



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
CELDA ROBOTIZADA PARA EL PROCESO DE PINTURA DE INODOROS A ESCALA.**

**AUTORES:**

**FALCONÍ FALCONÍ, ESTEBAN ANDRÉS**

**MALDONADO PAZMIÑO, JULIO ANDRÉS**

**DIRECTOR: ING. OROZCO BRITO, LUIS ALBERTO, MSc.**

**SANGOLQUÍ**

**2020**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *“DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA ROBOTIZADA PARA EL PROCESO DE PINTURA DE INODOROS A ESCALA.”* fue realizado por los señores *FALCONÍ FALCONÍ, ESTEBAN ANDRÉS* y *MALDONADO PAZMIÑO, JULIO ANDRÉS* el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 17 de enero de 2020

ING. LUIS ALBERTO OROZCO BRITO, MSc.

DIRECTOR

C. C.: 1710443803



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, **FALCONÍ FALCONÍ, ESTEBAN ANDRÉS**, con cédula de identidad N° 1721440897 y **MALDONADO PAZMIÑO, JULIO ANDRÉS**, con cédula de identidad N° 1719462671, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA ROBOTIZADA PARA EL PROCESO DE PINTURA DE INODOROS A ESCALA.”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 17 de enero de 2020

  
.....  
**FALCONÍ FALCONÍ ESTEBAN ANDRÉS**

C.C.: 1721440897

  
.....  
**MALDONADO PAZMIÑO JULIO ANDRÉS**

C.C.: 1719462671



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA


AUTORIZACIÓN

Nosotros, **FALCONÍ FALCONÍ, ESTEBAN ANDRÉS** y **MALDONADO PAZMIÑO, JULIO ANDRÉS** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CELDA ROBOTIZADA PARA EL PROCESO DE PINTURA DE INODOROS A ESCALA.”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 17 de enero de 2020



.....  
**FALCONÍ FALCONÍ ESTEBAN ANDRÉS**  
C.C.: 1721440897



.....  
**MALDONADO PAZMIÑO JULIO ANDRÉS**  
C.C.: 1719462671

## DEDICATORIA

A mis padres José y Pilar, por haberme dado la oportunidad de disfrutar de la vida, y haberme regalado la más valiosa familia.

A mi hermana Vale, por ser el Jing de mi Jang, el equilibrio que llega en el momento más adecuado, por ser la persona que siempre me ha sabido escuchar, y que siempre ha estado allí para apoyarme.

A mis tías: Jime, Miche, Marthy, Lupi por ser aquellas madres, que me han brindado, un hogar, todo su amor, y lecciones que me han hecho crecer, y que gracias a ellas puedo darme cuenta de lo afortunado que soy al estar a su lado.

A mi tío Edgar, por convertirse en ese papa inesperado, en ese gran amigo y ejemplo de ser humano.

A mi hermana mayor Cinty, que toda la vida me jalo las orejas, pero lo hizo por mi bien.

Esteban Falconí

Este logro profesional lo dedico a mi madre Carmen, quien ha sido, es y será el motor que impulsa mi vida. A mis hermanas Carolina y Estefanía quienes gracias a su ejemplo han formado parte de mi carácter. A mis abuelitos Laura y Antonio quienes han sido mis segundos padres y siempre me han demostrado su amor y preocupación. A mi Padre Julio quien me ha compartido muchas experiencias de vida. A mis sobrinos Martina, Renata y Josué para quienes espero ser un ejemplo. A Jessie por demostrarme su amor y paciencia cada día.

Julio Maldonado Pazmiño

## AGRADECIMIENTOS

A mis tíos Franklin y Cesar por preocuparse y ayudarme en los momentos que necesite. a mis primos Dani, Diani, Edgarito, Francis, Fernanda, Geovanna y Valentina. a mis amigos, Enrique, Andrés, Jhonny, Jandres y mi zapatito Dianita, toda mi familia por el ejemplo de unidad que siempre trasciende en nuestras vidas, al Ing. Marco Bravo por brindarme la confianza y el primer reto de mi vida profesional, al Ing. Luis Orozco por ser un gran profesor y tener una calidad humana inmejorable.

