado evaluación zona 4.  
Elaboración propia.

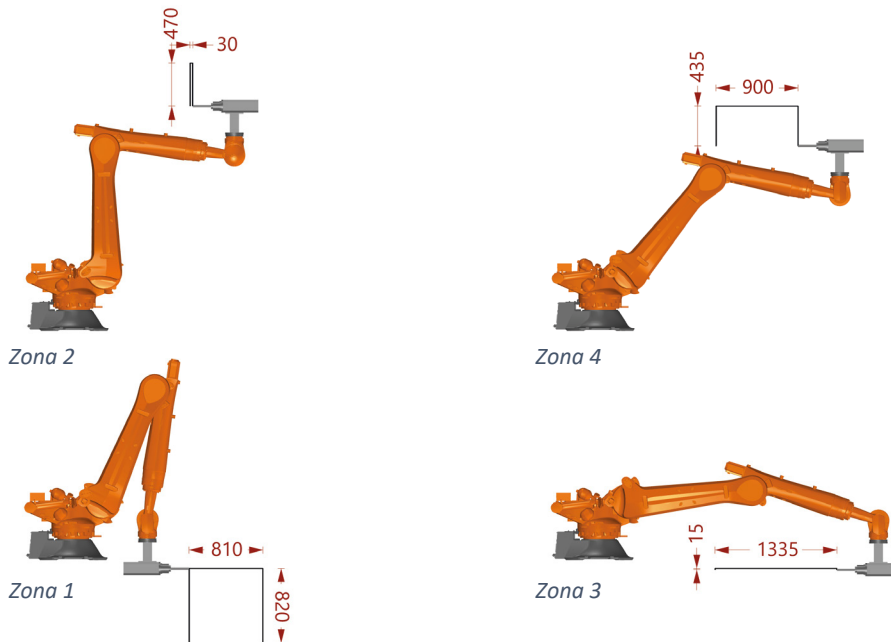
Una vez establecido el punto más alejado del robot, coincidiendo con la dependencia del resultado de la figura en la zona 2.

Para los resultados de la zona 4, el límite horizontal de la figura vuelve a coincidir con el criterio de evaluación inicial

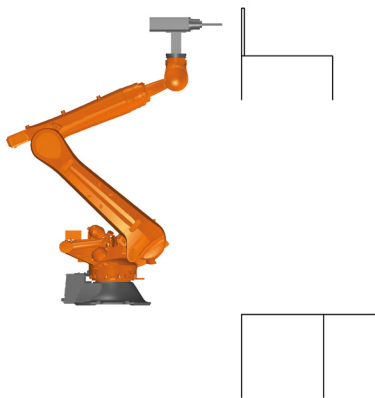
# CONSTRUCCIÓN DEL ALGORITMO

El mapa de trabajo se compone a través de la conjunción de vértices de todas las zonas evaluadas efectivamente. Esta etapa se desarrolla como principio de exploración, el cual solo determina zonas específicas de evaluación y un espacio generalizado para el trabajo de mecanizado, en el cual en un proceso siguiente se desarrollará una programación específica que determine las diversas figuras de mecanizado posible dentro de dicho espacio.

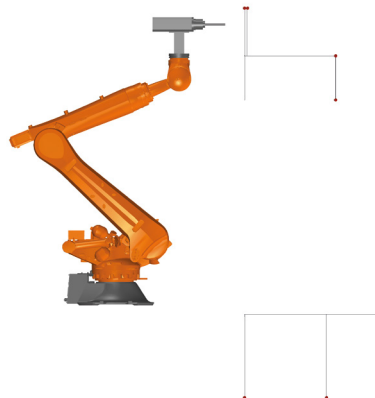
En esta etapa el algoritmo busca establecer criterios para desarrollar un proceso reglamentado con condiciones que vayan acorde a las capacidades del robot y que dichas condiciones estén vinculadas y no sean el resultado aleatorio de una búsqueda de capacidades en la exploración.



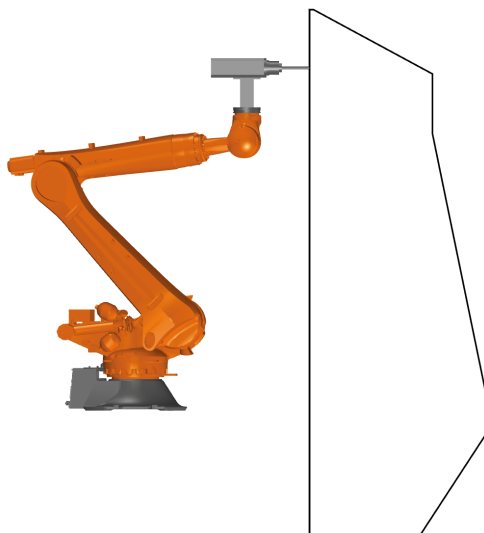
*Ilustración 45. Dimensiones de mecanizado para zona 1, 2, 3 y 4, de acuerdo a esquema zonas y mapa. Elaboración propia.*



*Ilustración 46. Curvas para construcción de mapa.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 47. Puntos para construcción de mapa.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 48. Mapa de trabajo.  
Elaboración propia.*

## Conclusiones parciales

El proceso de zonificación se realiza para comprender y definir instancias de mecanizado, evaluando las diversas capacidades para el trazado de 3 aristas, convirtiéndose en un proceso exploratorio para luego integrar un espacio virtual definido y aplicar las condiciones, criterios y los limitantes requeridos, para que cada zona sea construida de una manera pertinente y congruente con los objetivos y finalidades de la plataforma de simulación. Si bien las zonas determinadas ayudan a construir un mapa general de trabajo, esta definición en el espacio aun es necesaria que sea sometida a una evaluación exhaustiva, donde se pueda comprobar el correcto funcionamiento y establecer una secuencia lógica para determinar diversas dimensiones de figuras de mecanizado en el área de trabajo. El emplear estos criterios ayuda a reducir y evaluar de forma concisa las zonas de trabajo y definir los límites de desplazamiento.

Si bien las capacidades generales de desplazamiento del robot son mucho mayores, la plataforma está enfocada en programar un algoritmo para trabajar piezas en madera y como una primera aproximación sienta las bases para un desarrollo estructurado y enfocado, ya que se podrían tomar decisiones aún más específicas y cuantiosas en términos de criterios y limitantes, pero debido a esto el proceso resultaría mucho más extenso. A pesar de ello, con las labores ya desarrolladas se tiene una noción de las posibilidades de la programación paramétrica y como todo el proceso puede ser reconfigurado, otorga por si mismo la capacidad de integrar más variables, condiciones y optimizar los elementos de la programación.

Gracias a los datos parciales obtenidos, se puede dimensionar la capacidad de trabajo en madera, además del espacio físico necesario para su funcionamiento y los espacios adicionales para poder sustentar geometrías que colaboren con el mecanizado de la madera. Lo siguiente es adaptar los resultados obtenidos y completar el proceso para generar el resultado volumétrico necesario para el correcto funcionamiento de una plataforma de simulación.

## Depuración

Esta fase de depuración consiste en preparar el algoritmo para modificar los criterios y definiciones planteadas para adaptarlos a la celda de trabajo, por lo que se crea un paralelo de la programación, donde el algoritmo inicial (figura 49) es la referencia o instructivo de la exploración de las zonas y conformación del mapa de trabajo, mientras que la depuración define un núcleo secundario para disminuir la carga programática del algoritmo y así vincularlo a la celda de trabajo para desarrollar una nueva exploración y evaluación de los criterios planteados (anexo D).

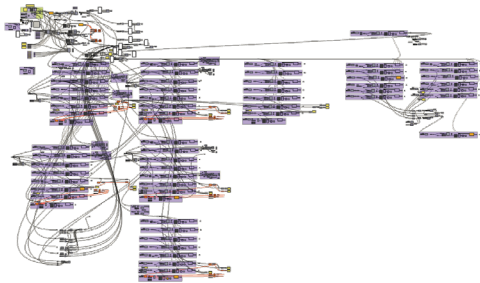


Ilustración 49. Algoritmo zonas y mapa base.  
Elaboración propia.

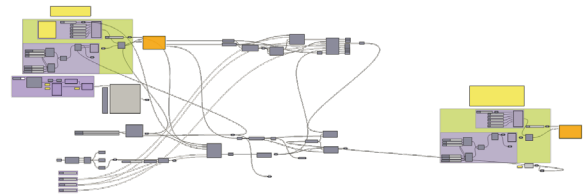


Ilustración 50. Algoritmo zonas y mapa depurado.  
Elaboración propia.

The background of the slide is a 3D rendering of an industrial robotic cell. It features a complex grey metal frame with various beams and supports. A prominent orange robotic arm is positioned on the left side, extending towards the center. The arm has a cylindrical body and a gripper at the end. The overall scene is brightly lit, with soft shadows, giving it a clean, technical appearance.

# **INCORPORACIÓN DEL ALGORITMO EN CELDA DE TRABAJO Y DESARROLLO DEL MECANIZADO AUTOMATIZADO**

## ESPACIO DIGITAL

Es el escenario donde se desenvuelve el robot de evaluación, un espacio geométrico definido al cual se le integran todos los procesos ya desarrollados para modificar, integrar y programar nuevos procesos de la plataforma de simulación en el ambiente de Rhinoceros.

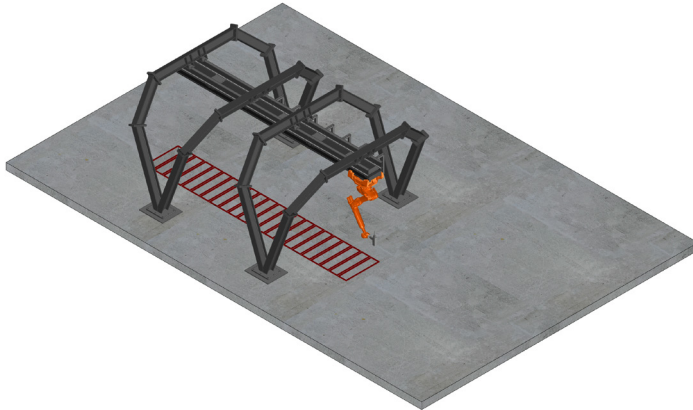
### Laboratorio de construcción y manufactura robotizada

Es el entorno real del cual se crea el gemelo digital para desarrollar la aproximación de las capacidades del robot industrial al cual está integrado.

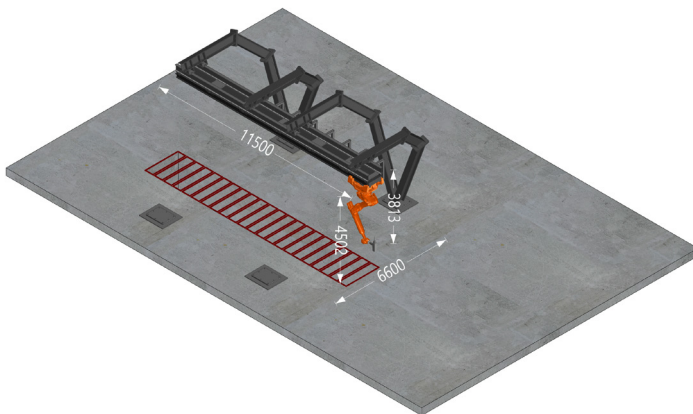
El incorporar una estructura definida, orienta el proceso y aterriza las capacidades de desplazamiento del robot, incentivando a tomar decisiones consecuentes con los procesos reales de trabajo, así este desarrollo establece un vínculo entre lo virtual y lo real.



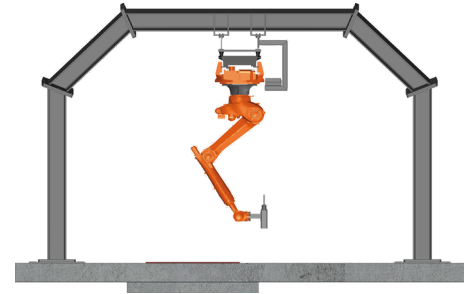
*Figura 19. Laboratorio de construcción y manufactura robotizada, campus San Joaquín, Santiago.  
Fotografías Leonfindel.*



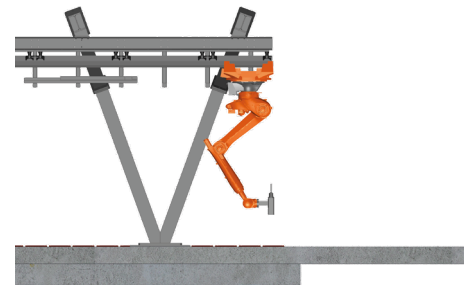
*Ilustración 51. Isométrica laboratorio de construcción y manufactura robotizada.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 52. Dimensiones laboratorio de construcción y manufactura robotizada.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 53. Elevación frontal laboratorio de construcción y manufactura robotizada.  
Elaboración propia.*

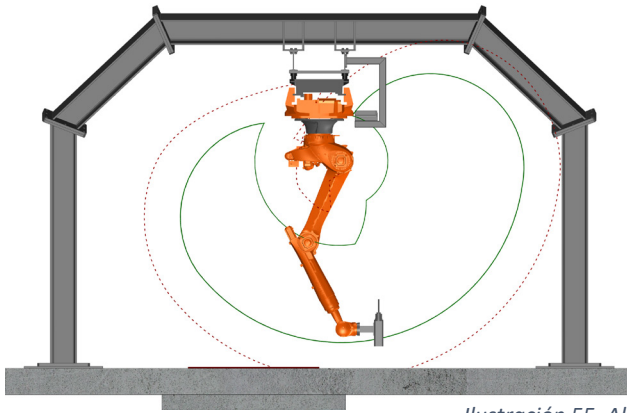


*Ilustración 54. Elevación lateral laboratorio de construcción y manufactura robotizada.  
Elaboración propia.*

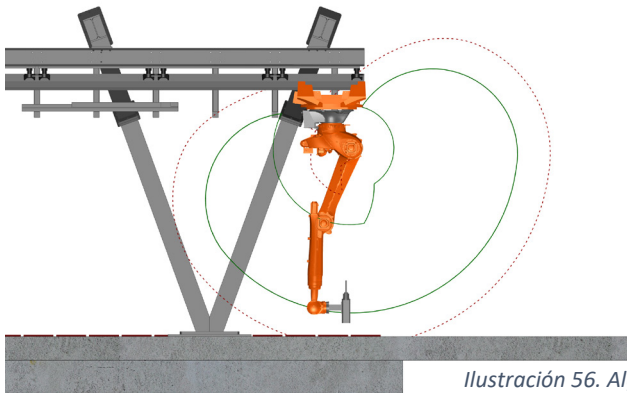
Espacio virtual correspondiente al laboratorio ubicado en San Joaquín, consta de una estructura metálica que sustenta un riel superior para el desplazamiento del KUKA KR210 R3100-2.

## Consideraciones y criterios

Al integrar el robot en un nuevo ambiente, las capacidades que brinda se ven alteradas de acuerdo a las geometrías integradas. Su desplazamiento se ve restringido a las colisiones con la estructura por lo que es necesario determinar nuevas zonas de trabajo y, dado que esto alterará su orientación, el procedimiento debe tener en consideración la nueva posición del robot y los criterios deberán adaptarse a estas nuevas condiciones.

