

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

**SEDE CUENCA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

*Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero  
Mecatrónico e Ingeniera Mecatrónica*

**PROYECTO TÉCNICO:**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS  
PROCESOS DE SELLADO Y LACADO, EN LA LÍNEA DE FABRICACIÓN  
DE DORMITORIOS DE LA EMPRESA CARPINTERÍA Y TAPICERÍA  
INTERNACIONAL CTIN. CIA. LTDA.”**

**AUTORES:**

PABLO ANDRÉS GÓMEZ GUERRERO

ROMANELLA JOHANNA SORIA GIMÉNEZ

**TUTOR:**

ING. JOHN IGNACIO CALLE SIGÜENCIA, PhD

**CO-TUTOR:**

ING. IVÁN MARCELO ESCANDÓN DEIDAN, Msc.

CUENCA - ECUADOR

2020

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

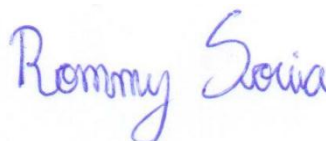
Nosotros, Pablo Andrés Gómez Guerrero con documento de identificación N° 0105249676 y Romanella Johanna Soria Giménez con documento de identificación N° 0106398183, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y SIMULACIÓN PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE SELLADO Y LACADO, EN LA LÍNEA DE FABRICACIÓN DE DORMITORIOS DE LA EMPRESA CARPINTERÍA Y TAPICERÍA INTERNACIONAL CTIN. CIA. LTDA.”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico e Ingeniera Mecatrónica*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, abril del 2020



Pablo Gómez Guerrero  
C.I. 0105249676



Romanella Soria Giménez  
C.I. 01063918183

## CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y SIMULACIÓN PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE SELLADO Y LACADO, EN LA LÍNEA DE FABRICACIÓN DE DORMITORIOS DE LA EMPRESA CARPINTERÍA Y TAPICERÍA INTERNACIONAL CTIN. CIA. LTDA.”**, realizado por Pablo Andrés Gómez Guerrero y Romanella Johanna Soria Giménez, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, abril del 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'John Calle', is written over a faint rectangular stamp or watermark.

John Ignacio Calle Sigüencia. PhD.

C.I. 0102118213

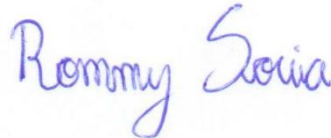
## DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Pablo Andrés Gómez Guerrero con documento de identificación N° 0105249676 y Romanella Johanna Soria Giménez con documento de identificación N° 0106398183, autores del trabajo de titulación: “**DISEÑO Y SIMULACIÓN PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS DE SELLADO Y LACADO, EN LA LÍNEA DE FABRICACIÓN DE DORMITORIOS DE LA EMPRESA CARPINTERÍA Y TAPICERÍA INTERNACIONAL CTIN. CIA. LTDA.**”, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, abril del 2020



Pablo Gómez Guerrero  
C.I. 0105249796



Romanella Soria Giménez  
C.I. 0106398183

## **DEDICATORIAS**

El presente trabajo está dedicado de manera especial a mi madre María de Lourdes, mis abuelos José y Esther, ellos han sido un apoyo fundamental durante todos estos años de estudio, gracias su amor y sacrificios he podido llegar hasta donde estoy y culminar mis estudios universitarios.

A mi hermano mayor Byron, que me ha apoyado en los momentos difíciles, y me ha ayudado cuando más lo he necesitado, a mi padre Manuel por apoyarme a seguir mi carrera profesional.

A todos los docentes quienes conforman la carrera de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica Salesiana, y de manera especial a los profesionales quienes forman parte de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA, por brindarnos su apoyo y conocimientos para la realización del proyecto.

**Pablo Andrés Gómez Guerrero**

El presente trabajo investigativo está dedicado a mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio que realizaron todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y terminar mi carrera profesional.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A los docentes y laboratoristas de la Universidad Politécnica Salesiana, además de los profesionales de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA. por abrirnos las puertas, compartir sus conocimientos y ayudarnos a realizar este trabajo con éxito.

**Romanella Johanna Soria Giménez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a John Calle. PhD, gracias por sus conocimientos, consejos y pautas dadas, que fueron fundamentales, para el desarrollo y ejecución de nuestro proyecto de grado.

Agradezco a la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., por brindarnos un espacio para el desarrollo conjunto de proyectos, que involucran la industria y sus necesidades, y de manera especial al Ing. Javier Iglesias, por su contribución y colaboración con el proyecto.

*Pablo Andrés Gómez Guerrero*

Agradezco a mis padres: Alicia y Juan, quienes me han ayudado y apoyado a lo largo de mi carrera universitaria y culminar esta importante etapa de mi vida

Agradezco a mi tutor Ing. John Calle por haberme orientado con paciencia y rectitud, ayudándome con consejos y correcciones para la finalización de este proyecto investigativo.

Agradezco a los profesionales de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA. y de manera especial al Ing. Javier Iglesias por su valioso aporte para nuestra investigación.

Agradezco a mi compañero Cristian Valdez por su paciencia y apoyo en la realización de este proyecto de investigación.

***Romanella Johanna Soria Giménez***



# ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. PROBLEMA DE ESTUDIO.....	2
2.1. ANTECEDENTES.....	2
2.2. IMPORTANCIA Y ALCANCES.....	3
2.3. DELIMITACIÓN.....	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO.....	4
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
4.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA.....	5
4.1.1. Fabricación del mueble.....	5
4.1.2. Proceso de lacado.....	8
4.1.3. Análisis del volumen de producción.....	19
4.1.4. Mobiliario representativo.....	22
4.2. SISTEMAS AUTOMÁTICOS.....	24
4.2.1. Sistemas automatizados de rociado lineal.....	24
4.2.2. Robot industrial.....	27
5. MARCO METODOLÓGICO.....	31
5.1. DISEÑO DEL SISTEMA Y PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN.....	32
5.1.1. Pruebas de laboratorio.....	32
5.1.2. Simulación de los sistemas.....	48
5.2. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO.....	53
5.2.1. Análisis de costos de la producción actual.....	54

5.2.2.	Inversión inicial.....	61
5.2.3.	Análisis de inversión de los sistemas .....	68
5.3.	Ponderación .....	73
6.	RESULTADOS.....	74
6.1.	RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO .....	74
6.1.1.	Pruebas de calidad.....	74
6.1.2.	Pruebas de destreza .....	76
6.2.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS.....	76
6.3.	RESULTADOS DEL ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO.....	77
7.	CONCLUSIONES .....	79
8.	RECOMENDACIONES.....	80
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
10.	ANEXOS .....	84
	ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS DE LOS MOBILIARIOS MÁS REPRESENTATIVOS.....	84
	ANEXO 2: FICHAS TÉCNICAS DE LOS ROBOTS SIMULADOS .....	88
	ANEXO 3: FICHAS TÉCNICAS DE LOS ROBOTS EVALUADOS .....	92
11.	APÉNDICES.....	95
	APÉNDICE A: PROCEDIMIENTO DE PROGRAMACIÓN DE SIMULACIONES.....	95
	APÉNDICE B: SIMULACIONES DE LOS SISTEMAS CON LOS MUEBLES .....	116
	APÉNDICE C: PLANOS DE LAS PROPUESTAS DE IMPLEMENTACIÓN .....	124
	APÉNDICE D: FLUJO DE CAJA DE LOS SISTEMAS.....	131

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Diagrama de flujo de la fabricación del mueble</i> [2].	5
Figura 2. <i>Madera cerezo chileno y pino poplar</i> [2].	6
Figura 3. <i>Preparación de la madera</i> [Cortesía de la empresa].	6
Figura 4. <i>Preparación de las chapas</i> [Cortesía de la empresa].	7
Figura 5. <i>Preparación de los tableros</i> [Cortesía de la empresa].	7
Figura 6. <i>Montaje inicial</i> [Cortesía de la empresa].	8
Figura 7. <i>Preparación de la madera mediante papel de lija</i> [7].	8
Figura 8. <i>Cadena del proceso de lacado</i> [8].	9
Figura 9. <i>Proceso de tinturado</i> [Cortesía de la empresa].	9
Figura 10. <i>Proceso de sellado</i> [Cortesía de la empresa].	10
Figura 11. <i>Proceso de lijado</i> [Cortesía de la empresa].	10
Figura 12. <i>Proceso de retoque</i> [Cortesía de la empresa].	11
Figura 13. <i>Proceso de lacado</i> [Cortesía de la empresa].	11
Figura 14. <i>Proceso de embalaje</i> [Cortesía de la empresa].	12
Figura 15. <i>Como funciona una pistola pulverizadora</i> [6].	12
Figura 16. <i>Partes principales de una pistola pulverizadora</i> [11].	13
Figura 17. <i>Pistola con alimentación por gravedad</i> [6].	14
Figura 18. <i>Pistola con alimentación por presión</i> [6].	14
Figura 19. <i>Pistola con alimentación por succión</i> [6].	15
Figura 20. <i>Copa de viscosidad Ford N°4</i> [16].	16
Figura 21. <i>Cabinas de aplicación de recubrimiento</i> [Cortesía de la empresa].	17
Figura 22. <i>Cabinas de secado</i> [Cortesía de la empresa].	18
Figura 23. <i>Ventilación en las cabinas</i> [Cortesía de la empresa].	18
Figura 24. <i>Porcentaje de producción de mobiliarios</i> .	19
Figura 25. <i>Producción porcentual de camas</i> .	19
Figura 26. <i>Producción total de camas de 2 y 2 ½ plazas</i> .	20
Figura 27. <i>Cama Vari II de 2 plazas</i> [17].	20
Figura 28. <i>Cama Match de 2 ½ plazas</i> [17].	20
Figura 29. <i>Producción total de veladores y cómodas</i> .	21
Figura 30. <i>Velador Vari II</i> [17].	21
Figura 31. <i>Velador Basilea</i> [17].	21
Figura 32. <i>Cómoda Vari</i> [17].	22

Figura 33. <i>Automatización completa del proceso de lacado</i> [20].	24
Figura 34. <i>Pistola pulverizadora automática</i> [22].	25
Figura 35. <i>Boquillas automáticas distribuidas</i> [19].	26
Figura 36. <i>Cabezal móvil con boquillas</i> [20].	26
Figura 37. <i>Funcionamiento de los rodillos de recubrimiento</i> [24].	27
Figura 38. <i>Articulaciones prismáticas y de rotación</i> [28].	28
Figura 39. <i>Robot de configuración cartesiana</i> [29].	28
Figura 40. <i>Robot cartesiano de cinco ejes</i> [30].	29
Figura 41. <i>Robot manipulador antropomórfico</i> [29].	29
Figura 42. <i>Robot con dos muebles en mesa giratoria</i> [31].	30
Figura 43. <i>Robot con desplazamiento lineal</i> [32].	30
Figura 44. <i>Diagrama de metodología del proyecto.</i>	31
Figura 45. <i>Diseño de la pistola pulverizadora.</i>	33
Figura 46. <i>Efector final para las pruebas de laboratorio.</i>	33
Figura 47. <i>Método de definición de herramienta de 4 puntos</i> [33].	34
Figura 48. <i>Coordenadas de la herramienta.</i>	35
Figura 49. <i>Método de definición de base de tres puntos</i> [33].	36
Figura 50. <i>Coordenadas de la base vertical.</i>	36
Figura 51. <i>Coordenadas de la base horizontal.</i>	36
Figura 52. <i>Asignación de la herramienta y base en el programa KUKA</i> [33].	37
Figura 53. <i>Ejemplo de programa para el robot KUKA</i> [33].	37
Figura 54. <i>Tablero tinturado para las pruebas de sellado.</i>	38
Figura 55. <i>Tablero sellado.</i>	39
Figura 56. <i>Tablero lijado</i>	39
Figura 57. <i>Tablero lacado.</i>	40
Figura 58. <i>Pruebas de calidad en orientación horizontal.</i>	40
Figura 59. <i>Pruebas de calidad en orientación vertical.</i>	40
Figura 60. <i>Velador Basilea tinturado.</i>	42
Figura 61. <i>Identificación de superficies en el velador.</i>	42
Figura 62. <i>Velador Basilea sellado.</i>	44
Figura 63. <i>Velador Basilea lijado.</i>	44
Figura 64. <i>Velador Basilea lacado.</i>	45
Figura 65. <i>Velador a escala.</i>	46
Figura 66. <i>Pruebas de destreza.</i>	46

Figura 67. <i>Sistema cartesiano proyectando sello a la cama Match.</i> .....	49
Figura 68. <i>Sistema rotativo proyectando sello a la cama Match.</i> .....	51
Figura 69. <i>Sistema con riel proyectando sello a la cama Match.</i> .....	52
Figura 70. <i>Riel Fanuc R-2000iB [45]</i> .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características para el proceso de sellado y lacado [14].	15
Tabla 2. Tiempos de vaciado para viscosidad [14].	17
Tabla 3. Tiempo de aplicación en veladores Basilea.	23
Tabla 4. Tiempo de aplicación en cómodas Vari.	23
Tabla 5. Tiempo de aplicación en camas Match 2 ½ plazas.	23
Tabla 6. Variables fijas dentro de las pruebas de calidad.	38
Tabla 7. Pruebas de calidad del proceso de sellado en horizontal.	41
Tabla 8. Pruebas de calidad del proceso de sellado en vertical.	41
Tabla 9. Pruebas de calidad del proceso de lacado en horizontal.	41
Tabla 10. Pruebas de calidad del proceso de lacado en vertical.	42
Tabla 11. Variables para las pruebas de destreza.	47
Tabla 12. Definición de variables.	47
Tabla 13. Características del robot cartesiano [35].	49
Tabla 14. Características del robot rotativo [36].	50
Tabla 15. Características del robot con riel [36], [37].	51
Tabla 16. Tiempos para el proceso de sellado.	53
Tabla 17. Tiempos para el proceso de lacado.	53
Tabla 18. Costo total del sistema actual.	56
Tabla 19. Costo total del sistema cartesiano.	58
Tabla 20. Costo total del sistema rotativo.	59
Tabla 21. Costo total del sistema con riel.	60
Tabla 22. Costos totales de los sistemas analizados.	61
Tabla 23. Precio del sistema cartesiano [41], [42].	62
Tabla 24. Precio del sistema rotativo [43], [44].	62
Tabla 25. Precio del sistema riel [44], [45].	63
Tabla 26. Costo de la modificación de estructura del sistema rotativo.	64
Tabla 27. Costo de la modificación de estructura del sistema con riel.	64
Tabla 28. Costo de la red eléctrica para un robot.	65
Tabla 29. Datos técnicos del compresor de aire de tornillo [1].	65
Tabla 30. Costo de la red neumática para el robot.	66
Tabla 31. Inversión inicial de los sistemas analizados.	66
Tabla 32. Depreciación total del sistema cartesiano.	67

Tabla 33. Depreciación total del sistema rotativo.....	67
Tabla 34. Depreciación total del sistema con riel. ....	68
Tabla 35. Balance general del año 2018. ....	68
Tabla 36. Flujo de caja de dos años del sistema cartesiano. ....	69
Tabla 37. Flujo de caja de dos años del sistema rotativo. ....	70
Tabla 38. Flujo de caja de dos años del sistema con riel. ....	71
Tabla 39. Flujo de efectivo del sistema cartesiano. ....	72
Tabla 40. Flujo de efectivo del sistema rotativo. ....	72
Tabla 41. Flujo de efectivo del sistema con riel.....	73
Tabla 42. Ponderación de los sistemas.....	74
Tabla 43. Resultados de las variables para las pruebas en los tableros enchapados..	75
Tabla 44. Tiempos resultantes de las simulaciones. ....	77
Tabla 45. Costos de producción de cada sistema. ....	78
Tabla 46. Utilidad neta por año de cada sistema.....	78

## **RESUMEN**

Varias empresas a nivel nacional están mejorando sus productos mediante la automatización de los procesos manufactureros, la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA. es una de ellas, la cual fabrica y comercializa muebles tanto para hogar como para oficinas. Sin embargo, aún existe procesos que se realizan mediante operarios como el proceso de lacado, el cual es fundamental para el acabado y durabilidad del mobiliario. Por lo tanto, este proyecto de investigación está destinado al análisis de los procesos de sellado y lacado de los distintos muebles que fabrica la línea de dormitorios de la empresa, con el fin de proponer una implementación de automatización en dichos procesos.

Para ello se sigue una metodología que consta de cinco puntos; primero se analiza la situación actual de la empresa y las variables que afectan a los procesos de sellado y lacado, el segundo punto es hacer un estudio del estado del arte de las tecnologías de automatización a nivel mundial que existen en dichos procesos, el tercero es verificar la factibilidad de dichos sistemas con pruebas en robots y equipos que mantiene la Universidad Politécnica Salesiana además de software de ingeniería, el cuarto punto se trata sobre un análisis técnico-económico donde se determina el flujo de caja de los sistemas además del período de recuperación de inversión, finalmente se realiza una ponderación con el objetivo de obtener el mejor sistema que se adapte a la planta actual de la empresa.

Los resultados realizados en los laboratorios de la universidad brindan altos niveles de calidad en el acabado, como uniformidad y homogeneidad en la capa de sello y laca en tableros enchapados con madera de cerezo, demostrando que la implementación de robots en la línea de dormitorios, si es factible. Las simulaciones se realizan con tres muebles de diferentes tamaños y formas que son los de mayor producción en la línea, además se programa las trayectorias de movimientos basándose en la habilidad del operario, con el propósito de comparar dichos sistemas con la situación actual de la empresa. Finalmente, el sistema que mejor se adapta a la empresa es el sistema con robot de configuración cartesiana con cinco grados de libertad.



# **1. INTRODUCCIÓN**

El grupo corporativo COLINEAL, del que forma parte la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., se dedica a la fabricación y comercialización de mobiliario de madera a nivel nacional como internacional. Desde que se fundó la compañía, la organización se encuentra en constante búsqueda de los métodos y procesos más avanzados para generar una alta calidad en sus productos. La empresa fue automatizándose con el pasar de los años, dando un gran cambio en la eficiencia, producción y costos al implementar sistemas automáticos a sus procesos manuales; sin embargo, esta implementación no es total por lo que aún existen áreas dentro de la planta en donde únicamente operarios realizan el trabajo, como es el caso del proceso de lacado, esta última etapa es fundamental para producir un buen acabado en los muebles, por el cual es reconocido el grupo COLINEAL.

En el presente trabajo de titulación se analizan los procesos actuales de sellado y lacado que ejecuta la empresa Carpintería y Tapicería Internacional. Posteriormente se realiza un estudio del estado del arte sobre las nuevas tecnologías y sistemas automáticos existentes, con el fin de diseñar una propuesta para automatizar estos procesos. Además, poner a prueba el sistema diseñado mediante software de simulación y equipos que están disponibles en la Universidad Politécnica Salesiana. Finalmente, se realiza un análisis técnico-económico considerando los gastos de producción de la propuesta de implementación.

## **2. PROBLEMA DE ESTUDIO**

### **2.1. ANTECEDENTES**

La empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA. cuenta con varias áreas de fabricación que cubren cada etapa de la elaboración de los muebles. La línea de dormitorios es una de las más grandes y la que presenta más complicaciones debido a las dimensiones de estos; primordialmente se encarga del tinturado, sellado y lacado de todas las camas, veladores, cómodas, entre otros productos [1].

Es fundamental que todos los muebles pasen por un proceso de lacado, de esta manera, la madera obtiene una capa protectora que le da resistencia a golpes y rayones, también brinda suavidad, brillo y un color característico; el proceso consiste en una cadena acoplada con una mesa donde un operario coloca los muebles para luego ser transportados a través de las distintas cabinas que corresponden a las fases de este procedimiento. Durante el recorrido se realizan seis pasos: tinturado, sellado, lijado, retoque, lacado y embalaje; el sello, genera una capa uniforme cerrando los poros que tiene la madera, además proporciona una superficie adhesiva para el siguiente recubrimiento, la laca o barniz crea una capa protectora al mueble, así mismo da brillo y color. La empresa utiliza productos de poliuretano para el sello y laca, los cuales se aplican a todos los muebles sin importar el tinte utilizado [2].

## **2.2. IMPORTANCIA Y ALCANCES**

Dentro de los procesos de sellado y lacado existe un desperdicio al aplicar los recubrimientos, este depende de dos factores; el primero es por la niebla causada por el método de aplicación (pulverización) y el segundo consiste en la habilidad y pericia del operario. Estudios realizados por compañías especializadas en recubrimientos y en sus métodos de aplicación determinaron que se puede ahorrar un porcentaje significativo de producto cambiando los sistemas manuales a automáticos [3].

El presente estudio tiene como finalidad beneficiar a la empresa Carpintería y Tapicería Internacional mejorando la calidad de sus productos y servicios, además de una reducción del desperdicio de los recubrimientos utilizados en las etapas de sellado y lacado disminuyendo así el costo de producción de los muebles, y favorece a los trabajadores de la planta brindando espacios más seguros y procesos estandarizados con el fin de tener un buen ambiente de trabajo.

## **2.3. DELIMITACIÓN**

El tema de estudio se enfoca en la provincia del Azuay, en la ciudad de Cuenca, dentro de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., que forma parte del grupo corporativo COLINEAL. La investigación estudia la línea de fabricación de dormitorios enfocado en las etapas de sellado y lacado. El presente trabajo de titulación utiliza los datos más relevantes sobre el volumen de producción, delimitando la información para el año 2018 y principios del 2019.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar y simular un sistema para automatizar los procesos de sellado y lacado en la línea de fabricación de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., tomando en cuenta los procesos actuales de la fábrica y las nuevas alternativas de automatización.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO**

- Definir las variables que intervienen en los procesos de sellado y lacado dentro la línea de fabricación de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., en función del análisis estadístico del volumen de producción del año 2018-2019 y de un estudio del estado del arte de la tecnología utilizada.
- Proponer una alternativa de automatización de los procesos de sellado y lacado de la línea de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., mediante el uso de softwares de ingeniería obteniendo las trayectorias cinemáticas del sistema.
- Realizar ensayos de funcionalidad del sistema de automatización propuesto en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana del mueble característico elegido, con el fin de comparar con el sistema actual de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA.
- Realizar un análisis técnico-económico que determine la factibilidad de implementación de la propuesta dentro de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., considerando los costos del sistema automatizado.

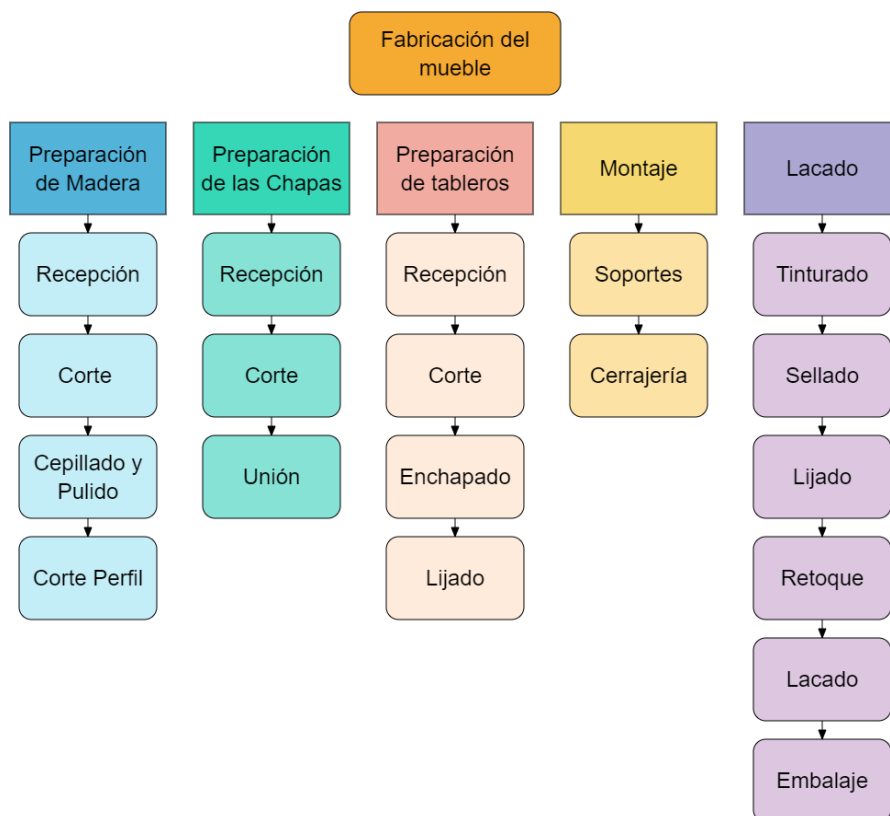
## 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta sección del presente documento se divide en dos partes: la primera se enfoca en la situación actual del proceso de fabricación de muebles de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, además de un estudio detallado sobre los procesos de sellado y lacado, también se describe sobre la teoría del lacado, herramientas y equipos que se utiliza en los procesos de fabricación. La segunda detalla sobre los sistemas automatizados de rociado lineal (automated linear spray system) como los sistemas automatizados de pulverización y rodillos de recubrimiento (roller coaters) así como los datos técnicos sobre los robots industriales que se manejan para la aplicación de distintos fluidos.

### 4.1. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA EMPRESA

#### 4.1.1. FABRICACIÓN DEL MUEBLE

Para la fabricación de muebles, la empresa tiene un procedimiento similar para cada mobiliario, este cuenta con cinco etapas fundamentales las cuales se describen a continuación (Figura 1):



**Figura 1.** Diagrama de flujo de la fabricación del mueble [2].

#### 4.1.1.1. Preparación de la madera

La empresa utiliza dos tipos de maderas: cerezo chileno, también conocido como lenga, y pino, también llamado poplar (Figura 2), dicha madera viene con una humedad relativa de 8 a 12%, siendo esta la necesaria para trabajar.



**Figura 2.** Madera cerezo chileno y pino poplar [2].

La madera es almacenada y luego se procede a cortarla, dándole la forma y medida correspondiente (Figura 3); sin embargo, para obtener las dimensiones exactas, esta pasa por un proceso de cepillado y pulido, finalmente se vuelve a cortar la pieza pero con un perfil característico del mueble que se desea fabricar [2].



**Figura 3.** Preparación de la madera [Cortesía de la empresa].

#### 4.1.1.2 Preparación de Chapas

La chapa es una lámina fina de madera sólida que tiene un espesor aproximado de 0.5mm, esta se utiliza para cubrir las caras de los tableros dando un mayor valor estético a todo el mueble, además de aumentar la protección de este [4].

Una vez que las chapas llegan a la empresa, son cortadas para darles las medidas exactas (Figura 4). Al trabajar con la línea de dormitorios vale recalcar que las chapas deben adquirir un tamaño considerable, por lo que, estas reciben un proceso de unión derritiendo hilos de poliéster [2].



**Figura 4.** Preparación de las chapas [Cortesía de la empresa].

#### **4.1.1.3 Preparación de tableros**

La empresa utiliza dos tipos de tableros; aglomerado y MDF (Medium Density Fibreboard), estos tableros están formados de partículas de maderas, sin embargo el aglomerado consiste en dos capas delgadas y una gruesa en el centro, mientras que el MDF tiene todas las fibras unidas entre sí [5]. Los tableros pasan por un proceso de corte donde se dejan con las medidas exactas antes de ser enchapados con madera decorativa (Figura 5); finalmente, se liján con un material abrasivo para eliminar cualquier imperfección y/o rayón, además de preparar la superficie para el proceso de lacado [2].



**Figura 5.** Preparación de los tableros [Cortesía de la empresa].

#### 4.1.1.4 Montaje

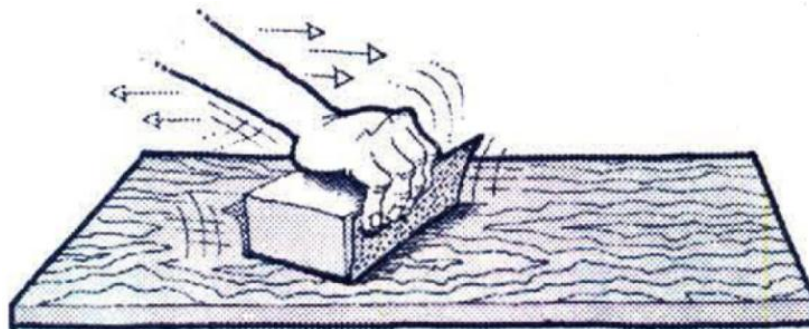
Los tableros se unen, ensamblan y ajustan con las distintas piezas de madera maciza que forman las partes del mueble, dando un montaje inicial (Figura 6) [4]; en este proceso se colocan los soportes y la cerrajería dependiendo del diseño [2].



**Figura 6.** Montaje inicial [Cortesía de la empresa].

#### 4.1.2. PROCESO DE LACADO

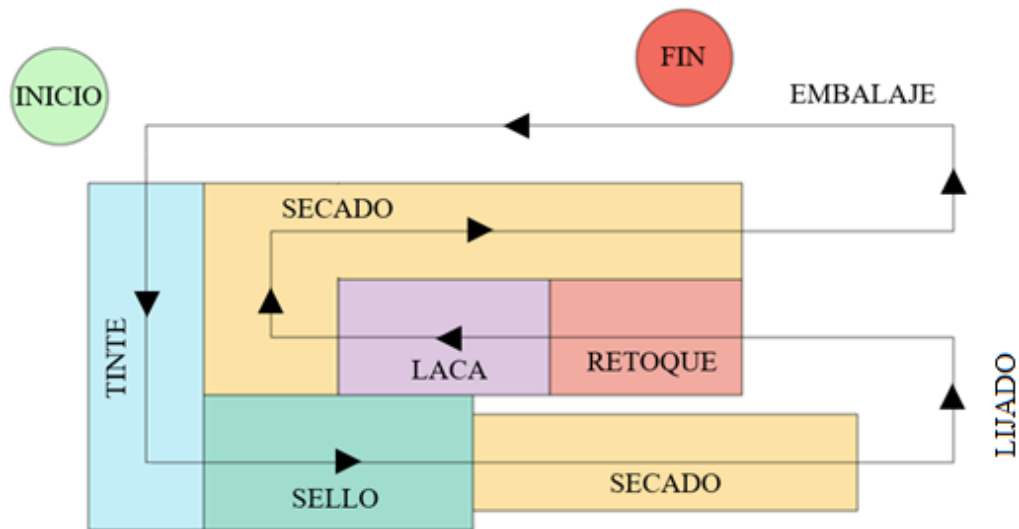
El proceso de lacado consiste en la aplicación de varios recubrimientos a los muebles para conseguir una determinada tonalidad en la madera, además de brindar protección y el aspecto deseado. Existen distintos tipos de métodos de aplicación que dependen de la densidad y viscosidad del recubrimiento, algunos ejemplos son; brochas, muñequillas y pistolas pulverizadoras [6]. Aunque la calidad del mueble va a depender de los recubrimientos utilizados y la forma correcta de aplicarlos, una mala preparación de la madera también afecta al acabado.



**Figura 7.** Preparación de la madera mediante papel de lija [7].

Antes de realizar el proceso de lacado, se debe lijar adecuadamente la madera para asegurar una terminación fina y homogénea (Figura 7) [7], luego se aplica los recubrimientos tinte, sello y laca. Los productos utilizados en este proceso se deben usar en orden secuencial para lograr el acabado deseado.

La línea de producción de dormitorios de la empresa consiste en seis etapas: tinturado, sellado, lijado, retoque, lacado y embalaje, numeradas a continuación. El mueble es transportado mediante una cadena hacia las diferentes etapas (Figura 8).



**Figura 8.** Cadena del proceso de lacado [8].

### 1. Proceso de tinturado

Se aplica un producto químico pigmentado al que se le denomina tinte, para conseguir la tonalidad y aspecto deseado en el mueble (Figura 9) [4].



**Figura 9.** Proceso de tinturado [Cortesía de la empresa].



## 2. *Proceso de sellado*

El proceso de sellado consiste en la aplicación de un sellador mediante una pistola pulverizadora aerográfica que proyecta a alta presión. El objetivo de aplicar sellador es de tapar todos los poros que tiene la madera dando uniformidad a esta, también brinda una superficie adhesiva para el siguiente recubrimiento (Figura 10) [9].



**Figura 10.** *Proceso de sellado [Cortesía de la empresa].*

## 3. *Proceso de lijado*

En este proceso el operario elimina la aspereza de la madera además de corregir cualquier imperfección que se encuentre, se utiliza principalmente pulidora con papel de lija (Figura 11). La aplicación de sello crea una superficie áspera que necesita ser lijada para colocar el siguiente recubrimiento; para las imperfecciones como agujeros o rayones se realiza el enmasillado que consta en la aplicación de una masilla hecha de madera líquida [10].



**Figura 11.** *Proceso de lijado [Cortesía de la empresa].*

#### 4. *Proceso de retoque*

Se basa en la aplicación de una segunda capa de tintura al mueble, para esto se utiliza pistola pulverizadora, pinceles o jeringas con tinte para corregir las zonas que no tienen suficiente color (Figura 12).



**Figura 12.** *Proceso de retoque [Cortesía de la empresa].*

#### 5. *Proceso de lacado*

El proceso de lacado consiste en la aplicación de un protector abrillantador al mueble [10], aumentando la vida útil del mismo, da un color característico y mayor atractivo para el cliente (Figura 13) [9]. Al igual que el proceso de sellado, la laca se aplica a la madera por medio de una pistola pulverizadora aerográfica que proyecta a alta presión.



**Figura 13.** *Proceso de lacado [Cortesía de la empresa].*

## 6. Proceso de embalaje

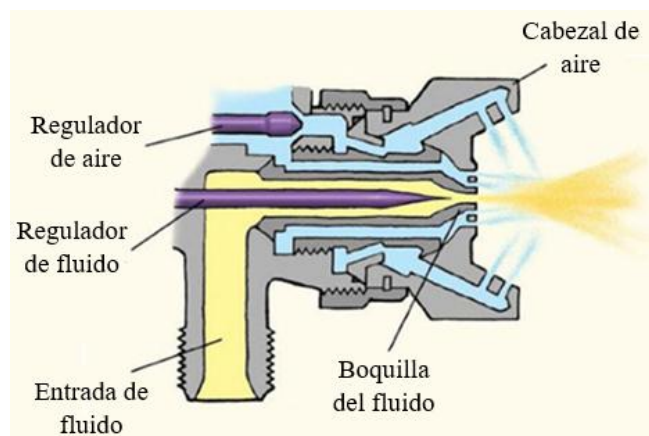
El operario arma el mueble para luego embalarlo y ser transportado hacia los almacenes de la empresa o a los clientes, para esto se utiliza varias protecciones para cubrir el mobiliario y asegurarse que llegue intacto a su destino (Figura 14).



**Figura 14.** Proceso de embalaje [Cortesía de la empresa].

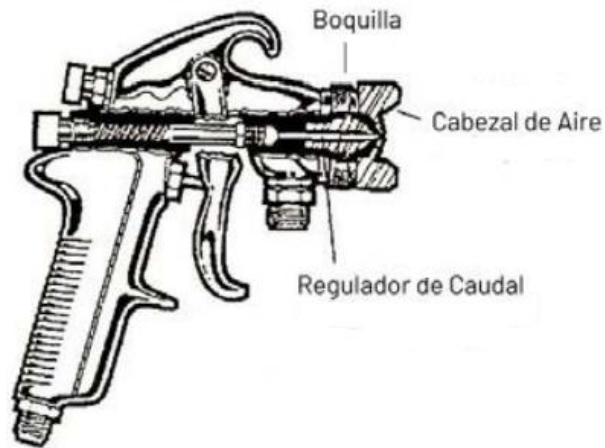
### 4.1.2.1. Método de Aplicación

La empresa Carpintería y Tapicería Internacional utiliza el método de aplicación por pistola pulverizadora aerográfica para los procesos de sellado y lacado debido a la versatilidad y rapidez que brinda [7]. La pistola descompone el líquido en una fina niebla compuesta de pequeñas partículas, este proceso se le denomina atomización, al presionar un poco el gatillo se abre la válvula permitiendo que salga aire presurizado por la boquilla, al presionar completamente el gatillo se abre la válvula del fluido provocando la atomización. El fluido color azul representa el aire presurizado, mientras que el amarillo es el producto por aplicar (Figura 15) [6].



**Figura 15.** Como funciona una pistola pulverizadora [6].

Las pistolas pulverizadoras están conformadas de cuatro partes principales; cabezal de aire, regulador de caudal, boquilla y tanque (Figura 16) [11]. El cabezal de aire contiene pequeños ductos donde pasa el aire comprimido para pulverizar el recubrimiento, el cual sale a través de la boquilla y de esta manera proyectar hacia la superficie. La cantidad de producto que se utiliza se controla con el regulador de caudal y el tanque es el recipiente donde se almacena el recubrimiento, este puede estar conectado a la pistola o separado de esta [12].



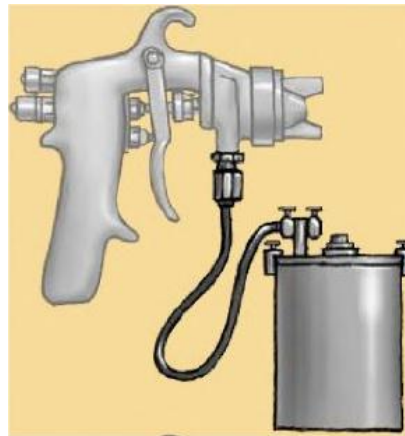
**Figura 16.** Partes principales de una pistola pulverizadora [11].

Las pistolas pulverizadoras se pueden clasificar por la ubicación del recipiente donde se encuentra el producto por aplicar. La empresa utiliza de dos tipos: por gravedad y por presión, sin embargo, también existe de succión [1]. La pistola con alimentación por gravedad es un diseño donde el material llega a la parte interna de la pistola por medio de la fuerza de gravedad, este equipo no necesita un tubo de alimentación debido a que el depósito se encuentra montado encima de la pistola (Figura 17) [13]. Este tipo de pistola se utiliza en el proceso de retoque porque es ideal para la aplicación de pequeñas cantidades, para correcciones o detalles de acabados.



**Figura 17.** Pistola con alimentación por gravedad [6].

En la pistola con alimentación de presión, el producto se encuentra separado del equipo, mediante una bomba el material pasa por un tubo de alimentación que va directo a la parte interna de la pistola (Figura 18) [13]. Este tipo de pistola se utiliza en los procesos de tinturado, sellado y lacado porque es ideal para aplicar grandes cantidades de material.



**Figura 18.** Pistola con alimentación por presión [6].

La pistola con alimentación por succión es un diseño donde el aire comprimido genera un vacío en la válvula de aire, generando un efecto de succión, de esta manera, el material se dirige hacia la parte interna de la pistola y hacia la boquilla donde se realiza la atomización por medio de un tubo de alimentación (Figura 19). Este tipo de alimentación es para productos con baja viscosidad [13].



**Figura 19.** Pistola con alimentación por succión [6].

La pistola pulverizadora utiliza cuatro tipos de presiones: línea, pistola, bomba y fluido. Las presiones del equipo y el número de boquilla dependen de la densidad y viscosidad del recubrimiento. La empresa utiliza distintos valores de presión en los procesos de sellado y lacado debido a que la laca es menos viscosa que el sellador (Tabla 1), además, existen dos acabados de diseño de muebles que dependen del número de pasadas: poro abierto y poro cerrado. Si el acabado es poro abierto se realiza dos pasadas, mientras que para poro cerrado se aplica cuatro pasadas.

**Tabla 1.** Características para el proceso de sellado y lacado [14].

<b>Características</b>	<b>Sello</b>	<b>Laca</b>
Presión de línea	50 ±2 psi	60 ±2 psi
Presión de pistola	45 ±2 psi	50 ±2 psi
Presión de bomba	45 ±2 psi	50 ±2 psi
Presión de fluido	15 ±2 psi	14 ±2 psi
Número de boquilla	1.2 mm	1 mm

#### 4.1.2.2.Productos Utilizados

➤ *Sellador o Tapaporos*

El sellador es un producto preparador de madera compuesto de fondo, catalizador y disolvente [15], que cubre total o parcialmente los poros, facilitando así un acabado terso y suave al mueble. La empresa utiliza dos tipos de selladores; uno transparente diseñado para todos los tintes que se emplean con anterioridad y el segundo que se aplica a los muebles que son pintados de blanco.

➤ *Laca o Barniz*

La laca es un tipo de recubrimiento compuesto de aglutinantes, disolventes y diluyentes, que al ser aplicado se genera una capa dura, brillante e insoluble en agua [15], aunque la principal función del barniz es protectora, aumentando la vida útil del mueble. La empresa tiene dos tipos de lacas; un barniz transparente diseñado para todos los tintes y un barniz para muebles pintados de blanco.