Esteban Falconí

Primeramente, doy gracias a Dios por la vida y por darme sabiduría para culminar esta etapa de mi vida. A mi madre por todo su amor y sacrificio, entregados sin medida. A mis hermanas por brindarme su apoyo incondicional en todo momento. A mi compañero de tesis Esteban por brindarme la oportunidad de compartir esta experiencia. Al Ing. Luis Orozco por su gran entrega, apoyo y paciencia. A Marco Bravo por el apoyo brindado en este tema de investigación. Y a todos quienes forman parte de mi familia quienes de alguna manera me han apoyado durante esta etapa.

Julio Maldonado Pazmiño.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
RESUMEN	xxi
ABSTRACT	xxii
CAPÍTULO I	
GENERALIDADES	1
1.1.Justificación e importancia	1
1.2.Área de influencia	1
1.3.Objetivos	1
1.3.1.Objetivos específicos	2
1.4.Descripción general del proyecto	2
1.4.1.Alcance del proyecto	3
1.4.2.Componentes mecánicos del sistema transportador para pintura.	5
1.4.3.Componentes eléctricos y electrónicos del sistema transportador.	6
1.5.Sistema de dosificación y aplicación de pintura	7
1.5.1.Accesorios	7
1.5.2.Componentes Mecánicos	7
1.5.3.Componentes Eléctricos/electrónicos	7
1.6.Manipulador robótico para pintura	8
1.7.Controlador KUKA KR C4 Compact	9
1.8.Diseño y construcción de la cabina de pintura	10
1.8.1.Componentes mecánicos de la cabina de pintura	10



1.8.2.Dimensiones de la cabina	10
1.8.3.Accesorios de la cabina de pintura	11
1.9.Integración de componentes	11
1.10.Software para implementación, análisis y simulación	12
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>ESTADO DEL ARTE</b>	13
2.1.Ejemplos de automatización del proceso de pintura	13
2.1.1.Proceso de pintura en cabinas-carrusel	13
2.1.2.Tipos de manipuladores para pintura	18
2.1.3.Rociado de pintura	19
2.1.4.Pistolas para esmalte o pintura	19
2.1.5.Ángulo de rociado y cubierta	20
2.1.6.Atomización	22
2.1.7.Suministro de fluidos	24
2.1.8.Bombas	25
2.1.9.Software de simulación	26
2.1.10.Componente visual	28
2.1.11.Scripts	29
2.1.12.Motion Control	30
2.1.13.Tipos de sistemas transportadores	31
2.1.14.Tipos de motores	33
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>DISEÑO</b>	36
3.1.Inodoro a escala	36
3.2.Metodología de pintura	37
3.2.1.Trayectoria de aplicación de pintura	37
3.3.Estructura de control	39
3.4.Sistema de dosificación y aplicación de pintura	40
3.4.1.Pistola de pintura	40
3.4.2.Bomba	43
3.4.3.Circuito de activación y control de bomba de pintura	43
3.4.4.Electroválvula AIGNEP de accionamiento	46
3.4.5.Compresor	46
3.5.Diseño del sistema transportador	47