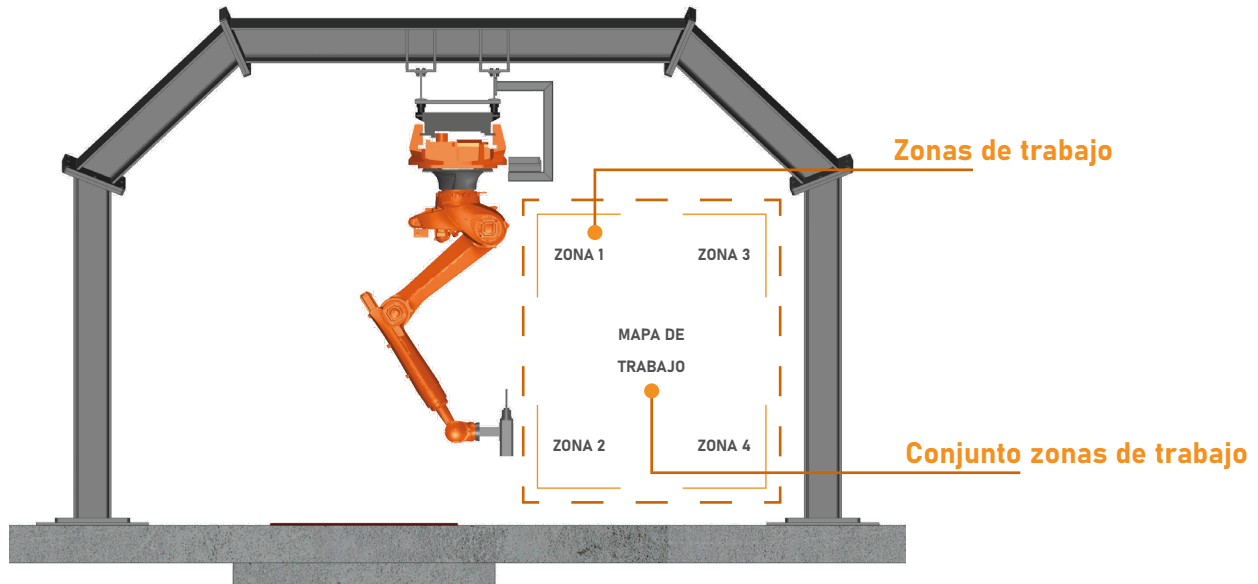


*Ilustración 55. Algoritmo base en escenario virtual, vista frontal.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 56. Algoritmo base en escenario virtual, vista lateral.  
Elaboración propia.*

Para aplicar los criterios y condiciones para elaborar las zonas de trabajo, junto al mapa resultante, es necesario adaptarlos al nuevo ambiente establecido, tomando en cuenta las condiciones más desfavorables para las capacidades de desplazamiento del robot.



*Ilustración 57. Esquema de zonas y mapa de trabajo en laboratorio.  
Elaboración propia.*

Las zonas de trabajo siguen la ubicación del proceso anterior, por lo que se encuentran orientadas a la posición del robot. Lo siguiente es reconfigurar los criterios para determinar los nuevos límites de estas zonas y elaborar el mapa de trabajo.

# ALGORITMO Y CELDA DE TRABAJO

Una vez se implementa el escenario para el trabajo de mecanizado, compuesto por la estructura y el robot, se reconfigura el algoritmo ya desarrollado para que albergue al nuevo algoritmo. El cambio en las condiciones de trabajo requiere una reconfiguración en el proceso de desarrollo del mapa de trabajo y sus zonas, que, gracias al establecimiento de condiciones y criterios para su elaboración, facilitan el proceso para determinar resultados congruentes y estandarizados en la confección de un algoritmo funcional y estructurado.

## Reconfiguración

Como ya se ha establecido, la reconfiguración del algoritmo actual sigue las condiciones anteriormente elaboradas, por lo que se deben adaptar las evaluaciones a un nuevo ambiente y orientación.

### Zona 1

Replicando los criterios de evaluación y considerando el distanciamiento más cercano al robot, se mantiene el límite de la exploración anteriormente realizada, puesto que no se ve alterado por la presencia del escenario virtual establecido. A pesar de mantener la evaluación en el eje Z, se debe de verificar todas las posiciones factibles, libre de colisiones e incongruencias, evaluando la condición en el sitio más desfavorable, conservando la orientación del trazado en 3 aristas, mecanizando en sus laterales y la arista superior.

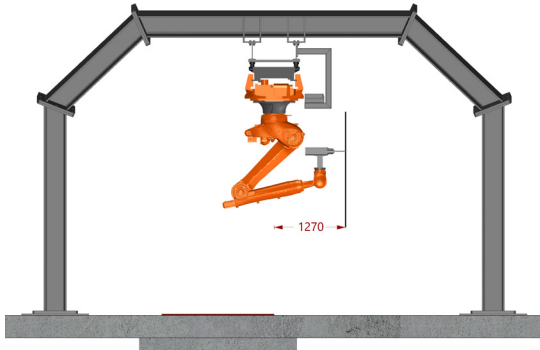


Ilustración 58. Criterios para zona 1, reconfiguración.  
Elaboración propia.

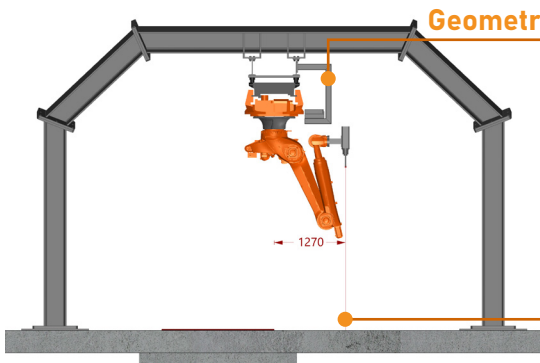


Ilustración 59. Limitantes zona 1.  
Elaboración propia.

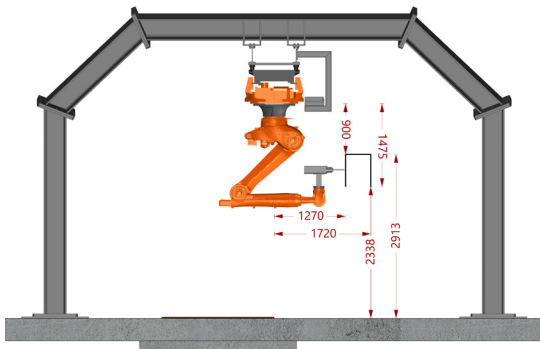


Ilustración 60. Resultados para zona 1, reconfiguración.  
Elaboración propia.

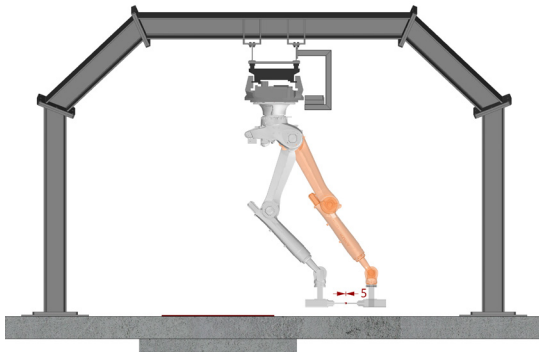
La presencia de geometrías de colisión establece nuevos criterios limitantes de desplazamiento. Siguiendo la lógica del criterio principal, se analiza el punto factible de trazado, en donde el desplazamiento de la arista superior no genere colisiones tanto con la estructura portante, como con los posibles trazados de mecanizado.

El punto límite de colisión superior establece el recorrido en el eje Z, por lo que todas las exploraciones de figuras posibles se fijan a una distancia de 900 [mm] entre la arista superior de la figura de mecanizado y la base del robot.

La figura resultante correspondiente a la zona 1 de trabajo, se acota con respecto a la base del robot y el piso del escenario virtual.

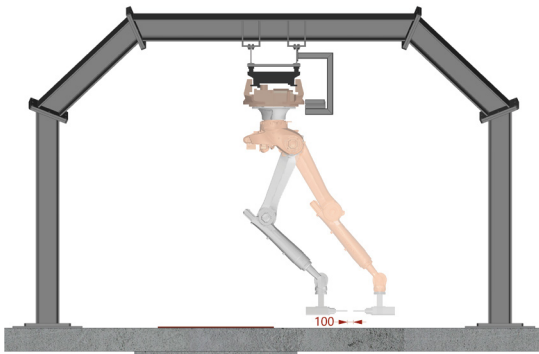
## Zona 2

El criterio principal aplica nuevamente para el desarrollo de la zona 2, por lo que se exploran las capacidades a través del eje Z, evaluando el punto inferior máximo posible en este eje, la configuración no genera una figura debido a un ancho inválido, al realizar la exploración por la arista derecha el ancho máximo posible resulta de 5[mm]. Debido a este resultado se establece un nuevo criterio de ancho mínimo y considerando la magnitud del laboratorio y el objetivo de su construcción se establece un valor mínimo de 100[mm] para el ancho de toda figura de mecanizado en el proceso de exploración de las zonas de trabajo.



*Ilustración 61 . Ancho máximo evaluación inicial zona 2.  
Elaboración propia.*

En base a los resultados de la exploración, los valores no coinciden con un trabajo adecuado para el diseño y magnitud de la estructura y el robot, a diferencia de la primera exploración, donde los resultados obtenidos eran con el objetivo de entender y aplicar criterios para definir el espacio, en esta circunstancia debe hacer una coherencia con las dimensiones y las capacidades de trabajo.



*Ilustración 62 . Ajuste ancho zona 2.  
Elaboración propia.*

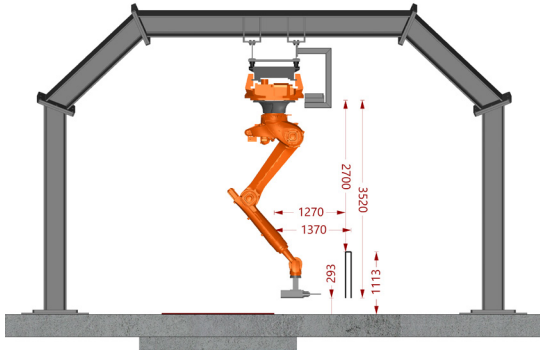


Ilustración 63 . Resultados para zona 2, reconfiguración.  
Elaboración propia.

Una vez establecida la condicionante de un ancho mínimo, ayuda a determinar la altura a la que se debe posicionar el robot para el mecanizado en el eje Z de sus dos laterales y se procede a completar la figura máxima posible.

### Zona 3

Para analizar la figura posible de mecanizado de la zona 3, se vincula el resultado de la zona 1 y se utiliza la arista superior como límite de trazado, desplazando a través del eje X el punto posible más alejado al robot, estableciendo como inicio de la evaluación este punto resultante para la figura máxima correspondiente. De este modo se mantiene la dependencia de los criterios de evaluación.

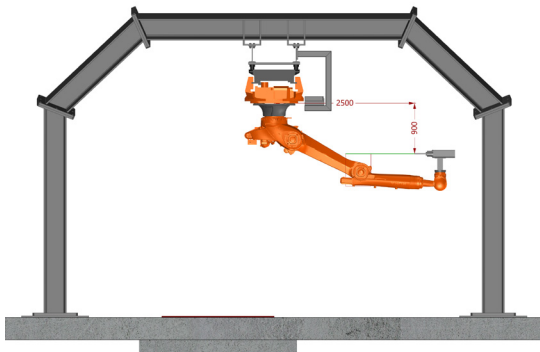


Ilustración 64 . Criterios para zona 3, reconfiguración.  
Elaboración propia.

A través de la evaluación de la arista superior y manteniendo los criterios y limitantes de colisión de geometrías, se determina el punto más alejado que determina el punto de inicio de evaluación para la figura de la zona 3.

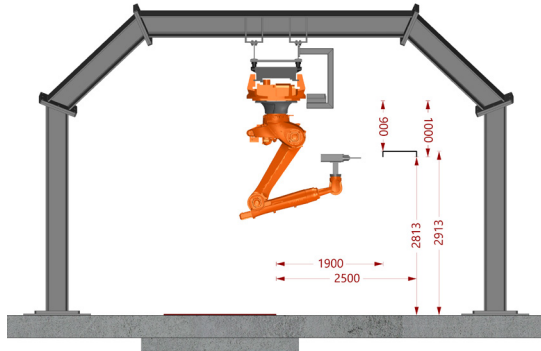


Ilustración 65. Resultados para zona 3, reconfiguración.  
Elaboración propia.

Manteniendo los principios de los criterios, se evalúa la condición de trazado posible desde el límite propuesto en el eje X hacia abajo para determinar el alto máximo de la figura y así establecer su ancho correspondiente.

## Zona 4

Al igual que en la exploración inicial, se aplica una evaluación entorno al eje X, pero debido a los cambios de las capacidades de trabajo provocados por el escenario virtual y el cambio de orientación, se utiliza la arista superior de la figura resultante. Se conserva el principio de buscar el punto más lejano para dar inicio a la exploración y definición de la zona máxima posible de mecanizado, para así luego construir el mapa de trabajo orientado al escenario virtual.

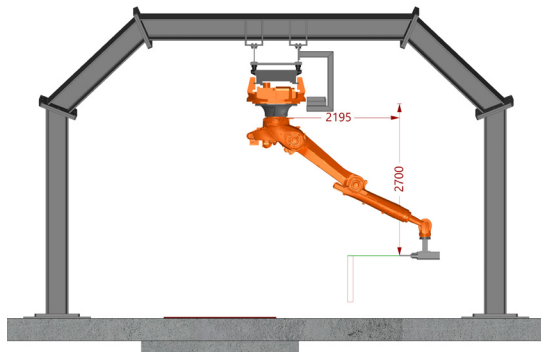
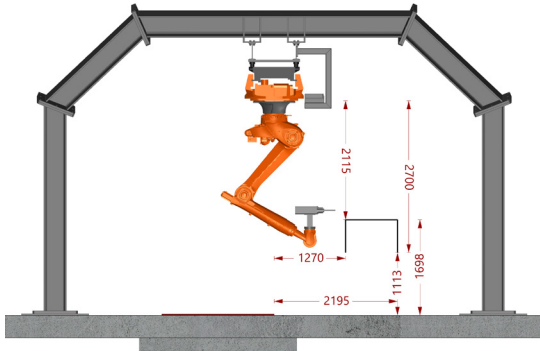


Ilustración 66. Criterios para zona 4, reconfiguración.  
Elaboración propia.

A través del eje guía correspondiente a la arista superior de la zona 2, se evalúan las condiciones límites, tomando como punto de referencia la ubicación más alejada en el extremo derecho del robot. En este procedimiento la evaluación se realiza desde el eje X hacía arriba, debido a los cambios de orientación.



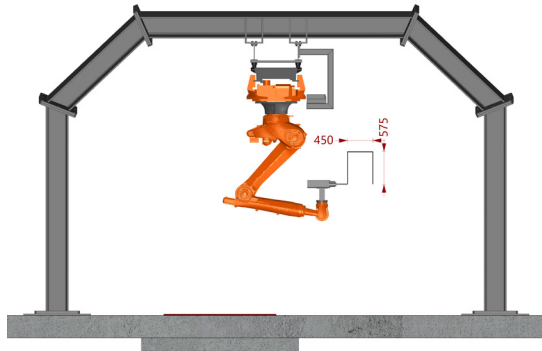
Al igual que en la primera definición de los criterios, el ancho de la figura coincide desde su extremo derecho hasta el límite definido en el eje Z de la zona 1 y 2. De este modo la definición de criterios establece y relaciona las zonas evaluadas y sus capacidades de mecanizado.

*Ilustración 67. Resultados para zona 4, reconfiguración. Elaboración propia.*

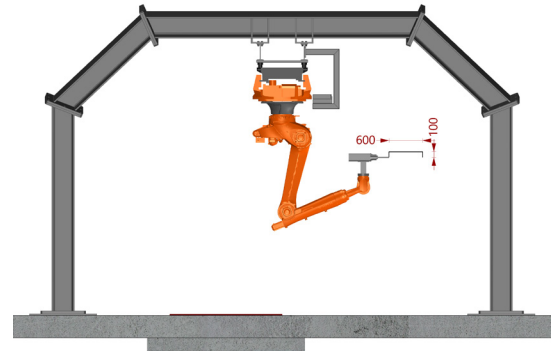
## Mapa de trabajo

Una vez determinada cada una de las zonas de trabajo necesarias se construye, a través de la evaluación de sus vértices, el nuevo mapa de trabajo correspondiente al escenario virtual compuesto por el KUKA KR210 y la celda de trabajo del laboratorio de construcción y manufactura robotizada.