➤ *Determinación de la viscosidad de los recubrimientos*

Antes de aplicar el recubrimiento el operario realiza la mezcla y comprueba la viscosidad de este, ya que si el fluido no está adecuado la calidad del acabado bajará. Se realiza mediante la copa de viscosidad Ford N°4 (Figura 20), donde se mide el tiempo que demora en vaciarse para luego compararlo con las especificaciones dada por la empresa (Tabla 2).



**Figura 20.** Copa de viscosidad Ford N°4 [16].

**Tabla 2. Tiempos de vaciado para viscosidad [14].**

<b>Recubrimiento</b>	<b>Tiempo de vaciado</b>
Sello	17-19 segundos
Laca	13-15 segundos

#### **4.1.2.3. Cabinas**

El proceso de lacado del mueble cuenta con un sistema de cabinas que permite un ciclo cerrado para los procesos de tinturado, sellado y lacado, las cuales se encuentran localizadas de tal manera que el proceso se ejecuta secuencialmente, garantizando el máximo aislamiento entre las fases del proceso.

##### ➤ *Cabinas de aplicación de recubrimiento*

Estas cabinas cuentan con una cortina de agua que permite atrapar las partículas que se desprenden de la niebla de la pistola pulverizadora, llevándolas a un tanque ubicado en el subsuelo de las cabinas (Figura 21). El agua es reutilizada mediante una bomba de recirculación que la bombea a la parte superior de la cabina, realimentando constantemente la cortina de agua. Las etapas que cuentan con este sistema son; tinturado, sellado, retoque y lacado [9].



**Figura 21. Cabinas de aplicación de recubrimiento [Cortesía de la empresa].**



➤ *Cabinas de secado*

Estas cabinas se encargan de fijar y curar el recubrimiento en la superficie del mobiliario en el menor tiempo posible (Figura 22). En los procesos de sellado y lacado es necesario que los recubrimientos se adhieran rápidamente, por lo tanto, las cabinas ayudan a acelerar este proceso dando un tiempo de secado de aproximadamente 30 minutos [9].



**Figura 22.** Cabinas de secado [Cortesía de la empresa].

➤ *Sistema de ventilación*

Para eliminar la niebla generada por la pulverización las cabinas cuentan con ventiladores en la parte superior (Figura 23), donde su función principal es garantizar la recirculación del flujo de aire al interior de estas, para evitar ambientes contaminados y saturados de los derivados de cada fase del proceso [9].



**Figura 23.** Ventilación en las cabinas [Cortesía de la empresa].

### 4.1.3. ANÁLISIS DEL VOLUMEN DE PRODUCCIÓN

En esta sección se realiza un análisis estadístico del volumen de producción de los muebles correspondientes a enero 2018 hasta marzo de 2019, con el fin de identificar los mobiliarios más representativos de la línea de dormitorios. A continuación, se presenta de manera porcentual la cantidad de muebles fabricados por el tipo al que pertenecen (Figura 24).

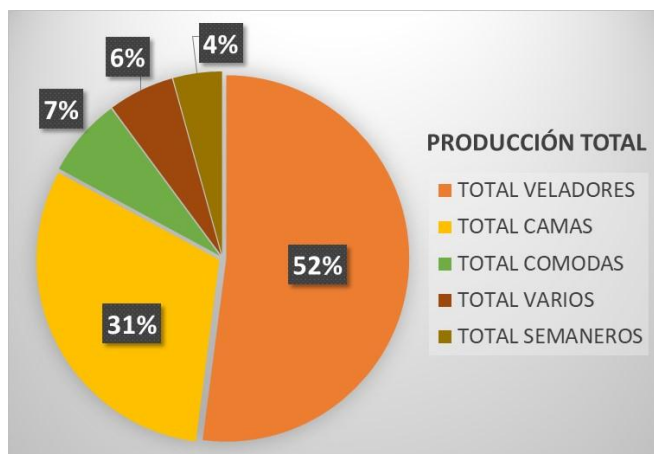


Figura 24. Porcentaje de producción de mobiliarios.

Los muebles más producidos son veladores, camas y cómodas con un 52%, 31% y 7% del volumen de producción total, respectivamente, los otros mobiliarios no representan un porcentaje significativo del volumen de producción, por lo que no serán utilizados. Dentro de la línea de dormitorios, las camas se producen en modelos de 1 ½, 2, 2 ½ y 3 plazas respectivamente. Para poder identificar los modelos más significativos se establece de manera porcentual la producción de cada uno de ellos (Figura 25).

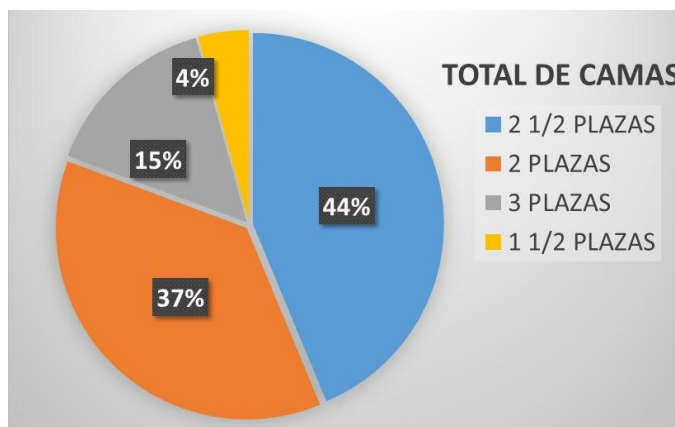
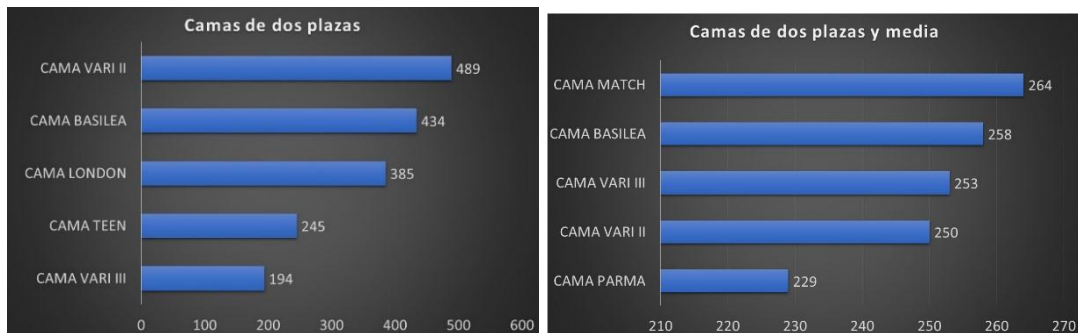


Figura 25. Producción porcentual de camas.

De esta manera se identifica que los modelos más representativos son las camas de 2 y 2 ½ plazas, que representan el 44% y 37% del total, respectivamente. De la cantidad total de camas de dos plazas producidas se identifica que el modelo de cama Vari II es el más demandado y producido en el año 2018-2019, mientras que en el caso de camas de dos plazas y media el modelo de mayor producción pertenece a la cama Match (Figura 26).



**Figura 26.** Producción total de camas de 2 y 2 ½ plazas.

El modelo de la cama Vari II de dos plazas tiene una producción total de 489 muebles y el modelo de la cama Match de dos plazas y media tiene una manufacturación de 264 camas (Figura 27 y 28).



**Figura 27.** Cama Vari II de 2 plazas [17].



**Figura 28.** Cama Match de 2 ½ plazas [17].

En el caso de la línea de veladores se identifica dos tipos de modelos representativos que corresponden a los veladores de la cama Vari II, que se comercializa juntamente con la cama y los modelos Basilea que son fabricados individualmente. Dentro de la fabricación de cómodas, el modelo de la cómoda Vari es el más producido (Figura 29).



**Figura 29.** Producción total de veladores y cómodas.

El modelo del velador Vari II tiene una producción total de 1766, el velador Basilea tiene una fabricación de 1262 unidades y el modelo de la cómoda Vari tiene una manufacturación de 239 (Figura 30, 31 y 32).



**Figura 30.** Velador Vari II [17].



**Figura 31.** Velador Basilea [17].



**Figura 32.** *Cómoda Vari* [17].

#### **4.1.4. MOBILIARIO REPRESENTATIVO**

De los datos obtenidos del análisis estadístico anterior se determina un mueble representativo de cada categoría perteneciente a la línea de dormitorios, donde sus fichas técnicas se encuentran en el Anexo 1. Debido a las dimensiones de los mobiliarios y el espacio del laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana se selecciona el velador Basilea para pruebas.

##### **4.1.3.1. Análisis de cantidad de producto utilizado**

Para obtener la cantidad de producto utilizado en los procesos de sellado y lacado se pesa el contenedor, donde se encuentra el producto por aplicar, antes y después de proyectar la capa respectiva. Luego de aplicar el sello a seis veladores Basilea, se obtiene un peso de diferencia de 1.633 kilogramos, por ende, por cada velador se utiliza 247 mililitros de sello (272 gramos), ya que este posee una densidad de 1.1 gramos por centímetro cúbico. En el proceso de lacado la diferencia de peso que se obtiene después de proyectar en seis veladores Basilea es de 1.633 kilogramos, por lo que por cada velador se utiliza 272 mililitros de laca (272 gramos), debido a que esta tiene una densidad de un gramo por centímetro cúbico.

##### **4.1.3.2. Análisis de tiempos**

Para obtener el tiempo requerido de aplicación de sello o laca en los distintos muebles representativos de cada categoría, se toma tres tiempos mediante cronómetro para conseguir un promedio (Tabla 3, 4 y 5). Se debe tomar en cuenta que cada muestra de la tabla 3, representa dos veladores Basilea debido a que la proyección se realiza simultáneamente.

El tiempo promedio para el proceso de sellado para un velador Basilea es de 63 segundos (1 minutos con 03 segundos), para una cómoda Vari es de 109 segundos (1 minuto con 49 segundos) y para una cama Match de 2 ½ plazas es de 152 segundos (2 minutos con 32 segundos). Para el proceso de lacado, el velador Basilea tiene un promedio de 67 segundos (1 minuto con 07 segundos), la cómoda Vari es de 93 segundos (1 minutos con 33 segundos) y la cama Match de 2 ½ plazas es de 98 segundos (1 minutos con 38 segundos).

**Tabla 3. Tiempo de aplicación en veladores Basilea.**

#	Proceso de sellado [s]	Proceso de lacado [s]
1	60	69
2	62	68
3	68	64

**Tabla 4. Tiempo de aplicación en cómodas Vari.**

#	Proceso de sellado [s]	Proceso de lacado [s]
1	106	93
2	111	96
3	110	90

**Tabla 5. Tiempo de aplicación en camas Match 2 ½ plazas.**

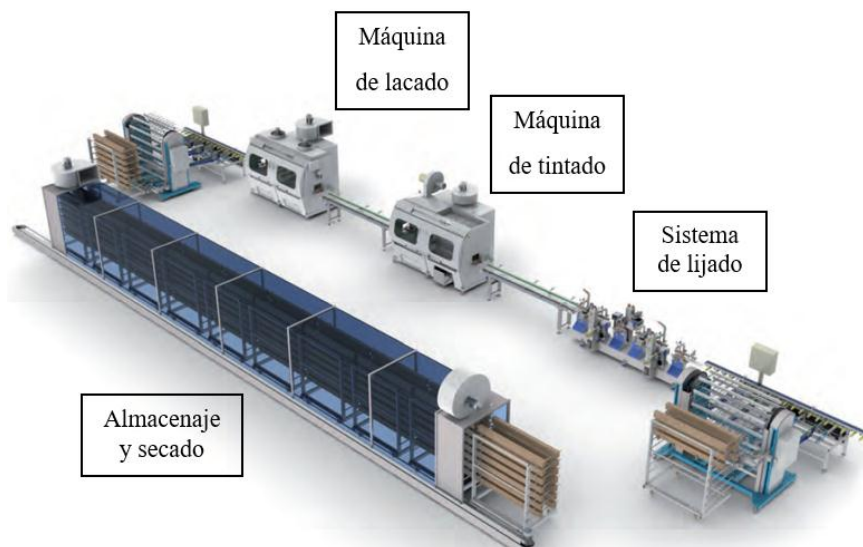
#	Proceso de sellado [s]	Proceso de lacado [s]
1	146	98
2	157	102
3	152	95

## 4.2. SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Realizar automatizaciones en procesos manuales brinda varias ventajas competitivas a las industrias, en el caso de los procesos de sellado y lacado, se puede disminuir los costos de operación reduciendo la cantidad de recubrimiento utilizado y por ende los componentes volátiles, además se mejora drásticamente la calidad debido a que se alcanza una alta transferencia del fluido hacia la madera [18]. Empresas especializadas en recubrimientos y sus métodos de aplicación ofrecen dos tipos de sistemas automáticos; sistemas automatizados de rociado lineal diseñadas para piezas delgadas o con un espesor limitado, y robots industriales que están enfocados en productos de mayor volumen.

### 4.2.1. SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE ROCIADO LINEAL

Como su nombre lo indica, los sistemas automatizados de rociado lineal son máquinas industriales que pueden aplicar sello o laca a distintas piezas delgadas de manera rápida y con poco personal. Es ideal para ventanas, marcos, puertas, tiras o tableros de madera con un espesor máximo de 30 cm [19]. La principal ventaja de estas máquinas es que se pueden acoplar con otros sistemas lineales diseñados para lijar la madera, secar el recubrimiento o almacenar las piezas (Figura 33), esto permite tener una completa automatización en todo el proceso de lacado y acabado de la madera [20]. Los sistemas automatizados de rociado lineal se clasifican en dos clases; sistemas automatizados de pulverización y rodillos de recubrimiento.

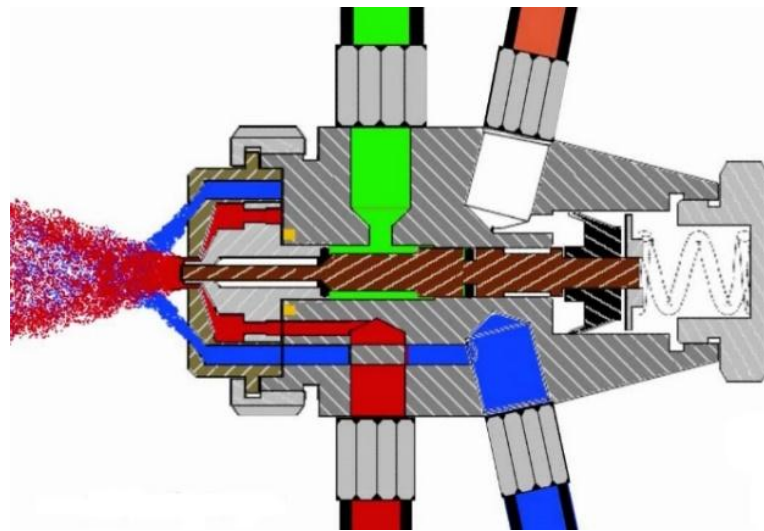


**Figura 33.** Automatización completa del proceso de lacado [20].

#### 4.2.1.1. Sistema automatizado de pulverización

Estas máquinas permiten proyectar sello o laca de manera automática sobre piezas planas o con un espesor limitado utilizando pistolas pulverizadoras automáticas [19]. Al igual que las pistolas manuales, las pistolas automáticas utilizan un compresor de aire para la pulverización y el recubrimiento entra al sistema mediante presión generada por una bomba.

La principal diferencia entre las pistolas automáticas y manuales es que la apertura y cierre son controlados eléctricamente por una válvula solenoide conectada a un pistón con aire presurizado, al accionar el controlador el pistón abre la válvula de aire, después de unas centésimas de segundos se abre la boquilla del fluido de la pistola, permitiendo proyectar el recubrimiento en pequeñas partículas sobre la superficie. Aparte de la entrada de aire para la pulverización (color rojo y azul) y la entrada para el recubrimiento (color verde), las pistolas automáticas cuentan con una tercera entrada de control neumático (color naranja) que permite abrir o cerrar la válvula del fluido que se desea aplicar (Figura 34) [21].



**Figura 34.** Pistola pulverizadora automática [22].

Las pistolas pulverizadoras automáticas están diseñadas para ser altamente precisas, reduciendo así la cantidad de desperdicio provocado hasta un 30% comparado con las pistolas manuales, esto previene la contaminación por los componentes volátiles y al mismo tiempo se ahorra costos, generando una ventaja competitiva frente a otras empresas [3].

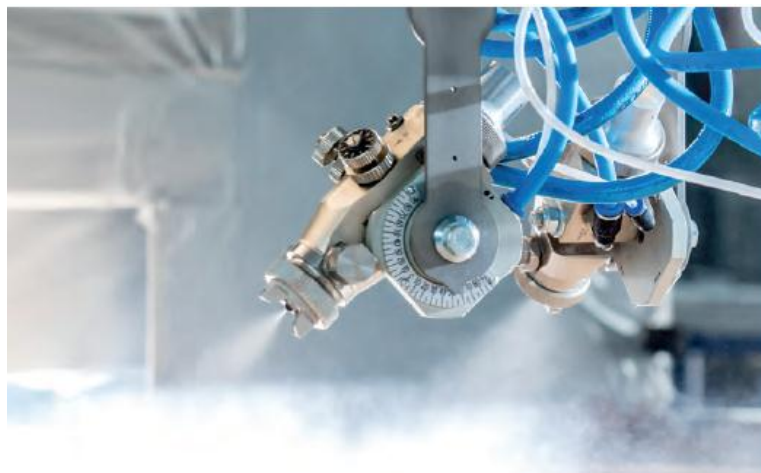


Las piezas de madera entran a estos sistemas automatizados de manera horizontal mediante una banda transportadora, al momento de ser detectados por los sensores las pistolas son accionadas para proyectar el sello o laca. Estas máquinas están conformadas de varias boquillas automáticas que pueden ser dentro de un cabezal móvil o estar fijas, donde estas están colocadas en distintos ángulos y posiciones para lograr proyectar el producto a todas las áreas de la superficie (Figura 35) [19].



**Figura 35.** *Boquillas automáticas distribuidas* [19].

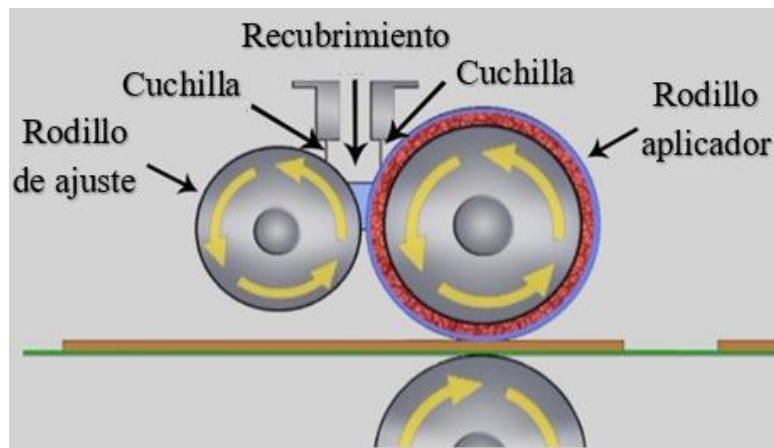
Los cabezales móviles pueden estar conformados de dos a cuatro boquillas, dependiendo del diseño y tamaño del producto (Figura 36). Dicho cabezal se puede desplazar linealmente en los ejes XY, cubriendo así todo el largo y ancho de la pieza, incluso algunos diseños de cabinas cuentan con rotación en las boquillas para proyectar en los laterales y esquinas [23].



**Figura 36.** *Cabezal móvil con boquillas* [20].

#### 4.2.1.2. Rodillos de recubrimiento

Los rodillos de recubrimiento son parte de una máquina capaz de esparcir sello o laca sobre una superficie plana, donde el recubrimiento pasa a través de dos rodillos formando una fina capa que se coloca sobre la madera. El rodillo principal, también conocido como rodillo aplicador, está cubierto con el recubrimiento deseado formando una capa gruesa que, al momento de entrar en contacto con la pieza de madera, se aplica el producto. El segundo rodillo controla la cantidad de producto aplicado variando la distancia entre rodillos (Figura 37) [5].



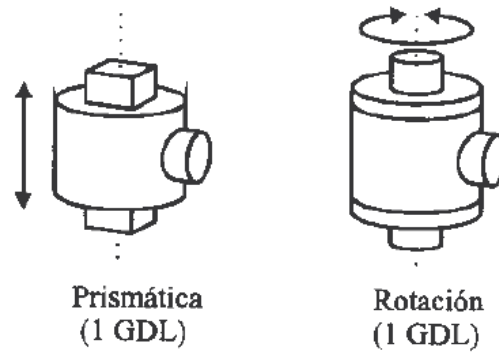
**Figura 37.** *Funcionamiento de los rodillos de recubrimiento* [24].

La diferencia de velocidad entre los rodillos, la viscosidad del recubrimiento y la presión de contacto del rodillo aplicador afectan directamente a la distribución de este y por ende a la calidad del acabado. Este sistema se utiliza principalmente con lacas ultravioleta siendo necesario acoplar otros sistemas secuenciales como cabinas de secado ultravioleta [25].

#### 4.2.2. ROBOT INDUSTRIAL

“Un robot industrial es un manipulador multipropósito de control automático, reprogramable de tres o más ejes, que puede ser fijo o móvil para su uso en aplicaciones de automatización industrial” [26]. Usualmente los robots industriales o brazos robóticos están diseñados para mover materiales y piezas de un lugar a otro, pero pueden ser programados para otras tareas como; ensamblado, mecanizado, pintura, soldadura y sellado [27].

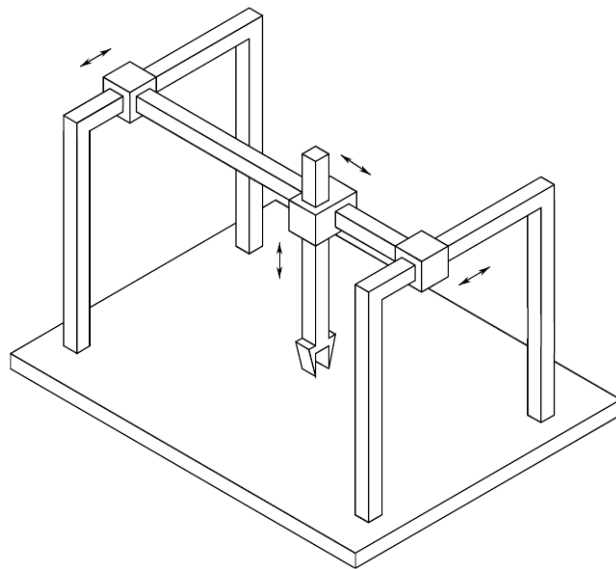
Los robots industriales que están diseñados para la aplicación de recubrimientos permiten cubrir artículos con mayor volumen, brindando soluciones a condiciones limitadas como proyectar sello o laca a piezas ensambladas [5]. Los robots se pueden clasificar dependiendo de su movilidad y grados de libertad, las cuales pueden ser prismáticas o de rotación (Figura 38).



**Figura 38.** Articulaciones prismáticas y de rotación [28].

#### 4.2.2.1. Robot de configuración cartesiana

El robot de configuración cartesiana cuenta con tres grados de libertad donde sus articulaciones son prismáticas, permitiendo que se mueva linealmente por los tres ejes cartesianos (x, y, z) de manera ortogonal (Figura 39). El espacio de trabajo es en forma de paralelepípedo rectangular [29].



**Figura 39.** Robot de configuración cartesiana [29].

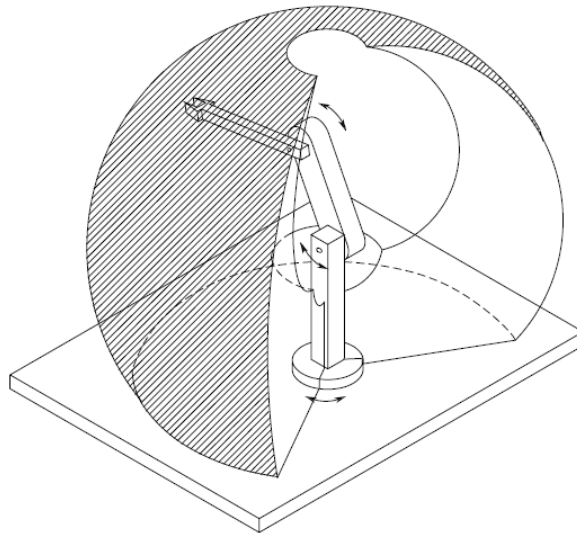
Los robots industriales de configuración cartesiana que están enfocados a proyectar recubrimientos cuentan con dos a tres grados de libertad adicionales en el efector final, permitiendo así cubrir todas áreas de la pieza ensamblada (Figura 40) [30]. Estos sistemas están complementados con una banda transportadora para el ingreso y salida de los productos, así como de cabinas con ventiladores para el flujo de aire.



**Figura 40.** Robot cartesiano de cinco ejes [30].

#### 4.2.2.2. Robot de configuración esférica

El robot de configuración esférica, también conocido como robot antropomórfico, cuenta con tres grados de libertad donde sus articulaciones son rotativas, permitiendo que se mueva angularmente en distintos ejes. El espacio de trabajo es de una esfera (Figura 41) [29].



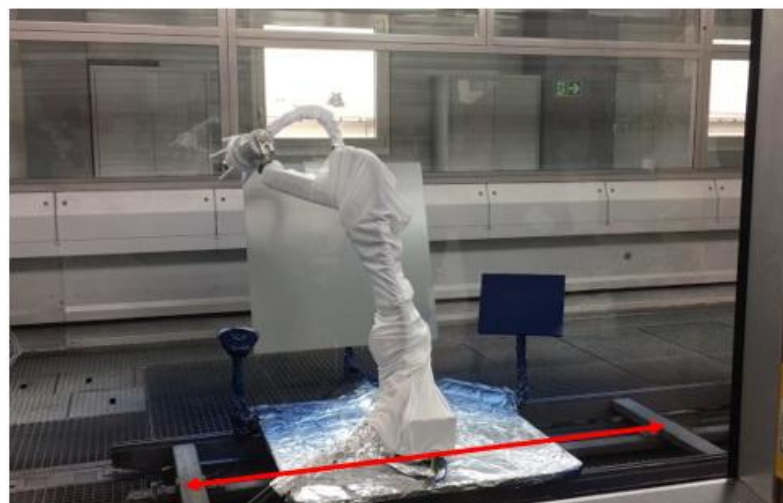
**Figura 41.** Robot manipulador antropomórfico [29].

Este tipo de robot puede acoplarse fácilmente a otros sistemas aumentando el alcance y movilidad de este como, por ejemplo, mesas giratorias que permiten al robot antropomórfico proyectar distintos recubrimientos a todas las áreas de una pieza ensamblada (Figura 42). Ambos sistemas están controlados para funcionar simultáneamente brindando una automatización completa del proceso y con poco o ninguna intervención de un operario [31].



**Figura 42.** Robot con dos muebles en mesa giratoria [31].

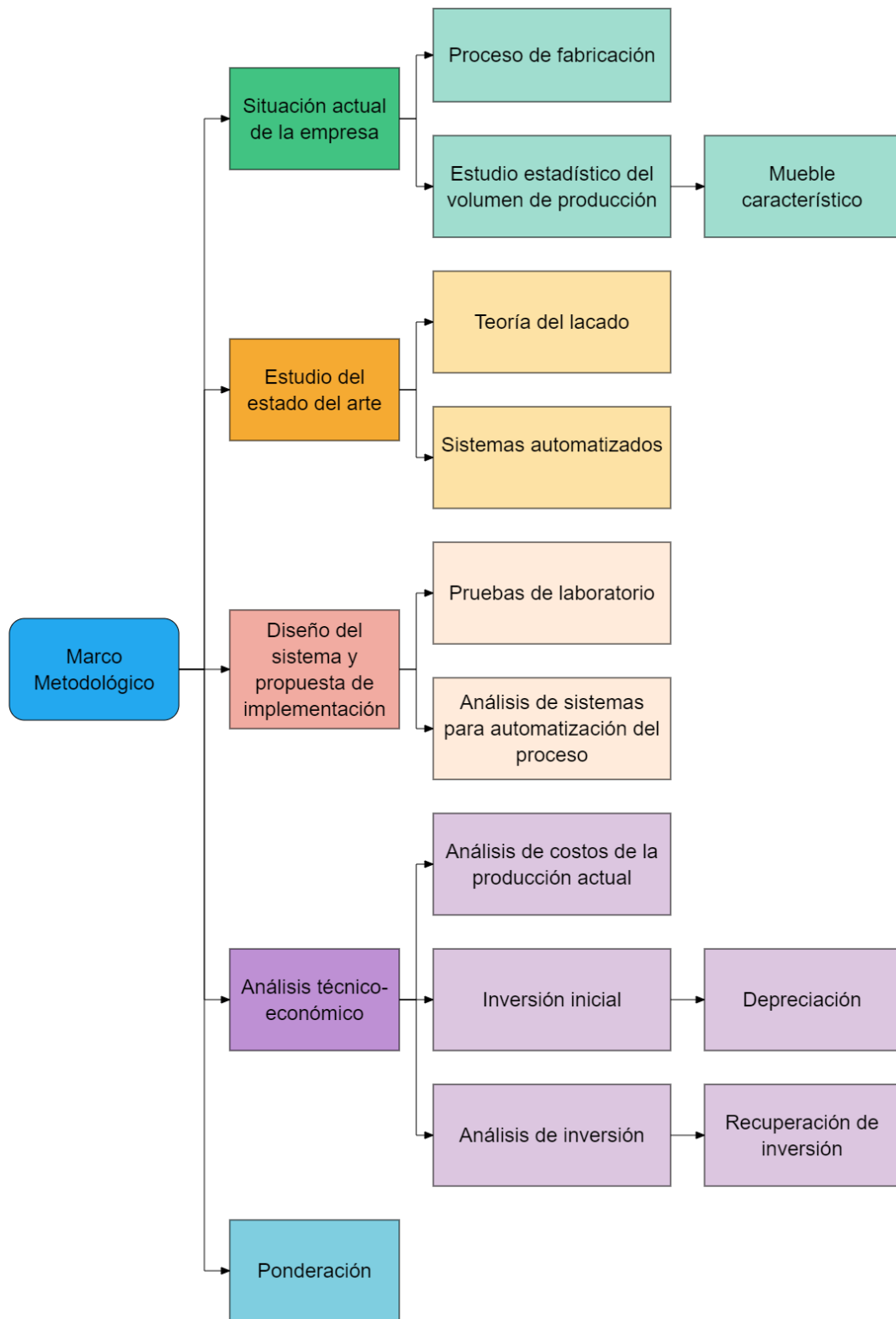
Otra de las posibilidades que existe para aplicar sello o laca en productos ensamblados es añadir un grado de libertad adicional al robot antropomórfico. Las unidades lineales permiten desplazar el robot de manera lineal a través del suelo o pared, agregando un eje complementario al sistema (Figura 43) [32].



**Figura 43.** Robot con desplazamiento lineal [32].

## 5. MARCO METODOLÓGICO

En esta sección del documento se va a desarrollar la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto de titulación (Figura 44).



**Figura 44.** Diagrama de metodología del proyecto.

La metodología se divide en cinco puntos fundamentales; el primero se enfoca en el análisis de la situación actual del proceso de fabricación de muebles de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, el cual ya está analizado en fundamentos teóricos. En el segundo punto se detalla el estudio del estado del arte sobre los sistemas automatizados para los procesos de sellado y lacado, tanto sistemas automatizados de rociado lineal como robots industriales enfocados al acabado de muebles, los cuales ya están descritos en fundamentos teóricos. El tercer punto se describe la propuesta de implementación donde se identifica las tecnologías que satisfacen las necesidades de la empresa, en esta sección se incluye la simulación en software de ingeniería y la validación mediante las pruebas en los laboratorios de la universidad. El cuarto punto se realiza un análisis técnico-económico de las distintas tecnologías propuestas, además se analiza el costo de producción de estos con el fin de calcular la utilidad neta que generarían en los próximos años. Finalmente se realiza una ponderación calificando los sistemas para determinar el que mejor se adapte a la planta actual de la empresa.

## **5.1. DISEÑO DEL SISTEMA Y PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN**

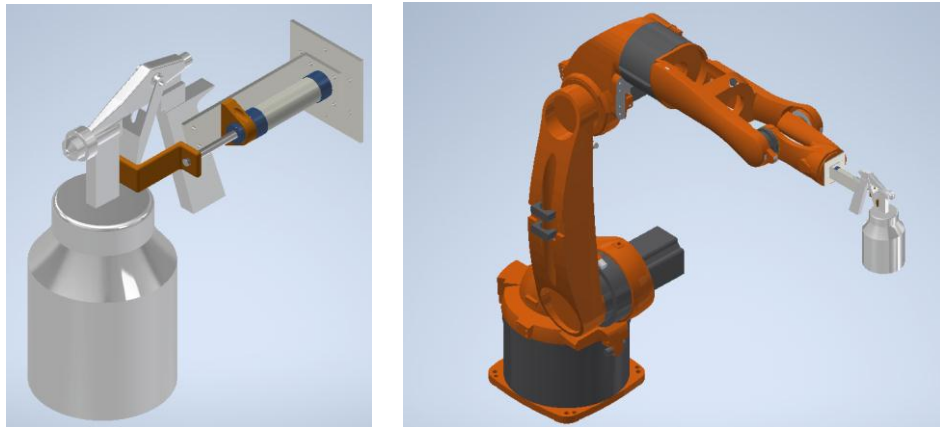
La propuesta de implementación se divide en dos secciones; en la primera se realiza las pruebas en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana, con el fin de probar la destreza y calidad que genera un robot antropomórfico frente al mueble en los procesos de sellado y lacado. La segunda parte detalla las tecnologías disponibles en función de los muebles de la línea de dormitorios y como se adaptan en la planta actual de la empresa, también incluye las simulaciones de los sistemas comparando con el proceso actual.

### **5.1.1. PRUEBAS DE LABORATORIO**

Las pruebas de laboratorio se dividen en dos etapas; la primera etapa se prueba la destreza que puede generar un robot antropomórfico (KUKA KR 5 HW-ARC) frente a la forma geométrica de la pieza para los procesos de sellado y lacado, de esta manera, determinar la factibilidad de realizar una automatización en dichos procesos. En la segunda etapa se comprueba la calidad que puede generar el robot donde se verifica la uniformidad y el buen acabado, para ello se diseña y construye un efector final o aditamento, capaz de proyectar sello o laca al mueble de manera uniforme y controlada mediante una electroválvula.

### 5.1.1.1. Diseño del aditamento

El diseño del aditamento utiliza como base una pistola pulverizadora manual de alimentación por succión, para el control de encendido y apagado del efector final se coloca un pistón neumático conectado con una electroválvula, la cual es accionada mediante una salida digital del controlador lógico del robot KUKA KR5 (Figura 45).



**Figura 45.** *Diseño de la pistola pulverizadora.*

### 5.1.1.2. Construcción del aditamento

El soporte del aditamento se fabrica con metal para una mayor estabilidad frente a los movimientos del robot, sin embargo, la pieza que está en contacto con el gatillo de la pistola y la pieza que sujeta al pistón neumático se realiza con impresión 3D con filamento PLA (Polylactic Acid), debido a su complejidad (Figura 46).



**Figura 46.** *Efector final para las pruebas de laboratorio.*



### 5.1.1.3. Programación

La programación del robot consiste en tres pasos que se deben realizar secuencialmente; primero se define la herramienta, luego se definen las bases necesarias y finalmente se crea la programación [33]. La asignación de herramienta se puede realizar de varias maneras, para este caso se utiliza el método de la medición del TCP (Tool Center Point) XYZ de 4 puntos. Este consiste en desplazar el robot para que la herramienta esté en un punto de referencia desde cuatro direcciones diferentes. Primero se debe montar la herramienta sobre la brida de acople, luego se selecciona la secuencia de menú Inicial → Medición → Herramientas → XYZ 4-puntos, después se indica un número y un nombre para la herramienta que se desea medir, posteriormente se desplaza el TCP a un punto de referencia, este paso se realiza tres veces más en distintas dirección (Figura 47), finalmente se guarda las coordenadas que se muestran en pantalla (Figura 48) [33].

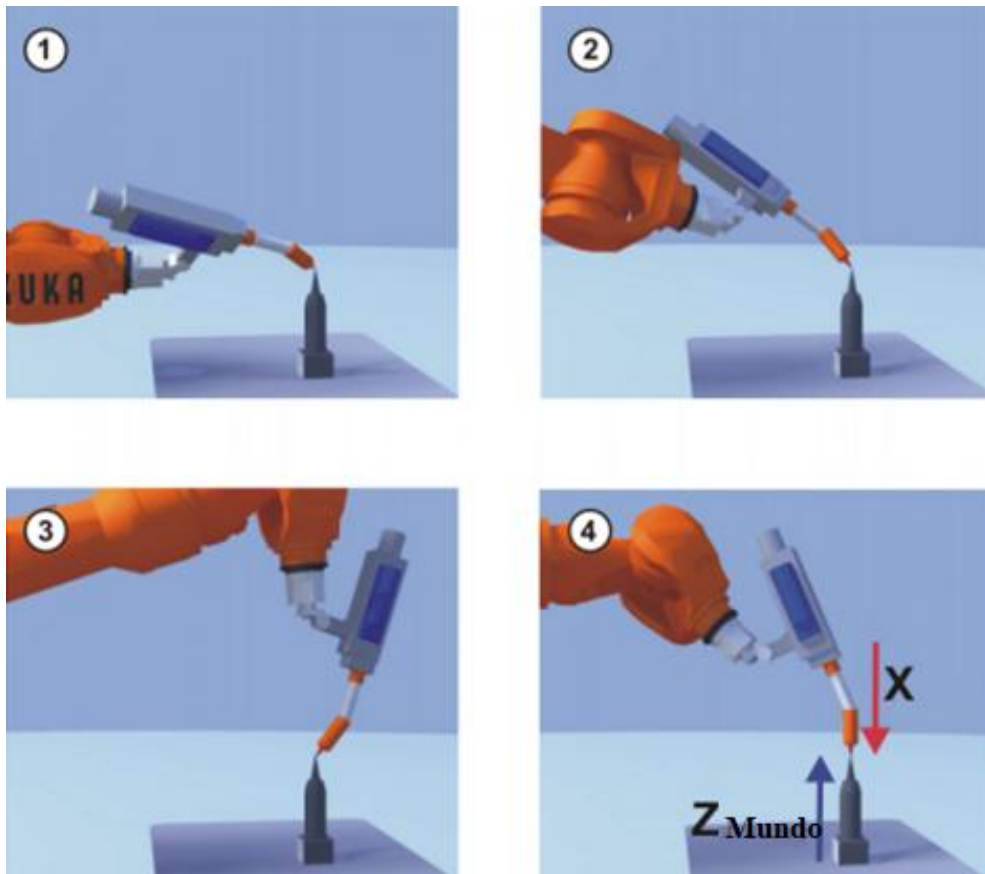
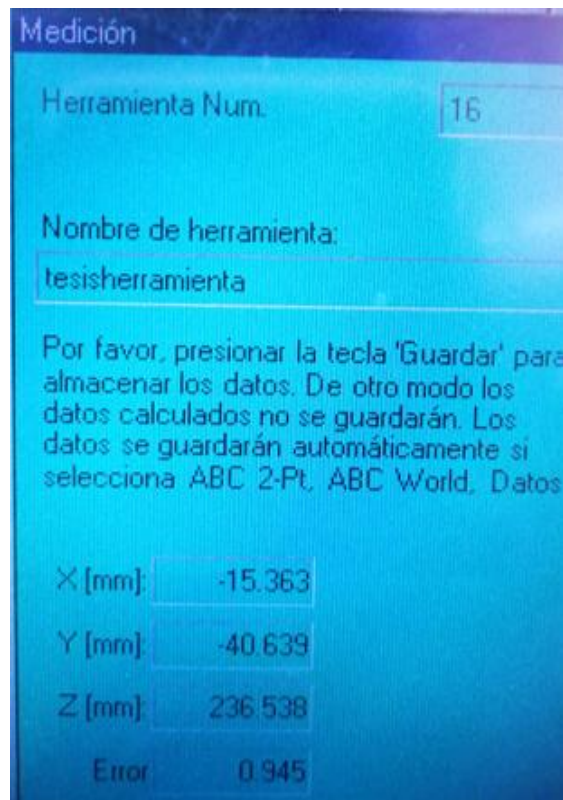
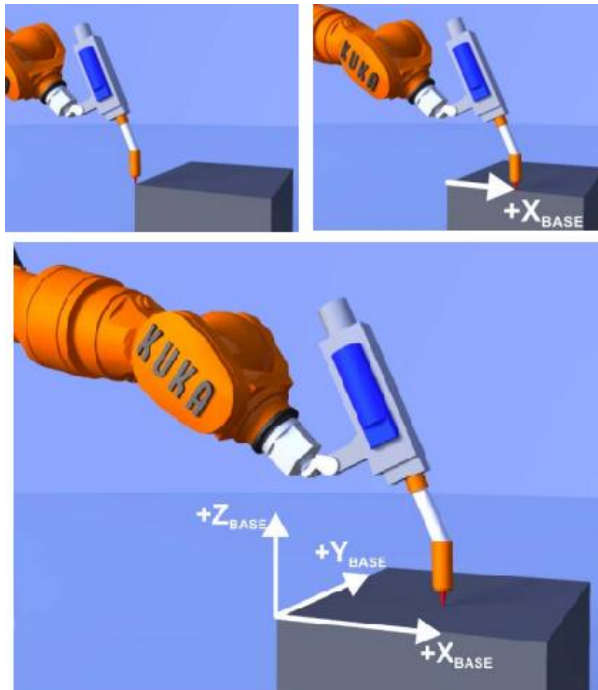


Figura 47. Método de definición de herramienta de 4 puntos [33].