3.5.1.Simulación	47
3.5.2.Selección de tipo de mecanismo transportador y de motores	55
3.5.3.Perfil de movimiento del sistema transportador	56
3.5.4.Dimensionamiento del mecanismo de traslación lineal del sistema transportador	71
3.5.5.Dimensionamiento del mecanismo rotacional del sistema transportador	103
3.5.6.Dimensiones del mecanismo de traslación lineal	122
3.5.7.Dimensiones del mecanismo rotacional	123
3.6.Sensores	124
3.6.1.Sensores inductivos modelo LJ12A3-4-Z/BY	124
3.7.Diseño en CAD prototipo de celda robotizada	125
3.8.Dimensionamiento del Controlador	126
3.8.1.Controlador CPU 1212C AC/DC/RLY 6ES7 212 1BE40-0XB0	127
3.8.2.Módulo de salidas digitales DO	128
3.9.Interfaz Humano Máquina	129
3.9.1.Diseño Interfaz Humano Máquina	129
3.10.Arquitectura de comunicación	133
3.11.Switch siemens CSM 1277	133
3.12.Intercambio de datos PLC-KUKA C4 compact	134
3.13.Rutina de pintura en el controlador KUKA KR C4	135
3.14.Control de suministro de pintura	138
3.15.Control de sistema de transporte	138
3.15.1.Control de trayectorias	142
<b>CAPITULO IV</b>	
<b>IMPLEMENTACIÓN PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	143
4.1.Implementación de los componentes mecánicos	143
4.1.1.Implementación mecanismo de traslación lineal	143
4.1.2.Implementación del mecanismo rotacional	144
4.2.Implementación de componentes Eléctricos y Electrónicos	145
4.2.1.Implementación de drivers	146
4.2.2.Conexión de sensores	147
4.2.3.Implementación de los Circuitos de Control de la bomba.	147
4.3.Implementación de los componentes de la Celda	148
4.4.Pruebas de funcionamiento del sistema transportador.	153

4.4.1.Pruebas de funcionamiento del mecanismo de traslación lineal.	153
4.4.2.Pruebas de velocidad óptima del mecanismo de traslación lineal.	155
4.4.3.Pruebas de funcionamiento del mecanismo rotacional	155
4.5.Pruebas de pintura	156
4.5.1.Tipos de recubrimiento	156
4.5.2.Pruebas de circuitos de control de la bomba	159
4.5.3.Caracterización pintura	160
4.6.Implementación programación trayectorias	162
4.6.1.Implementación HMI	162
4.6.2.Implementación rutina de pintura	163
4.7.Pruebas en la celda robotizada	164
4.7.1.Pruebas de sensores como finales de carrera	164
4.7.2.Prueba de fallo de energía	165
4.7.3.Prueba de botón de paro de emergencia	165
4.7.4.Pruebas de metodologías para programación de trayectorias	166
CAPITULO V	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	170
CAPITULO VI	
BIBLIOGRAFÍA	175
ANEXOS	177

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Robots especializados en pintura marcas KUKA, ABB, Yaskawa</i> .....	19
<b>Tabla 2.</b> <i>Tamaño de gota a partir de boquillas atomizadoras a base de aire</i> .....	22
<b>Tabla 3.</b> <i>Características de patrón de aspersión y aplicaciones según tipo de boquilla</i> .....	23
<b>Tabla 4.</b> <i>Software de simulación disponible en el mercado</i> .....	28
<b>Tabla 5.</b> <i>Ventajas y desventajas de mecanismo accionado por tornillo sin fin</i> .....	32
<b>Tabla 6.</b> <i>Ventajas y desventajas de mecanismo accionado por banda dentada</i> .....	33
<b>Tabla 7.</b> <i>Ventajas y desventajas de un servomotor</i> .....	34
<b>Tabla 8.</b> <i>Ventajas y desventajas de un motor a pasos</i> .....	35
<b>Tabla 9.</b> <i>Metodología propuesta para pintar sanitarios</i> .....	38
<b>Tabla 10.</b> <i>Características aerógrafo Paasche</i> .....	42
<b>Tabla 11.</b> <i>Características de bomba LXDQ</i> .....	43
<b>Tabla 12.</b> <i>Características del abanico de pintura a partir del apartado 2.1.5</i> .....	53
<b>Tabla 13.</b> <i>Parámetros para diseño de sistema</i> .....	55
<b>Tabla 14.</b> <i>Componentes del torque requerido por el motor para desplazar una carga</i> .....	58
<b>Tabla 15.</b> <i>Determinación de cantidad de pulsos para lograr perfil de movimiento</i> .....	59
<b>Tabla 16.</b> <i>Cálculo de dimensiones correspondiente a geometría de piñón y engrane</i> .....	67
<b>Tabla 18.</b> <i>Inercias necesarias para el cálculo, del torque del motor</i> .....	68
<b>Tabla 19.</b> <i>Selección de motores</i> .....	70
<b>Tabla 20.</b> <i>Pines para la conexión de la etapa de control</i> .....	71
<b>Tabla 20.</b> <i>Distribución de fuerzas respecto a posicionamiento de la carga</i> .....	81
<b>Tabla 21.</b> <i>Propiedades de nylon</i> .....	104
<b>Tabla 22.</b> <i>Parámetros para el análisis de esfuerzos en engranes</i> .....	106