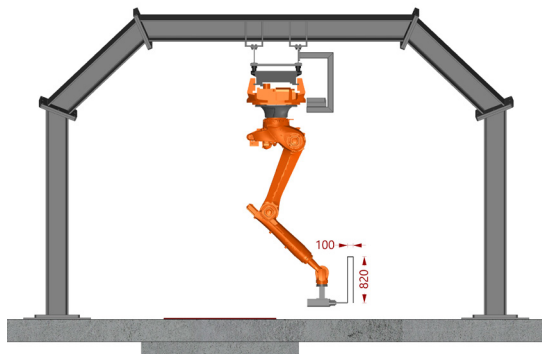
Dicha definición es la base para completa el algoritmo de evaluación y así definir las figuras de mecanizado posibles dentro de su espacio de trabajo.



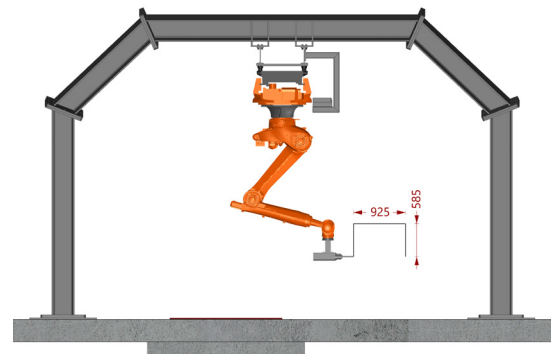
Zona 1



Zona 3

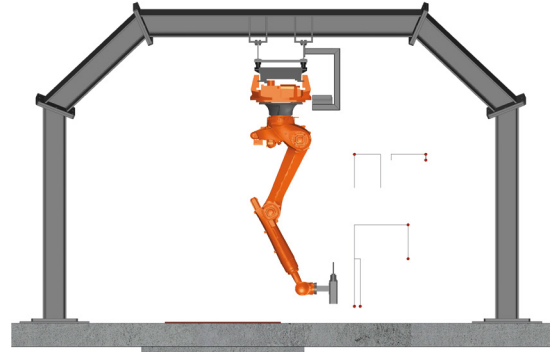
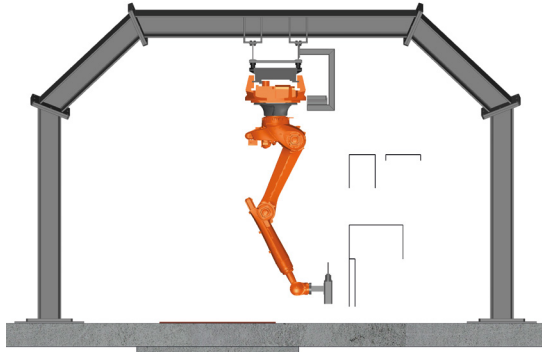


Zona 2

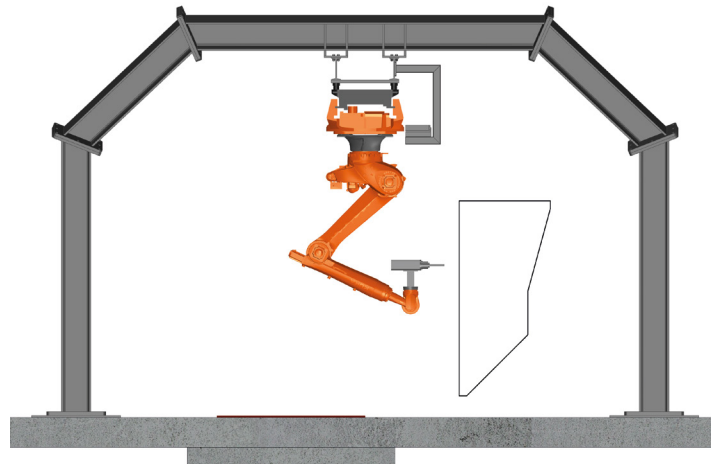


Zona 4

Ilustración 68. Dimensiones de mecanizado para zona 1, 2, 3 y 4, de acuerdo a esquema zonas y mapa, reconfiguración. Elaboración propia.



*Ilustración 69. Curvas y puntos para construcción mapa de trabajo, reconfiguración.  
Elaboración propia.*



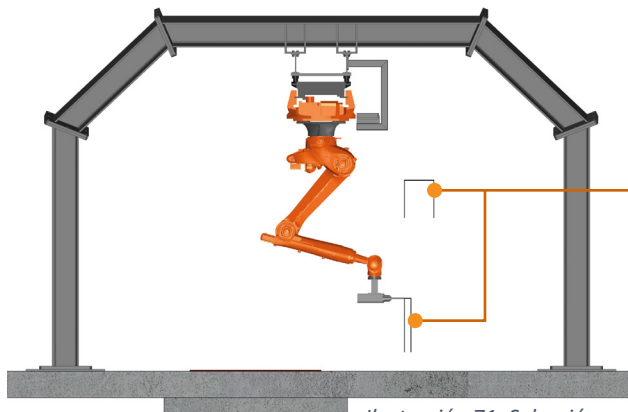
*Ilustración 70. Mapa de trabajo, algoritmo en laboratorio.  
Elaboración propia.*

## Mecanizado optimizado

Corresponde al proceso donde se busca automatizar la definición del trazado de mecanizado evaluado dentro del mapa de trabajo, de acuerdo a las capacidades de desplazamiento del robot industrial.

Desde el inicio del proceso, los trazados de mecanizado han sido una búsqueda y exploración manual de las capacidades de desplazamiento, esta etapa busca automatizar dicho proceso para realizar una plataforma funcional y parametrizada. Para ello se exploran métodos de automatización a través de las funciones que otorga Grasshopper, continuando con la metodología de desarrollo del algoritmo. Utilizando diversas configuraciones, se utilizan las herramientas disponibles para llevar a cabo un proceso que integre lo anteriormente realizado, buscando una programación que posibilite la automatización del mecanizado y que cumpla con los requisitos de la plataforma de simulación.

Como punto de partida, utilizando las zonas de trabajo ya evaluadas, se realiza una transición entre las figuras con el fin de comprobar la funcionalidad del mecanizado y verificar si efectivamente estas posiciones son los puntos extremos entre evaluaciones. La transición busca crear nuevas figuras de mecanizado dentro del mapa de trabajo, para ello se toman dos zonas de trabajo, proyectando las líneas guías de trazado de manera que conformen una nueva sección de 3 aristas a lo largo de su recorrido.

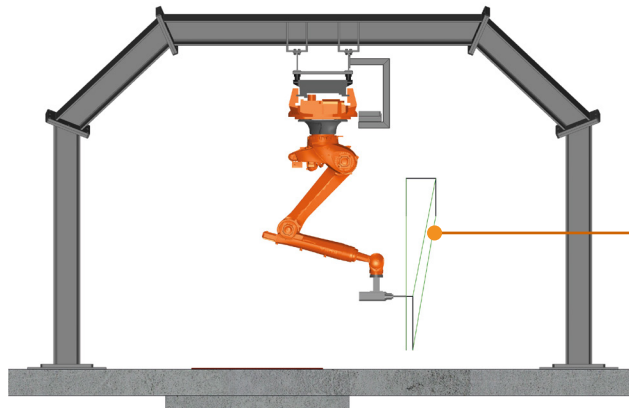


### Zonas de transición

Para elaborar el proceso de transición se utiliza como referencia la zona 1 y 2, con el objetivo de verificar mediante dicha transición la efectividad del mecanizado.

*Ilustración 71. Selección zonas de transición.  
Elaboración propia.*

Una vez realizada la selección de las zonas, se trazan las líneas guías que conforman las dos figuras, esto a través de la unión de aristas correlativas en cada zona, de este modo se grafica el recorrido de transición por el cual se creará una nueva figura de mecanizado.

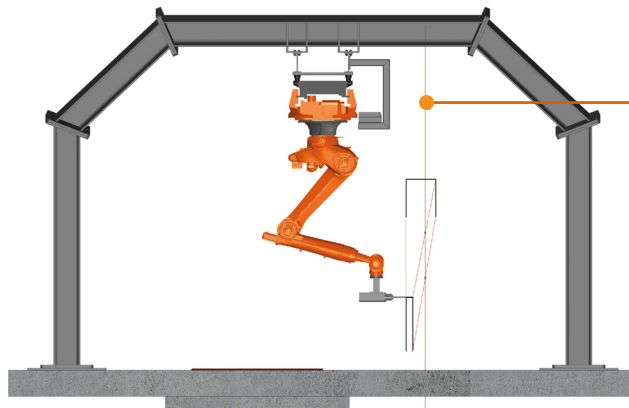


### Líneas guías

Por medio de los vértices de ambas figuras, se trazan las líneas que conformarán su transición.

Ilustración 72. Trazado líneas guías.  
Elaboración propia.

Se ejecuta una vertical que cruza a las líneas guías, dicha vertical se desplaza entre las aristas derechas de ambas figuras, por lo que su recorrido está limitado al valor de X entre esas dos aristas.

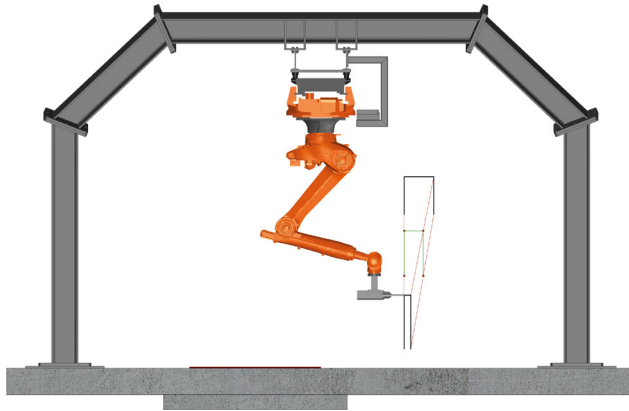


### Línea de intersección

La intersección entre el conjunto de curvas determina la altura de la nueva figura.

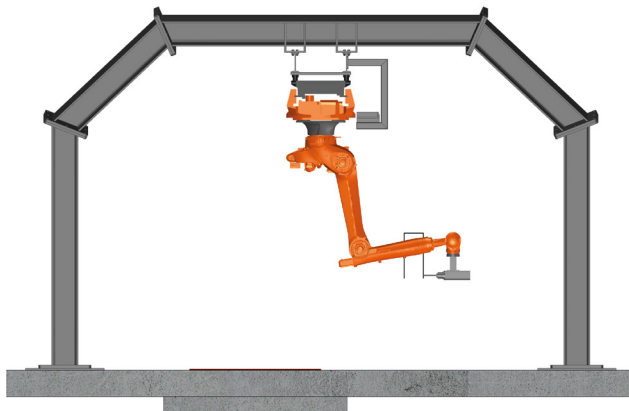
Ilustración 73. Línea de intersección.  
Elaboración propia.

Se proyectan los puntos de intersección en la arista opuesta y se crea la figura de mecanizado, la cual se procede a evaluar y determinar la efectividad de la exploración propuesta.



Se conectan todos los vértices para formar la nueva figura de mecanizado correspondiente a la transición de las zonas de trabajo.

*Ilustración 74. Construcción figura de mecanizado.  
Elaboración propia.*



La evaluación de mecanizado resulta errónea por el hecho de colisionar el robot con la misma figura resultante.

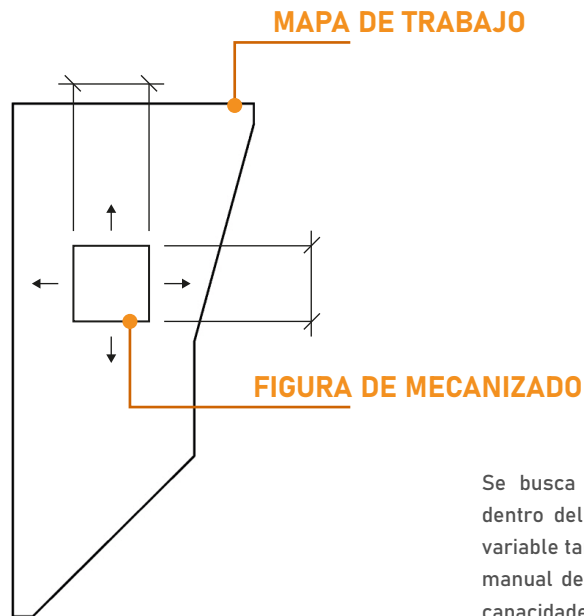
*Ilustración 75. Evaluación figura de mecanizado.  
Elaboración propia.*

Se corrobora que la transición directa entre una zona y otra no se relaciona con las capacidades de mecanizado del robot, por lo que se evalúa un nuevo método para la automatización del mecanizado. Además, este proceso no cumple con los objetivos de diseñar un algoritmo lo más paramétrico posible, si bien puede existir un mecanismo para crear la transición entre las zonas de trabajo, no se evalúa libremente dentro del área del mapa de trabajo, se requiere de un proceso de intersección con curvas externas y no relaciona las capacidades del robot con las dimensiones de mecanizado posible. Por otra parte, esta exploración evalúa dos zonas específicas y no toma en cuenta la transición con las dos zonas faltantes y la unión de transiciones entre cada zona generaría una programación confusa, extensa y dependiente de factores externos que no van incluidos directamente a la programación del algoritmo.

## Definición algoritmo de mecanizado

En base a los resultados ya obtenidos, es necesario definir un algoritmo capaz de mecanizar dentro del área del mapa de trabajo, que tome en consideración las geometrías y capacidades del robot y que su desplazamiento no este restringido a una guía de transición como el caso anterior, por lo que debe moverse libremente dentro del área determinada y que sus dimensiones puedan ser establecidas de acuerdo a las necesidades.

Bajo estas condiciones se plantea un nuevo diseño integrado al algoritmo y el desarrollo actual, con la intención de mantener la conectividad dentro de todo el proceso de elaboración y que el algoritmo de mecanizado sea un resultado de la plataforma de simulación y no un elemento ajeno a ella.

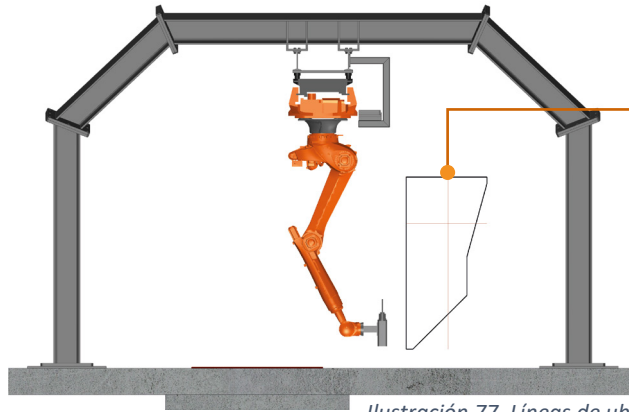


*Ilustración 76. Esquema algoritmo de mecanizado.  
Elaboración propia.*

Se busca desplazar libremente la figura de mecanizado dentro del área del mapa de trabajo, formando una figura variable tanto en su ancho como su alto, ya sea por un ajuste manual de dimensiones o el resultado automatizado de las capacidades del robot.