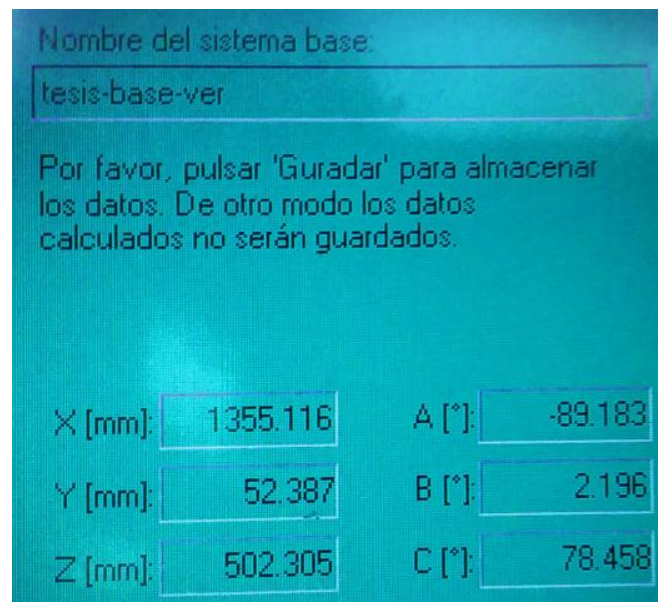


**Figura 48.** *Coordenadas de la herramienta.*

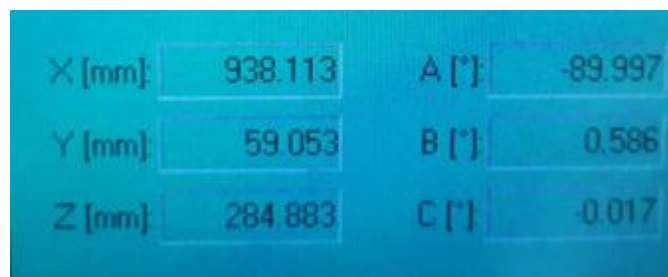
En la asignación de base también existen varias maneras de realizarlo, el método más común es la medición de los tres puntos, este procedimiento el robot se debe desplazar al origen y adicionalmente en dos puntos más de la misma base. Primero se debe montar la herramienta sobre la brida de acople, luego se selecciona la secuencia de Inicial → Medición → Base → 3-Puntos, después se indica un número y un nombre para la base que se desea colocar, posteriormente se selecciona la herramienta anteriormente definida, que en este caso es “tesisherramienta”, a continuación se mueve la herramienta hacia el punto origen de la base, el siguiente punto es una posición positiva con respecto al eje X de la base y el último punto es una posición positiva con respecto al eje Y de la base (Figura 49), finalmente se guarda las coordenadas que se muestran en pantalla. Este proceso se realiza tanto para los tableros en posición vertical como en horizontal (Figura 50 y 51) [33].



**Figura 49.** Método de definición de base de tres puntos [33].



**Figura 50.** Coordenadas de la base vertical.



**Figura 51.** Coordenadas de la base horizontal.

Una vez definido la herramienta y las bases, se procede a la creación de los programas para la realización de las pruebas, es importante recalcar que la programación se realiza en programación estándar. Primero se selecciona Archivo → Nuevo, luego se coloca el nombre del programa, antes de colocar las instrucciones de movimiento, se debe elegir la herramienta y base creadas anteriormente como se muestra en la figura 52 [33].



**Figura 52.** Asignación de la herramienta y base en el programa KUKA [33].

Estos programas utilizan dos tipos de movimientos que puede realizar el robot; movimiento punto a punto o PTP (Point to Point) y movimiento lineal o LIN. La principal característica del movimiento PTP es que el robot calcula la trayectoria más rápida y corta, sin embargo, no significa que esta sea recta, la velocidad de este tipo de movimiento se coloca en porcentaje. En el movimiento lineal, la herramienta acoplada se desplaza a una velocidad predeterminada en metros sobre segundo a través de una recta definida por dos puntos. Los programas siguen un orden secuencial de las instrucciones donde se define las distintas velocidades que trabaja el robot (Figura 53). Una vez finalizadas las programaciones se procede a las pruebas en los tableros y en el mueble característico elegido [33].

```

1 DEF kuka_rocks( )
2 INI
3 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT
4 PTP P1 Vel=100 % PDAT1 Tool[1] Base[0]
5 PTP P2 Vel=100 % PDAT2 Tool[1] Base[0]
6 PTP P3 Vel=100 % PDAT3 Tool[1] Base[0]
7 OUT 1'' State=TRUE CONT
8 LIN P4 Vel=2 m/s CPDAT1 Tool[1] Base[0]
9 PTP HOME Vel= 100 % DEFAULT
10 END

```

**Figura 53.** Ejemplo de programa para el robot KUKA [33].

#### 5.1.1.4. Pruebas

➤ *Calidad del robot*

Para comprobar la calidad que genera el robot KUKA KR 5 se opta por realizar los procesos de sellado y lacado a un velador Basilea. Primero se determina que variables afectan al acabado del mueble, las cuales son; velocidad de pasada, distancia entre la superficie y la pistola, solapado, presión de la pistola, ángulo de proyección y tamaño de la boquilla, donde las variables que más afectan a los procesos son el solapado y la velocidad de pasada, por lo tanto, las otras variables tienen valores fijos para las pruebas (Tabla 6).

**Tabla 6. Variables fijas dentro de las pruebas de calidad.**

<b>Distancia</b>	20 cm.
<b>Presión</b>	40 psi
<b>Ángulo de proyección en vertical</b>	90°
<b>Ángulo de proyección en horizontal</b>	60°
<b>Tamaño de Boquilla</b>	1.3

Antes de sellar y lacar el velador primero se realizan las pruebas en tableros con chapa de cerezo para determinar los valores de solapado y velocidad de pasada, que generan un acabado similar al realizado manualmente con el mueble. Es necesario que el tablero esté tinturado correctamente antes de la prueba de sellado (Figura 54), debido a que, tanto en el proceso de sellado como en el proceso de lacado, los productos no dan pigmentación a la chapa, estos son transparentes.



**Figura 54. Tablero tinturado para las pruebas de sellado.**

Para la comprobación, se utilizan datos del fabricante, el cual indica que, para garantizar una buena calidad, el depósito del producto debe ser de 120 a 150 g/m<sup>2</sup> tanto para sello como para laca [34]. Calculando con el área de los tableros se obtiene el siguiente resultado.

$$\text{Área} = (0.8 \text{ m}) \cdot (0.495 \text{ m}) = 0.396 \text{ m}^2$$

$$\text{Deposito mínimo} = \left(120 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}\right) \cdot (0.396 \text{ m}^2) = 47.52 \text{ g}$$

$$\text{Deposito máximo} = \left(150 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}\right) \cdot (0.396 \text{ m}^2) = 59.4 \text{ g}$$

Además de verificar la cantidad de producto depositado en el tablero, también se comprueba la uniformidad de este, donde el tablero sellado debe estar con todos sus poros tapados dando una superficie áspera por efecto de la sustancia aplicada. (Figura 55).



**Figura 55.** Tablero sellado.

Luego se realiza un proceso de lijado para brindar suavidad al tablero y prepararlo para el proceso de lacado (Figura 56).



**Figura 56.** Tablero lijado

Finalmente, se realiza el proceso de lacado donde el tablero debe tener un acabado suave, brillante y homogéneo (Figura 57).



**Figura 57.** *Tablero lacado.*

Antes de cada prueba, se pesa el tablero para poder comparar el peso final con el producto aplicado, además, dichas pruebas se realizaron cambiando la orientación de los tableros, tanto en vertical como en horizontal (Figura 58 y 59).



**Figura 58.** *Pruebas de calidad en orientación horizontal.*



**Figura 59.** *Pruebas de calidad en orientación vertical.*

Los resultados de las pruebas con los tableros chapados se muestran en las tablas 7, 8, 9 y 10.

**Tabla 7. Pruebas de calidad del proceso de sellado en horizontal.**

#	Peso inicial [g]	Solapado [cm]	Velocidad [m/s]	Peso deseado [g]	Peso final [g]
1	4150	10	0.275	4197 - 4209	4185
2	4195	10	0.275	4242 - 4254	4225
3	4225	8	0.25	4272 - 4284	4280
4	4240	8	0.25	4287 - 4299	4295

**Tabla 8. Pruebas de calidad del proceso de sellado en vertical.**

#	Peso inicial [g]	Solapado [cm]	Velocidad [m/s]	Peso deseado [g]	Peso final [g]
1	4290	8	0.275	4337 - 4349	4320
2	4185	8	0.25	4232 - 4244	4220
3	4320	8	0.2	4367 - 4379	4360
4	4360	8	0.15	4407 - 4419	4410

**Tabla 9. Pruebas de calidad del proceso de lacado en horizontal.**

#	Peso inicial [g]	Solapado [cm]	Velocidad [m/s]	Peso deseado [g]	Peso final [g]
1	4280	8	0.25	4327 - 4339	4310
2	4290	8	0.2	4337 - 4349	4320
3	4305	8	0.175	4352 - 4364	4370
4	4175	8	0.2	4222 - 4234	4210
5	4285	8	0.2	4332 - 4344	4335



**Tabla 10. Pruebas de calidad del proceso de lacado en vertical.**

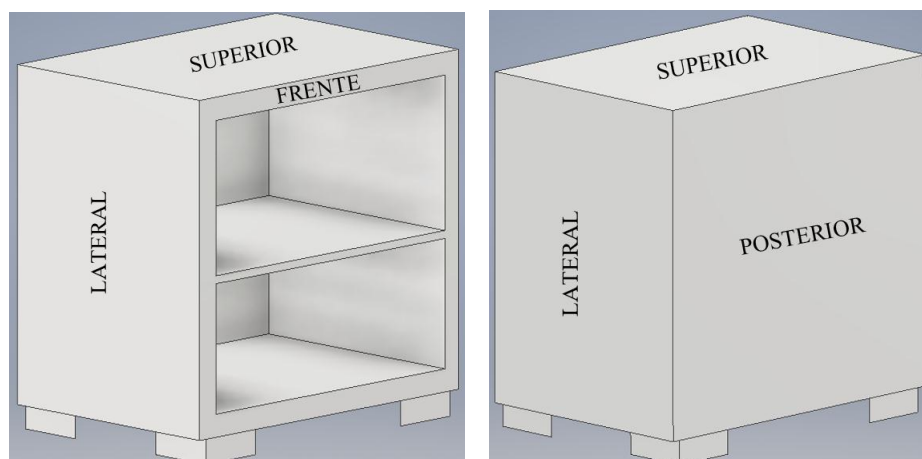
#	Peso inicial [g]	Solapado [cm]	Velocidad [m/s]	Peso deseado [g]	Peso final [g]
1	4270	8	0.15	4317 - 4329	4320
2	4395	8	0.15	4442 - 4454	4450

Con los valores de solapado y velocidad de pasada ya identificados se procede a realizar la prueba con el velador Basilea (Figura 60).



**Figura 60. Velador Basilea tinturado.**

El operario aplica los recubrimientos a cinco superficies del velador; dos laterales, superior, posterior y frente (Figura 61).



**Figura 61. Identificación de superficies en el velador.**

La proyección se realiza cara por cara debido a las dimensiones del mueble, además se limita a solo hacer las caras exteriores por el tamaño de la pistola pulverizadora automática. Así mismo, primero se calcula la cantidad de depósito que se debe proyectar al velador en función del área exterior de este donde se obtiene los siguientes resultados.

Superior

$$\text{Área} = (0.588 \text{ m}) \cdot (0.414 \text{ m}) = 0.243 \text{ m}^2$$

Lateral

$$\text{Área} = (0.414 \text{ m}) \cdot (0.561 \text{ m}) = 0.232 \text{ m}^2$$

Posterior

$$\text{Área} = (0.588 \text{ m}) \cdot (0.561 \text{ m}) = 0.33 \text{ m}^2$$

Frente

$$\text{Área} = [(0.588 \text{ m}) \cdot (0.561 \text{ m})] - [(0.255) \cdot (0.512)] - [(0.226) \cdot (0.512)]$$

$$\text{Área} = 0.083 \text{ m}^2$$

**Total**

$$\text{Área total} = 0.243 + (2 \cdot 0.232) + 0.33 + 0.083$$

$$\text{Área total} = 1.121 \text{ m}^2$$

$$\text{Depósito mínimo} = \left(120 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}\right) \cdot (1.121 \text{ m}^2) = \mathbf{134.57 \text{ g}}$$

$$\text{Depósito máximo} = \left(150 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}\right) \cdot (1.121 \text{ m}^2) = \mathbf{168.211 \text{ g}}$$

En la prueba de sellado, primero se proyecta sello en la cara superior, luego los laterales, en la cara posterior y finalmente en el frente del mueble, el velador queda con un buen acabado, los poros tapados y con una superficie áspera por el producto aplicado (Figura 62).



**Figura 62.** *Velador Basilea sellado.*

Para preparar el mueble para la laca, se lija todas las caras exteriores dando suavidad a la superficie (Figura 63).



**Figura 63.** *Velador Basilea lijado.*

Finalmente, en la prueba de lacado, se proyecta de la misma manera que en la prueba de sellado, dando una superficie suave, brillante y homogénea al velador (Figura 64).



**Figura 64.** *Velador Basilea lacado.*

➤ *Destreza del robot*

Comprobar la destreza que posee el robot KUKA KR 5 consiste en ver la capacidad de este para reproducir los movimientos del operario mientras aplica los distintos recubrimientos, ya sea sello o laca. El propósito de las pruebas es demostrar la versatilidad del sistema automatizado sobre el proceso manual, además del grado de adaptación de este dentro de la planta.

El proceso de sellado comienza aplicando el recubrimiento a las caras laterales y superior en contra de las vetas de la madera, luego se proyecta en sentido de las vetas a las mismas superficies, el frente del velador también se cubre con dos capas de sellador. La cara posterior no está chapada, por ende, se puede proyectar en cualquier sentido. El proceso de lacado es similar al del sellado, sin embargo, solo se aplica la pasada contra veta en la cara superior del velador, la pasada en sentido de la veta se aplica a todas las superficies anteriormente identificadas. Debido a la limitación de alcance que posee el robot se diseña un velador a escala para la realización de la prueba (Figura 65). Se utilizaron las dimensiones de un velador Basilea reduciendo un 25% el tamaño de este.



**Figura 65.** *Velador a escala.*

La programación del robot KUKA KR 5 está basado en el procedimiento que realiza el operario en la empresa en los procesos de sellado y lacado, no obstante, debido al tamaño del aditamento, solo se proyecta las caras exteriores del velador a escala (Figura 66).



**Figura 66.** *Pruebas de destreza.*

Para las pruebas de destreza se utiliza alcohol antiséptico que tiene una densidad similar a los recubrimientos utilizados en la empresa [34]. Los parámetros para la pistola pulverizadora se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11. Variables para las pruebas de destreza.**

<b>Distancia</b>	20 cm
<b>Presión</b>	15 psi
<b>Ángulo de proyección</b>	45°
<b>Tamaño de Boquilla</b>	1.3
<b>Velocidad de pasada</b>	1.5 m/s

Los resultados al finalizar las pruebas de destreza en el robot son; el proceso de sellado proyecta siete superficies, tres en contra veta y cuatro en sentido de estas dando un tiempo de 50 segundos, mientras que el proceso de lacado se aplica en cinco superficies, una en contra veta y cuatro en sentido de estas y demora 38 segundos.

#### **5.1.1.5. Definición de variables**

Con los resultados obtenidos se definen las variables de los procesos de sellado y lacado para los muebles de dormitorio, donde la velocidad de pasada y el solapado fueron obtenidos por las pruebas de laboratorio con el robot KUKA KR 5 (tabla 12), cabe recalcar que estas variables se destacan por ser las principales que afectan el acabado superficial de los distintos mobiliarios.

**Tabla 12. Definición de variables.**

<b>Variables</b>	<b>Sellado</b>		<b>Lacado</b>	
	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
<b>Distancia</b>	20 cm.	20 cm	20 cm	20 cm
<b>Presión</b>	40 psi	40 psi	40 psi	40 psi
<b>Ángulo de proyección</b>	90°	60°	90°	60°
<b>Tamaño de Boquilla</b>	1.3	1.3	1.3	1.3
<b>Solapado</b>	8 cm	8 cm	8 cm	8 cm
<b>Velocidad de pasada</b>	1.5 m/s	2.5 m/s	1.5 m/s	2 m/s

Con estas variables, las pruebas de calidad y destreza del robot antropomórfico de la universidad y las trayectorias que realiza los operarios dentro de la planta, se procede a realizar las distintas simulaciones para poder comparar los sistemas propuestos con el actual proceso de la empresa.

### **5.1.2. SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS**

En esta sección se detalla las distintas propuestas que se diseñan y simulan para los procesos de sellado y lacado dentro de la línea de dormitorios, para ello se utiliza un software de ingeniería código abierto. Es importante aclarar que, para un correcto análisis de factibilidad e implementación, se simulan tres distintos muebles de diferentes categorías, con el fin de examinar la destreza del sistema robotizado. Se emplean los muebles con más producción del año 2018-2019 de cada categoría; cama Match de 2 ½ plazas, velador Basilea y cómoda Vari.

Para el análisis y la simulación del proceso se definen tres tipos de sistemas que se fundamentan en el tipo de robot que se utiliza y que son los que cumplen con los requerimientos del proceso; los sistemas considerados son:

- Sistema cartesiano
- Sistema rotativo
- Sistema riel

La simulación se realiza en un software abierto denominado Coppelia SIM EDU, donde el procedimiento para ensamblar, programar y simular los procesos de sellado y lacado con los distintos sistemas se encuentran explicados en el Apéndice A.

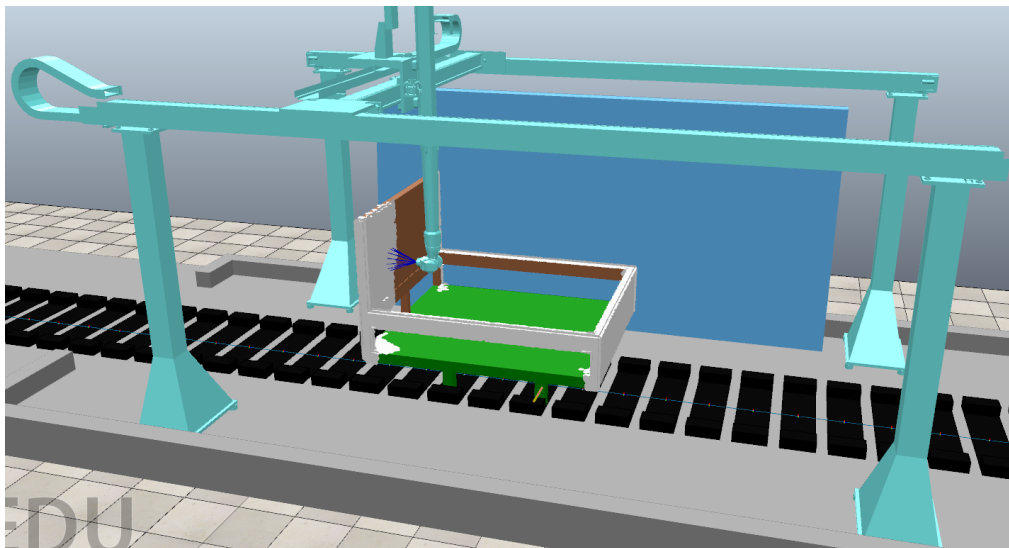
#### **5.1.2.1. Simulación del sistema cartesiano (Propuesta 1)**

Para el sistema cartesiano se utiliza el robot FP-3 de la marca GUEDEL diseñado a medida para la empresa donde su ficha técnica se encuentra en el Anexo 2, dicho robot cuenta con cinco grados de libertad donde las tres primeras son prismáticas (x, y, z) y las dos últimas son de revolución (A4, A5) (Tabla 13).

**Tabla 13. Características del robot cartesiano [35].**

Juntas	Posición mínima	Rango máximo	Torque máximo
<b>X</b>	-5.5 m	5.5 m	800 N
<b>Y</b>	0 m	2.45 m	800 N
<b>Z</b>	-1.5 m	1.5 m	800 N
<b>A4</b>	-350°	700°	9000 N□m
<b>A5</b>	-130°	238°	9000 N□m

El sistema cartesiano utiliza varios elementos para la simulación de los procesos de sellado y lacado como las cabinas de la empresa, la banda transportadora, los muebles mencionados anteriormente, el robot ensamblado y las trayectorias basadas en el proceso del operario. La principal característica de este sistema es su volumen de trabajo en forma de paralelepípedo donde puede llegar a proyectar todas las áreas de los muebles que se mencionan anteriormente. En la figura 67 se puede ver el sistema cartesiano proyectando sello a la cama Match de 2 ½ plazas y el resto de las simulaciones se encuentran en el Apéndice B.



**Figura 67. Sistema cartesiano proyectando sello a la cama Match.**



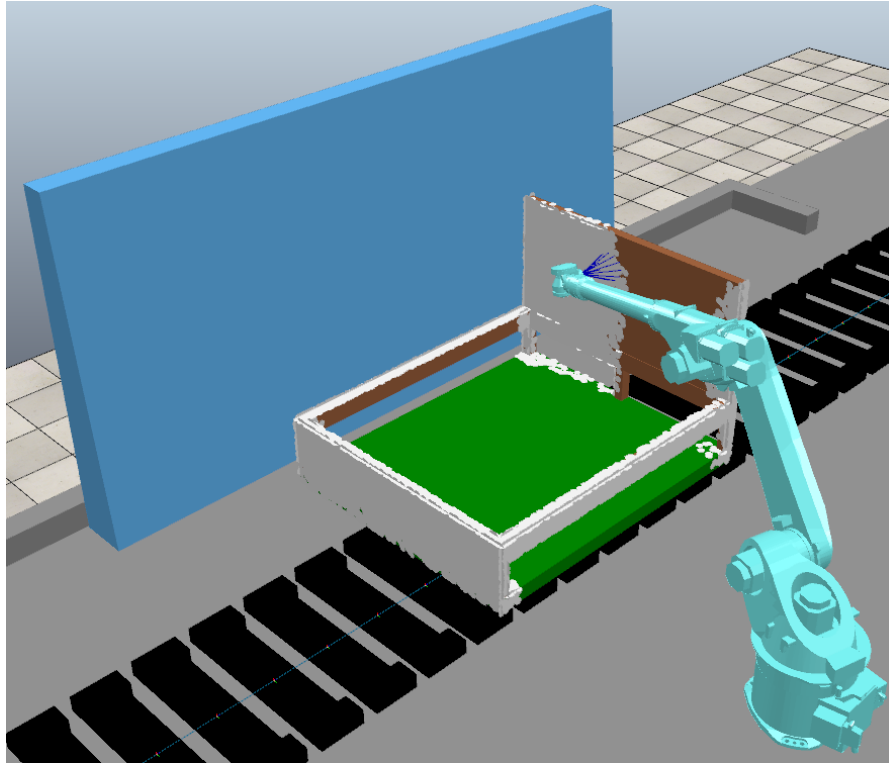
### 5.1.2.2. Simulación del sistema rotativo (Propuesta 2)

Para el sistema rotativo se utiliza el robot KR30L16-2 de la marca KUKA con una mesa giratoria donde su ficha técnica se encuentra en el Anexo 2, dicho robot antropomórfico cuenta con seis grados de libertad las cuales son de revolución (A1, A2, A3, A4, A5, A6) (Tabla 14) y la mesa cuenta con un giro completo de 360°.

**Tabla 14. Características del robot rotativo [36].**

<b>Juntas</b>	Posición mínima	Rango máximo	Torque máximo
<b>A1</b>	-185°	370°	18400 N□m
<b>A2</b>	-135°	170°	21600 N□m
<b>A3</b>	-120°	278°	11900 N□m
<b>A4</b>	-350°	700°	9000 N□m
<b>A5</b>	-130°	238°	9000 N□m
<b>A6</b>	-350°	700°	9000 N□m

El sistema rotativo utiliza varios elementos para la simulación de los procesos de sellado y lacado como las cabinas modificadas de la empresa debido al tamaño del sistema, la banda transportadora, los muebles mencionados, el robot ensamblado con la mesa giratoria y las trayectorias basadas en el proceso del operario. La principal característica de este sistema es que puede llegar a todas las áreas del mobiliario ya que este puede girar permitiendo proyectar sello o laca. En la figura 68 se puede ver el sistema rotativo proyectando sello a la cama Match de 2 ½ plazas y el resto de las simulaciones se encuentran en el Apéndice B.



**Figura 68.** Sistema rotativo proyectando sello a la cama Match.

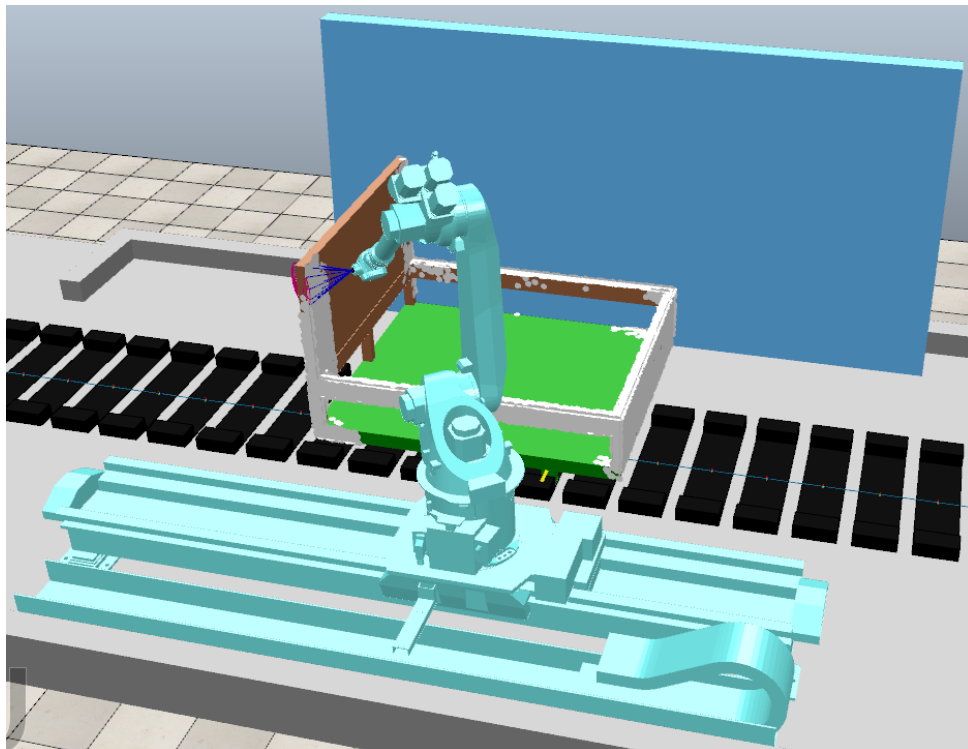
### 5.1.2.3. Simulación del sistema con riel (Propuesta 3)

Para el sistema con riel se utiliza el mismo robot antropomórfico KUKA KR30L16-2 con una unidad lineal KL1000-2 donde sus fichas técnicas se encuentran en el Anexo 2, dicho robot antropomórfico cuenta con seis grados de libertad las cuales son de revolución (A2, A3, A4, A5, A6, A7) y la unidad lineal brinda un séptimo grado de libertad que es prismático (P1) (Tabla 15).

**Tabla 15.** Características del robot con riel [36], [37].

<b>Juntas</b>	Posición mínima	Rango máximo	Torque máximo
<b>P1</b>	0 m	6 m	1000 N
<b>A2</b>	-185°	370°	18400 N□m
<b>A3</b>	-135°	170°	21600 N□m
<b>A4</b>	-120°	278°	11900 N□m
<b>A5</b>	-350°	700°	9000 N□m
<b>A6</b>	-130°	238°	9000 N□m
<b>A7</b>	-350°	700°	9000 N□m

El sistema con riel utiliza varios elementos para la simulación de los procesos de sellado y lacado como las cabinas modificadas de la empresa debido al tamaño del robot, la banda transportadora, los muebles mencionados, el robot ensamblado con el riel y las trayectorias basadas en el proceso del operario. La principal característica de este sistema es que el robot se desplaza paralelamente a la banda transportadora permitiendo proyectar sello o laca a todas las áreas del mobiliario. En la figura 69 se puede ver el sistema con riel proyectando sello a la cama Match de 2 ½ plazas y el resto de las simulaciones se encuentran en el Apéndice B.



**Figura 69.** Sistema con riel proyectando sello a la cama Match.

#### **5.1.2.4. Análisis comparativo**

Mediante las simulaciones en el software de ingeniería y las tablas 3, 4 y 5 donde se muestra el tiempo necesario para lacar los muebles representativos, se procede a realizar un análisis comparativo entre los sistemas propuestos y el proceso actual de la empresa (Tabla 16 y 17).

**Tabla 16. Tiempos para el proceso de sellado.**

<b>Sistema</b>	Velador Basilea	Cómoda Vari	Cama Match 2 ½ plazas	<b>Total</b>
<b>Proceso actual</b>	63 s	109 s	152 s	324 s
<b>Cartesiano</b>	64 s	96 s	131 s	291 s
<b>Rotativo</b>	63 s	111 s	167 s	341 s
<b>Riel</b>	62 s	111 s	225 s	398 s

**Tabla 17. Tiempos para el proceso de lacado.**

<b>Sistema</b>	Velador Basilea	Cómoda Vari	Cama Match 2 ½ plazas	<b>Total</b>
<b>Proceso actual</b>	67 s	93 s	98 s	258 s
<b>Cartesiano</b>	42 s	68 s	113s	223 s
<b>Rotativo</b>	45 s	79 s	145 s	269 s
<b>Riel</b>	46 s	82 s	183 s	311 s

Como se puede observar el sistema con robot cartesiano es el que menos demora en aplicar sello y laca a los muebles mencionados anteriormente, con tiempos de diferencia de 33 segundos y 35 segundos menos con respecto al proceso actual.

## **5.2. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO**

En esta sección se obtienen los costos de producción de cada sistema analizado además del proceso actual, de esta manera se consigue un pronóstico de la utilidad neta que generarían los sistemas una vez implementados tomando en cuenta el balance general del año 2018. También se incluye el cálculo del período de recuperación de inversión de cada propuesta de implementación.

## 5.2.1. ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PRODUCCIÓN ACTUAL

En este punto se determina el rubro que utiliza la empresa además de las distintas propuestas anteriormente analizadas en los procesos de sellado y lacado en la línea de dormitorios, donde se detalla el material utilizado, consumo energético, consumo de agua, la mano de obra de los operarios, gasto en reprocesos y mantenimiento de equipos.

### 5.2.1.1. Análisis de costos del sistema actual

El consumo energético del sistema actual, tanto en el proceso de sellado como el proceso de lacado, es debido al sistema de bombeo de las cortinas de agua, al compresor de aire, la cadena de transporte y las luces dentro de las cabinas, sin embargo, este consumo es igual para todos los sistemas por lo que no será tomado en cuenta para este análisis, así mismo con el gasto de mantenimiento para la cadena y las pistolas pulverizadoras. El resto de los gastos que realiza este sistema se desarrollan a continuación.

#### ➤ *Materiales*

Los operarios utilizan 889 litros de sello y 889 litros de laca por mes para la línea de dormitorios. El costo aproximado de estos recubrimientos es de \$3,50 por litro [1], [34]. El cálculo de costo anual se muestra a continuación:

$$\text{Costo mensual en materiales} = 889 \text{ L} \cdot 3,50 \frac{\$}{\text{L}} = \$3,111.11$$

$$\text{Costo anual en materiales} = \$3,111.11 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en materiales} = \mathbf{\$37,333.00}$$

#### ➤ *Consumo de agua*

El consumo de agua es debido a las cortinas que se encuentran en las cabinas, las mismas que requieren un cambio del agua cada 15 días. Cada piscina conectada a una cortina tiene una capacidad de 5 m<sup>3</sup> de agua [1], considerando que el costo de agua para la zona industrial es de \$4,14 por metro cúbico [38], se calcula el consumo de agua anual.

$$\text{Costo mensual en agua} = 5 \text{ m}^3 \cdot 2 \cdot 4,14 \frac{\$}{\text{m}^3} = \$41,40$$

$$\text{Costo anual en agua} = \$41,40 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en agua} = \mathbf{\$496,80}$$

➤ *Mano de obra*

La mano de obra es realizada por un operario el cual recibe mensualmente \$430,00 sin embargo, se debe añadir un porcentaje de 40% debido a los décimos y el seguro que recibe [1]. El cálculo de mano de obra anual se muestra a continuación:

$$\text{Costo mensual en mano de obra} = \$430,00 + (\$430,00 \cdot 0.4) = \$602,00$$

$$\text{Costo anual en mano de obra} = \$602,00 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en mano de obra} = \mathbf{\$7.224,00}$$

➤ *Reproceso*

Debido a las fallas que se producen en los procesos de tinturado, sellado y lacado; la empresa gasta \$5.000,00 en reprocesos mensualmente [1], por lo que se calcula el gasto anualmente por proceso.

$$\text{Costo mensual por reproceso} = \$5.000,00 \div 3 = \$1.666,67$$

$$\text{Costo anual por reproceso} = \$1.667,67 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en reproceso} = \mathbf{\$20.000,00}$$

➤ *Total*

Considerando todos los gastos mencionados anteriormente, el costo total por proceso se muestra en la tabla 18. La empresa utiliza \$65,054.13 por año por proceso, siendo necesario \$130,108.26 para los procesos de sellado y lacado.

**Tabla 18. Costo total del sistema actual.**

<b>Gastos anuales</b>	Planta actual
<b>Materiales</b>	\$37,333.33
<b>Agua</b>	\$496,80
<b>Electricidad</b>	\$0,00
<b>Mano de obra</b>	\$7.224,00
<b>Reproceso</b>	\$20.000,00
<b>Total</b>	\$65,054.13

### **5.2.1.2. Análisis de costos del sistema cartesiano (Propuesta 1)**

El sistema cartesiano utiliza la misma cantidad de recubrimiento para los procesos de sellado y lacado que tiene la empresa actualmente, además debido a que no es necesario una modificación de las piscinas, el consumo de agua también se mantiene. El resto de los gastos que realiza este sistema se desarrollan a continuación.

➤ *Consumo energético*

El sistema agrega un costo adicional de consumo de energía eléctrica que ya utiliza 6 KW para su funcionamiento. Considerando el horario normal que trabaja la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, el costo del consumo energético se calcula de la siguiente manera [39].

$$\text{Consumo energético} = 6KW \cdot 8H \cdot 20 \text{ días} = 960 \text{ KWH}$$

$$\text{Consumo mensual energético} = 960 \text{ KWH} \cdot 1.41 \frac{\$}{\text{KWH}} = \$1,353.60$$

$$\text{Costo anual energético} = \$1,353.60 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual energético} = \mathbf{\$16,243.20}$$

➤ *Mano de obra*

Para el sistema cartesiano es necesario un ingeniero que sepa sobre robótica y automatización provocando un cambio en el gasto de la mano de obra. El sueldo del nuevo operario está acorde al código de trabajo del Ecuador donde se considera sus beneficios y remuneración. A continuación, se muestra dicho cálculo.

$$\text{Costo mensual en mano de obra} = \$800,00 + (\$800 \cdot 0.4) = \$1.120,00$$

$$\text{Costo anual en mano de obra} = \$1,120.00 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en mano de obra} = \mathbf{\$13,440,00}$$

➤ *Reproceso*

El sistema cartesiano puede mejorar la calidad del acabado en los procesos de sellado y lacado, reduciendo así el costo de reproceso en un 50%. El cálculo se muestra a continuación.

$$\text{Costo mensual por reproceso} = \$1.666,67 \cdot \frac{50\%}{100\%} = \$833.33$$

$$\text{Costo anual por reproceso} = \$833.33 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en reproceso} = \mathbf{\$10.000,00}$$

➤ *Mantenimiento*

El sistema cartesiano cuenta con mecanismos y componentes electrónicos que necesitan un mantenimiento cada cierto tiempo, por lo que la empresa deberá gastar una suma para mantener al sistema en un buen estado para brindar un 100% de funcionalidad. El mantenimiento es preventivo siguiendo un protocolo específico donde se incluye una visita anual además de tener soporte técnico las 24h [40].

$$\text{Costo anual por mantenimiento} = \mathbf{\$2,941.50}$$

➤ *Total*

Considerando todos los gastos mencionados anteriormente, el costo total por proceso se muestra en la tabla 19. La primera propuesta tiene un costo de producción de \$80,454.83 por año por proceso, siendo necesario \$160,909.67 para los procesos de sellado y lacado.



**Tabla 19. Costo total del sistema cartesiano.**

<b>Gastos anuales</b>	Sistema cartesiano
<b>Materiales</b>	\$37,333.33
<b>Agua</b>	\$496.80
<b>Electricidad</b>	\$16,243.20
<b>Mano de obra</b>	\$13,440.00
<b>Reproceso</b>	\$10.000,00
<b>Mantenimiento</b>	\$2,941.50
<b>Total</b>	\$80,454.83

### 5.2.1.3. Análisis de costos del sistema rotativo (Propuesta 2)

El sistema rotativo aplica la misma cantidad de sello y laca que el operario a los distintos muebles de la empresa, sin embargo, la mano de obra cambia por un ingeniero capacitado en robótica, donde dicho gasto está analizado en la primera propuesta de implementación. Los gastos de reproceso y mantenimiento también se mantienen igual que al sistema cartesiano los cuales están detallados anteriormente. El resto de los gastos que realiza este sistema se desarrollan a continuación.

#### ➤ *Consumo de agua*

El consumo de agua se incrementa por las modificaciones de las piscinas, aumentando la cantidad de agua necesaria para las cortinas. El cálculo de este consumo se muestra a continuación [38].

$$\text{Consumo de agua} = 5 \text{ m}^3 + (5.45 \cdot 0.45 \cdot 1.2) \text{ m}^3 = 7.943 \text{ m}^3$$

$$\text{Costo mensual en agua} = 7.943 \text{ m}^3 \cdot 2 \cdot 4,14 \frac{\$}{\text{m}^3} = \$65,77$$

$$\text{Costo anual en agua} = \$65,77 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en agua} = \mathbf{\$789,22}$$

➤ *Consumo energético*

El sistema agrega un costo adicional de consumo de energía eléctrica que ya utiliza 4.5 KW para su funcionamiento. Considerando el horario normal que trabaja la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, el costo del consumo energético se calcula de la siguiente manera [39].

$$\text{Consumo energético} = 4.5KW \cdot 8H \cdot 20 \text{ días} = 720 KWH$$

$$\text{Consumo mensual energético} = 480 KWH \cdot 1.41 \frac{\$}{KWH} = \$1,015.20$$

$$\text{Costo anual en agua} = \$1,015.20 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en agua} = \$12,182.40$$

➤ *Total*

Considerando todos los gastos mencionados anteriormente, el costo total por proceso se muestra en la tabla 20. La segunda propuesta tiene un costo de producción de \$76,686.45 por año por proceso, siendo necesario \$153,372.90 para los procesos de sellado y lacado.