<b>Tabla 23.</b> <i>Factores para el cálculo de resistencia por flexión</i> .....	108
<b>Tabla 24.</b> <i>Desarrollo de análisis de deflexión eje rotacional.</i> .....	117
<b>Tabla 25.</b> <i>Características de sensor inductivo</i> .....	124
<b>Tabla 26.</b> <i>Número de entradas y salidas necesarias para el controlador</i> .....	126
<b>Tabla 27.</b> <i>Características del PLC siemens s71200</i> .....	127
<b>Tabla 28.</b> <i>Características del módulo de salidas digitales</i> .....	129
<b>Tabla 29.</b> <i>Características de pantalla táctil</i> .....	132
<b>Tabla 30.</b> <i>Características Switch</i> .....	134
<b>Tabla 31.</b> <i>Instrucciones desde el controlador KRC4 Compact al PLC activas bomba.</i> .....	138
<b>Tabla 32.</b> <i>Configuración de Motion Control para cada eje</i> .....	140
<b>Tabla 33.</b> <i>Instrucciones PLC-Sistema transportador</i> .....	140
<b>Tabla 34.</b> <i>Comandos del controlador KUKA KR C4 Compact al PLC.</i> .....	141
<b>Tabla 35.</b> <i>Funciones desde el PLC hacia el controlador KUKA KRC4 Compact.</i> .....	142
<b>Tabla 36.</b> <i>Escala de evaluación del desempeño del mecanismo de traslación lineal.</i> .....	154
<b>Tabla 37.</b> <i>Desempeño del mecanismo de traslación lineal.</i> .....	154
<b>Tabla 38.</b> <i>Velocidad del sistema transportador considerando variables reales</i> .....	155
<b>Tabla 39.</b> <i>Equilibrio del plato en función de la velocidad de posicionamiento.</i> .....	155
<b>Tabla 40.</b> <i>Aplicación de distintos tipos de recubrimiento a inodoro impreso en 3D</i> .....	157
<b>Tabla 41.</b> <i>Proceso para aplicación de pintura al thinner</i> .....	157
<b>Tabla 42</b> <i>Proceso para aplicación de pintura al agua</i> .....	158
<b>Tabla 43.</b> <i>Conclusiones tras aplicación de distintos tipos de recubrimiento</i> .....	158
<b>Tabla 44.</b> <i>Cantidad de pintura respecto al valor de la resistencia del circuito</i> .....	159
<b>Tabla 45.</b> <i>Densidad base utilizada para el proceso de pintura de inodoros a escala</i> .....	160
<b>Tabla 46.</b> <i>Tamaño de abanico [mm] VS Velocidad de aplicación [m/s]</i> .....	161

<b>Tabla 47.</b> <i>Comparación de abanicos a distintas distancias y velocidad constante 0.05 [m/s]...</i>	161
<b>Tabla 48.</b> <i>Desempeño de los fines de carrera al desactivar motor.....</i>	165
<b>Tabla 49.</b> <i>Comportamiento de la celda robotizada respecto a fallos de energía .....</i>	165
<b>Tabla 50</b> <i>Comportamiento de la celda robotizada tras pulsar el botón de paro. ....</i>	166
<b>Tabla 51.</b> <i>Métricas de evaluación de la metodología de programación.....</i>	168
<b>Tabla 52.</b> <i>Evaluación de las metodologías de programación .....</i>	169