Esta figura debe ser una respuesta a su posicionamiento dentro del mapa y como las posibilidades de mecanizado del robot la alteran.

La primera problemática a resolver es definir un modo de desplazamiento para la figura en el mapa de trabajo. Para ello se crea una intersección de rectas a partir de las propias dimensiones del mapa de mecanizado, tomando los valores máximos en X y en Z, obteniendo el recorrido en ambas direcciones, de este modo se vinculan los elementos diseñados y se asegura una dependencia de los componentes en la programación.

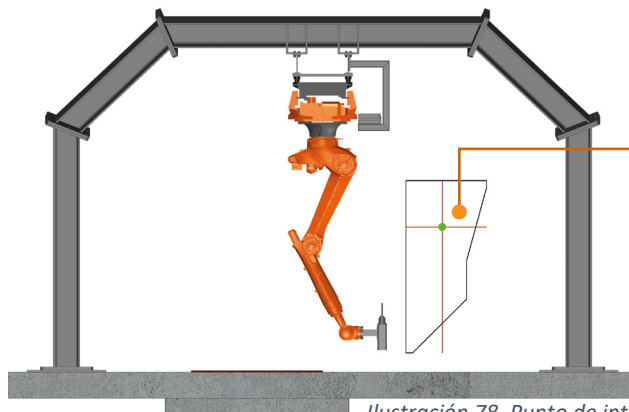


### LÍNEAS DE UBICACIÓN

Se crean dos rectas a partir de la evaluación del mapa establecido, cada recta posee el mismo ancho y alto correspondientemente con el mapa.

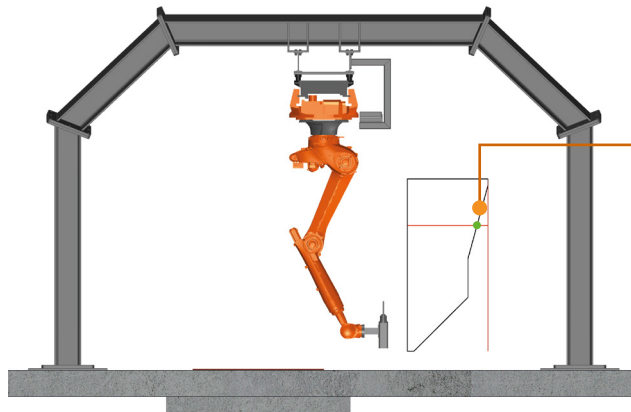
*Ilustración 77. Líneas de ubicación en mapa de trabajo.  
Elaboración propia.*

Su objetivo es intersectarse y ubicar un punto, el cual está programado para existir dentro del mapa. La programación permite desplazar vertical y horizontalmente a estas rectas, por lo que el punto puede ubicarse en cualquier sitio del espacio definido.



### PUNTO INTERSECCIÓN

*Ilustración 78. Punto de intersección en el espacio.  
Elaboración propia.*



## UBICACIÓN LÍMITE

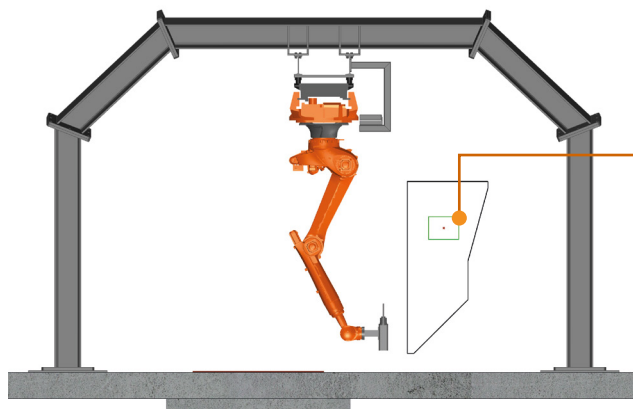
Al contrario de la exploración de transición, en esta circunstancia se puede tener un desplazamiento libre dentro del mapa de trabajo.

*Ilustración 79. Ubicación del punto en límites de desplazamiento. Elaboración propia.*

De este modo se controla la ubicación en el eje X y el eje Z del sistema de referencia y al ir vinculado directamente con las dimensiones del mapa de trabajo, la ubicación del punto de referencia para el sistema de ubicación no puede sobrepasar los límites ya definidos.

Con esto se establece un sistema dependiente del mapa de trabajo, el punto existe dentro del mapa gracias a las líneas de intersección, las cuales son una proyección de sus valores en X y Z, el punto creado por dicha intersección también va vinculado a la intersección que se genera con el propio mapa, por lo que no existe un componente externo generado aleatoriamente o arbitrariamente para desarrollar el algoritmo.

Ya establecido un punto de referencia en el espacio de trabajo, se crea una figura de dimensiones ancho por alto personalizado desde el centro del punto, esta sección representa la figura a mecanizar y con el posterior desarrollo se comprobará si es efectivamente un trazado posible o incongruente.

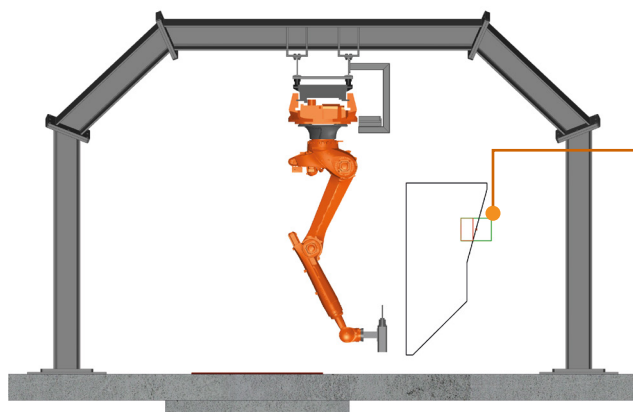


### FIGURA PERSONALIZADA

Se establecen dimensiones personalizadas para la figura de mecanizado, para no restringir sus dimensiones a solo la determinada por la transición como en el proceso anterior.

*Ilustración 80. Confección de figura personalizada.  
Elaboración propia.*

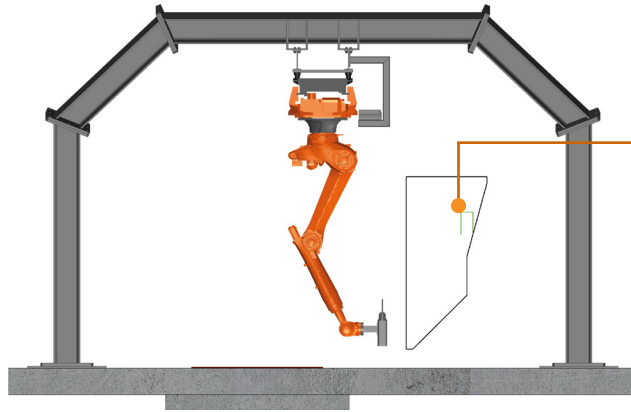
Lo siguiente es modificar la figura para que reaccione con los límites de desplazamiento, debido a que el punto se puede mover hasta los bordes del mapa de trabajo, una sección de la figura queda fuera de dicho límite establecido y por los criterios y definiciones no es una sección válida para el mecanizado.



### SECCIÓN EXTERIOR

Al desplazar el punto de referencia a los límites del mapa, la figura de trazado se inválida por quedar fuera de los límites establecidos.

*Ilustración 81. Invalidación figura exterior.  
Elaboración propia.*



## DEFINICIÓN INTERIOR

Se traza una nueva figura, analizando sus intersecciones con los límites del mapa y su misma composición.

*Ilustración 82. Definición de figura de mecanizado.  
Elaboración propia.*

El proceso de definición de una figura que reaccione a los límites propuestos toma en cuenta una serie de datos variables, debido a la composición de las figuras y su colisión con los límites, se altera el orden de los vértices según la zona en la que entra en conflicto, por ello el algoritmo reacciona a diferentes instancias de resultados, para solucionar dicha incongruencia dentro del algoritmo y establecer una figura efectiva para toda colisión, se realiza un filtro de datos, la cual tiene una particularidad de trabajar con diferentes cantidades de datos de acuerdo a las colisiones generadas, ya sea con una arista o dos y la dirección en la que colisiona la figura definida con el límite de trabajo. De acuerdo a los resultados disponibles para la selección del resultado correcto, el algoritmo filtra en una serie escalonada, el valor efectivo de la figura, este dato dentro del algoritmo puede ser una entrada válida, como un valor nulo de colisión, dichos datos tienen una información de entrada que mantienen y a medida que se generan colisiones se añade un valor adicional, que a través del filtro, se crea una secuencia, tomando en cuenta datos válidos e inválidos de acuerdo a la cantidad de conflictos y resultados. Una vez completado el procesamiento de los datos el filtro del algoritmo graficará la figura efectiva de mecanizado, ya sea que colisione o no.

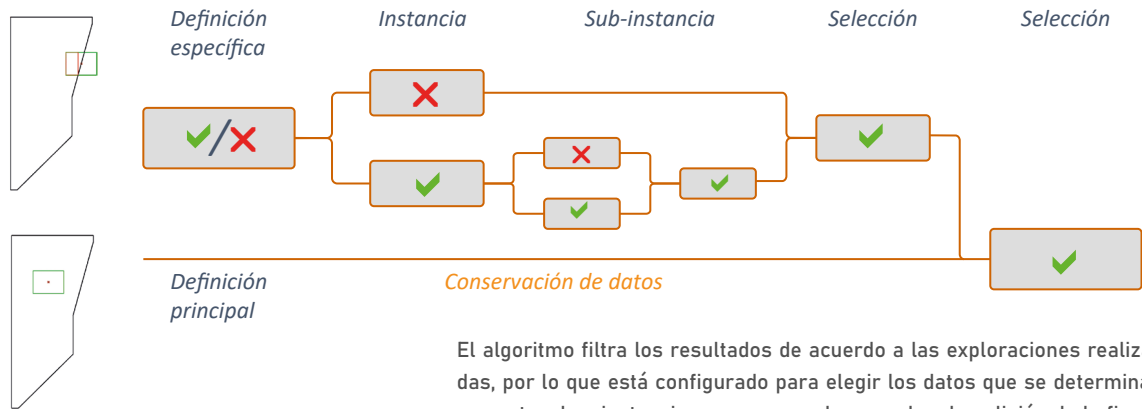
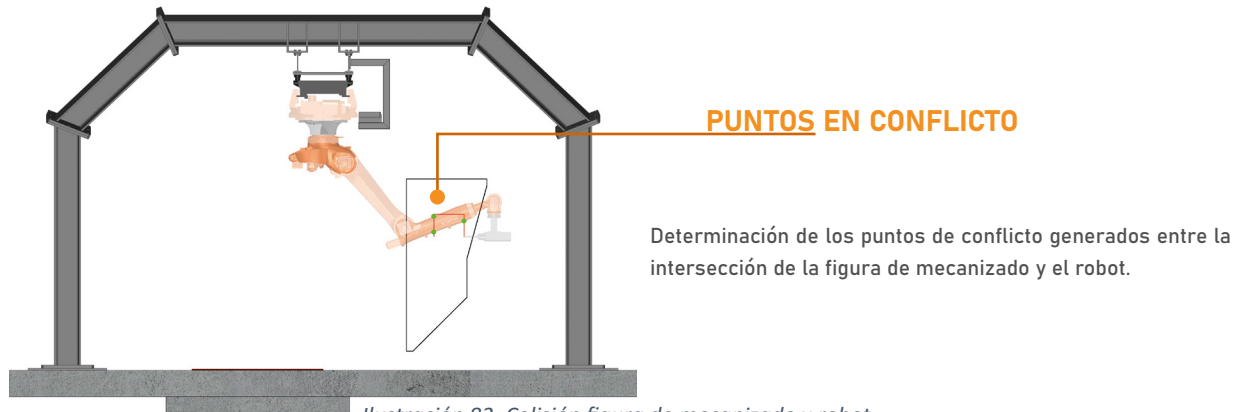


Diagrama 4. Esquema filtro de datos.  
Elaboración propia.

El algoritmo filtra los resultados de acuerdo a las exploraciones realizadas, por lo que está configurado para elegir los datos que se determinan correctos. Las instancias se generan de acuerdo a la colisión de la figura con el mapa de trabajo, por lo que los resultados varían, en caso de existir se desarrolla una figura y en caso contrario se mantiene la definición principal ya establecida.

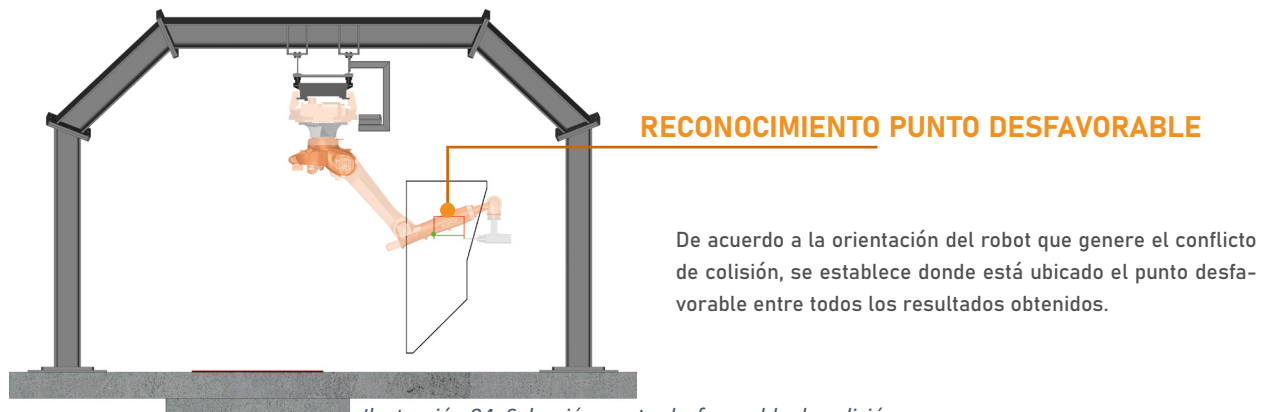
El filtro de datos resuelve diversas instancias exploradas de acuerdo a la interacción de la figura de mecanizado con las colisiones del robot industrial, en donde también pueden ocurrir sub-instancias que requieran mayor detalle de evaluación. La selección se realiza por etapas, donde ya generados los datos de cada instancia, se determinan los valores correctos para el funcionamiento del algoritmo, por lo que los siempre existe un valor final de selección considerado correcto, ya sea por el resultado de la definición específica elaborada o por la conservación de datos desde la instancia principal de la figura de mecanizado. Este algoritmo de filtro evalúa las colisiones para las dos orientaciones definidas y de acuerdo al valor ingresado (orientación 0 o 1) selecciona el valor para la visualización de la figura de mecanizado.

Con la figura básica de evaluación ya definida, se procede a evaluar en conjunto las capacidades del robot, por lo que se integra al proceso la colisión de geometrías, donde la figura será nuevamente reconfigurada a partir de los puntos de colisión con el propio robot. El robot se posiciona en la situación más compleja de mecanizado, a través de la exploración de sus capacidades se determina que las evaluaciones en la sección derecha del trazado resultan más inconvenientes para su desplazamiento y generan la mayor cantidad de colisiones.