**Tabla 20. Costo total del sistema rotativo.**

<b>Gastos anuales</b>	Sistema rotativo
<b>Materiales</b>	\$37,333.33
<b>Agua</b>	\$789.22
<b>Electricidad</b>	\$12,182.40
<b>Mano de obra</b>	\$13,440.00
<b>Reproceso</b>	\$10,000.00
<b>Mantenimiento</b>	\$2,941.50
<b>Total</b>	\$76,686.45

#### **5.2.1.4. Análisis de costos del sistema con riel (Propuesta 3)**

Al igual que el sistema cartesiano y rotativo, esta propuesta utiliza la misma cantidad de producto en la línea de dormitorios. Además, los gastos de mano de obra, reproceso y mantenimiento conservan los mismos costos que en los otros sistemas.

Esta propuesta utiliza la misma potencia que el sistema cartesiano por lo que se toma el mismo consumo energético. El resto de los gastos se desarrollan a continuación.

➤ *Consumo de agua*

El consumo de agua se incrementa por las modificaciones de las piscinas, aumentando la cantidad de agua necesaria para las cortinas. El cálculo de este consumo se muestra a continuación [38].

$$\text{Consumo de agua} = 5 \text{ m}^3 + (5.45 \cdot 0.45 \cdot 0.8) \text{ m}^3 = 6.962 \text{ m}^3$$

$$\text{Costo mensual en agua} = 6.962 \text{ m}^3 \cdot 2 \cdot 4,14 \frac{\$}{\text{m}^3} = \$57,65$$

$$\text{Costo anual en agua} = \$57,65 \cdot 12 \text{ meses}$$

$$\text{Costo anual en agua} = \mathbf{\$691,74}$$

➤ *Total*

Considerando todos los gastos mencionados anteriormente, el costo total por proceso se muestra en la tabla 21. La tercera propuesta tiene un costo de producción de \$80,649.78 por año por proceso, siendo necesario \$161,299.56 para los procesos de sellado y lacado.

**Tabla 21. Costo total del sistema con riel.**

<b>Gastos anuales</b>	Sistema con riel
<b>Materiales</b>	\$37,333.33
<b>Agua</b>	\$691.74
<b>Electricidad</b>	\$16,243.20
<b>Mano de obra</b>	\$13,440.00
<b>Reproceso</b>	\$10.000,00
<b>Mantenimiento</b>	\$2,941.50
<b>Total</b>	\$80,649.78

### 5.2.1.5. Total

Tabla 22. Costos totales de los sistemas analizados.

Gastos anuales	Planta actual	Sistema cartesiano	Sistema rotativo	Sistema con riel
<b>Materiales</b>	\$37,333.33	\$37,333.33	\$37,333.33	\$37,333.33
<b>Agua</b>	\$496,80	\$496,80	\$789.22	\$691.74
<b>Electricidad</b>	\$0,00	\$16,243.20	\$12,182.40	\$16,243.20
<b>Mano de obra</b>	\$7.224,00	\$13,440.00	\$13,440.00	\$13,440.00
<b>Reproceso</b>	\$20.000,00	\$10.000,00	\$10.000,00	\$10.000,00
<b>Mantenimiento</b>	\$0,00	\$2,941.50	\$2,941.50	\$2,941.50
<b>Total</b>	\$65,054.13	\$80,454.83	\$76,686.45	\$80,649.78

### 5.2.2. INVERSIÓN INICIAL

En este punto se describe las características importantes que se debe considerar en cada sistema para su correcta implementación e instalación, como el precio de los robots, modificación en las estructuras tanto en espacio como en las piscinas de agua, además de una nueva red eléctrica y neumática. Finalmente se evalúa el consumo total del nuevo sistema.

#### 5.2.2.1. Precio de los sistemas

##### ➤ *Precio del sistema cartesiano (Propuesta 1)*

El robot de configuración cartesiana elegido para este sistema es el SW7730D de la compañía Dongguan Switek Technology Automation [41], el cual posee un volumen de trabajo similar al robot simulado, sin embargo dicho robot solo posee tres grados de libertad (x, y, z), por lo que se debe agregar un brazo robótico para complementar la movilidad del sistema. El robot complementario es CS7MB RX60 de la compañía Stäubli [42]. Las compañías que comercializan los robots incluyen capacitación para el manejo de estos. Las fichas técnicas de los robots evaluados en esta sección se encuentran en el Anexo 3. Los precios de los robots se muestran a continuación con el total del sistema.

**Tabla 23. Precio del sistema cartesiano [41], [42].**

<b>Sistema cartesiano</b>	<b>Precio</b>
<b>SW7730D</b>	\$25,000.00
<b>CS7MB RX60</b>	\$9,327.33
<b>Total</b>	<b>\$34,327.33</b>

➤ *Precio del sistema rotativo (Propuesta 2)*

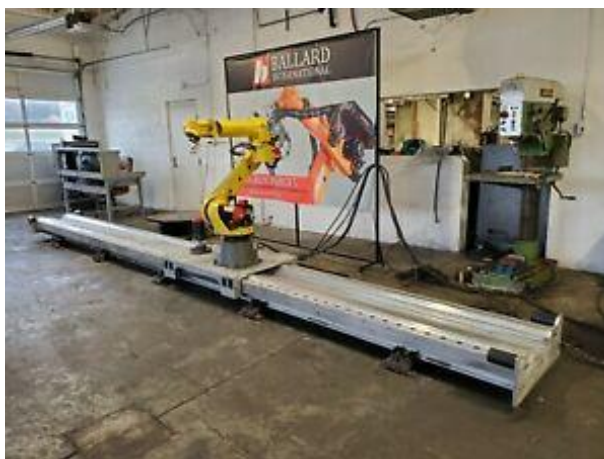
Este sistema se compone de dos partes; una mesa giratoria que utiliza un servo motor AC 1326AB-B430E-M 2 K4LS de la marca Allen-Bradley [43], y un robot antropomórfico de seis grados de libertad, el KR30L16 de la compañía KUKA [44], dicha empresa incluye la capacitación para el manejo del controlador y el robot en sí. Los datos técnicos de estos robots se encuentran en el Anexos 2 y 3. A continuación, se muestra el precio total del sistema rotativo.

**Tabla 24. Precio del sistema rotativo [43], [44].**

<b>Sistema rotativo</b>	<b>Precio</b>
<b>KR30L16</b>	\$17,205.00
<b>Servo Motor AC 1326AB-B430E-M 2 K4LS</b>	\$1,034.99
<b>Total</b>	<b>\$18,239.99</b>

➤ *Precio del sistema riel (Propuesta 3)*

Este sistema consiste en un robot antropomórfico de seis grados de libertad, el KUKA KR30L16 mencionado anteriormente, este es desplazado mediante un posicionador FANUC R-2000iB que puede mover al robot paralelamente a la cadena de transporte por siete metros (Figura 70). Las compañías incluyen la capacitación del manejo de los robots en sus precios. La información técnica de estos robots previamente mencionados se encuentra en el Anexo 2. El precio del sistema riel se muestra a continuación.



**Figura 70.** Riel Fanuc R-2000iB [45].

**Tabla 25.** Precio del sistema riel [44], [45].

Sistema riel	Precio
<b>KUKA KR30L16</b>	\$17,205.00
<b>Fanuc R-2000iB</b>	\$949.16
<b>Total</b>	<b>\$18,154.16</b>

### 5.2.2.2. Modificación de estructura

➤ *Modificación de estructura en el sistema cartesiano (Propuesta 1)*

Debido a que el sistema cartesiano es muy adaptable, no es necesario realizar modificaciones de espacio ni de las piscinas conectadas a las cortinas ya que se diseña según la planta actual de la empresa. Los planos de este sistema se encuentran en el Apéndice C.

➤ *Modificación de estructura en el sistema rotativo (Propuesta 2)*

El sistema rotativo necesita una expansión de estructura de 1.2 metros debido al giro que debe realizar la mesa para los muebles, además de una modificación de las piscinas y cortinas de agua, para ello se necesita un recorte de las paredes, una excavación, agrandar las piscinas con hormigón encofrado sin acabado y modificar la cadena de transporte. Los detalles sobre las modificaciones y los costos son datos de profesionales certificados que se muestran en la tabla 26. Con la nueva expansión, el proceso de sellado y lacado con el sistema rotativo ya implementado se puede observar en los planos que se encuentran en el Apéndice C.

**Tabla 26. Costo de la modificación de estructura del sistema rotativo.**

<b>Datos</b>	<b>Costo</b>
Materiales	\$900,00
Mano de obra	\$750,00
Recorte de pared	\$100,00
Excavación	\$150,00
Modificación de la cadena de transporte	\$150,00
<b>Total</b>	<b>\$2.050,00</b>

➤ *Modificación de estructura en el sistema con riel (Propuesta 3)*

El sistema con riel precisa una expansión de estructura de 0.8 metros debido al tamaño del riel que utiliza el robot para desplazarse, por lo que requiere una modificación de la estructura y de las piscinas de agua. Al igual que en el sistema rotativo, es necesario recortar las paredes, excavar, agrandar las piscinas con hormigón encofrado sin acabado y modificar la cadena de transporte, dichos datos son tomados de un profesional del área.

Los detalles sobre las modificaciones y los costos de estos se muestran en la tabla 27. Con la nueva expansión, el proceso de sellado y lacado con el sistema con riel ya implementado se puede observar en los planos que se encuentran en el Apéndice C.

**Tabla 27. Costo de la modificación de estructura del sistema con riel.**

<b>Datos</b>	<b>Costo</b>
Materiales	\$600,00
Mano de obra	\$750,00
Recorte de pared	\$100,00
Excavación	\$150,00
Modificación de la cadena de transporte	\$150,00
<b>Total</b>	<b>\$1.750,00</b>

### 5.2.2.3. Red eléctrica

La implementación de robots a la planta actual de la empresa necesita una nueva red eléctrica debido a que los sistemas funcionan con un voltaje de 460V y con 6KW de potencia [36], [45]–[48] (Tabla 28).

**Tabla 28. Costo de la red eléctrica para un robot.**

<b>Datos</b>	<b>Costo</b>
Materiales	\$470,00
Transformador 10KW	\$900,00
Mano de obra	\$100,00
<b>Total</b>	<b>\$1,470.00</b>

### 5.2.2.4. Red neumática

La empresa tiene dos compresores de aire de tornillo rotativo con paletas deslizables de la marca INGERSOLL RAND donde los datos técnicos se muestran en la tabla 29, estos son capaces de soportar la nueva línea neumática que necesita el robot para controlar la apertura y cierre de la pistola pulverizadora automática [1], por lo que solo se cotiza las tuberías, acoples y el regulador (Tabla 30).

**Tabla 29. Datos técnicos del compresor de aire de tornillo [1].**

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Capacidad	216 CFM
Presión de funcionamiento nominal	100 psig
Presión máxima de descarga	103 psig
Potencia nominal del motor	50 HP
Potencia nominal del ventilador	3 HP
Paquete total de amperios	140/70
Voltaje	230/460



**Tabla 30. Costo de la red neumática para el robot.**

<b>Datos</b>	<b>Costo</b>
Materiales	\$100,00
Regulador	\$130,00
Mano de obra	\$50,00
<b>Total</b>	<b>\$280,00</b>

#### **5.2.2.5. Total**

**Tabla 31. Inversión inicial de los sistemas analizados.**

<b>Datos</b>	<b>Sistema cartesiano</b>	<b>Sistema rotativo</b>	<b>Sistema con riel</b>
Precio del sistema	\$34,327.33	\$18,239.99	\$18,154.16
Modificación de estructura	\$0,00	\$2.050,00	\$1.750,00
Red eléctrica	\$1.470,00	\$1.470,00	\$1.470,00
Red neumática	\$280,00	\$280,00	\$280,00
<b>Total</b>	<b>\$36,077.33</b>	<b>\$22,039.99</b>	<b>\$21,654.16</b>

#### **5.2.2.6. Depreciación de los sistemas**

En esta sección se obtiene la depreciación de los robots necesarios para cada sistema. Se considera depreciación a la suma de dinero que pierde un equipo o máquina con el pasar del tiempo considerando la vida útil de este. Los robots industriales tienen una vida útil entre 10 a 15 años [49]. Utilizando la siguiente fórmula se calcula la depreciación de cada robot y, por ende, de cada sistema analizado anteriormente [50].

$$\text{Depreciación} = \frac{\text{Valor amortizable}}{\text{Vida útil}}$$

##### ➤ *Depreciación del sistema cartesiano (Propuesta 1)*

El robot SW7730D de la empresa Dongguan Switek Technology Automation tiene un precio de venta de \$25,000.00, considerando su vida útil de 10 años se obtiene una depreciación de \$2,500.00 por año.

El robot CS7MB RX60 de la empresa Staübli tiene una depreciación de \$932.73 debido a que su precio de comercialización es de \$9,327.33 (Tabla 32).

**Tabla 32. Depreciación total del sistema cartesiano.**

<b>Datos</b>	<b>Robot Switek SW7730D</b>	<b>Robot Staübli CS7MB RX60</b>
Valor amortizable	\$25,000.00	\$9,327.33
Vida útil (años)	10	10
Coste anual de depreciación	\$2,500.00	\$932.73
<b>Total</b>	<b>\$3,432.73</b>	

➤ *Depreciación del sistema rotativo (Propuesta 2)*

El robot KR30L16 de la empresa KUKA tiene un precio de venta de \$17,205.00, considerando su vida útil de 10 años se obtiene una depreciación de \$1,720.50 por año. El servo motor AC 1326AB de la marca Allen-Bradley tiene una depreciación de \$129.37 debido a que su precio de comercialización es de \$1,034.99 y su vida útil es de 8 años (Tabla 33) [51].

**Tabla 33. Depreciación total del sistema rotativo.**

<b>Datos</b>	<b>Robot KUKA KR30L16</b>	<b>Servo Motor AC 1326AB</b>
Valor amortizable	\$17,205.00	\$1,034.99
Vida útil (años)	10	8
Coste anual de depreciación	\$1,720.50	\$129.37
<b>Total</b>	<b>\$1,849.87</b>	

➤ *Depreciación del sistema con riel (Propuesta 3)*

El robot KR30L16 de la empresa KUKA tiene un precio de venta de \$17,205.00, considerando su vida útil de 10 años se obtiene una depreciación de \$1,720.50 por año. El robot riel R-2000iB de la empresa FANUC tiene una depreciación de \$94.92 debido a que su precio de comercialización es de \$949.16 y su vida útil es de 10 años (Tabla 34).

**Tabla 34. Depreciación total del sistema con riel.**

<b>Datos</b>	<b>Robot KUKA KR30L16</b>	<b>FANUC R-2000iB</b>
Valor amortizable	\$17,205.00	\$949.16
Vida útil (años)	10	10
Coste anual de depreciación	\$1,720.50	\$94.92
<b>Total</b>	<b>\$1,815.42</b>	

### **5.2.3. ANÁLISIS DE INVERSIÓN DE LOS SISTEMAS**

En esta sección se analiza económicamente la inversión frente al balance general del año 2018 de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, además se realiza un pronóstico para obtener la utilidad de los años de funcionamiento de la implementación según cada sistema analizado.

#### **5.2.3.1. Análisis económico de la situación actual**

El balance general del año 2018 de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional muestra un ingreso de \$15,577,704.60 con unos costos y gastos totales de \$15,091,437.40. Considerando el aporte del 15% a trabajadores y los impuestos a la renta, la empresa tiene en el año 2018 una utilidad neta de \$200,606.41 (Tabla 35) [52].

**Tabla 35. Balance general del año 2018.**

Ingresos totales	\$15,577,704.60
Costos y gastos totales	\$15,091,437.40
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74
Utilidad gravable	\$850,882.86
Impuesto a la renta causado	\$212,720.72
<b>Utilidad neta</b>	<b>\$200,606.41</b>

Utilizando el balance general del año 2018 se puede realizar un pronóstico del flujo de caja que obtendría la empresa una vez que se implemente los sistemas. El flujo de caja está considerando los diez años de vida útil que tiene el sistema por lo que las tablas se encuentran en el Apéndice D.

### 5.2.3.2. Análisis de inversión del sistema cartesiano (Propuesta 1)

El sistema cartesiano aumenta en un 8% la producción de la línea de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, no obstante, los gastos que conlleva el sistema más la depreciación de los robots aumenta los costos totales, obteniendo así una disminución del -4% en las ganancias en el primer año de la implementación. En el segundo año la implementación logra aumentar las utilidades netas en un +5% (Tabla 36).

**Tabla 36. Flujo de caja de dos años del sistema cartesiano.**

	Años		
	0	1	2
Ingresos totales	\$15,577,704.60	\$16,823,920.97	\$18,169,834.65
Costos y Gastos totales	\$15,091,437.40	\$16,298,752.39	\$17,602,652.58
Gastos del sistema	\$0.00	\$33,121.50	\$33,121.50
Depreciación	\$0.00	\$3,432.73	\$3,432.73
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20	\$488,614.34	\$530,627.83
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08	\$73,292.15	\$79,594.17
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74	\$472,560.20	\$510,365.02
Utilidad gravable	\$850,882.86	\$887,882.39	\$961,398.67
Impuesto a la renta causado	\$212,720.72	\$221,970.60	\$240,349.67
<b>Utilidad neta</b>	<b>\$200,606.41</b>	<b>\$193,351.59</b>	<b>\$210,683.99</b>

### 5.2.3.3. Análisis de inversión del sistema rotativo (Propuesta 2)

Este sistema otorga un incremento de producción del 8% aumentando así los ingresos y gastos totales de la empresa, sin embargo, debido a que el sistema tiene un gasto adicional además de la depreciación, se obtiene una disminución del -5% en la utilidad neta en el primer año de funcionamiento, aunque en el segundo año se tiene un incremento del +3% en la ganancia en comparación con el año cero siendo este la producción del sistema actual que maneja la empresa (Tabla 37).

**Tabla 37. Flujo de caja de dos años del sistema rotativo.**

	Años		
	0	1	2
Ingresos totales	\$15,577,704.60	\$16,823,920.97	\$18,169,834.65
Costos y Gastos totales	\$15,091,437.40	\$16,298,752.39	\$17,602,652.58
Gastos del sistema	\$0.00	\$29,353.12	\$29,353.12
Depreciación	\$0.00	\$1,849.87	\$1,849.87
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20	\$493,965.59	\$535,979.07
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08	\$74,094.84	\$80,396.86
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74	\$472,560.20	\$510,365.02
Utilidad gravable	\$850,882.86	\$892,430.95	\$965,947.23
Impuesto a la renta causado	\$212,720.72	\$229,738.37	\$248,117.44
<b>Utilidad neta</b>	<b>\$200,606.41</b>	<b>\$190,132.38</b>	<b>\$207,464.77</b>

### 5.2.3.4. Análisis de inversión del sistema con riel (Propuesta 3)

El sistema con riel proporciona un incremento en los ingresos, costos y gastos totales de la empresa aumentando la producción en un 8%, aunque dicho incremento disminuye la utilidad neta debido a los gastos del sistema y la depreciación. El primer año de implementación dan un -3% menos de utilidad neta, sin embargo, en el segundo año se obtiene un aumento del +5% (Tabla 38).

**Tabla 38. Flujo de caja de dos años del sistema con riel.**

	Años		
	0	1	2
Ingresos totales	\$15,577,704.60	\$16,823,920.97	\$18,169,834.65
Costos y Gastos totales	\$15,091,437.40	\$16,298,752.39	\$17,602,652.58
Gastos del sistema	\$0.00	\$33,316.44	\$33,316.44
Depreciación	\$0.00	\$1,815.42	\$1,815.42
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20	\$490,036.72	\$532,050.20
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08	\$73,505.51	\$79,807.53
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74	\$472,560.20	\$510,365.02
Utilidad gravable	\$850,882.86	\$889,091.41	\$962,607.69
Impuesto a la renta causado	\$212,720.72	\$222,272.85	\$240,651.92
<b>Utilidad neta</b>	<b>\$200,606.41</b>	<b>\$194,258.36</b>	<b>\$211,590.75</b>

### 5.2.3.5. Período de recuperación de inversión

Finalmente se determina la cantidad de tiempo que tarda la empresa Carpintería y Tapicería Internacional en recuperar el costo de la inversión de las propuestas de implementación anteriormente analizadas, para ello se considera la utilidad neta generada en las tablas de flujo de caja que se encuentran en el Apéndice D. Para obtener este periodo de tiempo se utiliza la fórmula que se muestra a continuación, donde; A representa el último año donde el flujo de efectivo acumulativo o también conocido como efectivo neto invertido tiene un valor negativo, B es el valor absoluto del flujo de efectivo acumulativo antes de finalizar el periodo de tiempo, y C es el total del flujo de efectivo una vez que el período termine [53], [54].

$$\text{Período de recuperación} = A + \frac{B}{C}$$

➤ *Período de recuperación de inversión del sistema cartesiano (Propuesta 1)*

Utilizando los datos de la tabla 39 y la fórmula de período de recuperación de inversión se obtiene un tiempo de dos años para el sistema cartesiano.

**Tabla 39. Flujo de efectivo del sistema cartesiano.**

	Años				
	0	1	2	3	4
Utilidad neta	\$200,606.40	\$193,351.59	\$210,683.99	\$229,402.97	\$249,619.48
Flujo de efectivo		\$17,332.39	\$18,718.98	\$20,216.50	
Efectivo neto invertido	-\$36,077.33	-\$18,744.94	-\$25,95	\$20,190.55	

$$\text{Período de recuperación para sistema cartesiano} = 2 + \frac{|-\$25.95|}{\$20,216.50}$$

**Período de recuperación para sistema cartesiano = 2 años**

➤ *Período de recuperación de inversión del sistema rotativo (Propuesta 2)*

Utilizando la tabla 40 y la fórmula de período de recuperación de inversión se obtiene un tiempo de un año con tres meses para el sistema rotativo.

**Tabla 40. Flujo de efectivo del sistema rotativo.**

	Años			
	0	1	2	3
Utilidad neta	\$200,606.41	\$190,132.38	\$207,464.77	\$226,183.75
Flujo de efectivo		\$17,332.39	\$18,718.98	
Efectivo neto invertido	-\$22,039.99	-\$4,707.60	\$14,011.39	

$$\text{Período de recuperación para sistema rotativo} = 1 + \frac{|-\$4,707.60|}{\$18,718.98}$$

**Período de recuperación para sistema rotativo = 1, 2 años**

➤ *Periodo de recuperación de inversión del sistema con riel (Propuesta 3)*

Utilizando la tabla 41 y la fórmula de período de recuperación de inversión se obtiene un tiempo de un año con tres meses para el sistema con riel.

**Tabla 41. Flujo de efectivo del sistema con riel.**

	Años			
	0	1	2	3
Utilidad neta	\$200,606.41	\$194,258.36	\$211,590.75	\$230,309.73
Flujo de efectivo		\$17,332.39	\$18,718.98	
Efectivo neto invertido	-\$21,654.16	-\$4,321.77	\$14,397.22	

$$\text{Período de recuperación para sistema rotativo} = 1 + \frac{|-\$4,321.77|}{\$18,718.98}$$

***Período de recuperación para sistema rotativo = 1,3 años***

### 5.3. PONDERACIÓN

En esta sección se califica los sistemas según su movilidad, soportes, costo, rapidez y modificación de espacios, y se determina que sistema se adapta mejor a los procesos de sellado y lacado. La ponderación se realiza con una calificación del cero al diez, donde diez es el valor más alto y cero es el valor más bajo. Cuando se califica los soportes de los sistemas, el que tiene menos soportes tiene una mayor puntuación; los costos utilizan los datos de las tablas 22 y 31; en la movilidad se califica la destreza de los robots frente a los muebles de distintos tamaños y formas siendo el sistema que mejor proyecta recubrimientos el de mayor calificación; la categoría rapidez utiliza los datos de las tablas 16 y 17 donde el sistema más rápido es el de mayor puntuación; y finalmente en la modificación de estructura, el sistema que no necesita modificación recibe la máxima calificación. La ponderación de los sistemas se muestra en la tabla 42.



**Tabla 42. Ponderación de los sistemas.**

<b>Sistema</b>	Soportes	Costo	Movilidad	Rapidez	Modificación de estructura	<b>Total</b>
<b>Cartesiano</b>	5	5	10	10	10	<b>40</b>
<b>Rotativo</b>	10	10	5	8	5	<b>38</b>
<b>Riel</b>	10	10	5	7	5	<b>37</b>

Por lo tanto, el sistema que mejor se adapta a los procesos actuales de sellado y lacado de la empresa es el sistema con robot de configuración cartesiana de cinco grados de libertad.

## **6. RESULTADOS**

En esta sección se desarrollan los resultados obtenidos del proyecto de investigación dividido en tres secciones; la primera parte detalla los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana tanto las pruebas para verificar la factibilidad de proyectar sello y laca mediante un robot antropomórfico, como las pruebas de destreza que dependen de la geometría del mobiliario. El segundo punto muestra los tiempos obtenidos de las simulaciones de las distintas tecnologías que están disponibles a nivel mundial para la proyección de recubrimientos. La tercera parte expone los resultados del análisis técnico-económico considerando los costos de producción tanto del proceso actual como de las propuestas de implementación, además de un pronóstico de la utilidad neta de la inversión y el período de recuperación.

### **6.1. RESULTADOS DE PRUEBAS DE LABORATORIO**

#### **6.1.1. PRUEBAS DE CALIDAD**

La finalidad de las pruebas de calidad es determinar si el robot KUKA KR 5 es capaz de igualar o mejorar la uniformidad y homogeneidad del operario dentro de los procesos de sellado y lacado.

Aunque se utiliza la misma distancia entre la superficie y la pistola, la misma presión de trabajo y ángulo de proyección (Tabla 6) que se utiliza en la planta, se realizan varias pruebas para determinar el solapado y velocidad de pasada debido a que el tamaño de la boquilla no es igual. Para obtener estos datos se reduce la distancia de solapado como la velocidad hasta lograr la uniformidad y espesor deseado. Después de las pruebas, el solapado resultante es de ocho centímetros ya que este deja una alta calidad sin marcas de escurrimiento. La velocidad de pasada varía dependiendo de la prueba, al proyectar con el tablero en vertical la velocidad es de 0.15 metros sobre segundo, mientras que, en horizontal, en el proceso de sellado tiene una velocidad de 0.25 metros sobre segundo y 0.2 metros sobre segundo para el proceso de lacado (Tabla 43).

**Tabla 43. Resultados de las variables para las pruebas en los tableros enchapados.**

<b>Prueba</b>	<b>Distancia</b>	<b>Presión</b>	<b>Ángulo de proyección</b>	<b>Tamaño de boquilla</b>	<b>Solapado</b>	<b>Velocidad de pasada</b>
Sello en posición vertical	20 cm	40 psi	90°	1.3	8 cm	0.15 m/s
Sello en posición horizontal	20 cm	40 psi	60°	1.3	8 cm	0.25 m/s
Laca en posición vertical	20 cm	40 psi	90°	1.3	8 cm	0.15 m/s
Laca en posición horizontal	20 cm	40 psi	60°	1.3	8 cm	0.2 m/s

Con estos datos se proyecta los recubrimientos en un mueble característico de la empresa para determinar si es factible implementar un robot dentro de los procesos de sellado y lacado. El mueble elegido es un velador del modelo Basilea ya que este es el de mayor producción dentro de su categoría, además de que es suficientemente pequeño para el espacio disponible que tiene el laboratorio de robótica. Sin embargo, se proyecta cada cara en programas separados debido a que el alcance del robot no es suficiente, también se espera el tiempo de secado requerido para que el recubrimiento no afecte las otras superficies.

Las áreas internas del mueble no se proyectan ya que el aditamento construido es demasiado grande en comparación con las pistolas pulverizadoras que se utilizan dentro de la empresa. El resultado obtenido es un velador con un acabado de alta calidad donde tiene buena uniformidad y homogeneidad, además de no presentar marcas de escurrimientos en los laterales ni en la parte posterior.

### **6.1.2. PRUEBAS DE DESTREZA**

En las pruebas de destreza se verifica la capacidad que tiene el robot KUKA KR 5 para proyectar recubrimientos frente a la geometría de un mueble. A diferencia de las pruebas anteriores, estas se programan para que el robot aplique el recubrimiento en todas las superficies sin interrupciones. Debido a que el alcance del robot es limitado, se construye un velador a escala, 25% más pequeño que el velador Basilea. Al realizar el proceso de sellado en el mueble se obtiene un tiempo de 50 segundos y 38 segundos para el proceso de lacado.

## **6.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIÓN DE LOS SISTEMAS**

Utilizando el software Coppelia SIM EDU, se simula tres sistemas capaces de proyectar sello o laca en los distintos muebles que posee la línea de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional, los cuales son; sistema con robot cartesiano de cinco grados de libertad, sistema con mesa giratoria controlado por robot antropomórfico de seis grados de libertad y sistema con robot antropomórfico de seis grados de libertad desplazado mediante un riel. Se imita el mismo proceso que realiza el operario con el fin de poder comparar la rapidez de dichos sistemas, además de su movilidad frente a los muebles.

Las simulaciones se realizan con tres muebles que son los de mayor producción de cada categoría, los cuales son; velador Basilea, cómoda Vari y cama Match de 2 ½ plazas. Las propuestas de implementación están diseñadas para los muebles de mayor producción brindando así la máxima capacidad posible para la línea de dormitorios, permitiendo que los sistemas estén capacitados para cubrir todos los muebles de las categorías analizadas.

Aunque se mantiene el número de pasadas y el orden de proyección de cada mueble que realiza el operario, la velocidad de pasada se decrementa debido a que el robot no logra proyectar correctamente sobre la superficie dejando áreas sin recubrimiento. La velocidad estándar en las simulaciones en contra vetado es de 1.25 metros sobre segundo y 1 metro sobre segundo a favor de las vetas; y se disminuye hasta una velocidad de 0.9 metros sobre segundo dependiendo del área que se está proyectando y del movimiento del robot.

El sistema con robot de configuración cartesiana de cinco grados de libertad es el más rápido con un tiempo total de 291 segundos en el proceso de sellado y 223 segundos en el proceso de lacado, mejorando la velocidad con respecto al operario con 33 segundos en el proceso de sellado y 35 segundos en el proceso de lacado (Tabla 44).

**Tabla 44. Tiempos resultantes de las simulaciones.**

<b>Proceso</b>	<b>Sistema</b>	<b>Velador Basilea</b>	<b>Cómoda Vari</b>	<b>Cama Match 2 ½ plazas</b>	<b>Total</b>
<b>Sello</b>	Proceso actual	63 s	109 s	152 s	324 s
	Cartesiano	64 s	96 s	131 s	291 s
<b>Laca</b>	Operario	67 s	93 s	98 s	258 s
	Cartesiano	42 s	68 s	113 s	223 s

### **6.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO**

El análisis técnico-económico tiene la finalidad de identificar la inversión de las distintas propuestas de implementación mediante el costo de producción de cada uno de estos además de la planta actual, de esta manera se puede conseguir un pronóstico de cómo se comportaría la inversión frente al balance general del año 2018 e incluir el tiempo de recuperación de la inversión. La empresa actualmente utiliza \$65,054.13 anualmente para un proceso, ya sea de sellado o de lacado, donde se incluye los materiales utilizados, el consumo energético, el consumo de agua, la mano de obra, el reproceso y el mantenimiento de la línea de dormitorios. El sistema cartesiano usa \$80,454.83, el sistema rotativo gasta \$76,686.45 y el sistema con riel utiliza \$80,649.78 (Tabla 45).

**Tabla 45. Costos de producción de cada sistema.**

	Planta actual	Sistema cartesiano	Sistema rotativo	Sistema con riel
<b>Total</b>	\$65,054.13	\$80,454.83	\$76,686.45	\$80,649.78

La inversión inicial de los sistemas utiliza precios referenciales de los robots debido a la emergencia sanitaria que impactó a nivel mundial ya que dichas compañías no pueden entregar un presupuesto de estos. Los sistemas aumentan la producción en un 8%, sin embargo, debido a la depreciación anual obtenida por la inversión inicial y los gastos del sistema, el primer año de la implementación presenta una disminución en la utilidad neta, aunque a partir del segundo año la ganancia de la empresa aumenta. El sistema cartesiano presenta una disminución del -4% que luego aumenta a un +5% en el segundo año comparando con el balance general de la empresa, el sistema rotativo tiene una reducción de la utilidad en un -5%, sin embargo, este incrementa un +3% a partir del segundo año y finalmente el sistema con riel disminuye su utilidad neta en un -3% que luego aumenta en un +5% comparando con el año cero (Tabla 46).

**Tabla 46. Utilidad neta por año de cada sistema.**

	Utilidad neta por año		
	0	1	2
<b>Cartesiano</b>	\$200,606.41	\$191,209.59	\$208,541.99
<b>Rotativo</b>	\$200,606.41	\$187,276.38	\$204,608.77
<b>Riel</b>	\$200,606.41	\$192,16.36	\$209,448.75

Con los datos obtenidos se puede calcular el período de tiempo de recuperación de la inversión utilizando la utilidad neta y el costo de producción de cada sistema. El sistema rotativo y el sistema con riel tienen un tiempo de un año con tres meses de recuperación de inversión y el sistema cartesiano necesita dos años. Finalmente se realiza una ponderación entre los sistemas anteriormente descritos, con el fin de determinar el que mejor se adapte a la empresa. El sistema con robot de configuración cartesiana de cinco grados de libertad es el de mayor calificación con 40 puntos, debido a su rapidez en las simulaciones, a su gran volumen de trabajo frente a los distintos muebles y al no tener que realizar modificaciones estructurales en las cabinas.

## 7. CONCLUSIONES

Muchas empresas nacionales ven la necesidad de automatizar sus procesos para obtener varias ventajas frente a la competencia como mejor la calidad de sus productos, reducción de tiempos y disminución de materia prima utilizada, sin embargo, es necesario realizar estudios y análisis en los procesos que intervienen para determinar la factibilidad de la implementación, además de un diseño y simulación de este.

Es indispensable realizar un estudio del estado del arte de las tecnologías a nivel mundial ya que como se puede evidenciar en el presente estudio, a partir de esto se proponen tres alternativas de automatización para los procesos de sellado y lacado que son capaces de satisfacer las necesidades de la empresa en cuanto al acabado de los muebles.

La identificación de variables en la planta como: presión, distancia y ángulos de proyección de las pistolas pulverizadoras, permiten identificar diferentes sistemas que cumplan con estos requerimientos, esto garantiza que se puedan identificar tecnologías apropiadas para la empresa en donde se requiere realizar la implementación.

El diseño y la simulación de un sistema automatizado para los procesos de sellado y lacado permite identificar la factibilidad técnica de la implementación de diferentes sistemas que pueden ser considerados como alternativas para dichos procesos en la fabricación de muebles a nivel industrial, garantizando el cumplimiento de todas las variables requeridas, identificadas de acuerdo con la necesidad de la empresa.

El análisis de laboratorio garantiza que los robots son capaces de realizar las maniobras requeridas en los procesos de sellado y lacado frente a la geometría del mueble, para garantizar uniformidad y excelentes acabados capaces de igualar o mejorar las condiciones obtenidas con los operarios.

El análisis técnico económico permite identificar la factibilidad económica de la implementación de cada sistema, considerando la utilidad neta que generaría cada uno de ellos, y estos datos analizados conjuntamente en una tabla de ponderación con las variables propias del proceso como rapidez, movilidad y modificación en la infraestructura que aportan de manera significativa para la toma de decisión sobre el sistema que ofrece mejores prestaciones para su implementación; en este caso en particular se optó por el sistema con robot de configuración cartesiana de cinco grados de libertad, debido a su rapidez en las simulaciones, a su gran volumen de trabajo frente a los distintos muebles y al no tener que realizar modificaciones estructurales en la infraestructura de las cabinas.

## **8. RECOMENDACIONES**

A lo largo del desarrollo de este proyecto de investigación hubo ciertos aspectos que se recomiendan mejorar, como la utilización del robot KUKA KR 16 que tiene la Universidad Politécnica Salesiana, ya que el mismo tiene un mayor alcance y se puede realizar más pruebas con otros tipos de muebles para dormitorios. También se recomienda utilizar una pistola pulverizadora de menor tamaño ya que se puede proyectar con mayor destreza como las partes internas de los mobiliarios. Otra recomendación es la utilización de tableros enchapados con otro tipo de chapa, como pino o roble, ya que las variables analizadas pueden verse afectadas por el tipo de madera. En cuanto a las simulaciones realizadas se recomienda reducir el tiempo del proceso mediante la modificación del orden de proyección de las superficies del mobiliario, ya que estas siguen la secuencia que realiza el operario en la planta actual. Un posible trabajo a futuro puede ser la automatización del proceso de lijado para conseguir un sistema automático completo de la línea de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional. Otra posibilidad es realizar este proyecto en otros tipos de mobiliario como sillas o mesas para comedores.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Iglesias, “Proceso de Lacado,” 2019.
- [2] J. Iglesias, “Estudio para el mejoramiento de los procesos de fabricación de muebles en la empresa Colineal,” Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca-Ecuador, 2014.
- [3] Walther Pilot, “Spray Guns Automatic spraying equipment.” Wuppertal, Alemania, 2014.
- [4] AIDIMA, *Guía De Mejores Técnicas Disponibles Para El Sector De Fabricación De Baldosas Cerámicas En La Comunitat Valenciana*, Primera ed. Valencia, España: Centro de Tecnologías Limpias. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, 2009.
- [5] TIKKURILA, *Industrial Wood Finishing*, Primera ed., no. 1996. Vantaa, Finlandia: Tikkurila Oy, Industry, 2010.
- [6] F. Bob, *Understanding Wood Finishing - How to Select and Apply the Right Finish*, vol. 118, no. 19. East Petersburg PA, USA: Fox Chapel Pub, 2010.
- [7] INFOR Instituto Forestal, “Manual práctico de pinturas y barnices,” *Manual N°23*. Santiago, Chile.
- [8] H. Moura, “Planos de las cabinas para la línea de producción de dormitorios de la empresa Carpintería y Tapicería Internacional.” Brasil, 2015.
- [9] E. Vásquez, *Manual Acabado de la Madera II*. Ecuador: CORMADERA, 1997.
- [10] W. Nutsch, *Tecnología de la madera y del mueble*. Barcelona, España: Reverté, S.A., 2005.
- [11] Codinter Editorial Team, “Spray guns : All about its use , parts and types.” Bogotá, Colombia, 2018.
- [12] J. Jewitt, *Great wood finishes : a step-by-step guide to beautiful results*. Newtown CT, USA: Taunton Press, 2000.
- [13] ITW Industrial Finishing, “El ABC del instructor.” Glendale Heights, IL, USA, 2006.
- [14] C. Bacuilima, “Instructivo para Tinturado, Sellado y Lacado Dormitorios.” Carpintería y Tapicería Internacional, Cuenca, Ecuador, 2017.
- [15] A. Guindeo, “Los barnices en la Industria del Mueble,” 1985.
- [16] PCE Ibérica S.L., “Copas de viscosidad.” Albacete, España, 2013.



- [17] G. Colineal, “Productos Colineal.” [Online]. Available: <https://colineal.com/products>. [Accessed: 25-Jan-2020].
- [18] GRACO Inc., “Finishing Automation Automated Paint Systems for Improving Performance and Quality.” Minneapolis MN, USA, 2017.
- [19] Cantek America Inc., “CD-305 Linear Spray Machine,” 2009. [Online]. Available: <http://cankamerica.com/product/cd-305-linear-spray-machine/>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [20] HOMAG Group AG, “SPRAYTEQ S-100 and industrial solutions.” Schopfloch, Alemania, 2019.
- [21] Krautzberger, “Operating instructions Automatic spray gun M-10.” Eltville am Rhein, Alemania, 2017.
- [22] CSI Coating Systems International, “Spray Nozzle; How It Works - YouTube,” 2012. [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=hF7J1DYc\\_Gc](https://www.youtube.com/watch?v=hF7J1DYc_Gc). [Accessed: 02-Sep-2019].
- [23] Aurel Automation S.p.A., “Microspray Coating System,” vol. 8, no. 5. Modigliana FC, Italia, 2019.
- [24] Stanza Machinery, “RC Roll Coater,” 2017. [Online]. Available: <https://stanzamachinery.com/products/rc-roll-coater>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [25] L. McKeen, *Fluorinated Coatings and Finishes Handbook*, Segunda ed. 2016.
- [26] International Organization for Standardization, “Robots and robotic devices — Vocabulary ISO 8373:2012(en).” 2012.
- [27] A. Ramos Hurtado, “Diseño, programación y simulación de estaciones robotizadas industriales con Robotstudio,” Universidad de Sevilla, 2016.
- [28] A. Barrientos, *Fundamentos de Robótica*, 2nd ed. 2007.
- [29] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics Modelling, Planning and Control*. London, Inglaterra: Springer, 2009.
- [30] SCHUBERTS, “WINSIX Robot Series.” [Online]. Available: <http://www.schuberts.co.uk/coating/estipolio-robotic-spray-systems/>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [31] CMA Robotics, “Assembled furniture.” Udine, Italia, 2019.
- [32] Przemystu, “Industry 4.0.” [Online]. Available: <http://przemysl-40.pl/>. [Accessed: 28-Jan-2020].
- [33] KUKA, *Programación de robots I*, vol. 1. Augsburg, Alemania, 2013.
- [34] C. Bacuilima, “Proceso de Lacado,” 2019.