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i><b>Figura 1.</b></i> Esquema general del prototipo de celda robotizada del proceso de pintura. ....	3
<i><b>Figura 2.</b></i> Vista lateral del espacio de trabajo. ....	4
<i><b>Figura 3.</b></i> Vista frontal del espacio de trabajo. ....	4
<i><b>Figura 4.</b></i> Componentes mecánicos del proyecto de titulación. ....	5
<i><b>Figura 5.</b></i> Vista lateral y frontal del sistema transportador. ....	6
<i><b>Figura 6.</b></i> Componentes eléctricos y electrónicos del sistema transportador. ....	6
<i><b>Figura 7.</b></i> Componentes mecánicos del sistema de dosificación y aplicación de pintura. ....	7
<i><b>Figura 8.</b></i> Componentes eléctricos y electrónicos del sistema de dosificación de pintura. ....	8
<i><b>Figura 9.</b></i> KUKA KR3 R540. ....	8
<i><b>Figura 10.</b></i> Área de trabajo KUKA KR3 R540. ....	9
<i><b>Figura 11.</b></i> Interconexión del Controlador C4. ....	9
<i><b>Figura 12.</b></i> Vista lateral y frontal de prototipo de celda robotizada. ....	10
<i><b>Figura 13.</b></i> Accesorios de la Cabina de Pintura. ....	11
<i><b>Figura 14.</b></i> Componentes del Panel de Control. ....	11
<i><b>Figura 15.</b></i> Integración de celda robotizada. ....	12
<i><b>Figura 16.</b></i> Proceso de pintura robotizado en cabinas. ....	14
<i><b>Figura 17.</b></i> Layout planta de pintura Setec Group. ....	16
<i><b>Figura 18.</b></i> Robot centralizado para proceso de pintura. ....	17
<i><b>Figura 19.</b></i> Manipuladores robóticos para el proceso de pintura. ....	18
<i><b>Figura 20.</b></i> Funcionamiento sistema de pulverización. ....	19
<i><b>Figura 21.</b></i> Pistola de rociado para robots. ....	20
<i><b>Figura 22.</b></i> Cobertura de pintura en función de la distancia. ....	21

<i>Figura 23.</i> Cobertura de superficie en función de la distancia de aplicación y ángulo.....	21
<i>Figura 24.</i> Aplicación de esmalte sobre porcelana sanitaria.....	22
<i>Figura 25.</i> Tamaño de partícula en función de presión y caudal .....	23
<i>Figura 26.</i> Comparación de robots de pintura con muñecas huecas y sólida.....	24
<i>Figura 27.</i> Bomba de desplazamiento positivo.....	25
<i>Figura 28.</i> Bombas centrífugas.....	25
<i>Figura 29.</i> Celda robotizada simulada en el software de ABB Robot Studio.....	27
<i>Figura 30.</i> Simulación de proceso KUKA SIM PRO 3.0.....	28
<i>Figura 31.</i> Componentes modelados en KUKA SIM PRO 3.0.....	29
<i>Figura 32.</i> Script de Python para la configuración de mecanismos.....	29
<i>Figura 33.</i> Configuración del tipo de control.....	30
<i>Figura 34.</i> Configuración de salidas para el control de ejes.....	31
<i>Figura 35.</i> Mecanismo de transmisión de movimiento tornillo sin fin.....	31
<i>Figura 36.</i> Transmisión de movimiento lineal mediante banda dentada.....	32
<i>Figura 37.</i> Servo motor.....	33
<i>Figura 38.</i> Motor a pasos.....	34
<i>Figura 39.</i> Inodoro genérico a escala.....	36
<i>Figura 40.</i> Sistema de control del prototipo de pintura.....	39
<i>Figura 41.</i> Diseño del accionador del aerógrafo.....	40
<i>Figura 42.</i> Gripper neumático SMC.....	41
<i>Figura 43.</i> Aerógrafo tipo Paasche.....	41
<i>Figura 44.</i> Acople para aerógrafo Paasche.....	42
<i>Figura 45.</i> Bomba utilizada para la succión de pintura.....	43
<i>Figura 46.</i> Integrado regulador de voltaje.....	44