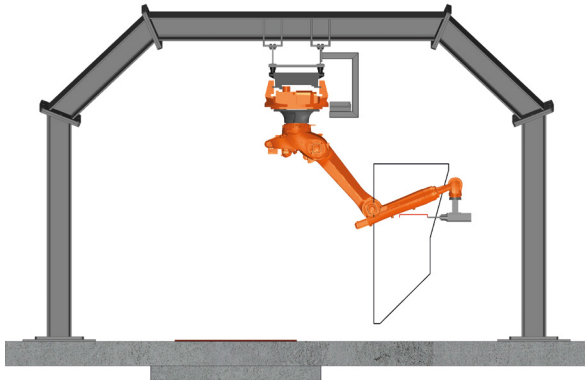
*Ilustración 83. Colisión figura de mecanizado y robot.  
Elaboración propia.*

En base a los puntos de conflicto localizados, se procede a modificar la figura de mecanizado, utilizando estos puntos para la definición de sus vértices. Al igual que en el proceso de filtro anterior, los puntos de conflicto generan más de una salida de datos, por lo que se aplica nuevamente una selección de resultados, utilizando la programación del filtro de datos. Otra instancia que altera la selección de datos es la orientación que posee el robot, gracias a los criterios iniciales, se incorpora un filtro que genera una figura de acuerdo a la orientación correspondiente, definida como 0 o 1, de esta manera se seleccionan los puntos desfavorables de la colisión y conecta los criterios con la programación del algoritmo.

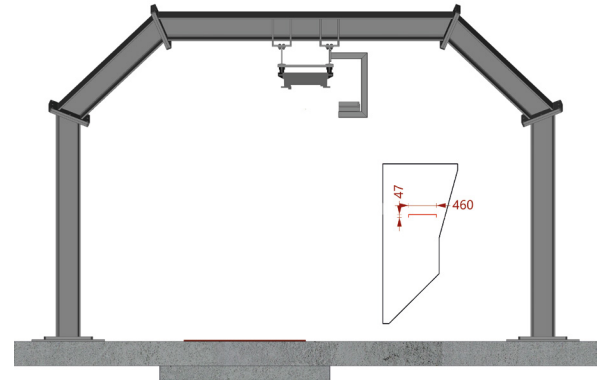


*Ilustración 84. Selección punto desfavorable de colisión.  
Elaboración propia.*

Al punto de colisión desfavorable se le añade un desfase para asegurar la integridad del robot y de la pieza de mecanizado. Este desfase posee un vector que se selecciona automáticamente según la orientación del mecanizado programado.



*Ilustración 85. Desfase y figura valida.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 86. Dimensiones figura valida.  
Elaboración propia.*

# SIMULACIÓN EN CELDA DE TRABAJO

Se pone a prueba la funcionalidad del algoritmo, comprendiendo el proceso desarrollado, sometiendo lo a las optimizaciones pertinentes, buscando una programación comprensible, de fácil manejo para los usuarios y que no genere ninguna situación de conflicto o incongruencia consigo mismo.

Para una evaluación eficiente de la programación en un paso previo de optimización, se desarrolla un set de comandos que permiten la manipulación de la figura de mecanizado (anexo E).

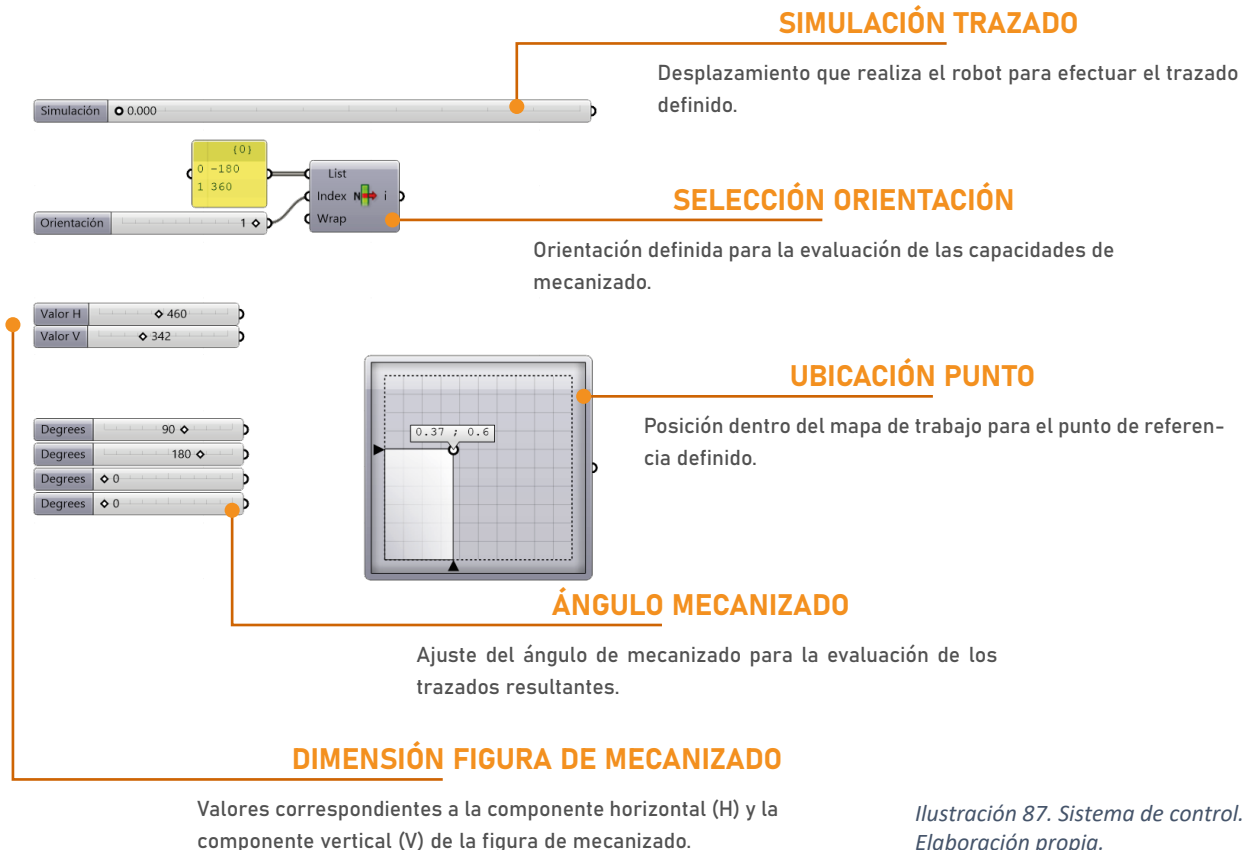
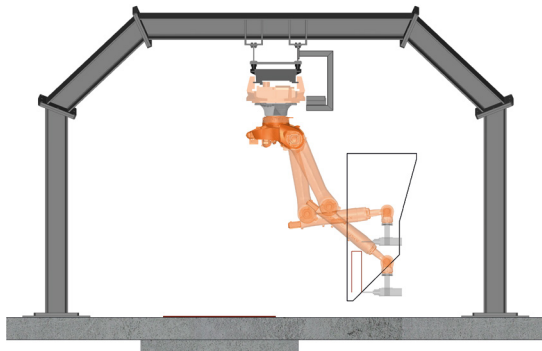


Ilustración 87. Sistema de control. Elaboración propia.

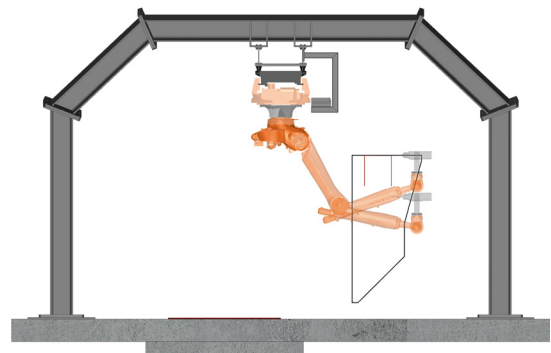
El algoritmo permite la definición de diversas dimensiones para las figuras de mecanizado, donde el robot base utilizado (KUKA KR210 R3100-2) para el ajuste de la figura, comprueba las capacidades posibles, determinando una nueva sección de ancho por alto.

Por medio de la selección de orientación, se utiliza un controlador numérico con valores de 0 y 1, de este modo se puede seleccionar la orientación de mecanizado definido como dato. Los controladores de ángulo van vinculados a la figura resultante y permiten modificar manualmente la orientación del mecanizado para así evaluar de manera óptima el trazado final. Así se automatiza la búsqueda de una figura de mecanizado y se permite una exploración más enfocada en el resultado de mecanizado efectivo.



*Ilustración 88. Evaluación figura orientación 0.  
Elaboración propia.*

Los robots son situados en posiciones límites de evaluación, donde el trazado a mecanizar será determinado por la selección de orientación.



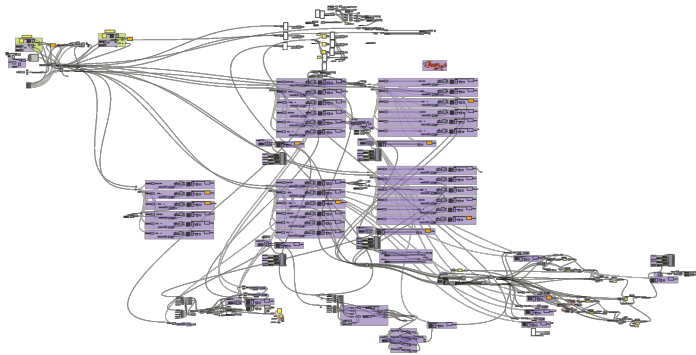
*Ilustración 89. Evaluación figura orientación 1.  
Elaboración propia.*

## Conclusiones parciales

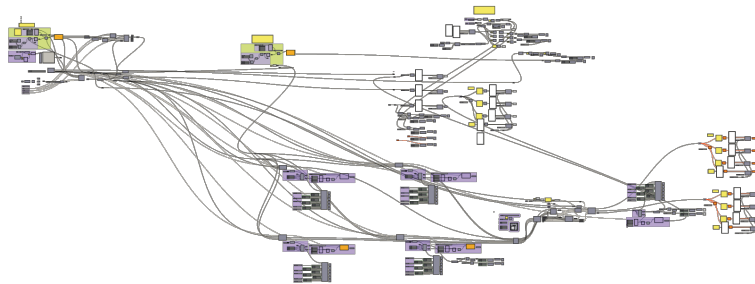
La reinterpretación de los criterios para definir un mapa de trabajo ha formado una guía para desarrollar un algoritmo automatizado, con una secuencia establecida se es posible aplicar una definición para el robot industrial en más de una circunstancia. Con la resolución del mapa, la búsqueda de la forma óptima para el mecanizado resulta en una primera instancia errónea al entendimiento de las transiciones de las figuras, el robot complejiza sus dimensiones de mecanizado en todo el espacio, con la gran variedad de posiciones que permiten sus ejes de libertad es necesario desarrollar un algoritmo directamente vinculado a su posición en el momento de la evaluación, la limitación y estandarización de la orientación de mecanizado a simplificado en gran medida los resultados posibles, pero esto también puede significar una mayor especificación en los métodos con los que en un futuro se analice el robot y su movimiento, incluso conservando los límites de orientación, el incrementar las zonas de evaluación puede llevar a resultados más específicos acerca de un mapa de trabajo con mayor detalle, la cantidad de evaluaciones que se realicen en un proceso de parametrización nos brindan una mejor retroalimentación a medida que estas crecen y nos especializamos en la metodología.

## Depuración


Esta fase de depuración consiste en preparar el algoritmo para modificar los criterios y definiciones planteadas para adaptarlos a la celda de trabajo, por lo que se crea un paralelo de la programación, donde el algoritmo inicial (figura XX) es la referencia o instructivo de la exploración de las zonas y conformación del mapa de trabajo, mientras que la depuración define un núcleo secundario para disminuir la carga programática del algoritmo y así vincularlo a la celda de trabajo para desarrollar una nueva exploración y evaluación de los criterios planteados.



*Ilustración 90. Algoritmo de mecanizado.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 91. Algoritmo de mecanizado depurado.  
Elaboración propia.*

A 3D rendered image of an industrial robotic arm, colored in a bright orange, mounted on a complex grey metal frame. The frame consists of various beams, supports, and a central vertical column. The background is a plain, light grey color. The text is overlaid on the upper left portion of the image.

# **CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PRUEBA DE LA PLATAFORMA DE SIMULACIÓN PARA EL MECANIZADO**

## PLANTEAMIENTO DE PROCEDIMIENTO ADICIONAL

Al finalizar los procesos en la elaboración de algoritmos y exploración de las diversas capacidades que tienen los robots industriales, se comprueba el funcionamiento de la programación para la plataforma de simulación, aún así con los ideales proyectados y la apreciación final de la plataforma de simulación, el proceso queda incompleto, por esto mismo se plantea una extensión de los objetivos específicos, donde se propone una geometría externa que complementa al gemelo digital ya existente para comprobar la funcionalidad del algoritmo en la realización de un mecanizado en madera virtual y la programación correspondiente que conlleva este procedimiento gracias a la plataforma de simulación para la carpintería de armar robotizada.

# OBJETIVOS

## Objetivo General:

Desarrollar una plataforma experimental para la simulación orientada a la carpintería de armar robotizada y el laboratorio de construcción y manufactura robotizada del departamento de arquitectura USM campus San Joaquín.

## Objetivos específicos:

1. Establecer requerimientos para la definición de la plataforma de simulación y los criterios de mecanizado para el robot industrial y la celda de trabajo del laboratorio de construcción y manufactura robotizada.
2. Desarrollar algoritmos que permitan el análisis, comprensión y evaluación de las capacidades del robot industrial, su mecanizado y aquellos elementos que definen el entorno de trabajo.
3. Evaluar y simular las condiciones de trabajo para el mecanizado efectivo de la carpintería de armar robotizada.
4. Proponer un banco de trabajo para la puesta a prueba de la plataforma de simulación y el trabajo de la carpintería de armar robotizada.

# DEFINICIÓN GEOMÉTRICA PARA EL BANCO DE TRABAJO

Con la resolución del algoritmo de mecanizado y la definición del gemelo digital para la plataforma de simulación, se plantea una propuesta geométrica para sustentar las labores de mecanizado en madera, complementando el escenario virtual para la simulación.

## Consideraciones y construcción

En el proceso de construir una geometría para la plataforma de simulación, es necesario tener ciertas consideraciones para el proceso. A pesar de ser una plataforma para el trabajo en madera, es fundamental definir el acercamiento y los alcances del proyecto.

Para elaborar la geometría para el banco de trabajo en madera se tiene en cuenta lo siguiente:

- Material de trabajo
- Espacio de trabajo
- Mecanismo de desplazamiento

## Material de trabajo

El uso de la madera como material principal en la construcción conlleva efectos positivos sustanciales para el medioambiente, avances recientes en la producción de madera de ingeniería, como madera contra laminada, la vuelven una alternativa económicamente viable al hormigón y construcción en acero [37], es un material innovador con mayores ventajas frente a las estructuras tradicionales de madera, además de producir una menor huella de impacto ambiental, punto clave para hacer de la construcción más sostenible [38].

Existen diversos productos derivados de la madera para construcción, así como también en diferentes formatos, estos formatos pueden estar compuestos por diversos tipos de madera, ya sea procesada o como aglomerados de material mezclados con aditivos. Para el alcance de la plataforma de simulación, el proceso se enfoca en mecanizar piezas de madera, si bien podrían ser diversos derivados del material, se opta por el desarrollo de la plataforma orientada a madera de ingeniería, en específico productos de madera laminada.