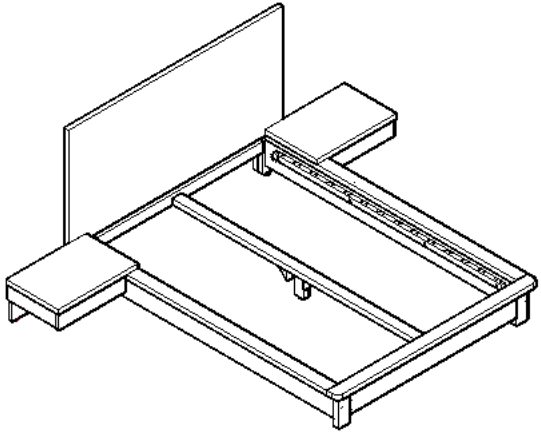
- [35] GÜDEL, “TYPE FP.” Langenthal, Suiza.
- [36] KUKA, “ROBOT KR30, 60-3; KR30 L16-2.” Augsburg, Alemania.
- [37] KUKA, “Industrial robotics Linear units and positioners.” Augsburg, Alemania, 2017.
- [38] ETAPA EP, “Servicios de Agua Potable de Cuenca - Ecuador,” 2019. [Online]. Available: <https://www.etapa.net.ec/Principal/Agua-potable/Operación-y-Mantenimiento/Tarifas>. [Accessed: 09-Apr-2020].
- [39] Agencia de Regulación y Control de Electricidad, *Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución*, vol. 18. Quito, Ecuador, 2019.
- [40] ABB DW Robotics, “Contratos de Mantenimiento 2015.” Asea Brown Boveri, S.A., Barcelona, España, 2014.
- [41] Dongguan Switek Technology Automation Co. Ltd., “Cartesian Robot SW7730D.” [Online]. Available: [https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Sale-New-Cartesian-Robot-Looking\\_60101379378.html?spm=a2700.7724857.normalList.133.5e4e4e9flnmtdo](https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-Sale-New-Cartesian-Robot-Looking_60101379378.html?spm=a2700.7724857.normalList.133.5e4e4e9flnmtdo). [Accessed: 22-Apr-2020].
- [42] Amikon GmbH, “Robot controller Stäubli CS7MB RX60.” [Online]. Available: <https://www.machineseekeer.com/stäubli-rx+60/i-3870503>. [Accessed: 22-Apr-2020].
- [43] Allen-Bradley, “AC Servo Motor 1326AB-B430E-M 2 K4LS.” [Online]. Available: [https://www.amazon.com/-/es/Allen-Bradley-Servo-Motor-1326AB-B430E-M/dp/B07X1TD77M/ref=olp\\_product\\_details?ie=UTF8&me=](https://www.amazon.com/-/es/Allen-Bradley-Servo-Motor-1326AB-B430E-M/dp/B07X1TD77M/ref=olp_product_details?ie=UTF8&me=). [Accessed: 22-Apr-2020].
- [44] Exapro, “KUKA KR30L16 Industrial Robot.” [Online]. Available: [https://www.exapro.com/question-to-the-seller/kuka-kr30l16-p60812054/?utm\\_source=TradeMachines&utm\\_campaign=Robot\\_industrial\\_Kuka\\_KR30L16&utm\\_medium=cpc](https://www.exapro.com/question-to-the-seller/kuka-kr30l16-p60812054/?utm_source=TradeMachines&utm_campaign=Robot_industrial_Kuka_KR30L16&utm_medium=cpc). [Accessed: 22-Apr-2020].
- [45] Mercado Libre, “Fanuc R-2000iB.” [Online]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-707833054-fanuc-r-2000ib-riel-lineal-de-7-ejes-con-robot-de-7-metros-\\_JM#position=1&type=item&tracking\\_id=4b783c31-a3b3-4d64-9cca-4f8245cbe2fb](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-707833054-fanuc-r-2000ib-riel-lineal-de-7-ejes-con-robot-de-7-metros-_JM#position=1&type=item&tracking_id=4b783c31-a3b3-4d64-9cca-4f8245cbe2fb). [Accessed: 20-Apr-2020].

- [46] ELWOOD High Performance Motors, “1326AB-B4xxx Motor Data.” Racine, Wisconsin, p. 1.
- [47] Dongguan Switek Technology Automation Co. Ltd., “SW77 CNC Servo Robot.” China, p. 7.
- [48] Eurobot, “Staubli RX60 control CS7M.” [Online]. Available: <https://www.eurobots.net/other-robots-robots-staubli-rx60l-control-cs7m-p107-en.html>. [Accessed: 22-Apr-2020].
- [49] J. M. De Garcia, R. Rodríguez, and E. Quintanar, “Triptico Robotica Industrial,” *Calameo*. [Online]. Available: <https://es.calameo.com/read/00234048017819bdbb4ef>. [Accessed: 09-May-2020].
- [50] Debitoor, “Activos, amortización y depreciación.” [Online]. Available: <https://debitoor.es/guia-pequenas-empresas/contabilidad/activos-amortizacion-y-depreciacion>. [Accessed: 09-May-2020].
- [51] Servicio de Impuestos Internos, “Tabla de vida útil de los bienes físicos del activo inmovilizado,” 2003. [Online]. Available: [http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla\\_vida\\_enero.htm](http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm). [Accessed: 09-May-2020].
- [52] Carpintería y Tapicería Internacional CTIN. CIA. LTDA., “Declaración del impuesto a la renta y presentación de balances.” Cuenca, Ecuador, 2019.
- [53] J. Irfanullah, “Payback Period,” *Xplained*, 2019. [Online]. Available: <https://xplained.com/849768/payback-period>. [Accessed: 09-May-2020].
- [54] S. Bragg, “Payback method | Payback period formula,” *Accounting tools*, 2018. [Online]. Available: [https://www.accountingtools.com/articles/2017/5/17/payback-method-payback-period-formula?rq=payback method](https://www.accountingtools.com/articles/2017/5/17/payback-method-payback-period-formula?rq=payback%20method). [Accessed: 09-May-2020].
- [55] M. Freese, “Robot simulator CoppeliaSim,” *Coppelia Robotics GmbH*, 2010. [Online]. Available: <https://www.coppeliarobotics.com/>. [Accessed: 18-Mar-2020].

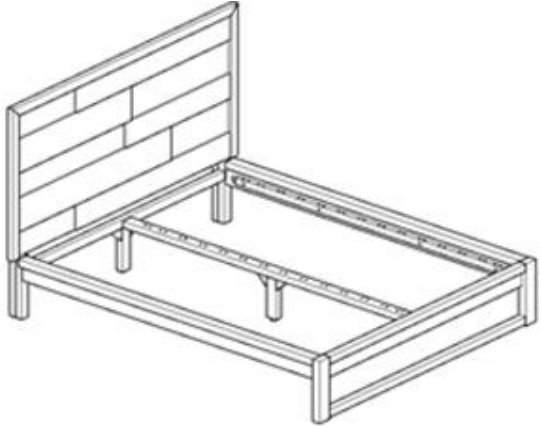
## 10. ANEXOS

### ANEXO 1: FICHAS TÉCNICAS DE LOS MOBILIARIOS MÁS REPRESENTATIVOS

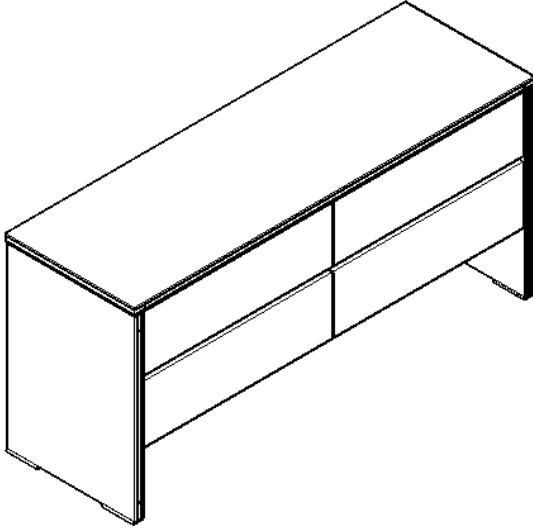
Tabla 1. Cama Vari II 2 plazas [Cortesía de la empresa].

		
<b>Madera:</b>		Lenga
<b>Chapa de madera:</b>		Cerezo
<b>Dimensiones</b>		
<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
1630 mm	1027 mm	2070 mm
<b>Color/Tinte:</b>	Sanchez Brown Cocoa Wengue	
<b>Tipo de acabado:</b>	Poro cerrado	
<b>Sellador:</b>	Sello poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 2.5 mil
		<b>Viscosidad:</b> 18s (Copa Ford N°4)
<b>Laca:</b>	Laca poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 1 mil
		<b>Viscosidad:</b> 14s (Copa Ford N°4)

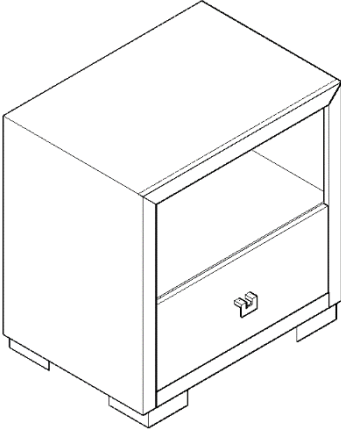
**Tabla 2. Cama Match 2 ½ plazas [Cortesía de la empresa].**

		
<b>Madera:</b>		Pino radiata
<b>Chapa de Madera:</b>		Roble marfil
<b>Dimensiones</b>		
<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
2150 mm	1821 mm	1230 mm
<b>Color/Tinte:</b>	Amaretto	
<b>Tipo de acabado:</b>	Poro abierto	
<b>Sellador:</b>	Sello poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 2.5 mil
		<b>Viscosidad:</b> 18s (Copa Ford 4)
<b>Laca:</b>	Laca poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 1 mil
		<b>Viscosidad:</b> 14s (Copa Ford 4)

**Tabla 3. Cómoda Vari [Cortesía de la empresa].**

		
<b>Madera:</b>		Lenga
<b>Chapa de Madera:</b>		Cerezo
<b>Dimensiones</b>		
<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
1562 mm	738 mm	502 mm
<b>Color/Tinte:</b>	Sanchez Brown Cocoa	
<b>Tipo de acabado:</b>	Poro cerrado	
<b>Sellador:</b>	Sello poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 2.5 mil
		<b>Viscosidad:</b> 18s (Copa Ford 4)
<b>Laca:</b>	Laca poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 1 mil
		<b>Viscosidad:</b> 14s (Copa Ford 4)

**Tabla 4. Velador Basilea [Cortesía de la empresa].**

		
<b>Madera:</b>		Lenga
<b>Chapa de Madera:</b>		Cerezo
<b>Dimensiones</b>		
<b>Largo</b>	<b>Ancho</b>	<b>Alto</b>
587 mm	413 mm	600 mm
<b>Color/Tinte:</b>	Sanchez Brown Wengue	
<b>Tipo de acabado:</b>	Poro cerrado	
<b>Sellador:</b>	Sello poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 2.5 mil
		<b>Viscosidad:</b> 18s (Copa Ford 4)
<b>Laca:</b>	Laca poliuretano	<b>Espesor de capa:</b> 1 mil
		<b>Viscosidad:</b> 14s (Copa Ford 4)

## ANEXO 2: FICHAS TÉCNICAS DE LOS ROBOTS SIMULADOS

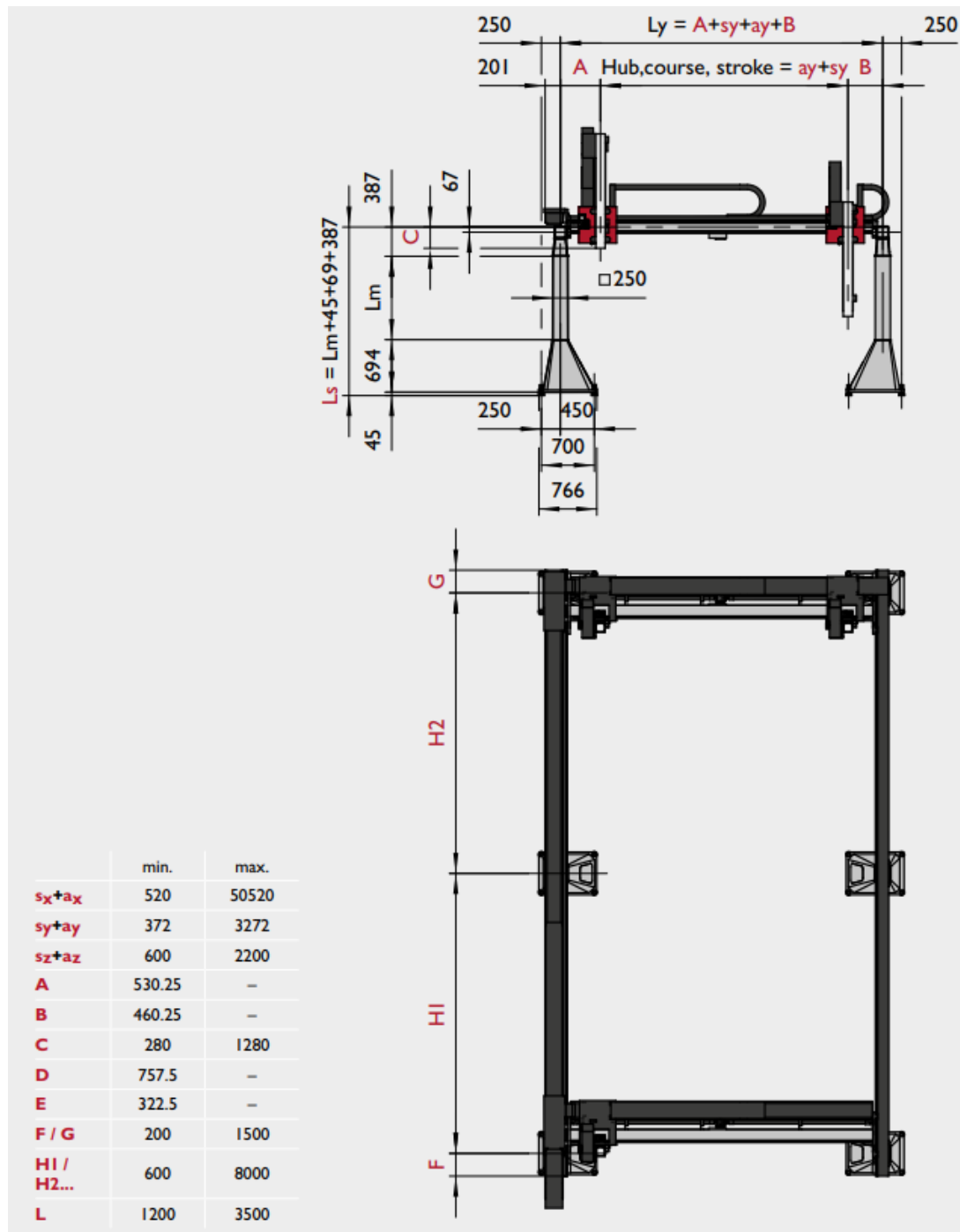


Figura 1. Perspectiva superior del robot GÜDEL FP-3 [35].



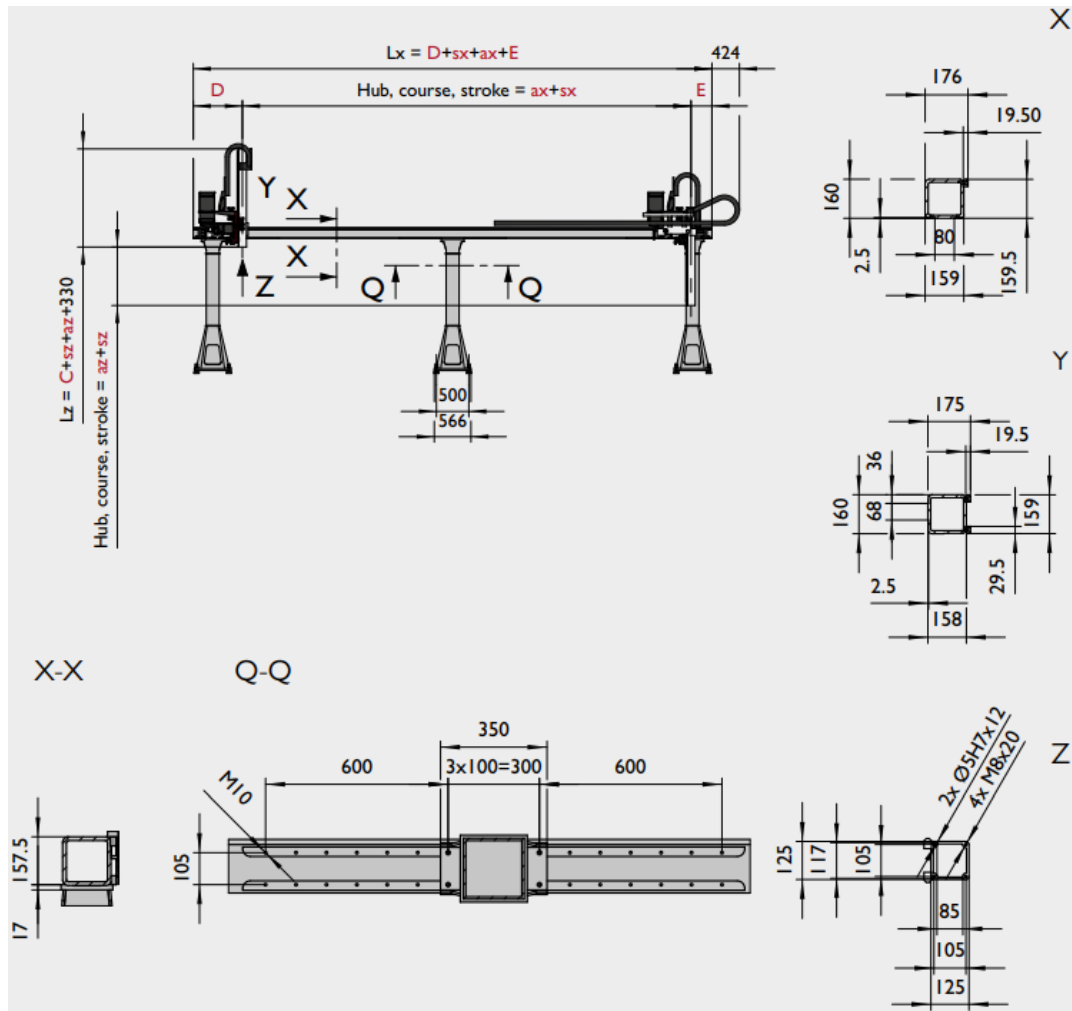
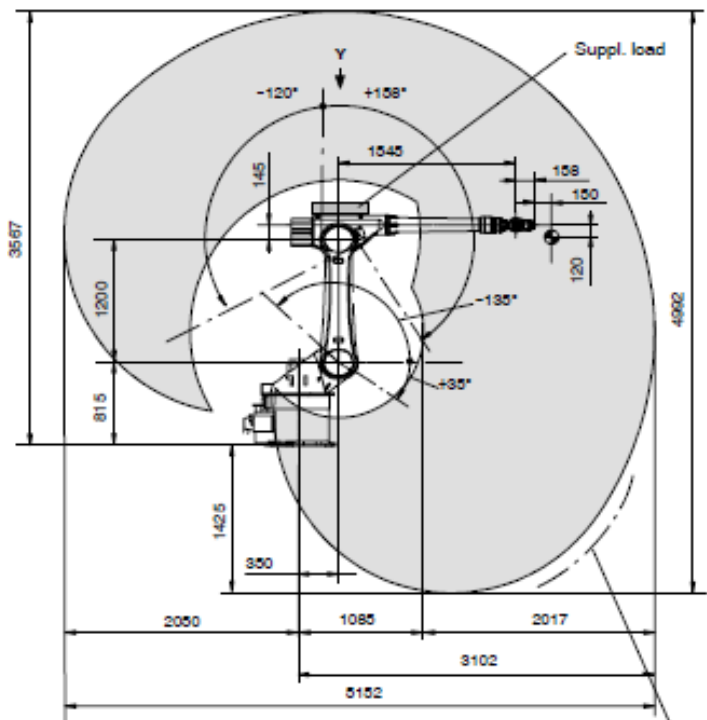


Figura 2. Perspectiva lateral del robot GÜDEL FP-3 [35].



Dimensions: mm

CAUTION: The interference radius (safe area) lies approx. 163 mm beyond the reference point for the working envelope.

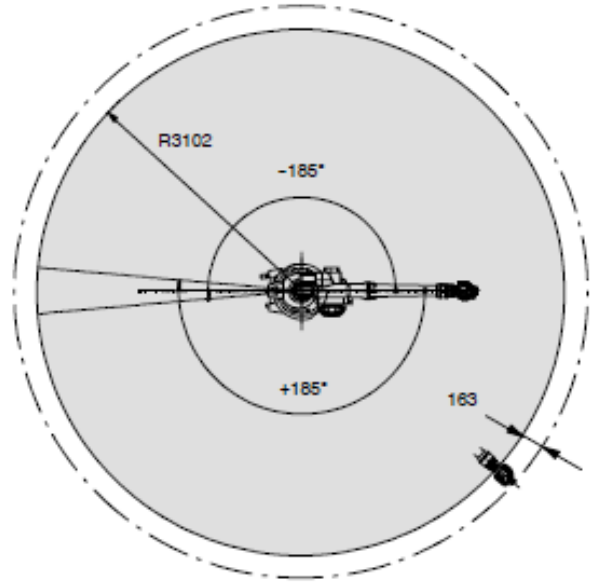
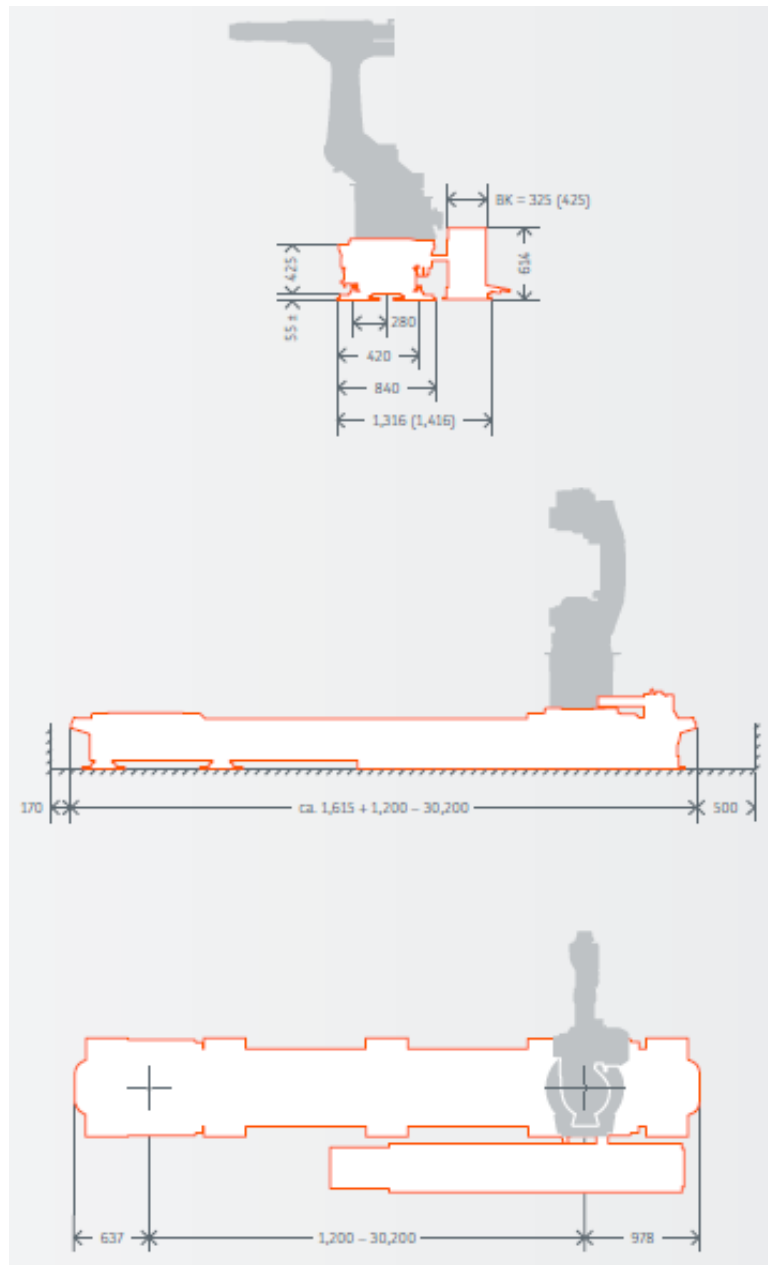
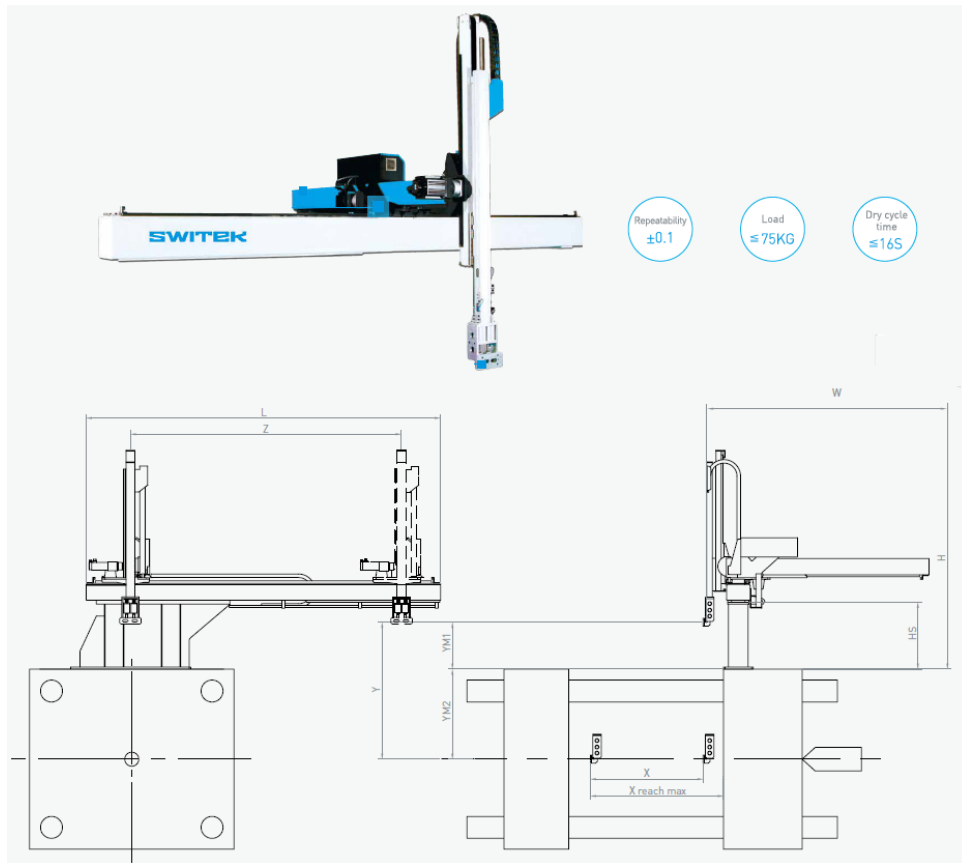


Figura 3. Volumen de trabajo del robot KUKA KR 30 L16-2 [36].



**Figura 4.** *Volumen de trabajo del robot KUKA KL 1000-2 [37].*

### ANEXO 3: FICHAS TÉCNICAS DE LOS ROBOTS EVALUADOS



Model	X	X reach	Y	YM1	YM2	Z	L	W	H	HS	payload/kgs	Lmm
SW7722D <sub>S</sub>	1720	2250	2200	680	1520	4000	5050	3000	2980	850	50	800-2800T
SW7725D <sub>S</sub>	1720	2250	2500	730	1770	4000	5050	3000	3210	900	50	1000-3000T
SW7730D <sub>S</sub>	1720	2250	3000	780	2220	4000	5050	3000	3240	950	75	1400-4000T

**Remarks** S<sub>1</sub> Single arm D<sub>1</sub> Double-cut B<sub>1</sub> Reverse E<sub>1</sub> European standard

**Figura 1.** Dimensiones de la serie de robots SW77 de la empresa Switek [47].

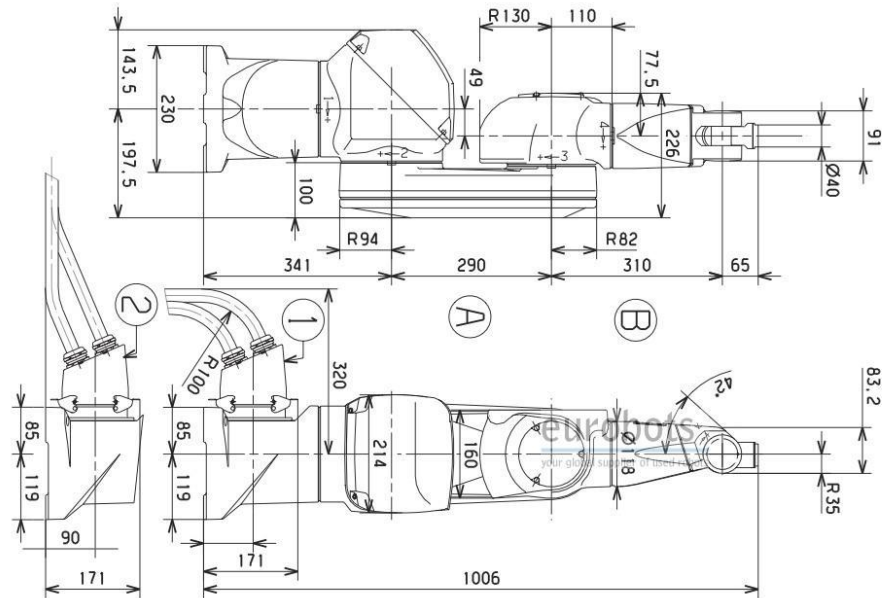


Figura 2. Dimensiones del robot Stäubli CS7MB RX60 [48].

	STANDARD ARM	LONG ARM
<b>Work envelope</b>		
R.M max. reach between joints 2 and 5	600 mm	800 mm
R.m min. reach between joints 2 and 5	233 mm	309 mm
R.b reach between joints 3 and 5	310 mm	400 mm
<b>Maximum speed</b> at load center of gravity	8 m/s	12.5 m/s
<b>Repeatability</b> at constant temperature	± 0.02 mm	± 0.033 mm

#### 1.4.1. TORQUE LIMITS

	REFERENCE JOINT		
	JOINT 5 (Z <sub>6</sub> )		JOINT 6 (Z <sub>7</sub> )
Static torque (Nm)	7.2 <sup>(1)</sup>	3.7 <sup>(2)</sup>	3.5
Peak torque (Nm)	36 <sup>(1)</sup>	21.5 <sup>(2)</sup>	14.5

(1) if joint 6 torque = 0  
(2) for maximum torque on joint 6

#### 1.4.2. AMPLITUDE, SPEED AND RESOLUTION

Joint	1	2	3	4 <sup>(1)</sup>	5	6 <sup>(2)</sup>
Amplitude (°)	320	255	269	540	230	540
Working range distribution (°)	A ± 160	B ± 127.5	C ± 134.5	D ± 270	E +120.5 -109.5	F ± 270
Nominal speed (°/s)	287	287	319	410	320	700
Angular resolution (°·10 <sup>-3</sup> )	0.724	0.724	0.806	1.177	1.953	2.747

(1) For 5-joint arms, joint 4 is fixed. Joint 5 corresponds to joint 4 and joint 6 to joint 5 of the software.  
(2) Multiturn version available as an option.

Figura 3. Datos técnicos del robot Stäubli CS7MB RX60 [48].



Figura 4. Servo motor AC 1326AB [46].

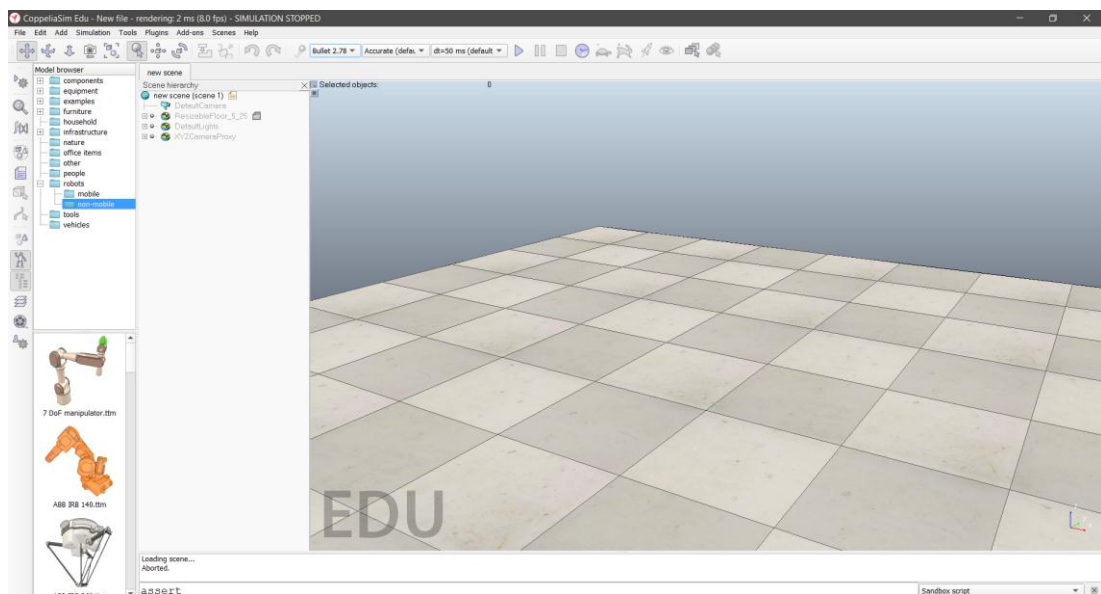
MOTOR MODEL	1326AB-B410G	1326AB-B410J	1326AB-B420E	1326AB-B420H	1326AB-B430E	1326AB-B430G	
<b>MECHANICAL DATA (1)</b>							
Rated Torque, Cont (Stall)	Nm	2.7	2.7	5.0	5.1	6.6	6.4
	lb-in	24	24	44	45	58	57
Peak Torque (Stall)	Nm	8.1	8.1	14.9	14	19.7	17.2
	lb-in	72	72	132	124	174	152
Rated Current	A <sub>0-PK</sub>	3.5	4.9	4.0	7.7	5.5	7.9
	kW	1.0	1.4	1.1	2.2	1.5	2.3
Rated Power	hp	1.3	1.9	1.5	3.0	2.0	3.1
	V <sub>rms</sub>	460	460	460	460	460	460
Rotor Moment of Inertia	kg-m <sup>2</sup>	0.000433	0.000433	0.0008	0.0008	0.0010	0.0010
	lb-in-s <sup>2</sup>	0.00383	0.00383	0.0071	0.0071	0.0089	0.0089
Rotor Moment of Inertia Brake Motors	kg-m <sup>2</sup>	0.00054	0.00054	0.00091	0.00091	0.00111	0.00111
	lb-in-s <sup>2</sup>	0.00481	0.00481	0.0081	0.0081	0.0098	0.0098
Motor Shipping Weight	kg	10.0	10.0	12.7	12.7	16.8	16.8
	lb	22.0	22.0	27.9	27.9	37.0	37.0
Motor Shipping Weight Brake Motors	kg	11.4	11.4	14.1	14.1	18.2	18.2
	lb	25.0	25.0	30.9	30.9	40.0	40.0
Max. Operating Speed	rpm	5000	7250	3000	6000	3000	5000
	<b>WINDING DATA (1)</b>						
Poles		4	4	4	4	4	4
K <sub>t</sub> , Sine Wave Torque Constant (2)	Nm/A <sub>0-PK</sub>	0.94	0.62	1.43	0.71	1.41	0.95
	lb-in/A <sub>0-PK</sub>	8.3	5.5	12.7	6.3	12.5	8.4
K <sub>e</sub> , Voltage Constant (4)	V <sub>0-PK</sub> /kRPM	113.8	74.7	172.8	85.6	171.1	115.3
	Ohms ±15%	12.6	5.8	12.6	3.1	7.1	3.4
Winding Resistance Phase to Phase at 25±5°C	mH	73.0	28.6	69.8	17.2	40.2	18.2
	°C/W	1.4	1.4	2.0	2.0	2.3	2.3
Thermal Constant (Cth)	W-s/°C	1000	1000	1000	1000	1000	1000
Dielectric Rating	Power Leads (R, S, T) to Ground: 1500 VAC 50/60 Hz for 1 minute.						
	(1) Specifications are at 25°C unless noted.		(3) Peak value of per phase square wave Amperes		(4) Volts 0-peak Line-Line / kRPM		
(2) Peak value of per phase sine wave Amperes							
<b>STORAGE AND OPERATING CONDITIONS</b>							
Ambient Temperature	Operating: 0° to 40°C (32° to 104°F) Storage: -30° to 70°C (-25° to 158°F)						
Relative Humidity	5% to 95% non-condensing						
<b>THERMOSTAT RATINGS</b>							
Rated Voltage	0-250 Volts DC or 50/60 Hz AC*						
Rated Current	2.5 Amps @ Power Factor of 1.0						
	1.6 Amps @ Power Factor of 0.6						
Maximum Switching Current	5 Amps						
Contact Resistance	<0.10 Ohms maximum						
Contacts	Normally closed						
Insulation Dielectric	Mylar Nomex capable of withstanding 1500 VAC RMS 50/60 Hz for 1 minute						
Opening Temperature (+/- 5°C)	140°C						
*The thermostat is normally used as a switch for a 15VDC logic signal.							

Figura 5. Datos técnicos de la serie de motores 1326AB-B4xxx [46].

# 11. APÉNDICES

## APÉNDICE A: PROCEDIMIENTO DE PROGRAMACIÓN DE SIMULACIONES

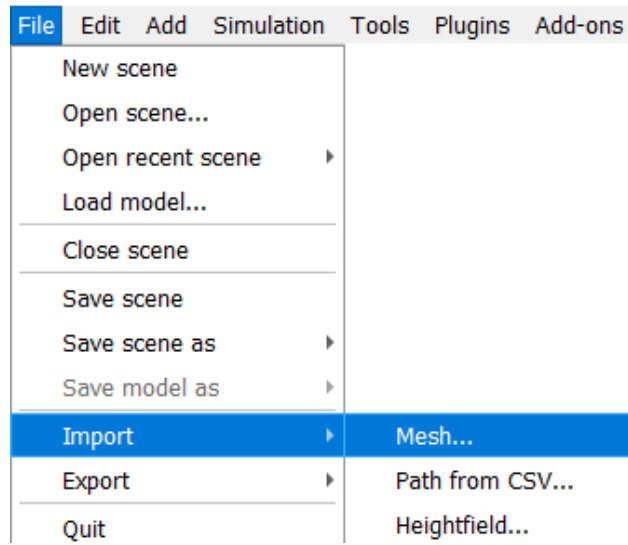
Para la simulación de los sistemas robóticos se emplea un software de ingeniería de código abierto, denominado Coppelia SIM EDU (Figura 1), que permite simular varios tipos de robots en diversos ambientes industriales, acoplando variedad de sensores especialmente de proximidad y visión artificial, posee una biblioteca propia de robots para agregar a la escena de simulación o la opción de ensamblar y renderizar los robots que se pretendan simular [55].