<b>Figura 47.</b> Esquema del circuito optoacoplador utilizado para accionar la bomba. ....	44
<b>Figura 48.</b> Circuito regulador de potencia Dimmer .....	45
<b>Figura 49.</b> Circuito de activación y regulación de potencia para bomba de pintura. ....	45
<b>Figura 50.</b> Electroválvula AIGNEP. ....	46
<b>Figura 51.</b> Compresor de las instalaciones del laboratorio. ....	46
<b>Figura 52.</b> Simulación inicial del proceso de pintura de inodoros. ....	47
<b>Figura 53.</b> Mecanismo de tres eslabones.....	48
<b>Figura 54.</b> Elementos modelados en el simulador, a partir de un mecanismo de tres eslabones. .	48
<b>Figura 55.</b> Lógica de programación utilizada para producir movimiento lineal.....	50
<b>Figura 56.</b> Lógica de programación utilizada para producir movimiento rotacional.....	51
<b>Figura 57.</b> Detección de colisiones. ....	52
<b>Figura 58.</b> Indeterminación del manipulador. ....	52
<b>Figura 59.</b> Aplicación de pintura utilizando Painting Tool.....	53
<b>Figura 60.</b> Simulación de cables de fluidos, durante la ejecución de la rutina de pintura. ....	54
<b>Figura 61.</b> Perfil de movimiento de actuadores. ....	56
<b>Figura 62.</b> Variación de torque respecto al perfil de movimiento del sistema.....	58
<b>Figura 63.</b> Gráfica de reducción de torque respecto de velocidad. ....	59
<b>Figura 64.</b> Fuerza de fricción producida gracias al avance de la carga.....	64
<b>Figura 65.</b> Driver de motor a pasos HY-DIV268N-5A.....	71
<b>Figura 66.</b> Ubicación del centro de gravedad del plato.....	72
<b>Figura 67.</b> Distribución de carga en mecanismo de traslación lineal.....	73
<b>Figura 68.</b> Perfil de movimiento de la carga ambas direcciones.....	74
<b>Figura 69.</b> Sumatoria de fuerzas proucidas dentro de un rodamiento.....	74
<b>Figura 70.</b> Distribución de cargas viga de soporte 1 .....	82

<b>Figura 71.</b> Diagrama de cortantes y momentos viga de soporte 1 .....	84
<b>Figura 72.</b> Distribución de cargas en viga de soporte 2. ....	86
<b>Figura 73.</b> Diagrama de cortantes y de momentos viga de soporte 2 .....	88
<b>Figura 74.</b> Rodamiento lineal.....	91
<b>Figura 75.</b> Catálogo de rodamientos lineales .....	92
<b>Figura 76.</b> Tabla de factor de contacto.....	93
<b>Figura 77.</b> Factor que depende de la distribución de los rodamientos. ....	93
<b>Figura 78.</b> Tabla factor de probabilidad de fallo.....	95
<b>Figura 79.</b> Factor de dureza.....	95
<b>Figura 80.</b> Factor de temperatura. ....	96
<b>Figura 81.</b> Factor de condiciones de trabajo. ....	96
<b>Figura 82.</b> Generación de fuerza de empuje.....	97
<b>Figura 83.</b> Carga axial generada durante el recorrido de la carga.....	98
<b>Figura 84.</b> Tabla de coeficientes de fricción en función. ....	98
<b>Figura 85.</b> Eficiencia en función del ángulo del tornillo y el coeficiente de fricción .....	99
<b>Figura 86.</b> Tipos de soporte para tornillo sin fin respecto a soportes. ....	100
<b>Figura 87.</b> Comportamiento del tornillo a velocidad crítica. ....	101
<b>Figura 88.</b> Gráfica para determinar la velocidad rotacional crítica.....	102
<b>Figura 89.</b> Tabla de eficiencias del tornillo sin fin.....	103
<b>Figura 90.</b> Fuerza en engranes rectos. ....	105
<b>Figura 91.</b> Rodamiento de rodillos cónicos de una hilera. ....	111
<b>Figura 92.</b> Esquema del conjunto eje-rodamiento-engrane.....	112
<b>Figura 93.</b> Fuerzas transmitidas del engrane al eje. ....	112
<b>Figura 94.</b> Eje seccionado en voladizo. Dimensiones en mm.....	113