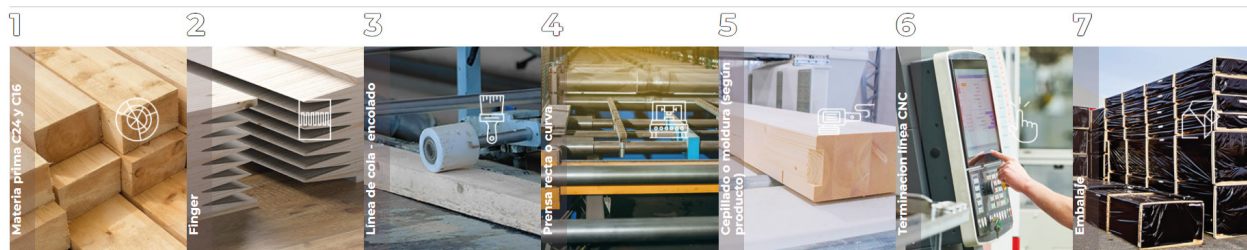


Figura 20. Proceso producción madera laminada. Forestal Arauco. [39]

Se utiliza pino radiata la cual se une con otras secciones de madera a través de uniones dentadas (finger joint), para luego ser encolada con adhesivos estructurales, prensada y aplicar las terminaciones necesarias para obtener la madera laminada.

Productos Estándar disponibles en tiendas especializadas			
Producto mm	Espesor(e) mm	Altura(h) láminas	Largo m
Pilares	90	90	2,5
	115	115	2,7
	138	138	2,7
Vigas	42	185	6
	42	228	6
	65	228	8
	65	304	10

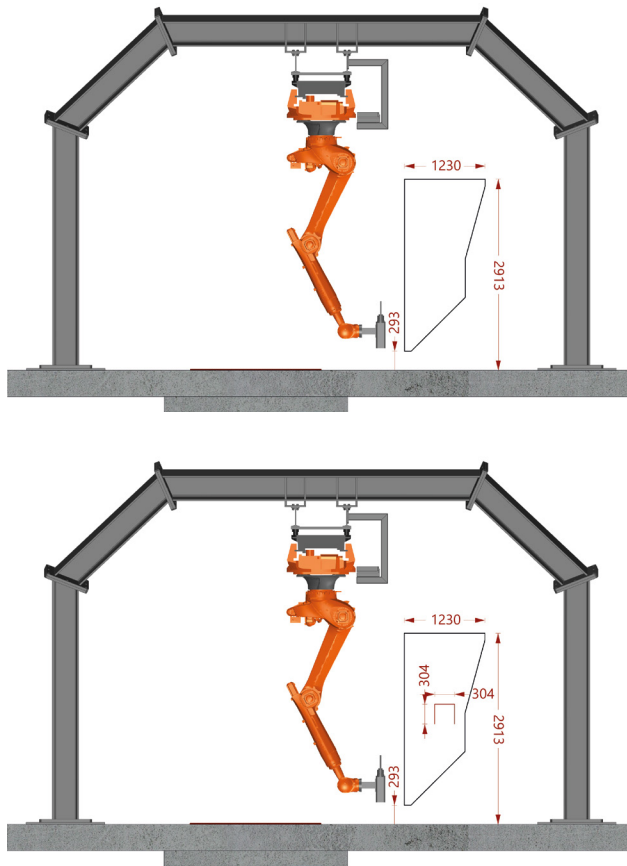
Para desarrollar la geometría del banco de trabajo, se emplea una tabla de referencia con las medidas del material estándar para configurar las dimensiones de trabajo de la madera y lograr un acercamiento a las posibles condiciones reales.

Tabla 1. Dimensiones productos de madera laminada. Forestal Arauco. [40]

## Espacio de trabajo

Considera el espacio virtual generado por los gemelos digitales (laboratorio y robot), las dimensiones resultantes por la aplicación del algoritmo de mecanizado (zonas, mapa y figura), el funcionamiento del mismo algoritmo (figura variable) y las dimensiones del material.

La propuesta se basa en estos elementos, formando parte del algoritmo programado, además de tener un acercamiento a posibles condiciones reales.



*Ilustración 92. Consideración de dimensiones y algoritmo.  
Elaboración propia.*

## Mecanismo de desplazamiento

Debido a la existencia de múltiples posiciones de la figura en el espacio delimitado, su desplazamiento horizontal y vertical necesita de un mecanismo que permita el desplazamiento en estos ejes.

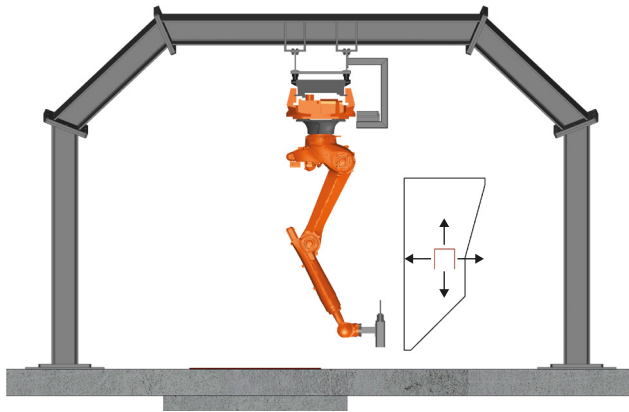


Ilustración 93. Desplazamiento de figura.  
Elaboración propia.

Como solución al desplazamiento vertical, se plantea una plataforma que utiliza el principio de un elevador hidráulico, que por medio de la presión ejercida por los fluidos se hace posible el desplazamiento de un pistón permite subir y bajar la plataforma de apoyo.

### Desplazamiento pistón

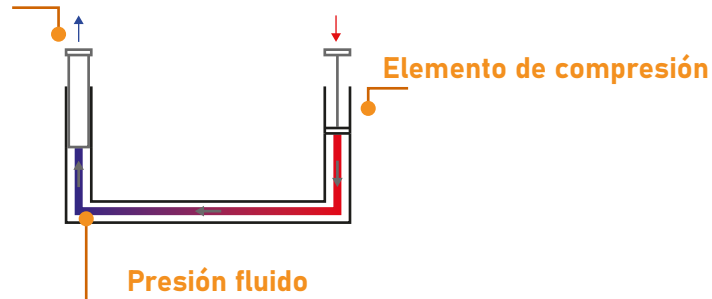
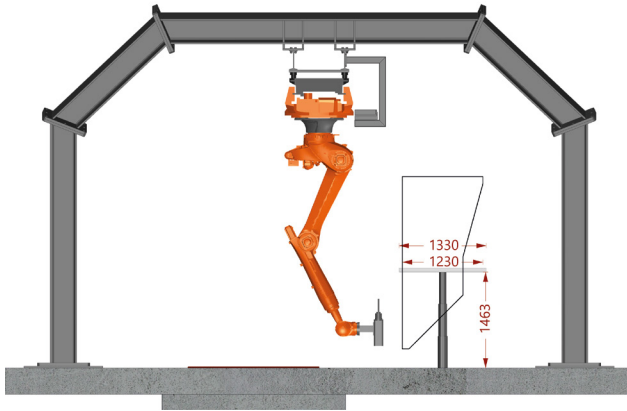


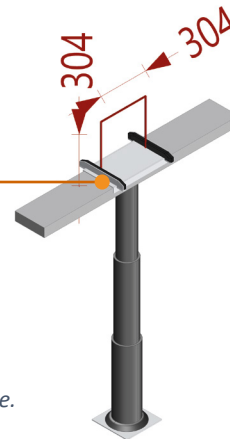
Ilustración 94. Esquema elevador hidráulico.  
Elaboración propia.

Para la resolución del desplazamiento horizontal, se plantea una plataforma deslizante, capaz de ajustar su ancho para adaptarse a las diversas dimensiones de las piezas para el mecanizado en madera (anexo F).



*Ilustración 95. Elevador hidráulico.  
Elaboración propia.*

**Plataforma deslizante**

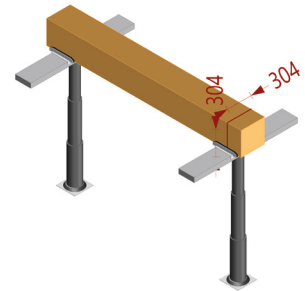


*Ilustración 96. Definición plataforma deslizante.  
Elaboración propia.*

De este modo se desarrolla un elevador hidráulico de doble plataforma, una cual sustenta la base de apoyo para el material de trabajo y otra que permite el desplazamiento con el algoritmo. Al estar conectado con el algoritmo, se ajusta automáticamente la posición, tanto vertical como horizontal, además de adaptarse a las dimensiones del material, y como es un componente parametrizado, se puede controlar y variar la cantidad de elementos, su distanciamiento y adecuarlo a las condiciones que se estimen necesarias para el uso de la plataforma de simulación.



*Ilustración 97. Geometría auxiliar.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 98. Cambio de capacidades.  
Elaboración propia.*

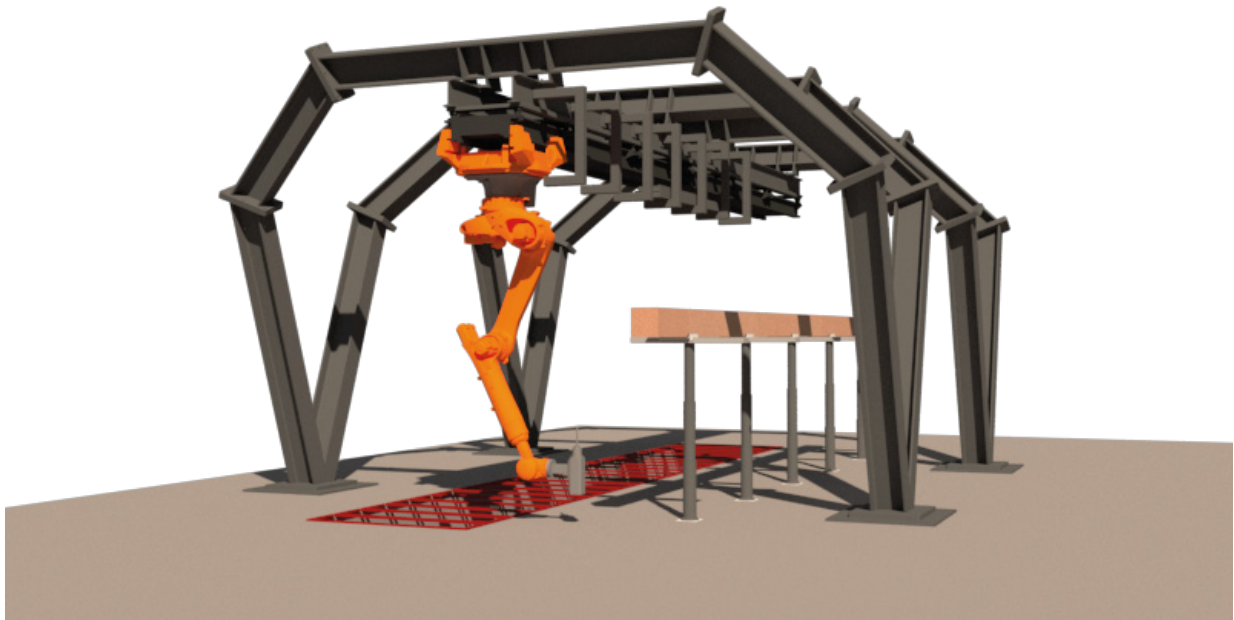
# FLUJO DE TRABAJO



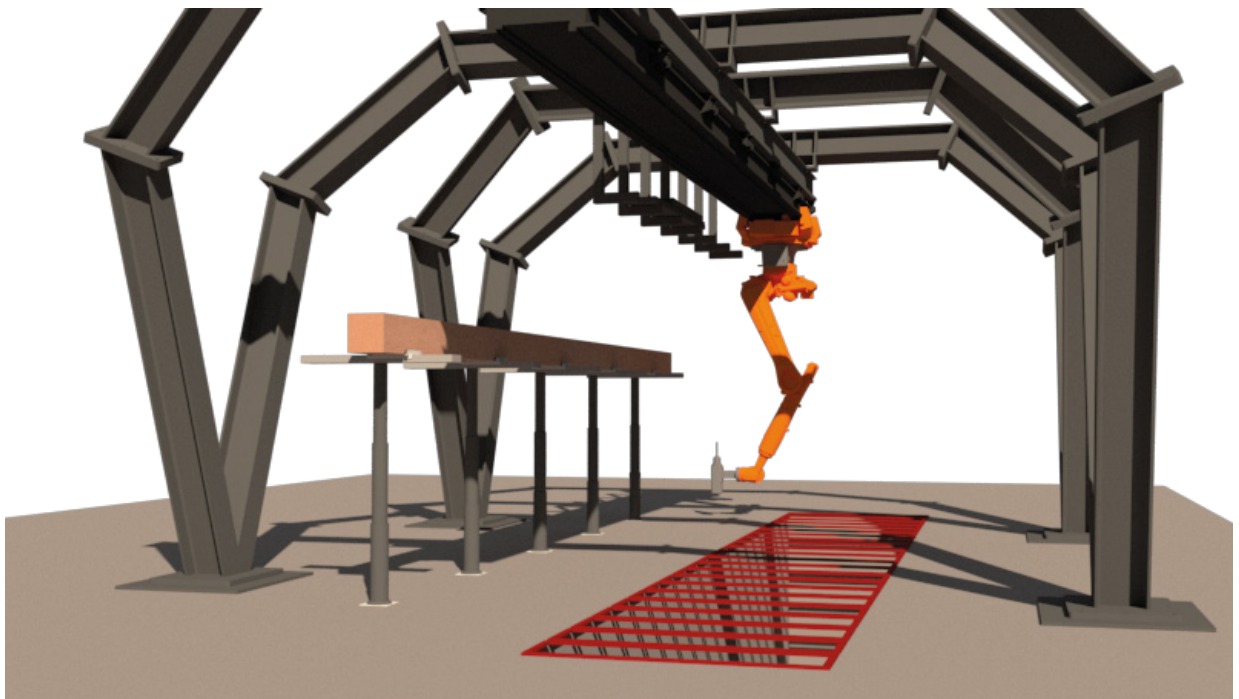
Se plantea la figura resultante deseada y se desarrolla la trayectoria para cumplir con este objetivo, a través de un diseño paramétrico en el ambiente digital.

El flujo de trabajo demuestra de manera simplificada el funcionamiento total de la plataforma de simulación, enfocados en un material a trabajar, se ajusta mediante el algoritmo desarrollado para determinar las dimensiones y posición en el espacio.