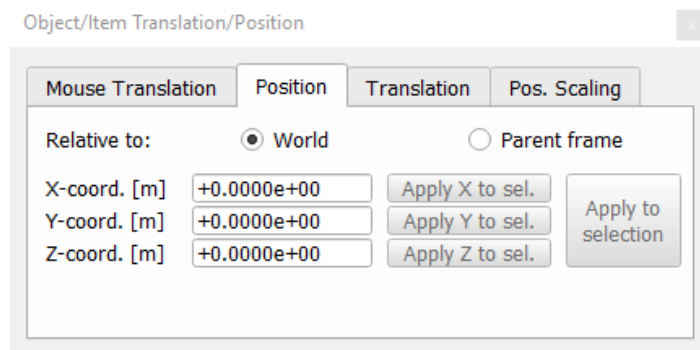
**Figura 1, Interfaz de Coppelia SIM EDU.**

### ➤ *Construcción de las cabinas*

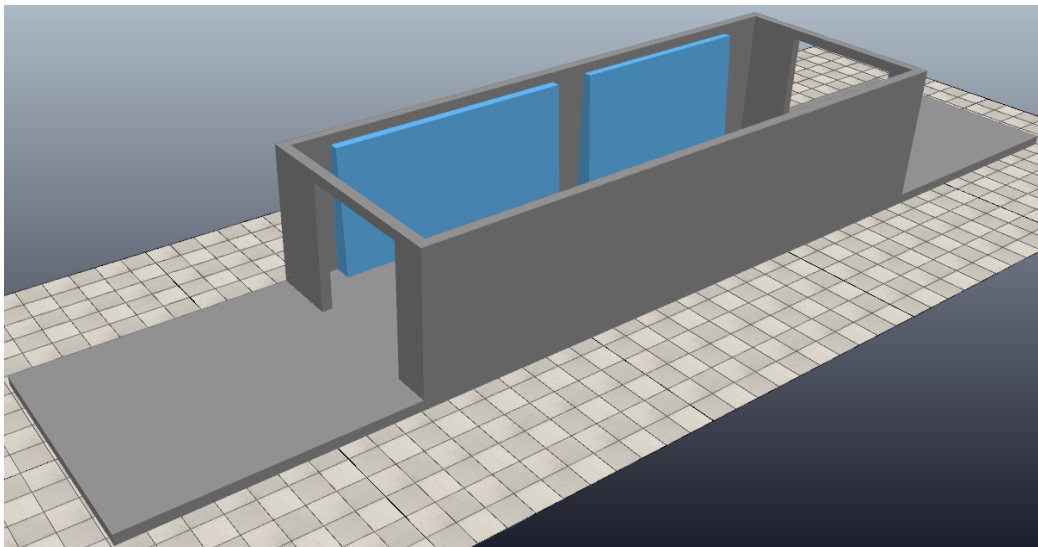
Para la simulación se debe tener en cuenta el espacio físico donde se desea implementar los robots en los procesos de sellado y lacado. En primera instancia se diseña a escala real las cabinas usadas en la empresa en Autodesk Inventor, tanto la estructura como las cortinas de agua, posteriormente se importa dentro del programa con el formato STL (Standard Triangle Language), para ello se selecciona la pestaña “File → Import → Mesh” (Figura 2) luego se escoge el elemento y se pone “Import” a la ventana emergente, seguidamente se ubica el escenario mediante el botón “Object/Item shift → Position” (Figura 3) de tal manera que se asemeje a la planta actual de la empresa (Figura 4) [55].



**Figura 2.** Importar el modelo del robot.



**Figura 3.** Ventana emergente para cambiar la posición.

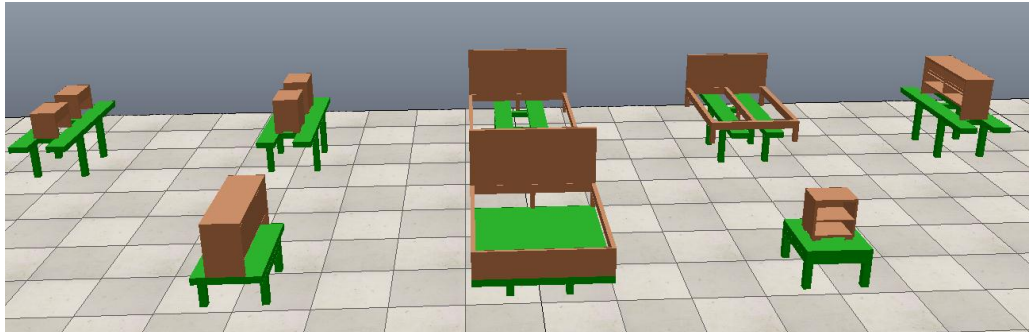


**Figura 4.** Cabina de lacado.



➤ *Muebles más representativos*

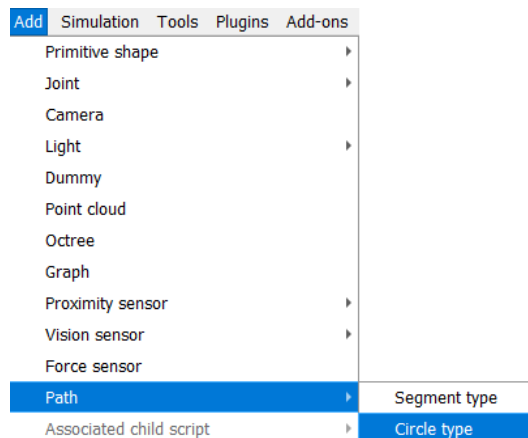
En este punto se importan todos los muebles que tuvieron mayor demanda dentro del año 2018 y principios del 2019 de la misma manera que se importa las cabinas de sellado y lacado mencionadas anteriormente, y se colocan en un escenario aparte (Figura 5) [55].



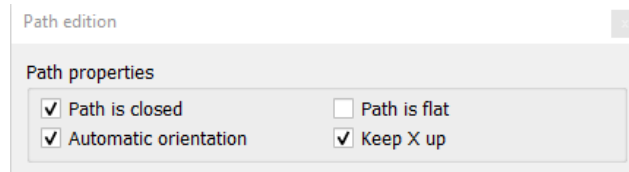
**Figura 5.** *Muebles importados a Coppelia SIM EDU.*

➤ *Construcción de la banda*

La banda transportadora permite desplazar los muebles hasta un sensor provocando que este se detenga. Para la construcción de la banda primero se crea una trayectoria mediante puntos escogiendo la pestaña “Add → Path → Circle type” (Figura 6), mediante el botón “Object/Item shift → Position” (Figura 3) se coloca los distintos puntos en la posición correcta formando un ovalo con las dimensiones de la banda, además se debe activar las casillas “Path is closed”, “Automatic orientation” y “Keep X up” (Figura 7), después de crear la trayectoria se le reorienta dando la forma de la banda [55].

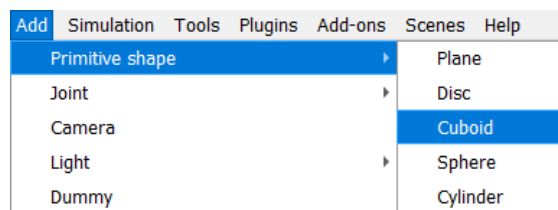


**Figura 6.** *Creación de una trayectoria circular.*



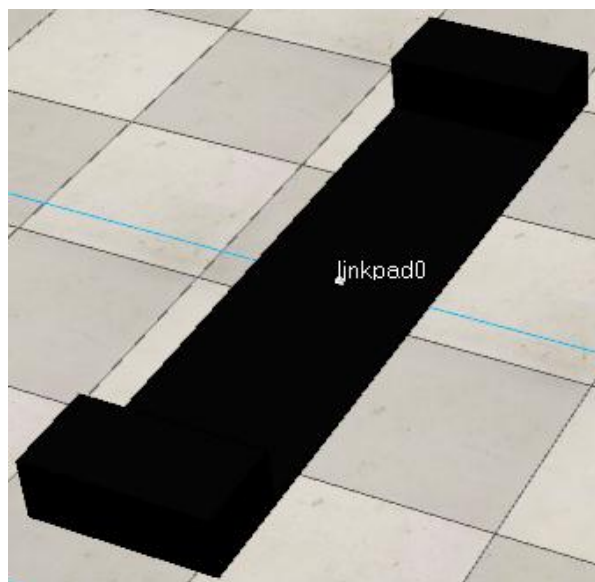
**Figura 7.** *Propiedades de la trayectoria.*

Ahora se crean las almohadillas que forman parte de la banda, para ello se utiliza la pestaña “Add → Primitive shape → Cuboid” y se asigna los valores de 0.3 en X, 1.25 en Y y 0.005 en Z (Figura 8). Posteriormente se crea un punto en la misma pestaña “Add → Dummy” [55].

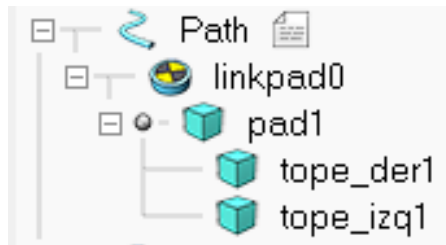


**Figura 8.** *Creación de un cuboides.*

Se arrastra la almohadilla hacia el punto, luego se selecciona el punto y la trayectoria creada anteriormente y se selecciona “Apply to selection” que se encuentra dentro de “Object/Item shift → Position” (Figura 3), esto hace que la almohadilla se coloque en su posición para formar la banda (Figura 9), después se arrastra el punto hacia la trayectoria (Figura 10). Si es necesario, se puede modificar la orientación de la almohadilla [55].

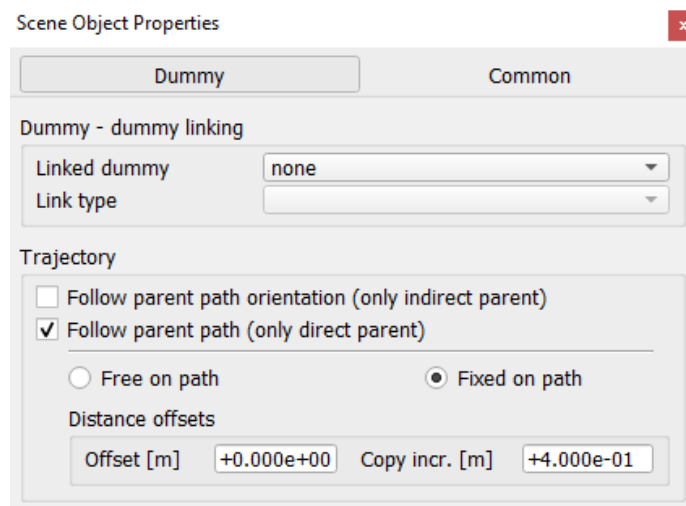


**Figura 9.** *La almohadilla colocada dentro de la trayectoria.*

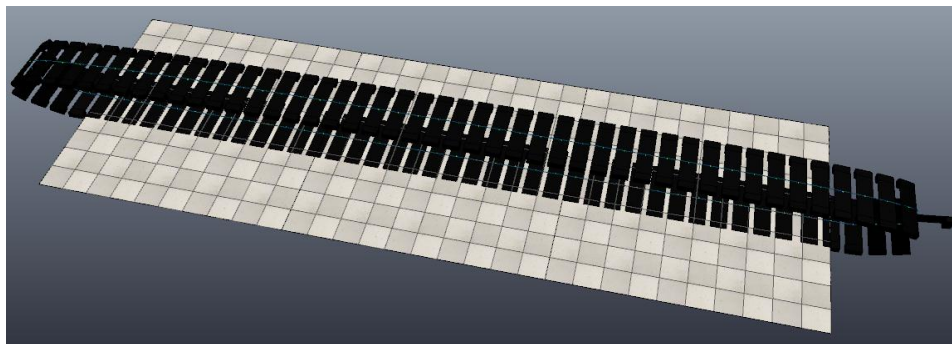


**Figura 10.** La estructura jerárquica de la banda.

Posteriormente se modifica las propiedades del punto activando la casilla “Follow parent path (only direct parent)” y asignando el valor de 0.4 en “Copy incr. [m]” (Figura 11). Se crea varias copias del punto y de la almohadilla para poder completar la banda, se seleccionan y se arrastran dentro de la trayectoria, ahora la banda está completa y se puede programar para que se mueva (Figura 12) [55].

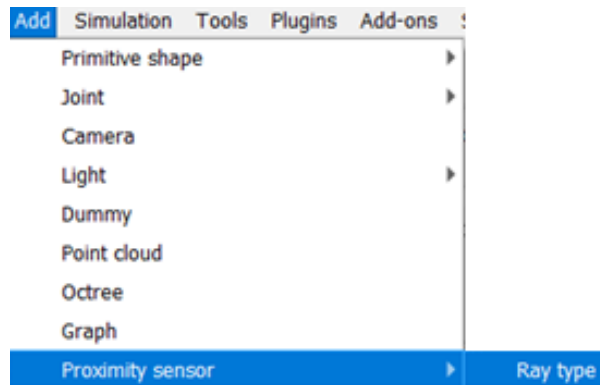


**Figura 11.** Propiedades del punto.

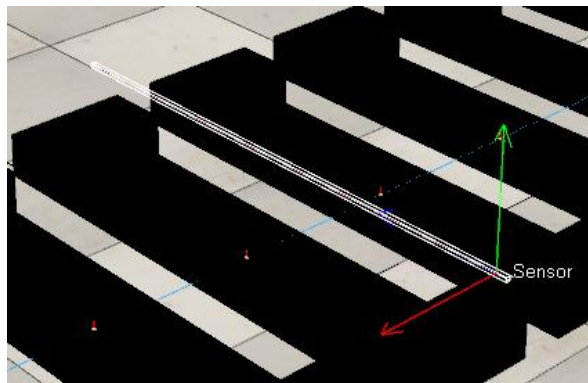


**Figura 12.** Construcción completa de la banda.

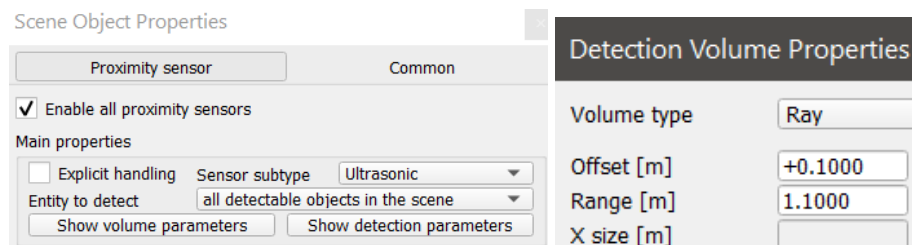
Ahora se añade un sensor de proximidad para detectar al mueble y detener la banda, para ello primero se añade este elemento seleccionando la pestaña “Add → Vision sensor → Ray type” (Figura 13). Se ubica y orienta el sensor de tal forma que este arriba de la banda (Figura 14), además se modifica las propiedades del sensor para que tenga un mayor alcance poniendo un valor de 1.1 metros en la opción “Show volumen parameters → Range [m]” (Figura 15) [55].



**Figura 13.** Creación de un sensor de proximidad tipo rayo.



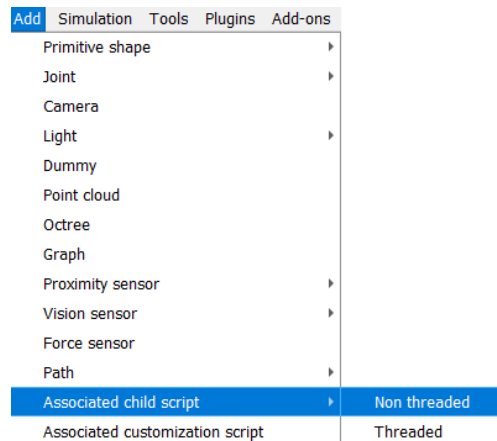
**Figura 14.** Sensor de proximidad para la banda.



**Figura 15.** Propiedades del sensor

Para programar la banda primero se asocia una escritura seleccionando la trayectoria de esta y luego a la pestaña “Add → Associated child script → Non threaded” (Figura 16), luego se utiliza la programación que se muestra en la figura 17.

En la programación se recalca cuatro puntos importantes para el funcionamiento de la banda, las dos variables agregadas son para detener y continuar la banda según el tiempo establecido, la variable “belVelocity” es la velocidad de la banda donde se le asigna 0.3 metros sobre segundo, la variable “resp” se encarga de guardar el valor del sensor ya sea cero (no detecta objeto) o uno (detectó un objeto) y la variable “tiempo” conserva el valor en segundos del tiempo de la simulación [55].



**Figura 16.** Creación de un escrito asociado a la banda.

```

Non-threaded child script (Banda)
function sysCall_init()
    pathHandle=sim.getObjectHandle("Banda")
    sensor=sim.getObjectHandle("Sensor")
    sim.setPathTargetNominalVelocity(pathHandle,0)
    a=0
    aux=0
end
function sysCall_actuation()
    beltVelocity=0.3
    resp=sim.readProximitySensor(sensor)
    if (resp>0) then
        beltVelocity=0
        tiempo=sim.getSimulationTime()
        if (a==0) then
            aux=tiempo+48.7
            a=1
        end
        if (tiempo>aux) then
            beltVelocity=0.3
        end
    end
    local dt=sim.getSimulationTimeStep()
    local pos=sim.getPathPosition(pathHandle)
    pos=pos+beltVelocity*dt
    sim.setPathPosition(pathHandle,pos)
end

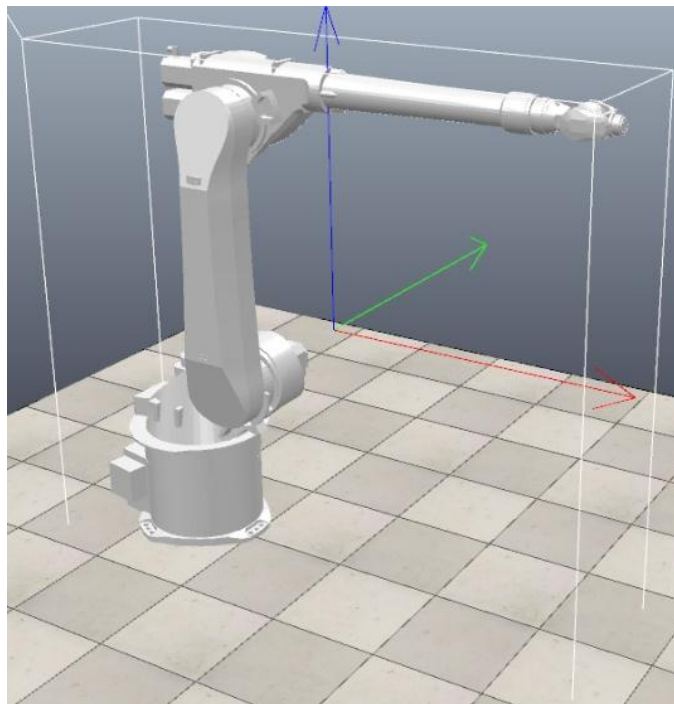
```

**Figura 17.** Programación de la banda.

Una vez que el sensor detecta un objeto, se almacena el tiempo de la simulación y se guardan las variables, luego se compara estos dos números hasta que la condición de falso, provocando un lapso antes de que vuelva a mover la banda [55].

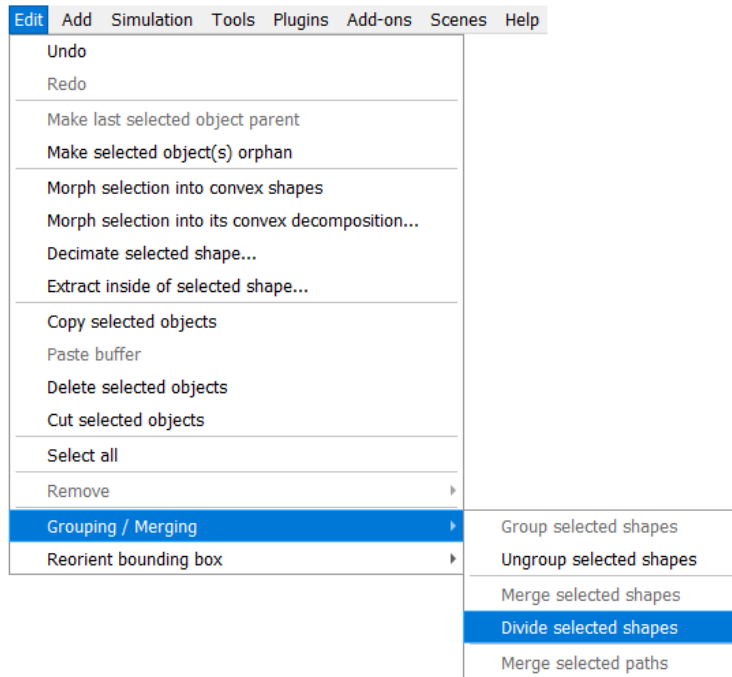
➤ *Modelo limpio del robot*

Construir un modelo en limpio de un robot consiste en importar, ensamblar y añadir las articulaciones respectivas de tal manera que se pueda simular los movimientos de este. Primero se importa el modelo del robot con el mismo procedimiento que en las cabinas, obteniendo el robot con el nombre “Shape” (Figura 18) [55].

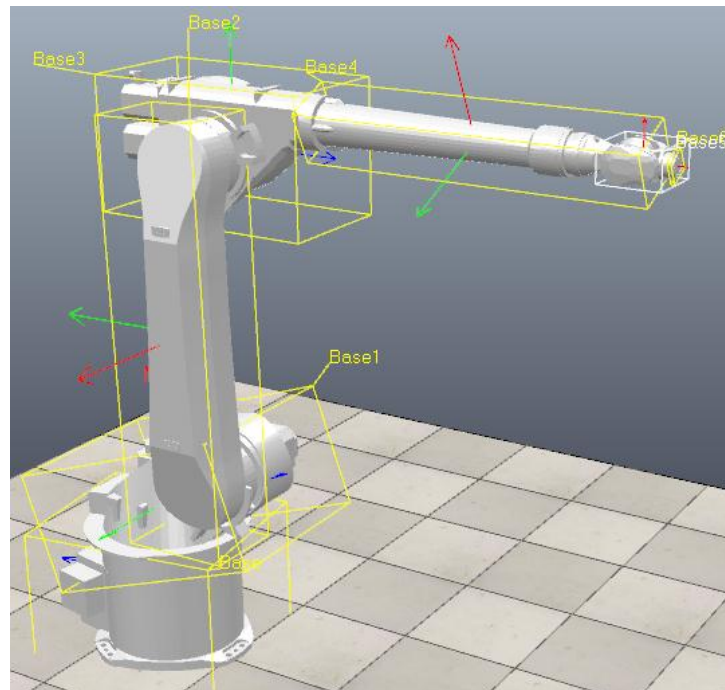


**Figura 18.** El robot KUKA importado en Coppelia SIM EDU.

Se selecciona la pestaña “Edit → Grouping/Merging → Divide selected shapes” (Figura 19) para descomponer el robot en sus eslabones, luego se le asigna un nuevo nombre a cada uno (Figura 20). En el caso de tener más objetos, se pueden unir entre sí mediante la opción “Edit → Grouping/Merging → Merge selected shapes” [55].

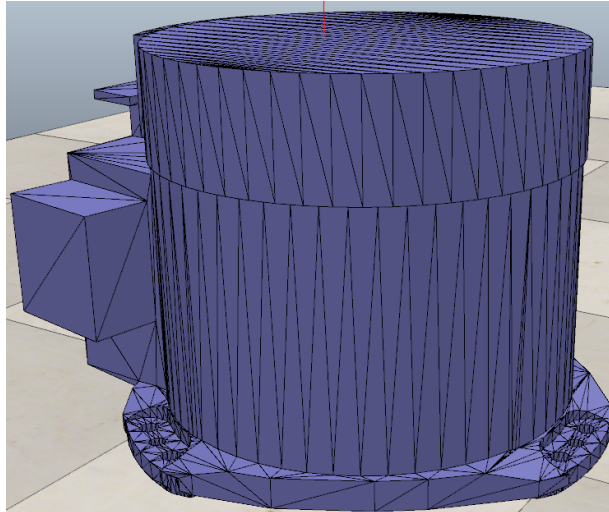


**Figura 19.** Dividir el modelo en sus eslabones.

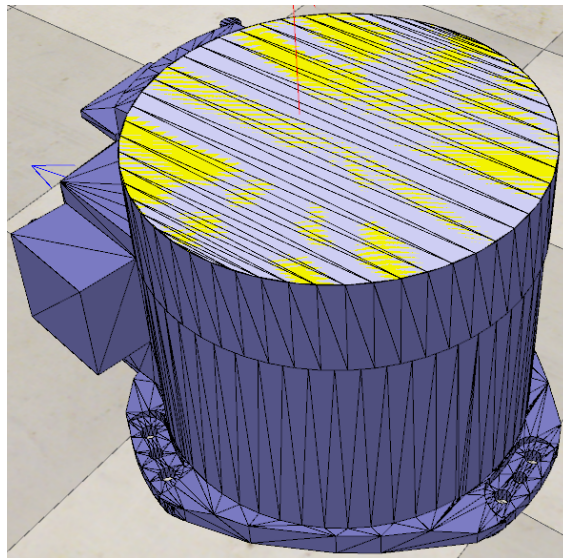


**Figura 20.** Eslabones renombrados.

Después se selecciona la base del robot y se elige “Toggle shape edit mode” para que el eslabón se muestre en triángulos (Figura 21). Luego se escoge los triángulos que se encuentran enlazados con el siguiente eslabón y se crea un cilindro con la opción “Extract cylinder” (Figura 22), en el caso de tener juntas prismáticas, se debe crear un cuboides [55].



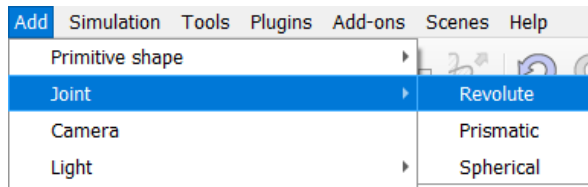
**Figura 21.** Base del robot conformado por triángulos.



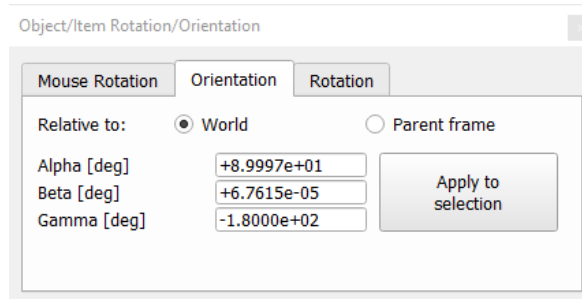
**Figura 22.** Cilindro creado centrado en la base.

Para salir de ese modo se cierra la ventana emergente “Shape Edition”, luego se crea la articulación, que en este caso es de revolución seleccionando la pestaña “Add → Joint → Revolute” (Figura 23). Posteriormente se elige la nueva junta con el cilindro creado anteriormente y se escoge la opción “Apply to selection” que se encuentra dentro de “Object/Item shift → Position” (Figura 3) y dentro de “Object/Item rotate → Orientation” (Figura 24), esto provoca que se centre la articulación con el eslabón (Figura 25) [55].

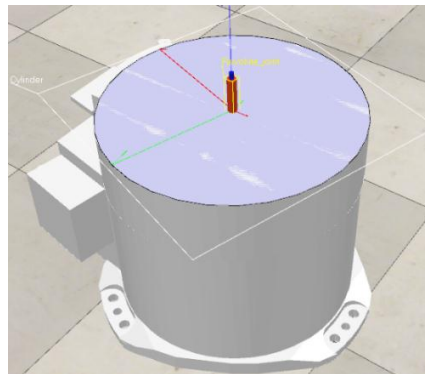




**Figura 23.** Creación de una junta de revolución.

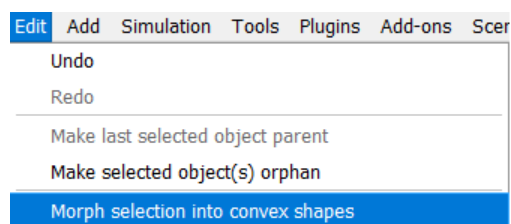


**Figura 24.** Ventana emergente para cambiar la orientación.

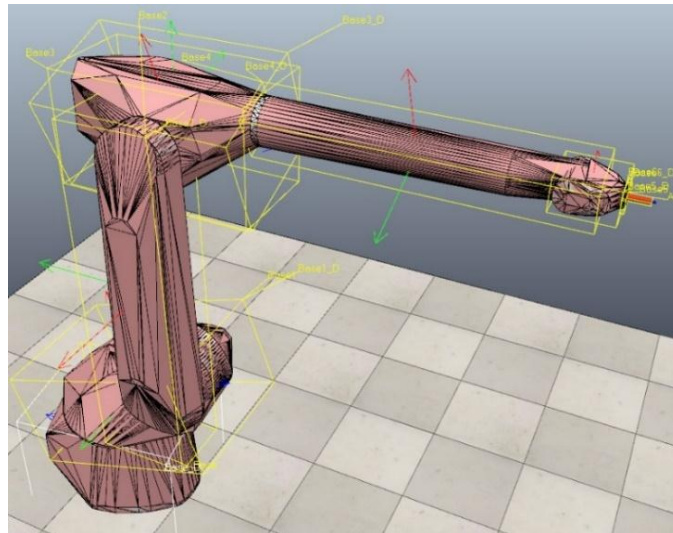


**Figura 25.** Articulación centrada en la base del robot.

Se repite este paso con el resto de los eslabones dando un total de seis juntas de revolución y se les asigna un nuevo nombre. Ahora se crean las piezas dinámicas, para ello se realiza una copia de todos los objetos que forman parte del robot, se selecciona una de ellas y se escoge la pestaña “Edit → Morph selection into convex shapes” (Figura 26), se repite este paso con el resto de los objetos y se les renombra (Figura 27) [55].

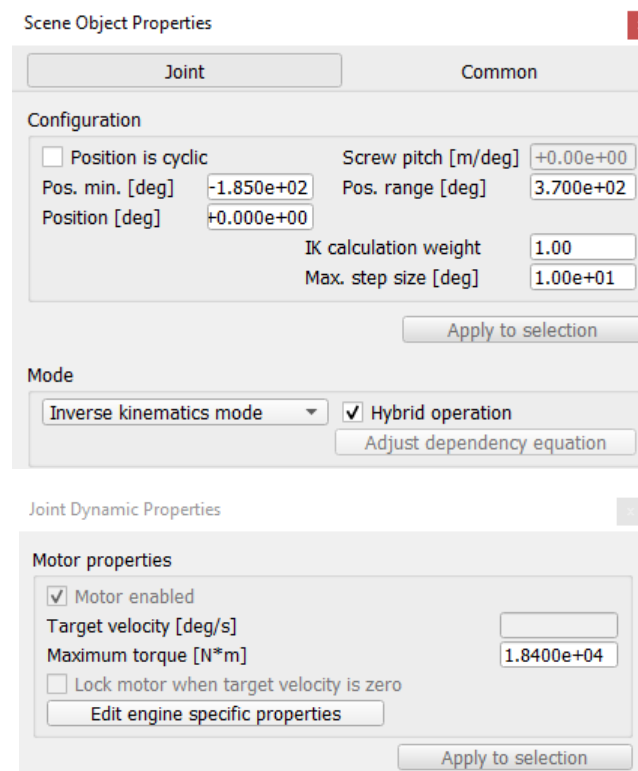


**Figura 26.** Modificar los eslabones en formas más simples.



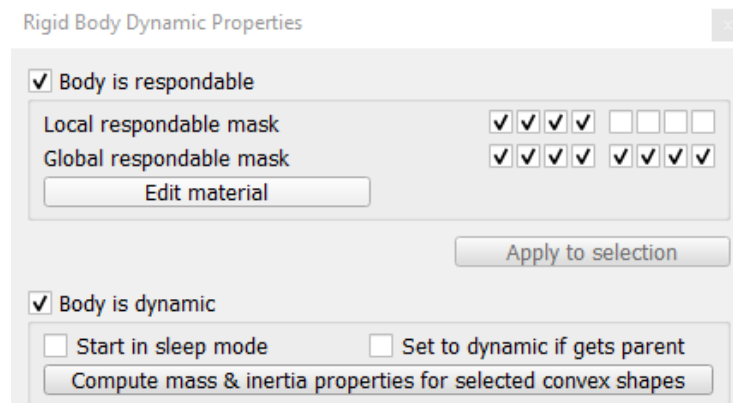
**Figura 27.** Articulaciones, eslabones estáticos y dinámicos.

Ahora se agregan las propiedades a los objetos. En las juntas de revolución se les puede asignar su posición mínima “Pos. min. [deg]”, el rango de movimiento “Pos. range [deg]” y máximo torque “Maximum torque [N\*m]” (Figura 28), además el modo de operación debe ser en cinemática inversa “Inverse kinematics mode” con la opción de operación híbrida “Hybrid operation” [55].



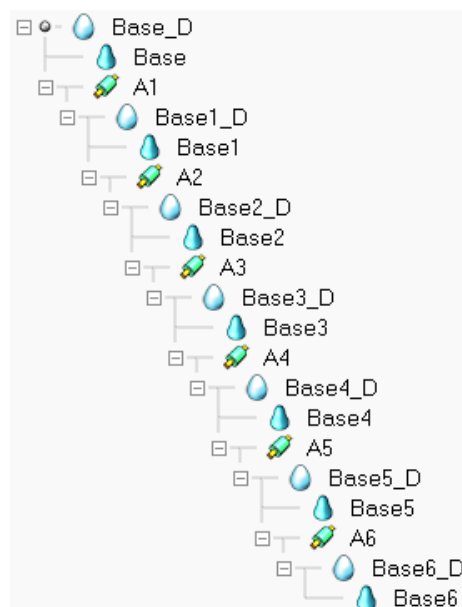
**Figura 28.** Propiedades de las juntas de revolución.

En las piezas dinámicas se debe activar las opciones, el cuerpo es dinámico “Body is dynamic” y el cuerpo responde “Body is responsable” para que el robot pueda moverse y responder al entorno, además se debe desactivar las últimas cuatro casillas de la máscara local y las primeras cuatro casillas de esta, alternando entre piezas (Figura 29). Posteriormente se elige la pieza base, se activa la opción “Set to Dynamic if get parent” para desactivar el botón dinámico, de esta manera la base se mantiene fija en el piso [55].



**Figura 29.** *Propiedades dinámicas de los eslabones.*

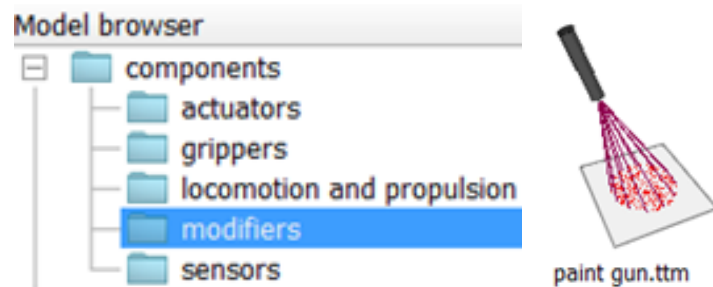
Finalmente, se arrastra las piezas para formar el ensamblado completo tal como se puede ver en la figura 30, tomando en cuenta que las piezas dinámicas son las que dan el movimiento al robot mediante las juntas de revolución y las piezas estáticas brindan la estética al robot, ahora se puede utilizar el robot para la simulación [55].



**Figura 30.** *Ensamblado completo del robot*

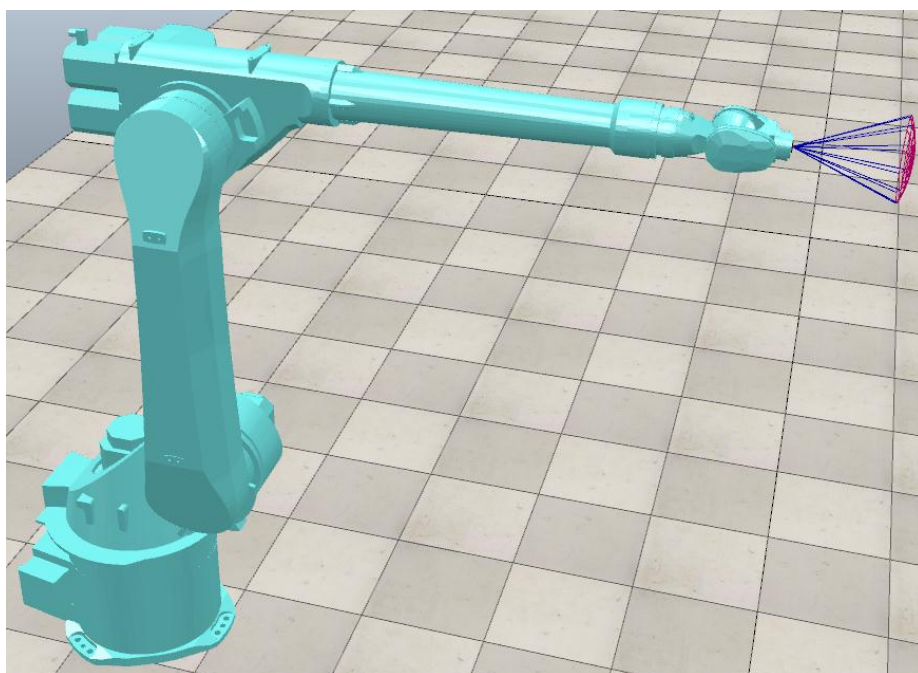
➤ *Pistola de pintura*

Acopladas las articulaciones en el robot, se adjunta el efector final que es una pistola de pintura que forma parte de la biblioteca de Coppelia SIM denominado “PaintNozzle”, para anexarla al robot, se busca en la biblioteca del programa, y se arrastra a la escena de la simulación (Figura 31) [55].

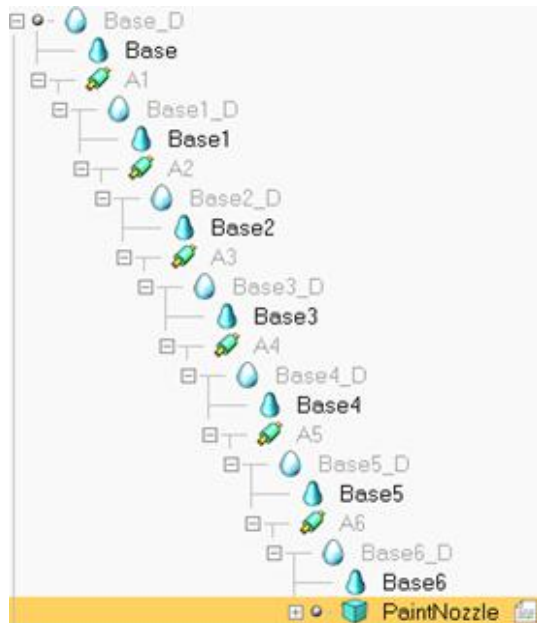


**Figura 31.** *Paint Gun en Biblioteca.*

Para que la pistola se mueva a la par con el robot siguiendo las trayectorias preestablecidas, se debe incorporar a la última articulación donde está el efector final, para ello se elige la junta y la pistola de pintura, luego se escoge la opción “Apply to selection” que se encuentra dentro de “Object/Item shift → Position” (Figura 3) y dentro de “Object/Item rotate → Orientation” (Figura 24), entonces el objeto queda ensamblado y orientado en el robot (Figura 32), además se le arrastra hacia la junta dentro de la jerarquía del robot para formar el enlace (Figura 33) [55].



**Figura 32.** *Pistola de pintura ensamblada en el robot.*



**Figura 33.** Ubicación en la jerarquía del robot del PaintNozzle.

La pistola de pintura viene con una programación predeterminada donde se modifica las variables iniciales como la densidad (density), tamaño (itemSize) y color de las partículas que se proyectan (colorIndex), además se modifica el cono de proyección (jetAngle) (Figura 34). Al igual que la banda, se crea una variable llamada “tiempo” donde se almacena el tiempo de la simulación, asimismo se agrega varias variables que son las encargadas de activar y desactivar la pistola (Figura 35). Conforme pasa el tiempo de la simulación se cumplen las condiciones creadas con las variables mencionadas anteriormente provocando el apagado y prendido de la proyección (Figura 36) [55].

```

Non-threaded child script (PaintNozzle)
function sysCall_init()
  jetHandle=sim.getObjectHandle("PaintNozzleJet")
  joint0Handle=sim.getObjectHandle("PaintNozzleJoint0")
  joint1Handle=sim.getObjectHandle("PaintNozzleJoint1")
  dlg=simGetUIHandle("PaintNozzleDialog")
  simSetUIButtonLabel(dlg,100,sim.getScriptName(sim.handle_self))
  jetAngle=60*math.pi/180
  density=35
  objList={}
  allDrawingObjects={}
  mode=sim.drawing_discpoints
  itemSize=12
  bufferSize=50000
  paintingEnabled=true
  refreshDlg=true
  aux=0
end

```

**Figura 34.** Variables iniciales de la programación del PaintNozzle.

```

20 function sysCall_actuation()
21     tiempo=sim.getSimulationTime()
22     print (tiempo)
23     density=0
24     colorIndex=3
25
26     if (aux==0) then
27         aux=1
28         aa=tiempo+13.73
29         bb=tiempo+15.86
30         cc=tiempo+16.09
31         dd=tiempo+16.55
32         ee=tiempo+17.91
33         ff=tiempo+20.71
34         gg=tiempo+23.17
35         hh=tiempo+23.54
36         ii=tiempo+25.71

```

**Figura 35.** Variables para activar y desactivar la pistola.

```

66     if (tiempo>aa)and(tiempo<bb) then
67         density=35
68     end
69     if (tiempo>bb)and(tiempo<cc) then
70         density=0
71     end
72     if (tiempo>cc)and(tiempo<dd) then
73         density=35
74     end
75     if (tiempo>dd)and(tiempo<ee) then
76         density=0
77     end
78     if (tiempo>ee)and(tiempo<ff) then
79         density=35
80     end
81     if (tiempo>ff)and(tiempo<gg) then
82         density=0
83     end

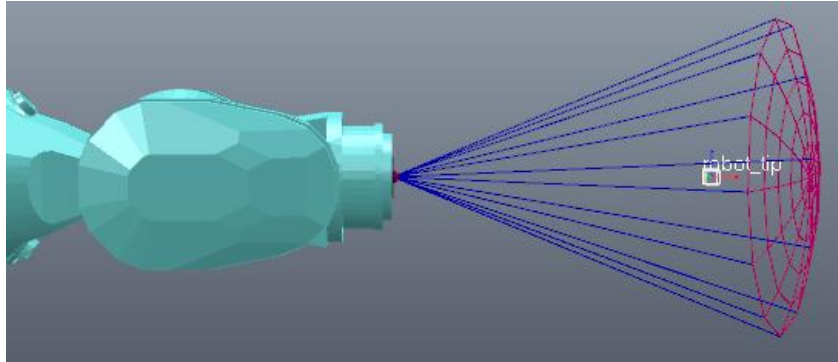
```

**Figura 36.** Condiciones para el encendido y apagado de la pistola.

### ➤ Puntos objetivos

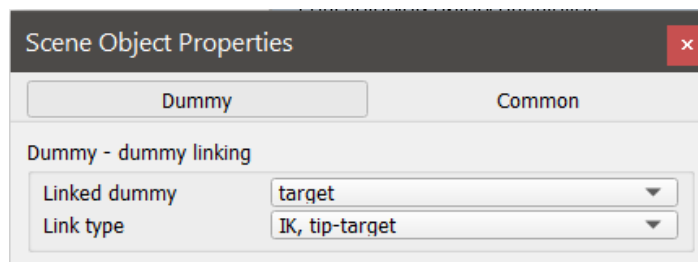
Para generar los movimientos del robot dentro del programa se puede recurrir a diversas técnicas que permiten que el robot ejecute la tarea requerida a simular, en este caso de estudio se opta por la cinemática inversa (Inverse Kinematics), donde el programa realiza cálculos y mediciones, permitiendo que el robot mueva sus articulaciones y ejecute movimientos siguiendo una trayectoria previamente establecida [55].

Para ello se crean puntos objetivos (Dummy) que son los marcos de referencia y orientación para el efector final del robot, por lo que primero se selecciona la pestaña “Add → Dummy”, se renombran con “Dummytip” y “target” y se les ubica en la pistola de pintura (Figura 37) [55].

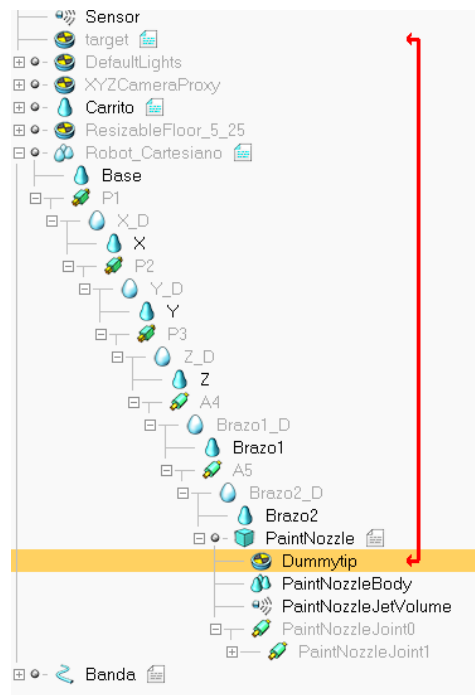


**Figura 37.** Ubicación de los puntos en la pistola de pintura.

Luego se enlazan los puntos modificando las propiedades de estos cambiando la opción “Linked dummy” con el punto correspondiente (Figura 38) y se traslada el punto “Dummytip” dentro de la jerarquía del robot con la pistola de pintura (Figura 39) [55].

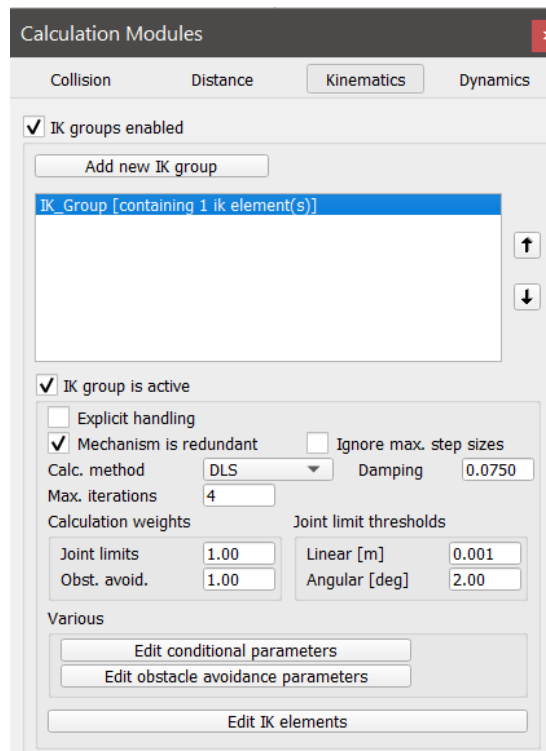


**Figura 38.** Propiedades del punto “Dummytip”.



**Figura 39.** Enlace entre los puntos “Dummytip” y “target”.

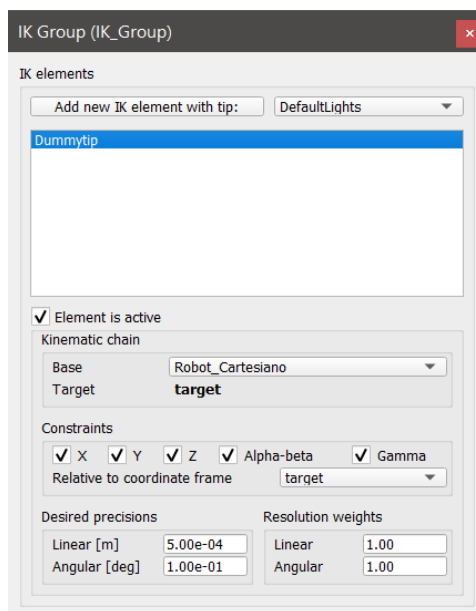
A continuación, se abre la ventana de módulos de cálculo, se escoge la pestaña cinemática (Kinematics) y se crea un nuevo grupo IK (Inverse Kinematics). Se activa la casilla “Mechanism is redundant”, se elige la opción “DLS” en “Calc. method”, se asigna el número cuatro a las máximas iteraciones (Max. iterations) y se coloca un valor de amortiguación de 0.075 (Figura 40). Todas estas opciones se modifican con el fin de dar un movimiento más suave y uniforme al robot [55].



**Figura 40.** *Propiedades de la cinemática inversa.*

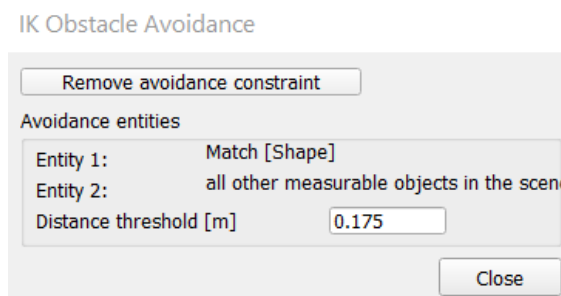
Luego se modifica los elementos que están dentro de la cadena cinemática, para ello se selecciona el botón “Edit IK elements” y se agrega el elemento “Dummytip” con la opción “Add new IK element with tip:”. Se escoge la base dinámica del robot como base, se elige “target” en la opción “Relative to coordinate frame” y también la casilla objetivo, además se activan las casillas “X”, “Y”, “Z”, “Alpha-beta” y “Gamma” (Figura 41) [55].





**Figura 41.** Ventana emergente para modificar la cadena cinemática.

Finalmente se configura los parámetros de evasión de obstáculos, de esta manera, el robot evita chocar con los muebles, para ello se selecciona la opción “Edit obstacle avoidance parameters” donde se agrega las entidades, la primera es el mueble que se está simulando y la segunda son todos los objetos medibles que están dentro del escenario, además se modifica la distancia mínima que puede haber entre las entidades dependiendo de la simulación (Figura 42) [55].

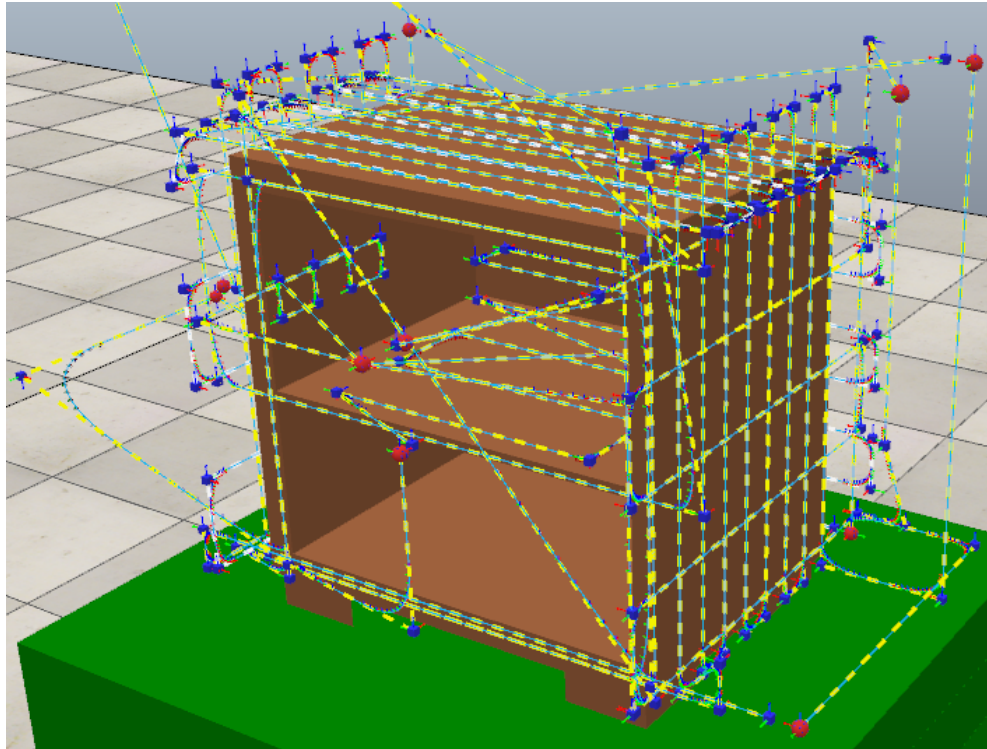


**Figura 42.** Propiedades de evasión de obstáculos.

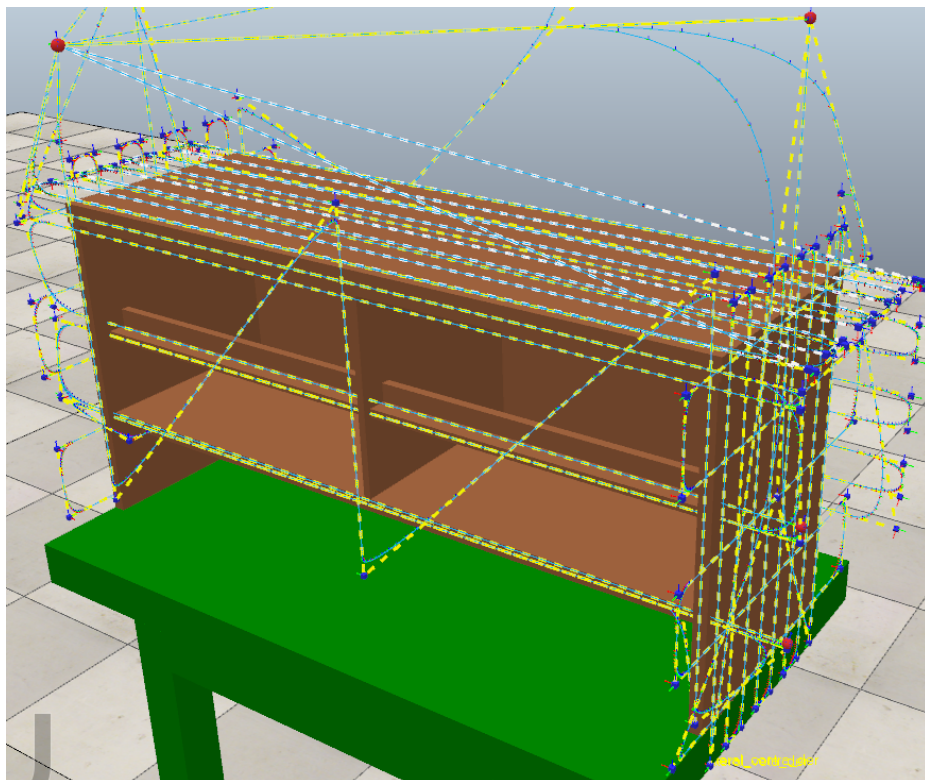
➤ *Trayectoria de los muebles*

El robot requiere seguir una trayectoria trazada para poder pintar la superficie del mueble importado, para ello se escoge la pestaña “Add → Path → Circle type” (Figura 6), luego se agregan puntos y se modifica su ubicación y orientación mediante el botón “Object/Item shift → Position” (Figura 3) y el botón “Object/Item rotate → Orientation” (Figura 24) de tal manera que siga la misma trayectoria y proceso que realiza el operario manualmente [55].

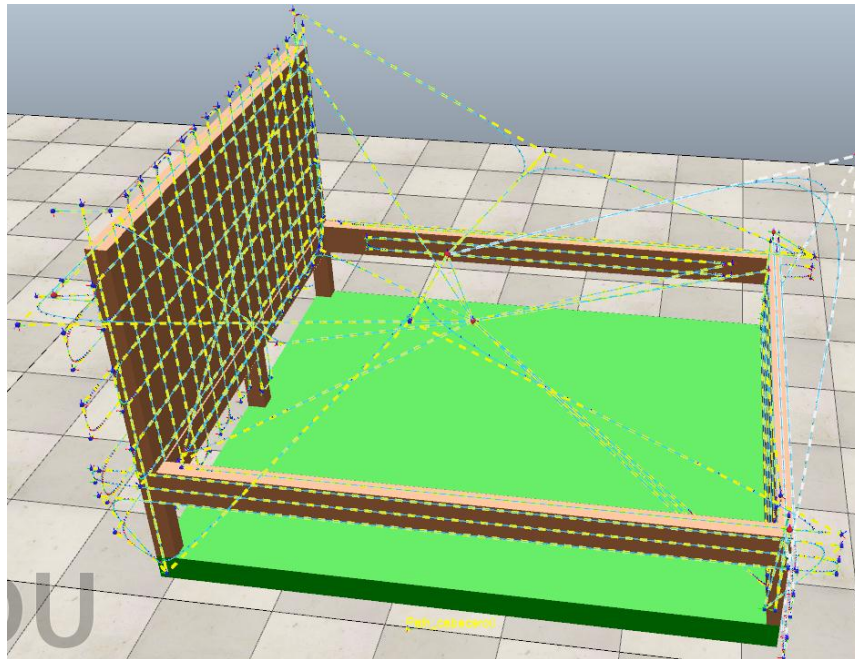
Las trayectorias de los muebles velador Basilea, cómoda Vari y la cama Match de 2 ½ plazas se muestran en las figuras 43, 44 y 45 respectivamente [55].



**Figura 43.** Trayectoria para el velador Basilea.



**Figura 44.** Trayectoria para la cómoda Vari.



**Figura 45.** Trayectoria para la cama Match 2 ½ plazas.

Posteriormente se añade una escritura al punto “Target” para que este siga las trayectorias previamente creadas mediante la pestaña “Add → Associated child script → Threaded” (Figura 16) y se utiliza la programación que se muestra en la figura 46 [55].

```

Threaded child script (robot_target)
1  sim.wait(11.75)
2
3  path= sim.getObjectHandle('Path_inicio')
4  Target=sim.getObjectAssociatedWithScript(sim.handle_self)
5  sim.followPath(Target, path,3, 0, 1.25,1.25)
6  path= sim.getObjectHandle('Path_frente_borde')
7  Target=sim.getObjectAssociatedWithScript(sim.handle_self)
8  sim.followPath(Target, path,3, 0, 1.25,1.25)
9  path= sim.getObjectHandle('Path_superior_contra')
10 Target=sim.getObjectAssociatedWithScript(sim.handle_self)
11 sim.followPath(Target, path,3, 0, 1.25,1.25)
12 sim.wait(1)
13 path= sim.getObjectHandle('Path_interior_izq')
14 Target=sim.getObjectAssociatedWithScript(sim.handle_self)
15 sim.followPath(Target, path,3, 0, 1,1)

```

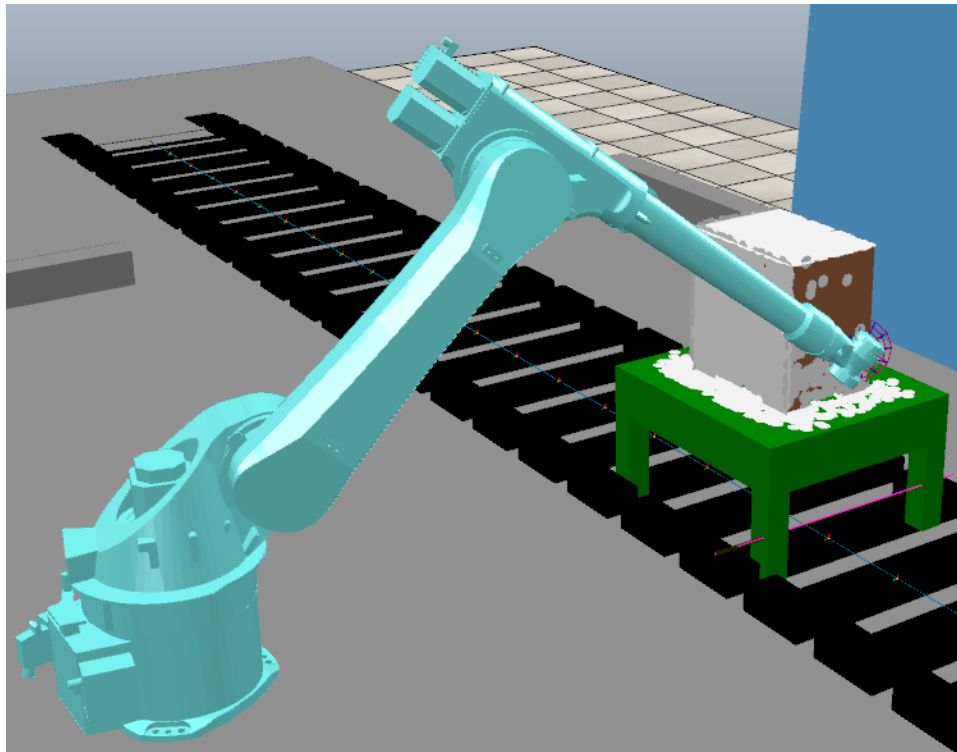
**Figura 46.** Programación para el punto “target”.

La programación se basa en tres líneas, la primera se le nombra a la trayectoria dentro de la escritura, en la segunda se le asocia el punto “Target” a esta y la última línea es para modificar los parámetros, donde los dos últimos números son la velocidad y aceleración, respectivamente [55].

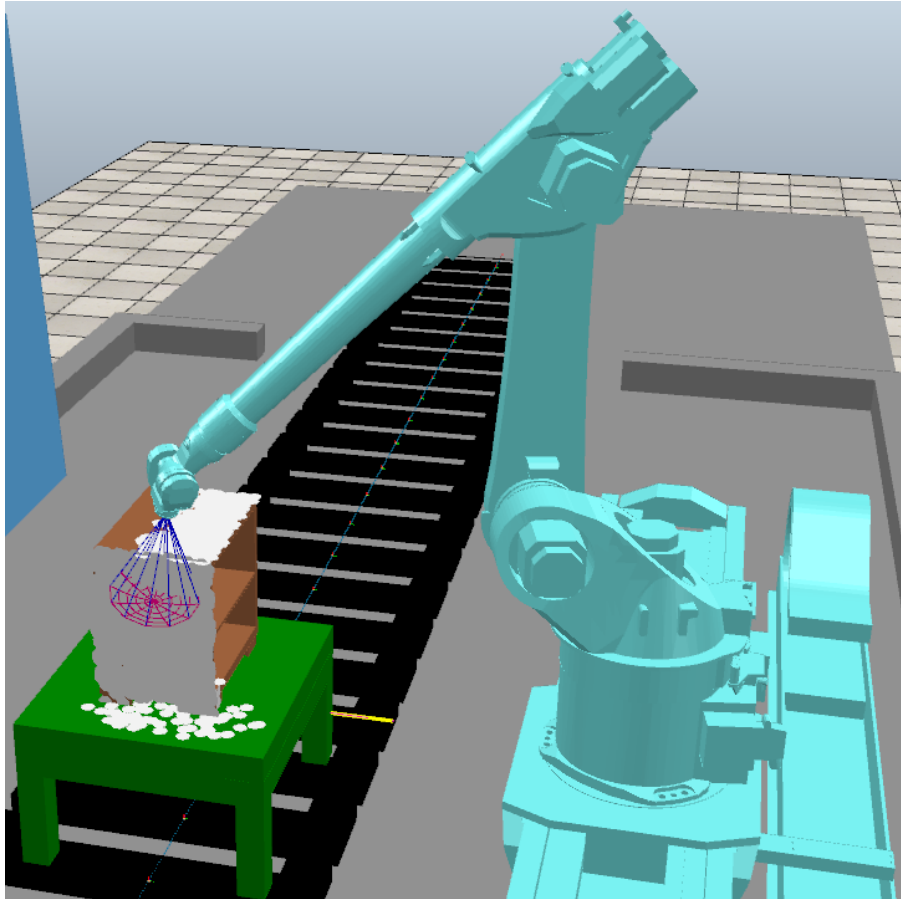
## APÉNDICE B: SIMULACIONES DE LOS SISTEMAS CON LOS MUEBLES



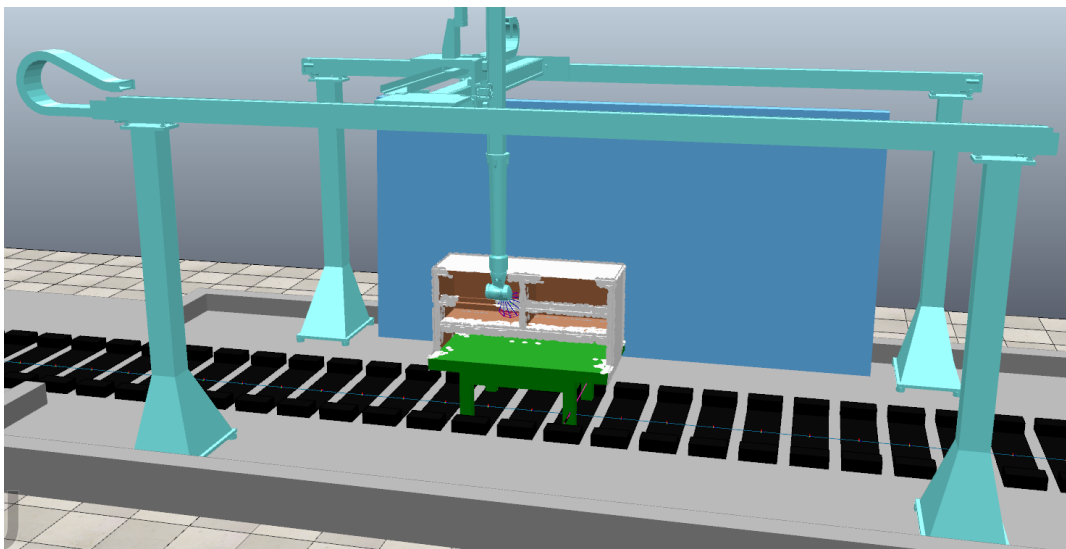
**Figura 1.** Sistema cartesiano proyectando sello al velador Basilea.



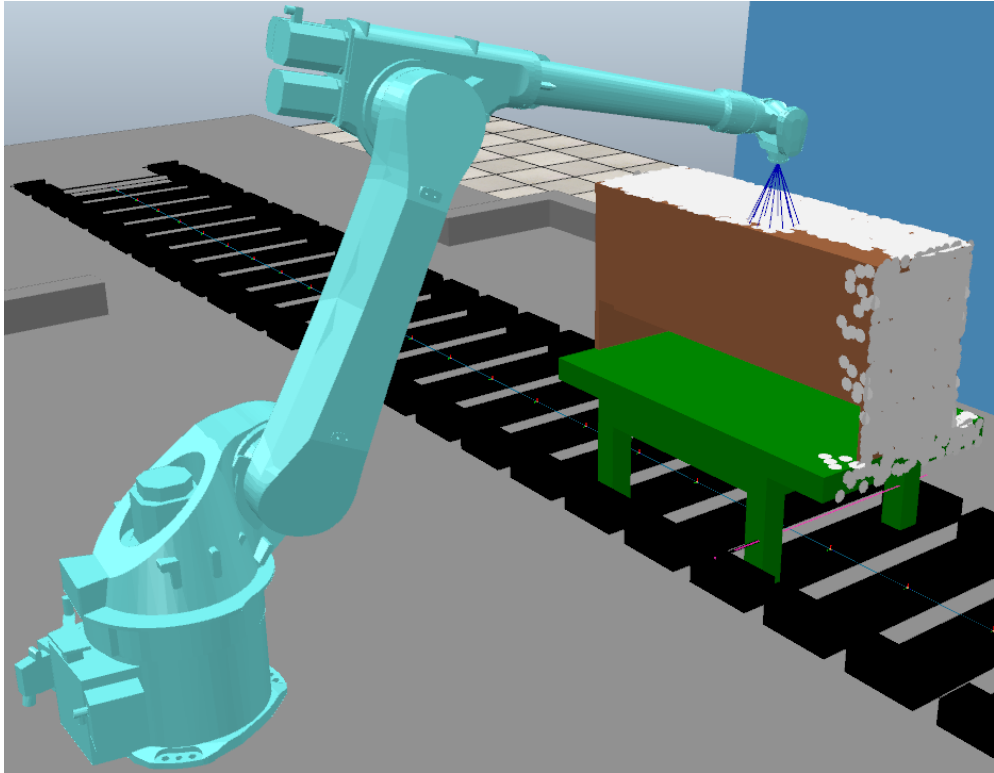
**Figura 2.** Sistema rotativo proyectando sello al velador Basilea.



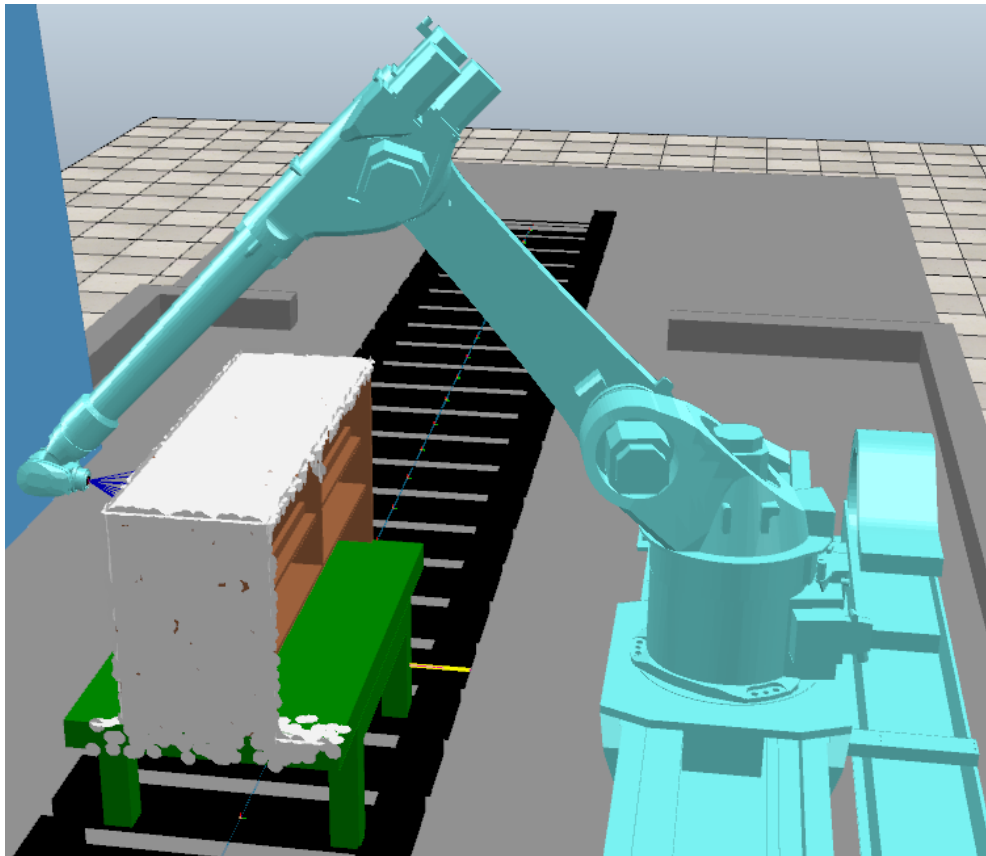
**Figura 3.** Sistema con riel proyectando sello al velador Basilea.



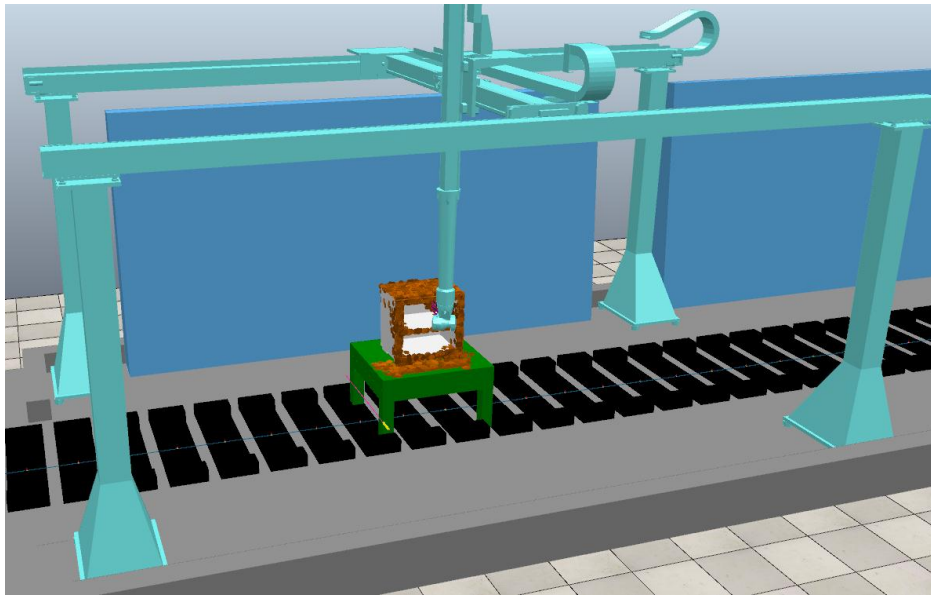
**Figura 4.** Sistema cartesiano proyectando sello a la cómoda Vari.



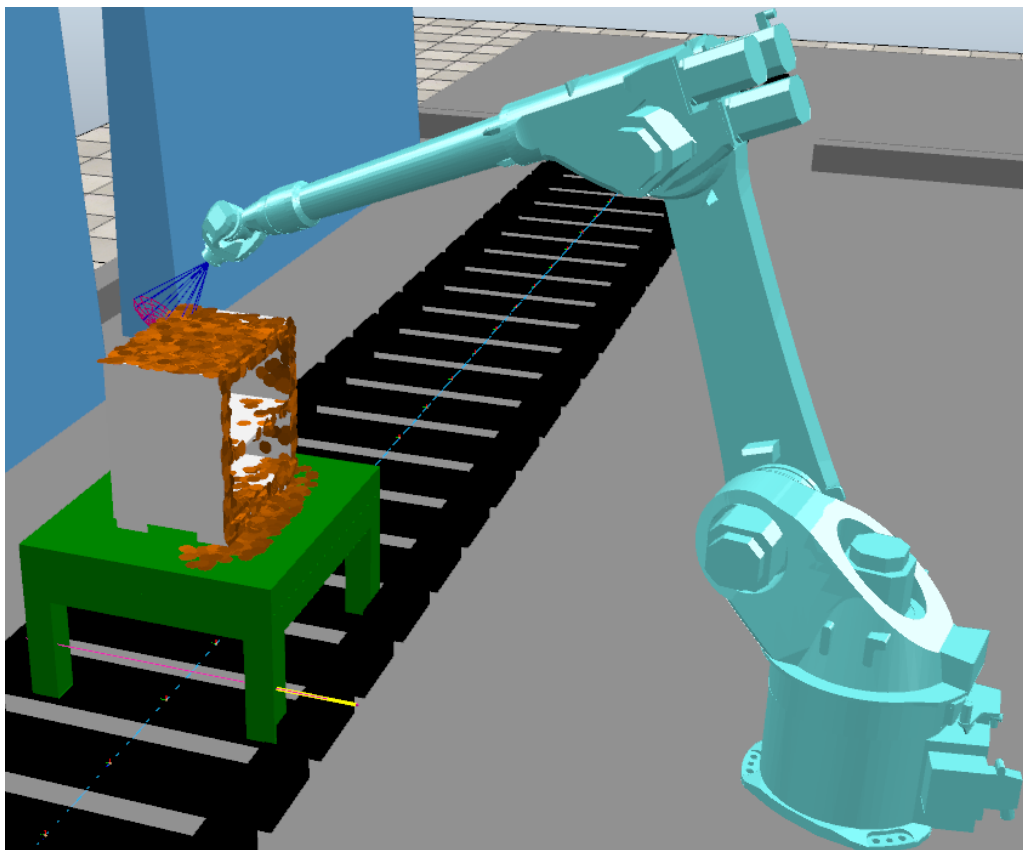
**Figura 5.** Sistema rotativo proyectando sello a la cómoda Vari.



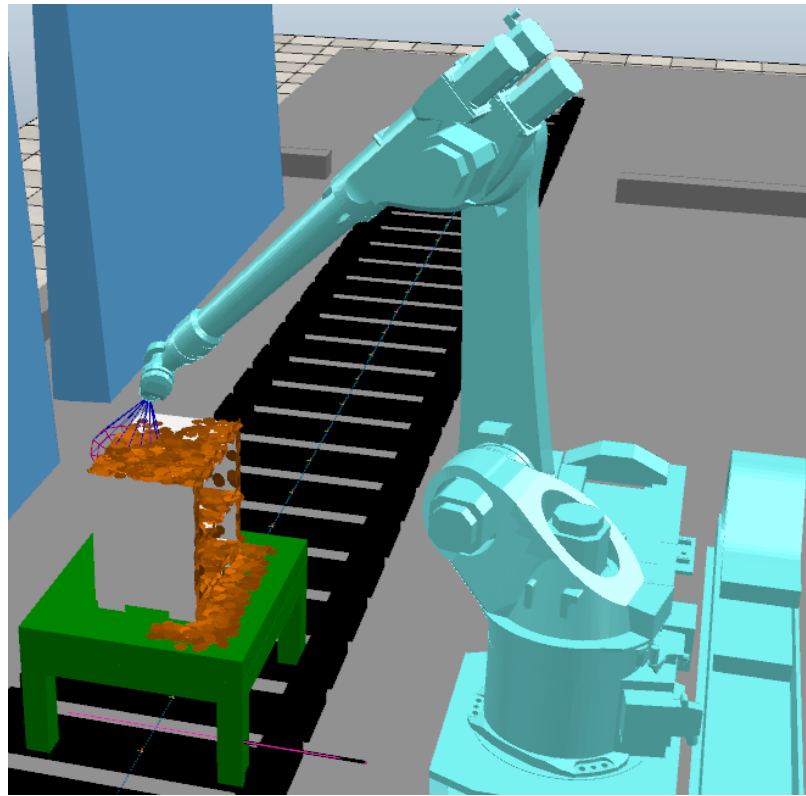
**Figura 6.** Sistema con riel proyectando sello a la cómoda Vari.



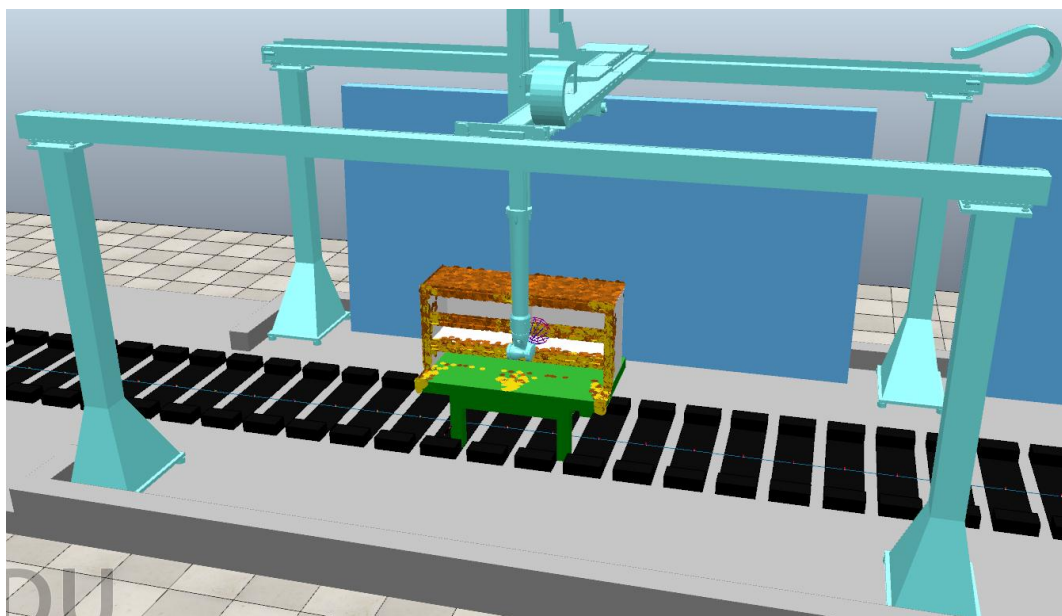
**Figura 7.** Sistema cartesiano proyectando laca al velador Basilea.