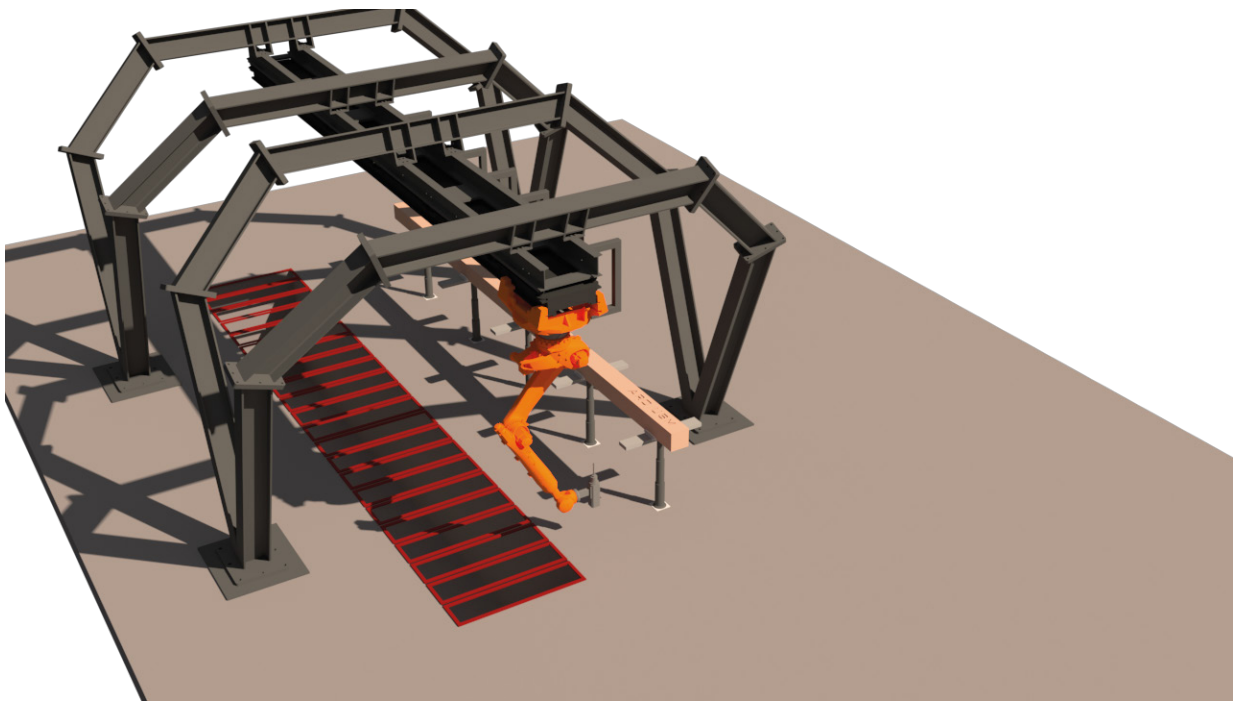
# SIMULACIÓN Y RESULTADOS



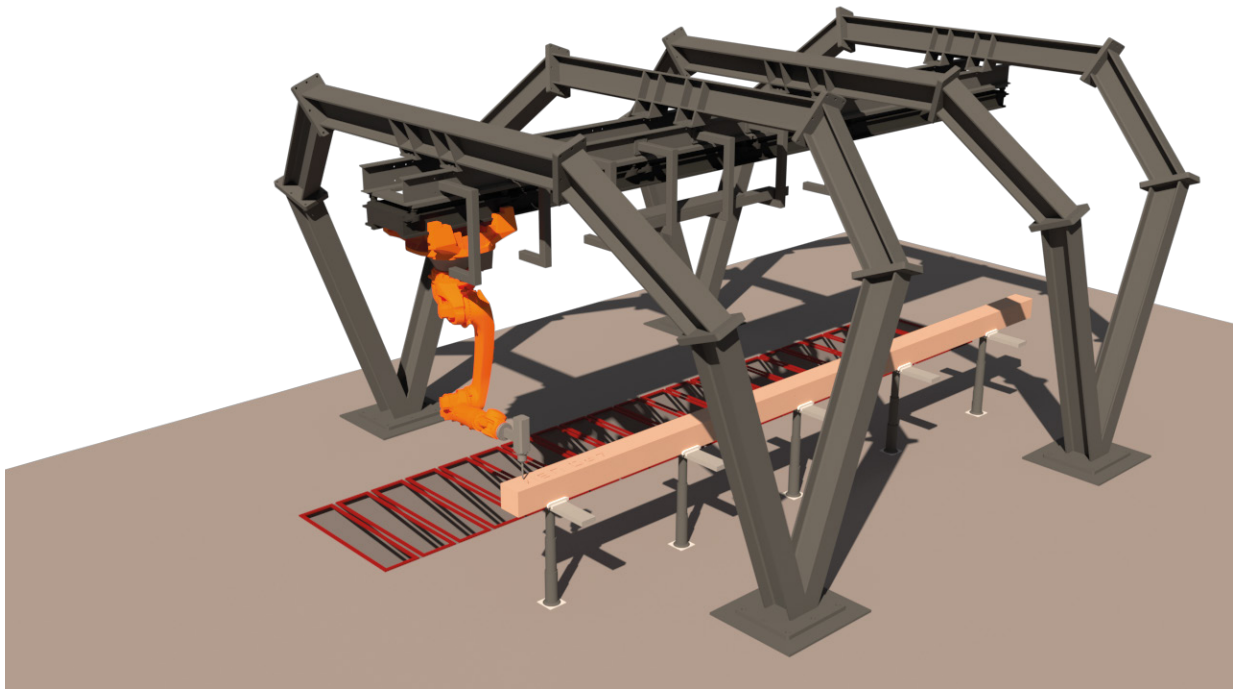
*Ilustración 99. Render plataforma de simulación.  
Elaboración propia.*



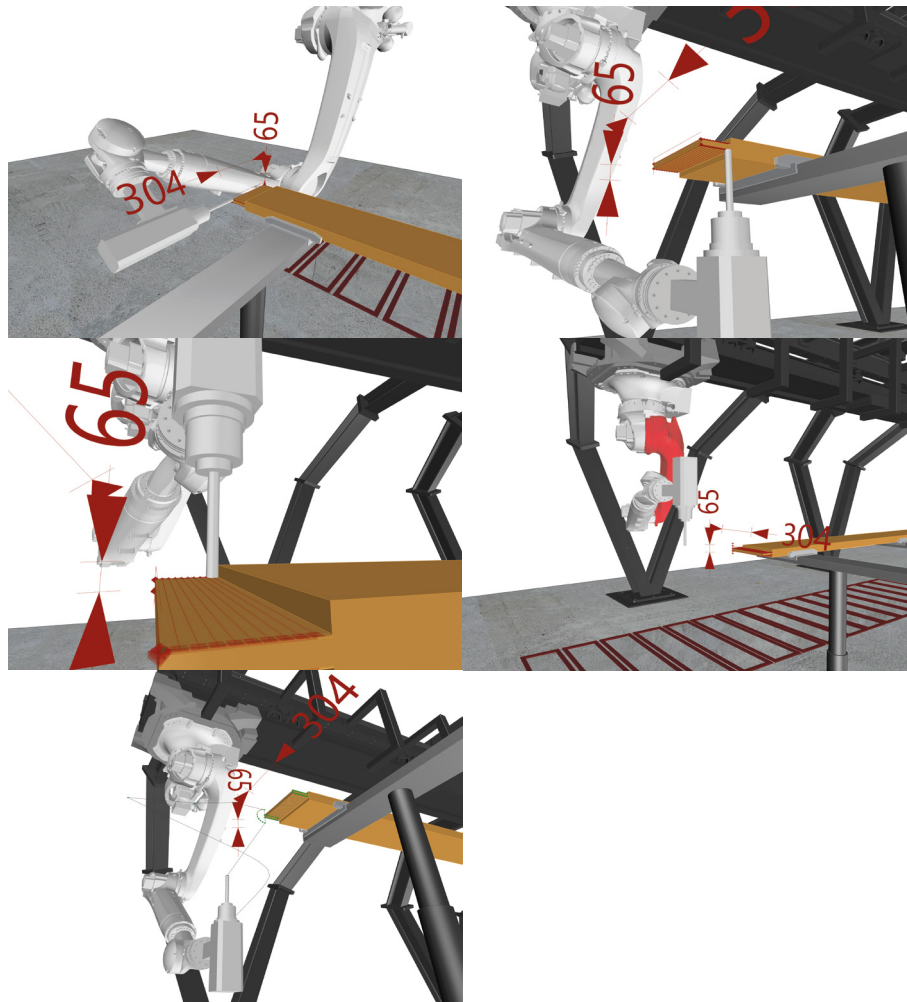
*Ilustración 100. Render plataforma de simulación.  
Elaboración propia.*



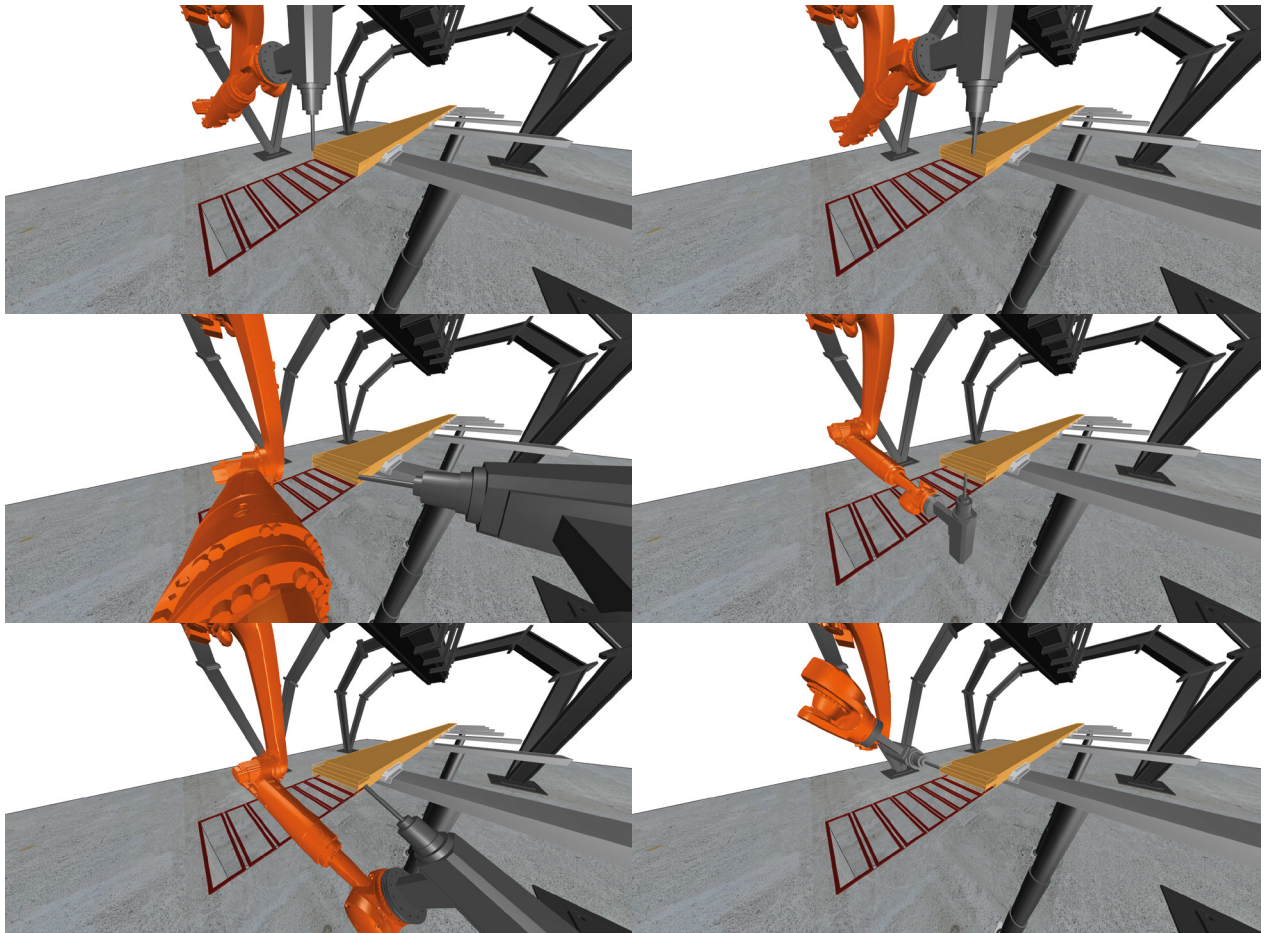
*Ilustración 101. Render plataforma de simulación.  
Elaboración propia.*



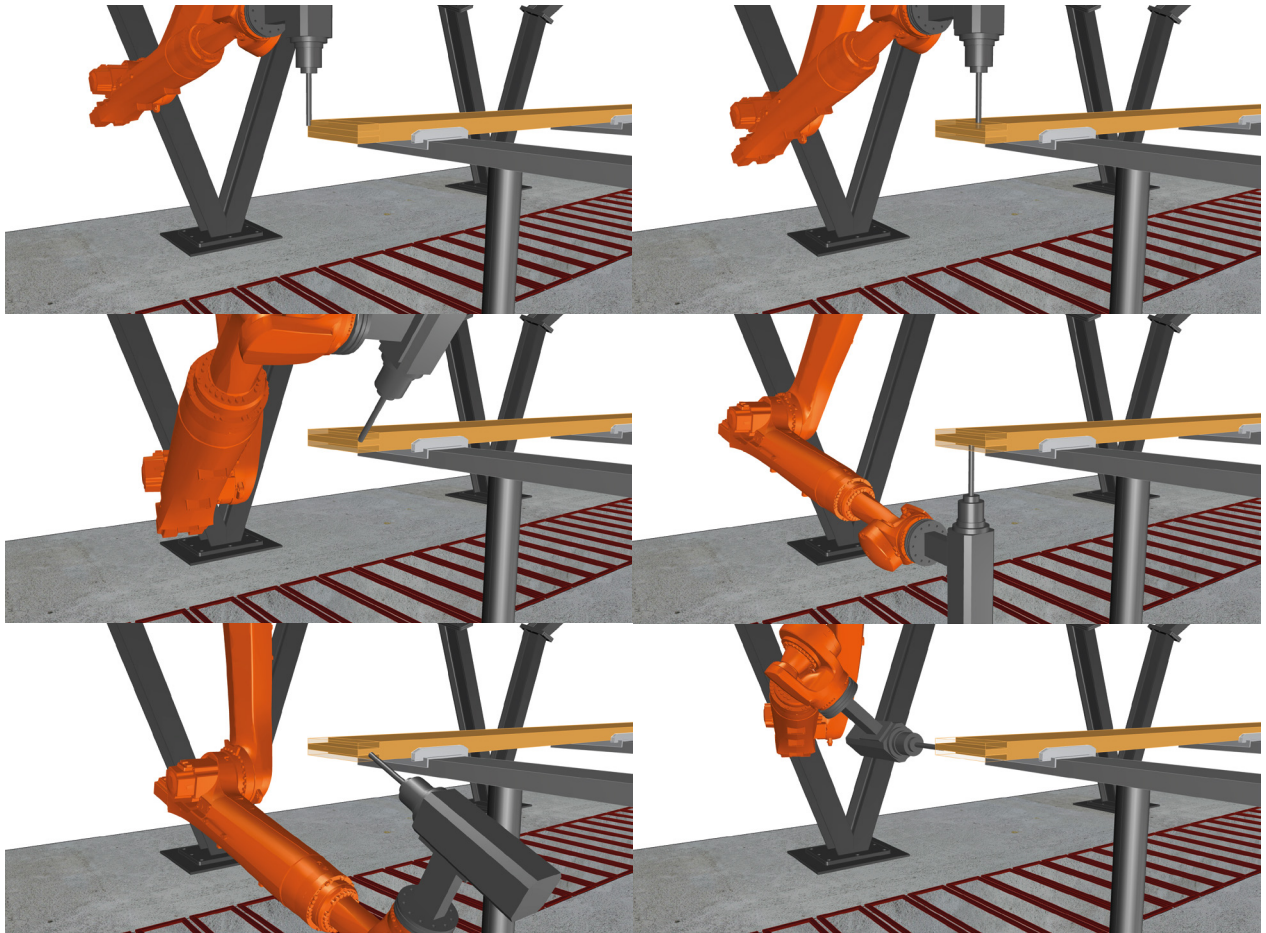
*Ilustración 102. Render plataforma de simulación.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 103. Comprobación de las capacidades de mecanizado y ejecución de trayectoria.  
Elaboración propia.*