**Figura 8.** Sistema rotativo proyectando laca al velador Basilea.

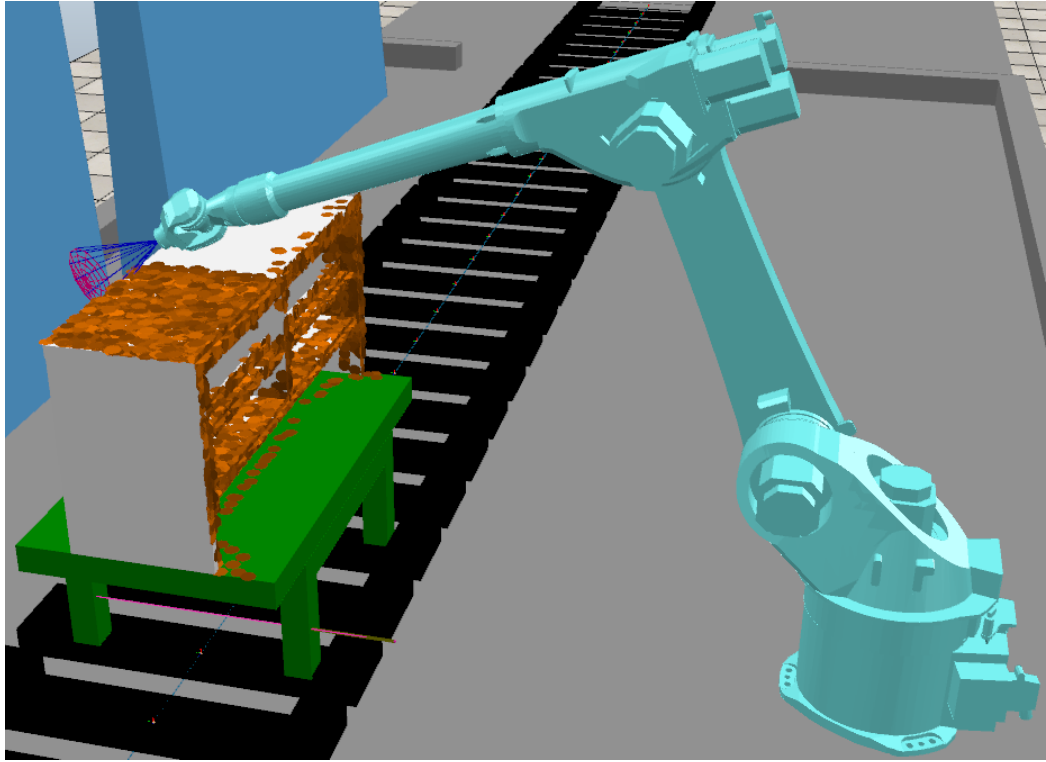


**Figura 9.** Sistema con riel proyectando laca al velador Basilea.

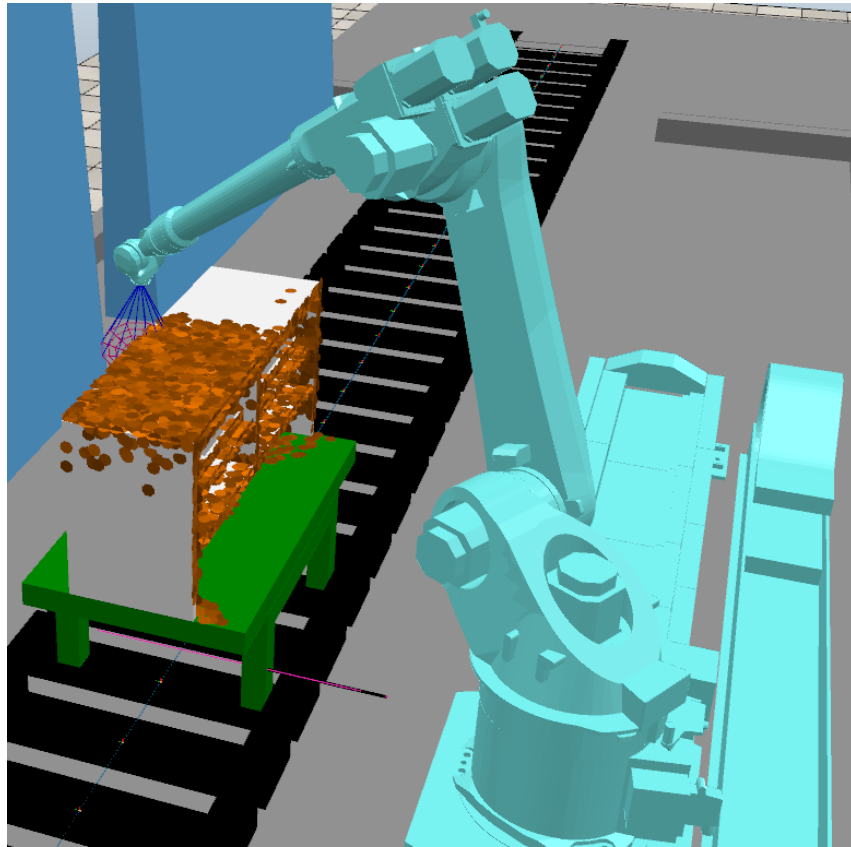


**Figura 10.** Sistema cartesiano proyectando laca a la cómoda Vari.

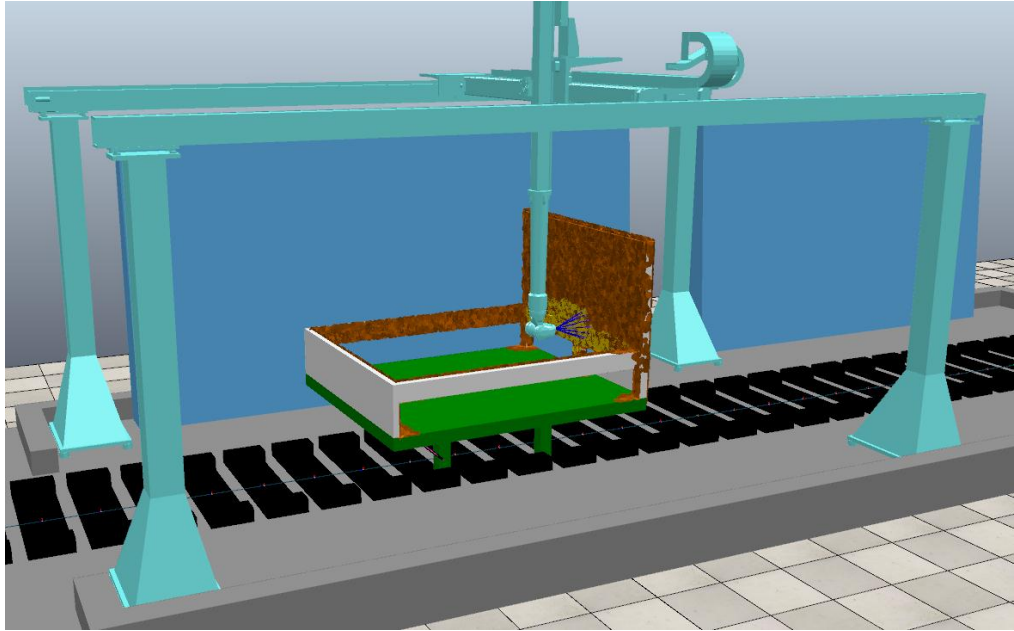




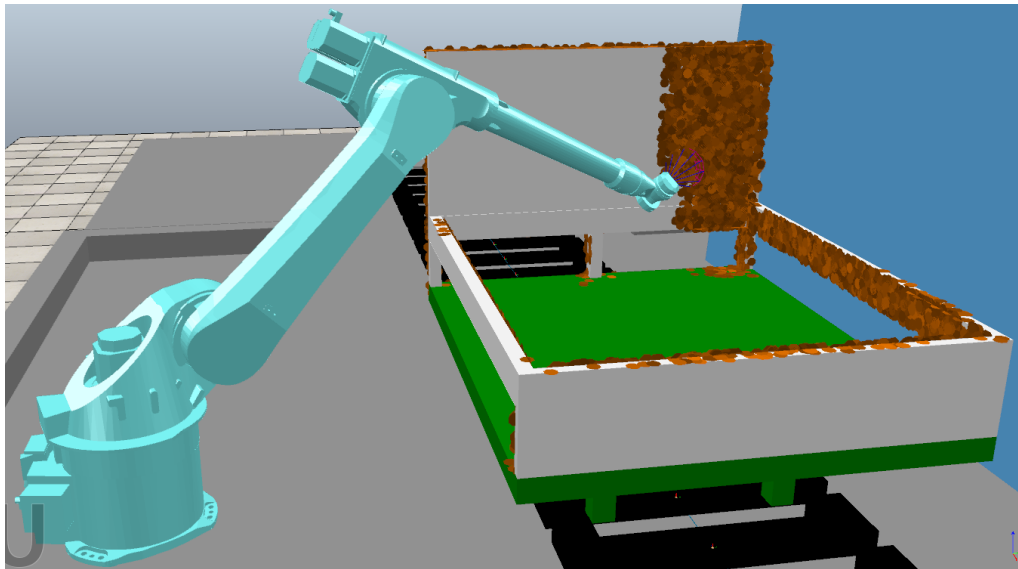
**Figura 11.** Sistema rotativo proyectando laca a la cómoda Vari.



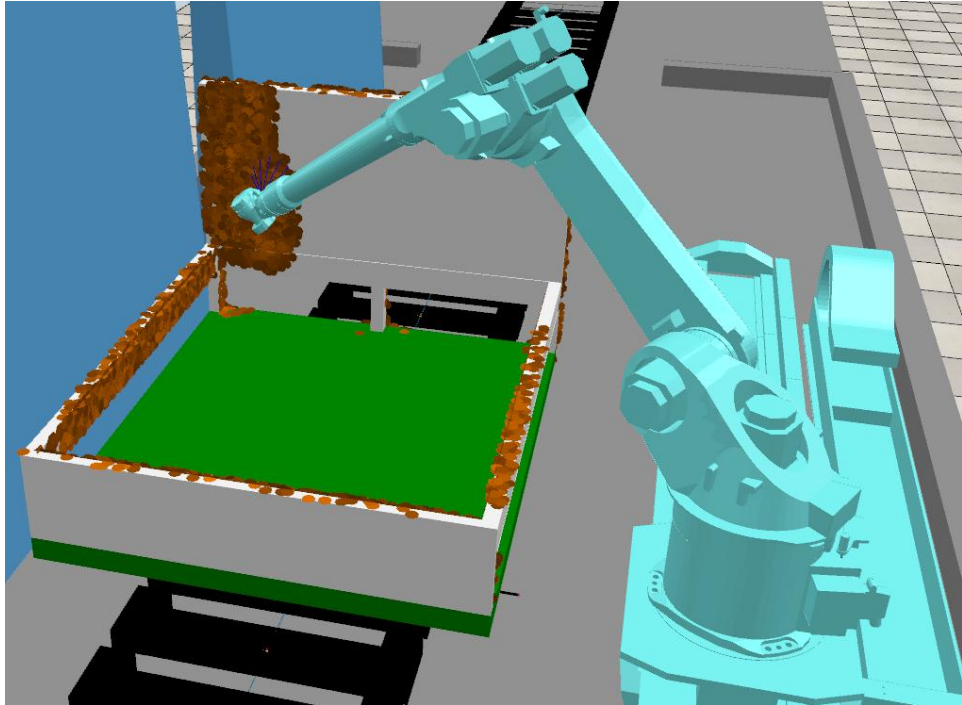
**Figura 12.** Sistema con riel proyectando laca a la cómoda Vari.



**Figura 13.** Sistema cartesiano proyectando laca a la cama Match.

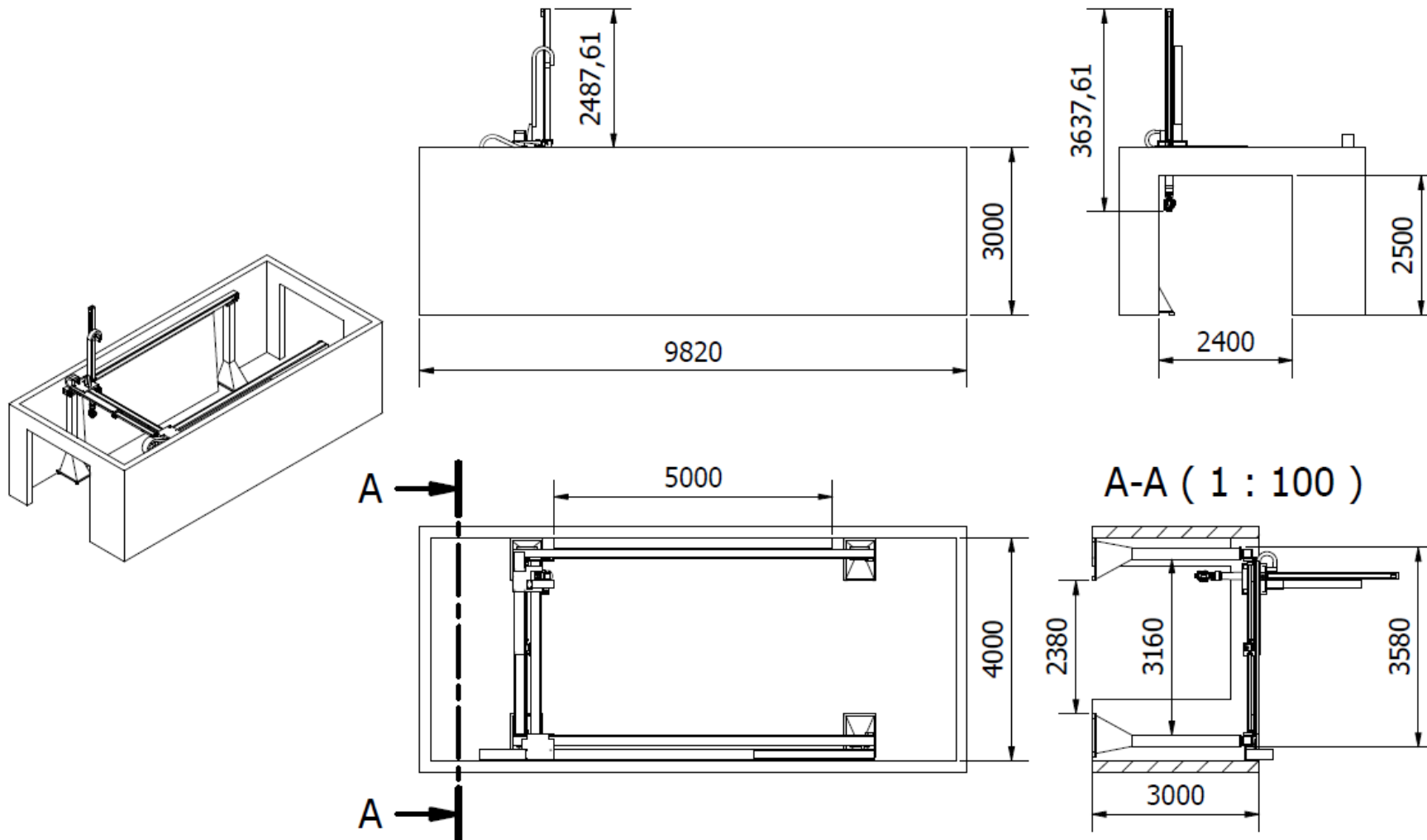


**Figura 14.** Sistema rotativo proyectando laca a la cama Match.

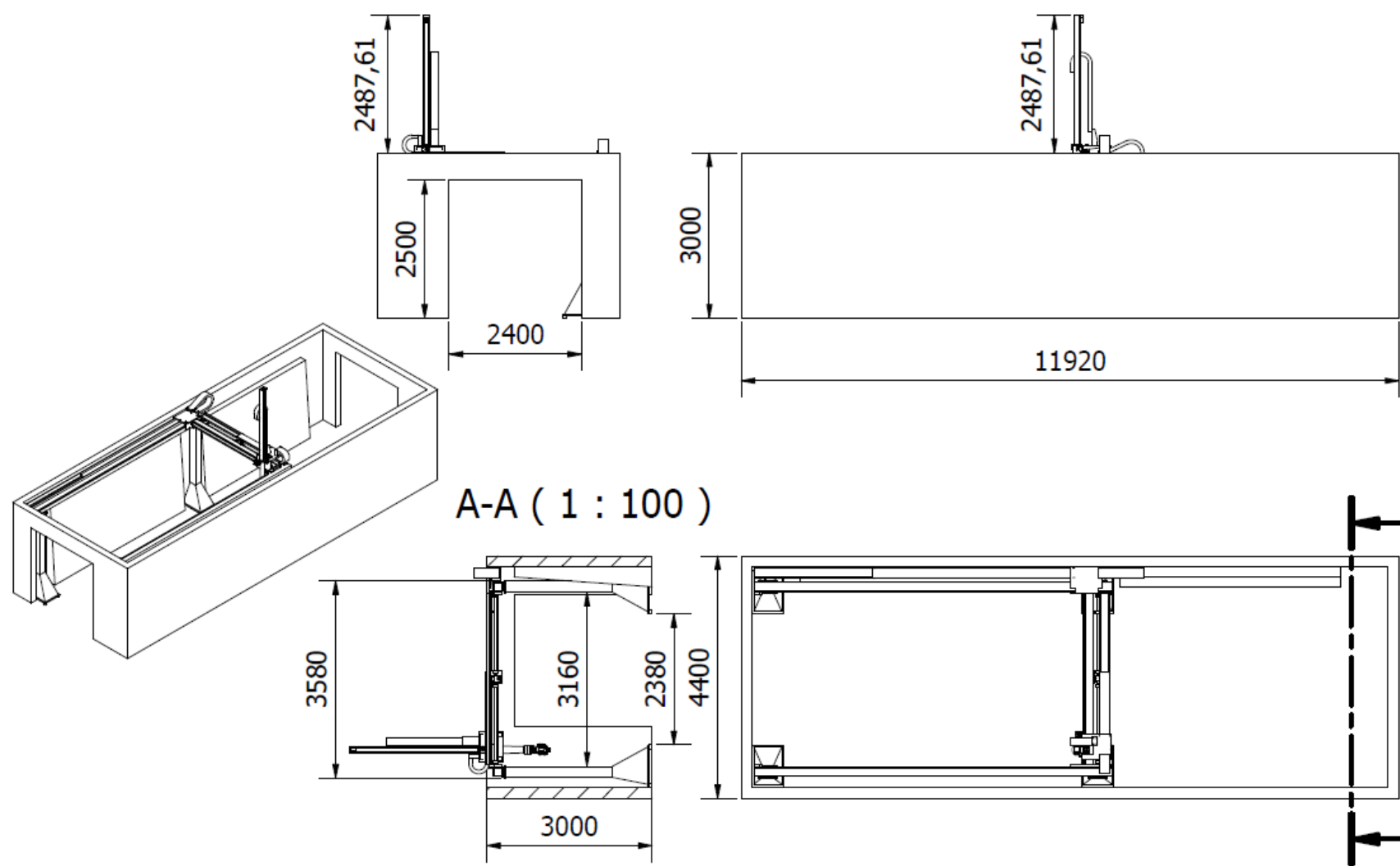


**Figura 15.** Sistema con riel proyectando laca a la cama Match.

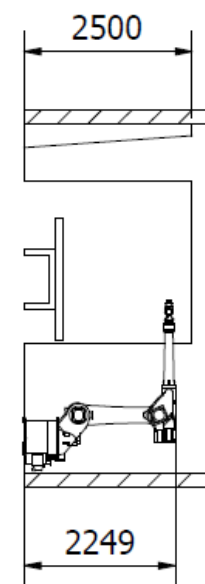
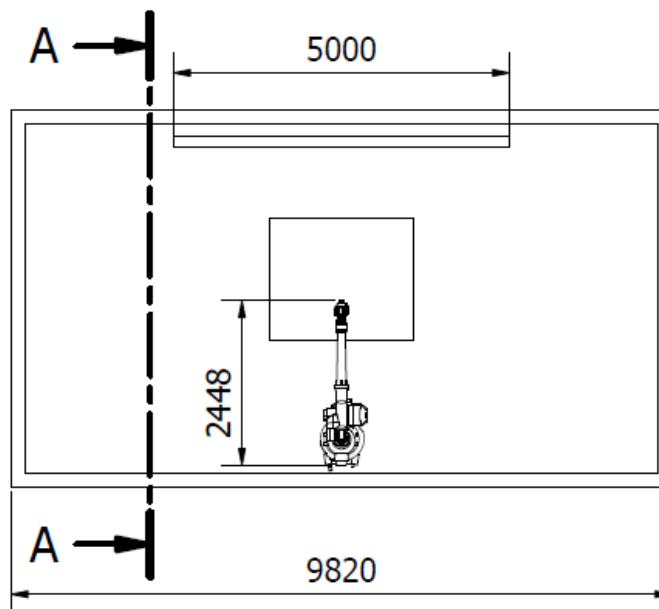
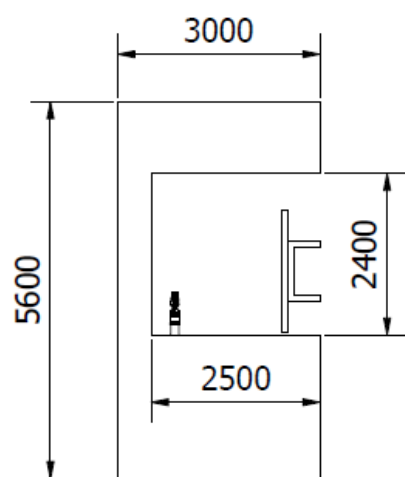
**APÉNDICE C: PLANOS DE LAS PROPUESTAS DE  
IMPLEMENTACIÓN**



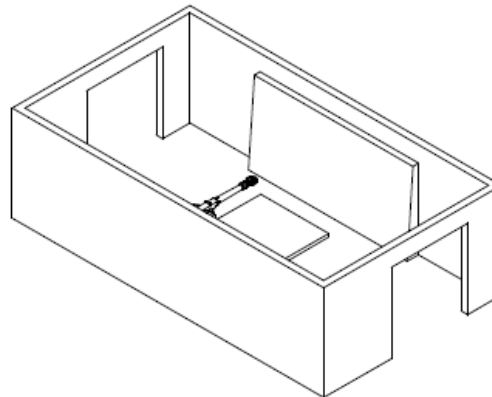
	Fecha	Nombre	Carpintería y Tapicería Internacional
Dibujado	20/05/2020	Romanella Soria	
Revisado	21/05/2020	Ing. John Calle, PhD	Universidad Politécnica Salesiana
Escala: 1:100	Planos de la implementación del robot FP-3 de la marca GÜDEL en la cabina de sellado		
			Número: 1 de 6



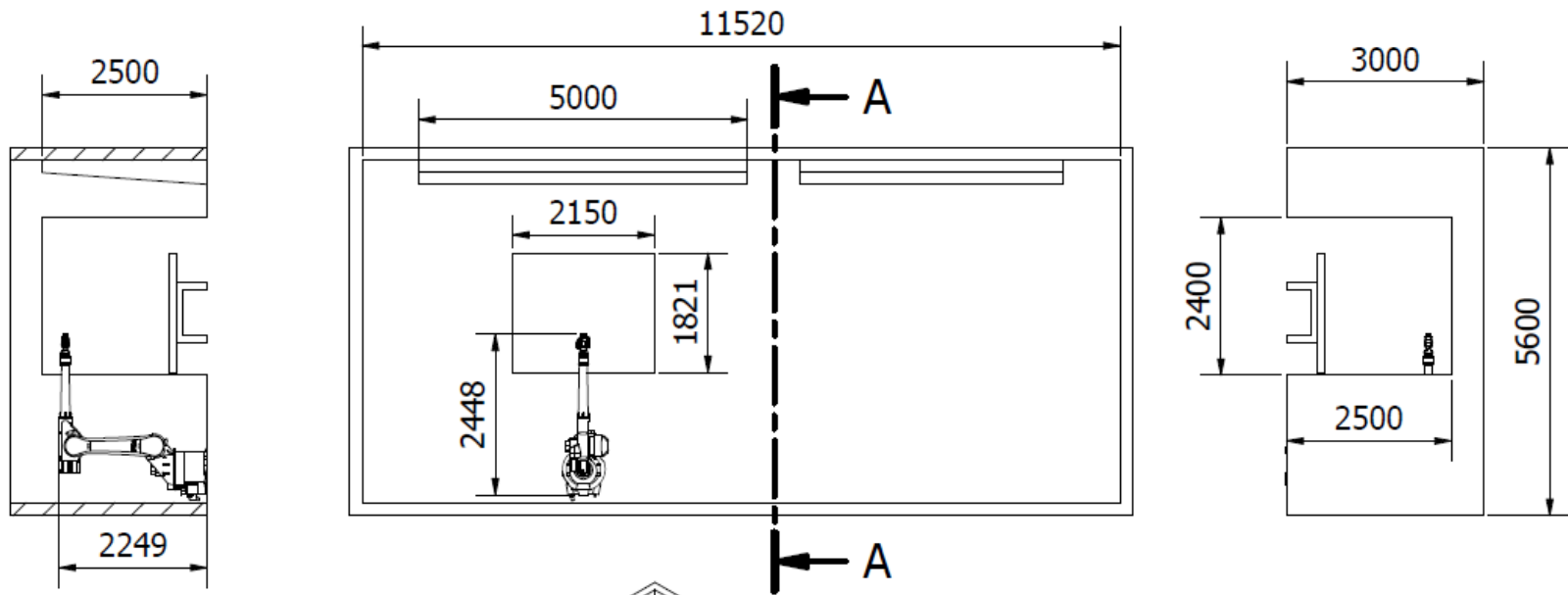
	Fecha	Nombre	Carpintería y Tapicería Internacional
Dibujado	20/05/2020	Romanella Soria	
Revisado	21/05/2020	Ing. John Calle, PhD	Universidad Politécnica Salesiana
Escala: 1:100	Planos de la implementación del robot FP-3 de la marca GÜDEL en la cabina de lacado		



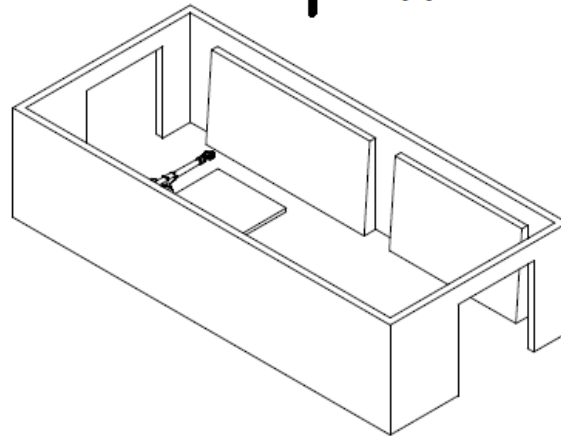
A-A ( 1 : 100 )



	Fecha	Nombre	Carpintería y Tapicería Internacional
Dibujado	20/05/2020	Romanella Soria	
Revisado	21/05/2020	Ing. John Calle, PhD	
Escala: 1:100	Planos de la implementación del robot KR30L16-2 de la marca KUKA en la cabina de sellado		Universidad Politécnica Salesiana
			Número: 3 de 6

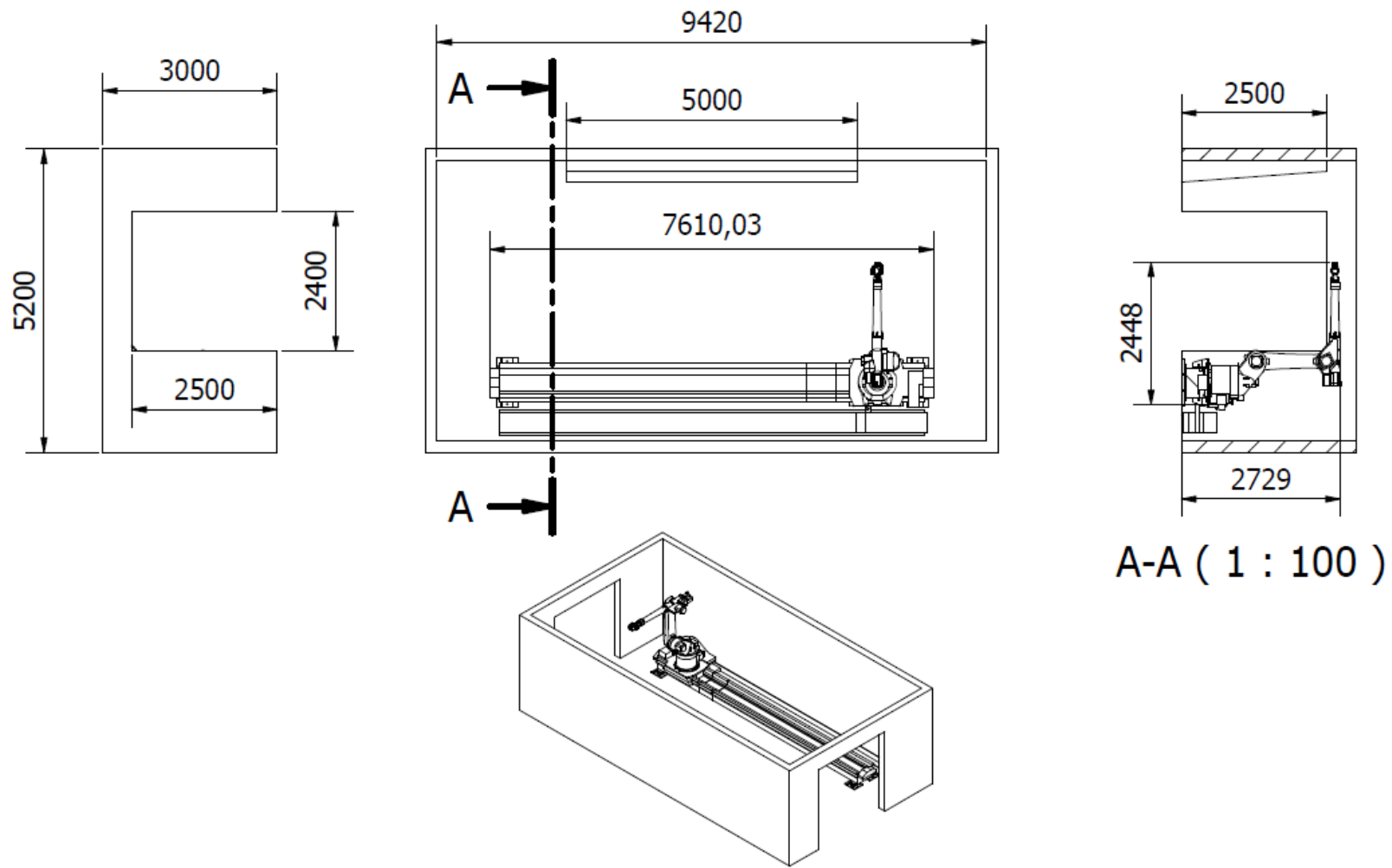


A-A ( 1 : 100 )

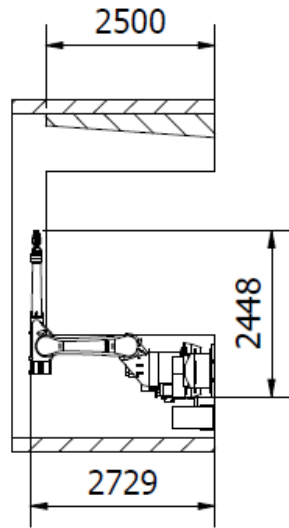


	Fecha	Nombre	Carpintería y Tapicería Internacional
Dibujado	20/05/2020	Romanella Soria	
Revisado	21/05/2020	Ing. John Calle, PhD	
Escala: 1:100	Planos de la implementación del robot KR30L16-2 de la marca KUKA en la cabina de lacado		Universidad Politécnica Salesiana
			Número: 4 de 6

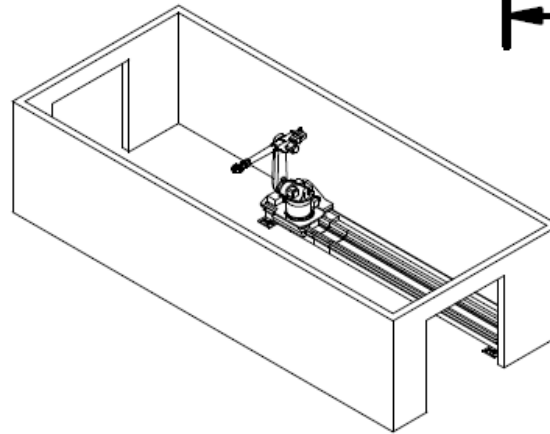
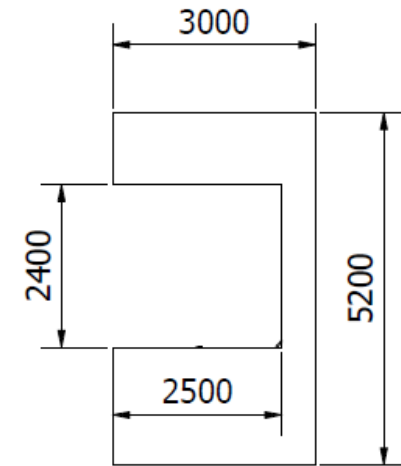
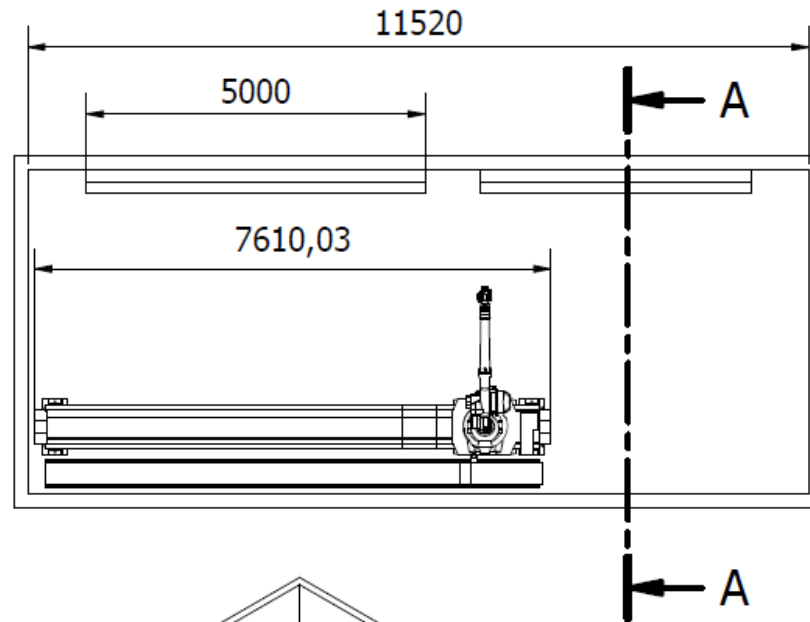




	Fecha	Nombre	Carpintería y Tapicería Internacional
Dibujado	20/05/2020	Romanella Soria	
Revisado	21/05/2020	Ing. John Calle, PhD	
Escala: 1:100	Planos de la implementación del robot KR30L16-2 y KL1000-2 de la marca KUKA en la cabina de sellado		Universidad Politécnica Salesiana
			Número: 5 de 6



A-A ( 1 : 100 )



	Fecha	Nombre	Carpintería y Tapicería Internacional
Dibujado	20/05/2020	Romanella Soria	
Revisado	21/05/2020	Ing. John Calle, PhD	
Escala: 1:100	Planos de la implementación del robot KR30L16-2 y KL1000-2 de la marca KUKA en la cabina de lacado		Universidad Politécnica Salesiana
			Número: 6 de 6

## APÉNDICE D: FLUJO DE CAJA DE LOS SISTEMAS

**Tabla 1. Flujo de caja del sistema cartesiano (Propuesta 1)**

	Años										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos totales	\$15,577,704.60	\$16,823,920.97	\$18,169,834.65	\$19,623,421.42	\$21,193,295.13	\$22,888,758.74	\$24,719,859.44	\$26,697,448.20	\$28,833,244.05	\$31,139,903.58	\$33,631,095.86
Costos y Gastos totales	\$15,091,437.40	\$16,298,752.39	\$17,602,652.58	\$19,010,864.79	\$20,531,733.97	\$22,174,272.69	\$23,948,214.51	\$25,864,071.67	\$27,933,197.40	\$30,167,853.19	\$32,581,281.45
Gastos del sistema	\$0.00	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50	\$33,121.50
Depreciación	\$0.00	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73	\$3,432.73
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20	\$488,614.34	\$530,627.83	\$576,002.39	\$625,006.92	\$677,931.82	\$735,090.70	\$796,822.30	\$863,492.42	\$935,496.15	\$1,013,260.18
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08	\$73,292.15	\$79,594.17	\$86,400.36	\$93,751.04	\$101,689.77	\$110,263.61	\$119,523.34	\$129,523.86	\$140,324.42	\$151,989.03
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74	\$472,560.20	\$510,365.02	\$551,194.22	\$595,289.75	\$642,912.93	\$694,345.97	\$749,893.65	\$809,885.14	\$874,675.95	\$944,650.02
Utilidad gravable	\$850,882.86	\$887,882.39	\$961,398.67	\$1,040,796.25	\$1,126,545.64	\$1,219,154.98	\$1,319,173.06	\$1,427,192.60	\$1,543,853.69	\$1,669,847.68	\$1,805,921.18
Impuesto a la renta causado	\$212,720.71	\$221,970.60	\$240,349.67	\$260,199.06	\$281,636.41	\$304,788.74	\$329,793.27	\$356,798.15	\$385,963.42	\$417,461.92	\$451,480.29
Utilidad neta	\$200,606.40	\$193,351.59	\$210,683.99	\$229,402.97	\$249,619.48	\$271,453.3	\$295,033.83	\$320,500.80	\$348,005.13	\$377,709.81	\$409,790.86

**Tabla 2. Flujo de caja del sistema rotativo (Propuesta 2)**

	Años										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos totales	\$15,577,704.60	\$16,823,920.97	\$18,169,834.65	\$19,623,421.42	\$21,193,295.13	\$22,888,758.74	\$24,719,859.44	\$26,697,448.20	\$28,833,244.05	\$31,139,903.58	\$33,631,095.86
Costos y Gastos totales	\$15,091,437.40	\$16,298,752.39	\$17,602,652.58	\$19,010,864.79	\$20,531,733.97	\$22,174,272.69	\$23,948,214.51	\$25,864,071.67	\$27,933,197.40	\$30,167,853.19	\$32,581,281.45
Gastos del sistema	\$0.00	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12	\$29,353.12
Depreciación	\$0.00	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87	\$1,849.87
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20	\$493,965.59	\$535,979.07	\$581,353.64	\$630,358.17	\$683,283.06	\$740,441.94	\$802,173.54	\$868,843.66	\$940,847.39	\$1,018,611.42
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08	\$74,094.84	\$80,396.86	\$87,203.05	\$94,553.73	\$102,492.46	\$111,066.29	\$120,326.03	\$130,326.55	\$141,127.11	\$152,791.71
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74	\$472,560.20	\$510,365.02	\$551,194.22	\$595,289.75	\$642,912.93	\$694,345.97	\$749,893.65	\$809,885.14	\$874,675.95	\$944,650.02
Utilidad gravable	\$850,882.86	\$892,430.95	\$965,947.23	\$1,045,344.81	\$1,131,094.20	\$1,223,703.53	\$1,323,721.62	\$1,431,741.15	\$1,548,402.25	\$1,674,396.23	\$1,810,469.73
Impuesto a la renta causado	\$212,720.72	\$229,738.37	\$248,117.44	\$267,966.84	\$289,404.18	\$312,556.52	\$337,561.04	\$364,565.92	\$393,731.20	\$425,229.69	\$459,248.07
Utilidad neta	\$200,606.41	\$190,132.38	\$207,464.77	\$226,183.75	\$246,400.26	\$268,234.08	\$291,814.61	\$317,281.58	\$344,785.91	\$374,490.59	\$406,571.64

**Tabla 3. Flujo de caja del sistema con riel (Propuesta 3)**

	Años										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ingresos totales	\$15,577,704.60	\$16,823,920.97	\$18,169,834.65	\$19,623,421.42	\$21,193,295.13	\$22,888,758.74	\$24,719,859.44	\$26,697,448.20	\$28,833,244.05	\$31,139,903.58	\$33,631,095.86
Costos y Gastos totales	\$15,091,437.40	\$16,298,752.39	\$17,602,652.58	\$19,010,864.79	\$20,531,733.97	\$22,174,272.69	\$23,948,214.51	\$25,864,071.67	\$27,933,197.40	\$30,167,853.19	\$32,581,281.45
Gastos del sistema	\$0.00	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44	\$33,316.44
Depreciación	\$0.00	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42	\$1,815.42
Utilidad del ejercicio	\$486,267.20	\$490,036.72	\$532,050.20	\$577,424.77	\$626,429.30	\$679,354.19	\$736,513.07	\$798,244.67	\$864,914.79	\$936,918.52	\$1,014,682.55
Aporte 15% a trabajadores	\$72,940.08	\$73,505.51	\$79,807.53	\$86,613.72	\$93,964.39	\$101,903.13	\$110,476.96	\$119,736.70	\$129,737.22	\$140,537.78	\$152,202.38
Gastos no deducibles locales	\$437,555.74	\$472,560.20	\$510,365.02	\$551,194.22	\$595,289.75	\$642,912.93	\$694,345.97	\$749,893.65	\$809,885.14	\$874,675.95	\$944,650.02
Utilidad gravable	\$850,882.86	\$889,091.41	\$962,607.69	\$1,042,005.27	\$1,127,754.66	\$1,220,363.99	\$1,320,382.08	\$1,428,401.61	\$1,545,062.71	\$1,671,056.69	\$1,807,130.19
Impuesto a la renta causado	\$212,720.72	\$222,272.85	\$240,651.92	\$260,501.32	\$281,938.66	\$305,091.00	\$330,095.52	\$357,100.40	\$386,265.68	\$417,764.17	\$451,782.55
Utilidad neta	\$200,606.41	\$194,258.36	\$211,590.75	\$230,309.73	\$250,526.24	\$272,360.06	\$295,940.59	\$321,407.56	\$348,911.89	\$378,616.57	\$410,697.62