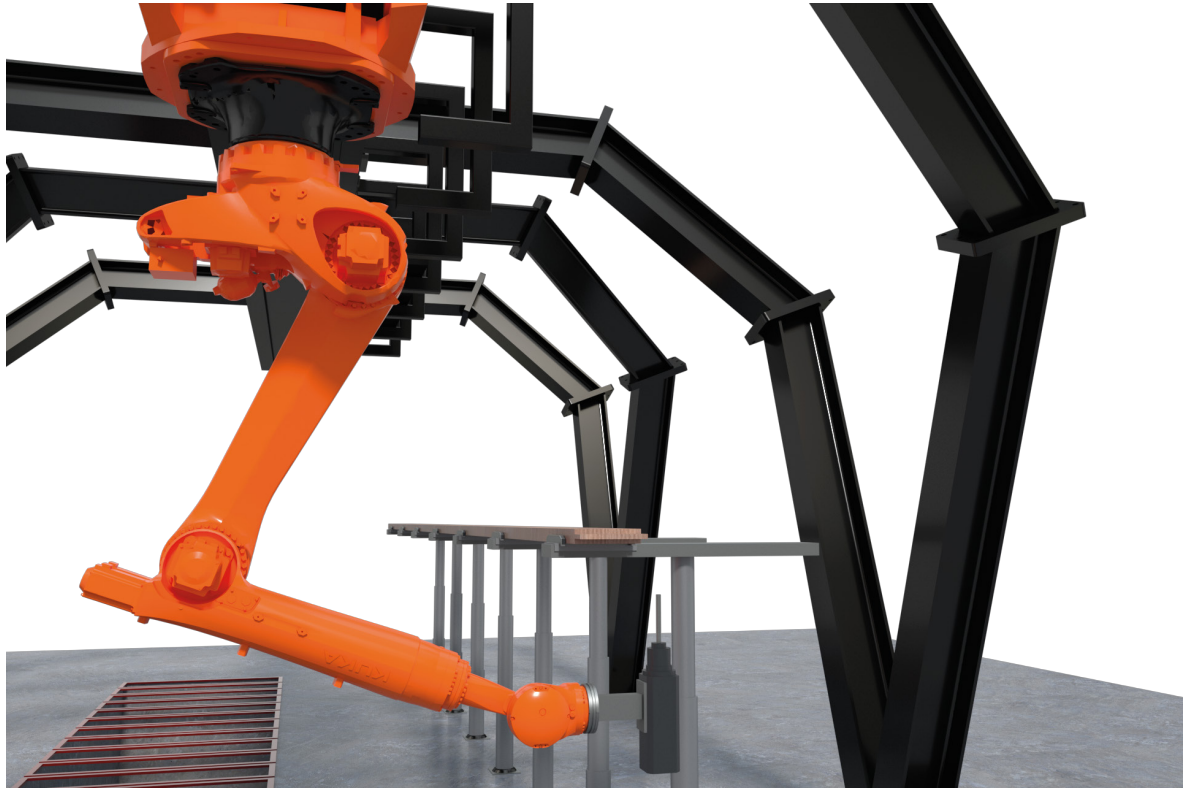
*Ilustración 104. Secuencia plataforma de simulación.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 105. Secuencia plataforma de simulación (anexo G).  
Elaboración propia.*



*Ilustración 106. Render resultado de mecanizado.  
Elaboración propia.*



*Ilustración 107. Render resultado de mecanizado.  
Elaboración propia.*

# CONCLUSIONES



La construcción de la plataforma de simulación requiere de la comprensión de muchos elementos, herramientas digitales, métodos de organización y elaboración de criterios, definiciones y estructura para plantear y plasmar un concepto digital de manera tal que logre ser comprensible en la escritura. Esta memoria de título I+D establece un flujo de trabajo para automatizar el proceso de mecanizado en madera y proponer una estructura en base a resultados obtenidos de una programación lógica, definida y estructurada, para poder manipular y simular condiciones aplicables en un entorno real del robot KUKA KR210 R3100-2 integrado en el laboratorio de construcción y manufactura robotizada.

Desde la exploración inicial la plataforma es un constante aprendizaje y desarrollo de criterios que son considerados apropiados para adaptar las necesidades de la memoria y los conocimientos de programación visual para la construcción de una plataforma de simulación. A medida que se desarrolla cada etapa paralelamente se progresa en el entendimiento de los robots industriales, como se desenvuelven en el espacio virtual y como se configuran para realizar labores mediante la programación visual.

Parte esencial del proyecto I+D es previsualizar lo que se espera desarrollar, plantear una metodología y explorar las posibilidades, y así como el diseño paramétrico es una iteración de secuencias e ingreso de datos para obtener los múltiples resultados de cada serie de programación, la constante búsqueda de soluciones y métodos para elaborar los algoritmos es parte del proceso, con cada iteración se obtiene una retroalimentación y orienta el desarrollo de la memoria a definir los criterios apropiados y seguir una secuencia lógica en cada etapa individual, para luego integrarlo en el conjunto de la plataforma de simulación.

La memoria ejemplifica una manera de plantear los algoritmos, sirviendo como una guía para el desarrollo paramétrico y el uso de robots industriales, al igual que la utilización de las herramientas digitales para virtualizar un gemelo digital, analizando, descomponiendo y proponiendo geometrías, que en su conjunto permiten formar un flujo de trabajo, identificando las entradas y salidas de información para reestructurar el ciclo de programación, plantear nuevas definiciones e incluso el añadir en un proceso futuro vínculos con otras herramientas digitales, especialidades multidisciplinarias como la informática, mecánica o ingeniería y crear el enlace ciber-físico en tiempo real.

Con la elaboración de la plataforma y el algoritmo de mecanizado automatizado, al momento de poner a prueba su funcionalidad, las capacidades de mecanizado permiten desarrollar mayores desplazamientos que los planteados como criterios en un inicio, otorgando un movimiento a través de cada una de las aristas de la figura, aunque este resultado puede variar de acuerdo a la posición en el espacio, la posibilidad de manipular libremente cada uno de los ángulos del robot permiten elaborar trayectorias factibles para el mecanizado.

La puesta a prueba final demuestra como un desarrollo coherente y estructurado logran resolver de manera viable el mecanizado en madera, con los conocimientos suficientes para el manejo de Grasshopper la plataforma de simulación resuelve los principales problemas como la colisión con los diferentes objetos del ambiente, las dimensiones y posicionamiento del material, y una vez solucionado esto el siguiente paso es resolver las trayectorias que van definidas al robot para elaborar las tareas que se le programen, ya una vez realizado puede ser aplicado una y otra vez, lo que da cabida a realizar nuevas operaciones cada vez más complejas e ir integrando nuevas funcionalidades y elementos.

Este trabajo puede sentar una base para más exploraciones y comprensión de las capacidades del laboratorio de construcción y manufactura robotizada, como el definir las zonas factibles para el mecanizado de 4 aristas, la orientación y movimientos que ejecuta el robot en cada uno de los lados de mecanizado, especificar la exploración y definición de las zonas y mapas de trabajo, conformar un mapa de trabajo asimilable a la envoltura de trabajo con las condiciones de colisión y orientación pertinentes.

La adición de factores y elementos en el proceso de programación de la plataforma permitiría resolver soluciones geométricas para la utilización efectiva del espacio real, como en el caso de la propuesta de banco de trabajo, es un primer acercamiento a una solución real para sustentar labores de mecanizado en el espacio, en caso de integrar mayores datos de dimensiones, materiales y herramientas de trabajo se puede llegar a plantear una plataforma multidisciplinaria para satisfacer cada una de nuestras proyecciones e ideas, que en conjunto con el uso de algoritmos diseñados paramétricamente nos permitan apreciar dichas propuestas con una mirada arquitectónica del diseño del espacio, conservando los criterios técnicos y manejar de manera eficiente el trabajo digital sin comprometer el espacio físico.

Las posibilidades para el diseño de estructuras solo está limitado a las evaluaciones técnicas que podamos imaginar, el diseño digital nos brinda la gran ventaja de encontrar diversas soluciones para un mismo problema, cada una de estas vías tienen su propio desarrollo y fundamentos, que con un manejo técnico de las tecnologías digitales y una visión arquitectónica podemos llegar a innovar en la creación de diseños de estructuras en madera, que con la particularidad de enfocarse en el uso y aplicaciones de uniones carpinteras realizadas con la precisión de un robot industrial, es factible llegar a hacer uso total del espacio que brinda el laboratorio para diseñar, construir y montar estas estructuras que con la proyección adecuada podemos modular o sub dividir las secciones del diseño y elaborar estructuras de mayor envergadura y utilizar la tecnología para simplificar nuestros diseños y llevarlos a la realidad.

Estas especulaciones y proyecciones, con los procesos de virtualización y simulación podemos volverlas tangibles, y con la suficiente dedicación y precisión para hacer uso del laboratorio de construcción y manufactura robotizada, puede tornarse en el principal centro de innovación universitaria y profesional para llevar a cabo proyectos en escala 1:1 para construcciones en madera, sin olvidar de poder llevar a cabo procesos de restauración mezclando el paso con el presente y proyectando hacia el futuro.

Este proceso digital sobre la proyección de la plataforma de simulación y comprensión de los robots industriales, es una constante iteración, una secuencia de prueba y error, que en la medida que se van resolviendo problemáticas, con cada nuevo proceso e iteración aparecen nuevos desafíos a resolver y de los cuales es posible aprender e interiorizar estos procedimientos, concluyendo nuevos criterios y vías para elaborar un mismo procedimiento, donde pueda ser posible explotar las ventajas de la manufactura personalizada y el diseño digital, utilizando los recursos de manera eficiente, con el sello de crear estructuras sustentables y estableciendo vínculos multidisciplinarios entre la arquitectura y otras materias, conformando el lenguaje de la nueva era físico-digital.

# REFERENCIAS



- 1. Isolda, Agustí Juan. Sustainability Assessment and Development of Guidelines for Digital Fabrication in Construction. 2018.**
- 2. United Nations Environment Programme. 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector - Executive Summary. 2020.**
- 3. Chai, Hua, So, Chunpong y Yuan, Philip F. Manufacturing double-curved glulam with robotic band saw cutting technique. 2021.**
- 4. Thoma, Andreas y Adel, Arash. Robotic Fabrication of Bespoke Timber Frame Modules. 2018.**
- 5. Chai, Hua y Yuan, Philip F. Investigations on Potentials of Robotic Band-Saw Cutting in Complex Wood Structures. 2019.**
- 6. Naboni, Roberto, y otros. Design, simulation and robotic assembly of reversible timber structures. 2021.**
- 7. Zhang, Ye, y otros. Digital Twin in Computational Design and Robotic Construction of Wooden Architecture. 2021.**
- 8. Eversmann, Philipp. Robotic Fabrication Techniques for Material of Unknown Geometry. 2018.**
- 9. Brugnaro, Giulio, Figliola, Angelo y Dubor, Alexandre. Negotiated Materialization: Design Approaches Integrating Wood Heterogeneity Through Advanced Robotic Fabrication. 2019.**
- 10. Nicolescu, Adrian, y otros. VIRTUAL PROTOTYPING AND PROGRAMMING OF A ROBOTIC MANUFACTURING CELL FOR WOOD MACHINING. 2018.**
- 11. Pedersen, Jens, y otros. Augmented drawn construction symbols: A method for ad hoc robotic fabrication. 2020.**
- 12. Krieg, Oliver David y Lang, Oliver. Adaptive Automation Strategies for Robotic Prefabrication of Parametrized Mass Timber Building Components. 2019.**
- 13. United Nations Office of the Secretary-General's Envoy on Technology. Action Plan for a Sustainable Planet in the Digital Age - Executive Summary. 2022.j, y otros.**

14. Kyjanek, Ondrej, y otros. **Implementation of an Augmented Reality AR Workflow for Human Robot Collaboration in Timber Prefabrication. 2019.**
15. Mork, John Haddal. **Parametric Timber Detailing. A parametric toolkit customized for detailing fabrication-ready timber structures. 2020.**
16. Petschnigg, Christina, y otros. **Online Simulation for Flexible Robotic Manufacturing. 2018.**
17. Caneparo, Luca. **Digital Fabrication in Architecture, Engineering and Construction. 2014.**
18. Neythalath, Narendrakrishnan, y otros. **Applying software design patterns to graph-modelled robotic workflows. 2021.**
19. Kunic, Anja, y otros. **Design and assembly automation of the Robotic Reversible Timber Beam. 2021.**
20. Szulczyński, Paweł y Kozłowski, Krzysztof. **Parametric programming of industrial robots. 2015.**
21. Svilans, Tom, y otros. **A Multi-scalar Approach for the Modelling and Fabrication of Free-Form Glue-Laminated Timber Structures. 2017.**
22. Wagner, Hans Jakob, y otros. **Towards digital automation flexibility in large scale timber construction: integrative robotic prefabrication and co design of the BUGA Wood Pavilion. 2020.**
23. Martinez, Pablo, y otros. **Simulation-Driven Design of Wood Framing Support Systems for Off-Site Construction Machinery. 2020.**
24. Vercruyse, Emmanuel. **Autonomous Architectural Operations. 2019.**
25. Chai, Hua, Zhang, Liming y Yuan, Philip. **Advanced Timber Construction Platform: Multi-robot System for Timber Structure Design and Prefabrication. 2019.**
26. Ruttico, Pierpaolo. **Robots in Architecture, Research and Development. 2017.**
27. Dritsas, Stylianos y Soh, Gim Song. **Building robotics design for construction. 2019.**

28. Dubor, Alexandre, y otros. *Sensors and Workflow Evolutions: Developing a Framework for Instant Robotic Toolpath Revision*. 2016.
29. Braumann, Johannes y Brell-Cokcan, Sigrid. *Adaptive Robot Control*. 2015.
30. Castelo-Branco, Renata y Leitão, António. *Comprehending Algorithmic Design*. 2021.
31. Tedeschi, Arturo. *AAAD\_Algorithms-Aided Design*. 2014.
32. Braumann, Johannes y Brell-Cokcan, Sigrid. *Real-Time Robot Simulation and Control for Architectural Design*. 2012.
33. Abdelaal, Moataz, y otros. *Visualization for Architecture, Engineering, and Construction: Shaping the Future of Our Built World*. 2022.
34. Lu, Ming, Zhu, Wei Ran y Yuan, Philip F. *Toward a Collaborative Robotic Platform: FUROBOT*.
35. KUKA Roboter GmbH. [En línea] <[https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/importe-d/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000205456\\_en.pdf](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/importe-d/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000205456_en.pdf)>.
36. KUKA Roboter GmbH. [En línea] <[https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/importe-d/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000325897\\_es.pdf?rev=d03e690feb77432bb39af511889b3aaf&hash=F70163A4A3E50420C7376BE1B4DECAFE](https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/importe-d/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000325897_es.pdf?rev=d03e690feb77432bb39af511889b3aaf&hash=F70163A4A3E50420C7376BE1B4DECAFE)>.
37. Wagner, Hans Jakob, y otros. *Flexible and transportable robotic timber construction platform – TIM*. 2020.
38. Martinez Villanueva, Emanuel, y otros. *Design and simulation of an automated robotic machining cell for cross-laminated timber panels*. 2021.
39. ARAUCO Chile. [En línea] <<https://www.arauco.cl/chile/marcas/hilam/hilam-estandar/>>.
40. ARAUCO Chile. [En línea] <[https://www.arauco.cl/chile/wp-content/uploads/sites/14/2018/03/file\\_4450\\_01\\_16099\\_hilam\\_tablas\\_de\\_calculo\\_0911\\_15.pdf](https://www.arauco.cl/chile/wp-content/uploads/sites/14/2018/03/file_4450_01_16099_hilam_tablas_de_calculo_0911_15.pdf)>.

# ANEXOS



**ANEXO A - COMPLEMENTOS DE ROBOTS PARA GRASSHOPPER**

**ANEXO B - ROBOT PRINCIPAL E INTERFAZ DEL ALGORITMO**

**ANEXO C - ORIENTACIÓN SISTEMA DE COORDENADAS**

**ANEXO D - NÚCLEO ROBOT SECUNDARIO**

**ANEXO E - EVALUACIÓN FIGURA DE MECANIZADO**

**ANEXO F - PROPUESTA GEOMETRÍA VARIABLE**

**ANEXO G - PUESTA A PRUEBA DEL MECANIZADO**

**ANEXO H - PLATAFORMA DE SIMULACIÓN  
(rhinoceros 7/grasshopper)**