<i>Figura 95.</i> Diagrama de Cuerpo libre del eje. ....	114
<i>Figura 96.</i> Método de cortes para encontrar el momento flector. ....	115
<i>Figura 97.</i> Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector. ....	116
<i>Figura 98.</i> Vista lateral del eje .....	119
<i>Figura 99.</i> Análisis de Compresión.....	120
<i>Figura 100.</i> Mecanismo de traslación lineal del sistema transportador [mm]. ....	122
<i>Figura 101.</i> Altura en [mm] del mecanismo de traslación lineal . ....	122
<i>Figura 102.</i> Alto y ancho del mecanismo rotacional en [mm]. ....	123
<i>Figura 103.</i> Base del mecanismo rotacional [mm]. ....	123
<i>Figura 104.</i> Sensor Inductivo. ....	124
<i>Figura 105.</i> Ensamble final del prototipo de celda robotizada.....	125
<i>Figura 106.</i> PLC Siemens S71200 1212C AC/DC/RLY. ....	127
<i>Figura 107.</i> Signal Board 4DO 5V DC. ....	128
<i>Figura 108.</i> Ventanas de navegación del usuario.....	129
<i>Figura 109.</i> HMI modo automático del control de proceso de pintura de inodoros a escala. ....	130
<i>Figura 110.</i> Ventana de calibración manual.....	131
<i>Figura 111.</i> HMI siemens.....	132
<i>Figura 112.</i> Arquitectura de comunicación de la celda robotizada. ....	133
<i>Figura 113.</i> Switch siemens de 4 puertos.....	134
<i>Figura 114.</i> Comunicación entre dispositivos.....	135
<i>Figura 115.</i> Rutina utilizada para la pintura del inodoro. ....	136
<i>Figura 116.</i> Diagrama de flujo Instrucción estrategia de pintura. ....	137
<i>Figura 117.</i> Accionamiento bomba. ....	138
<i>Figura 118.</i> Configuración de pulsos para realizar el avance del actuador.....	139

<i>Figura 119.</i> Configuración dinámica de ejes.....	139
<i>Figura 120.</i> Esquema de envío de instrucciones desde KUKA KR C4 compact a PLC.....	141
<i>Figura 121.</i> Programación de trayectorias en KUKA SIM PRO 3.0. ....	142
<i>Figura 122.</i> Ensamble del transportador lineal. ....	143
<i>Figura 123.</i> Ensamble del motor a la placa. ....	144
<i>Figura 124.</i> Ensamble del plato con el engrane. ....	144
<i>Figura 125.</i> Ensamble del plato con el engrane ....	145
<i>Figura 126.</i> Implementación del módulo al PLC. ....	145
<i>Figura 127.</i> Conexión de drivers de los motores al módulo de salidas digitales. ....	146
<i>Figura 128.</i> Implementación de los sensores inductivos.....	147
<i>Figura 129.</i> Implementación de circuitos de control para la bomba. ....	147
<i>Figura 130.</i> Traje protector del robot .....	148
<i>Figura 131.</i> Base de madera. ....	148
<i>Figura 132.</i> Montaje del transportador lineal en la mesa de trabajo. ....	149
<i>Figura 133.</i> Montaje del mecanismo rotacional sobre el transportador lineal. ....	149
<i>Figura 134.</i> Riel para cables del motor. ....	150
<i>Figura 135.</i> Acoples para mangueras. ....	150
<i>Figura 136.</i> Cajas de los componentes de la bomba. ....	151
<i>Figura 137.</i> Soporte del aerógrafo.....	151
<i>Figura 138.</i> Canaletas para cables.....	152
<i>Figura 139.</i> Ensamble de la estructura de la cabina. ....	152
<i>Figura 140.</i> Celda Robotizada de Pintura. ....	153
<i>Figura 141.</i> Medición de densidad de pintura utilizada. ....	160
<i>Figura 142.</i> Ventana de control automático implementada en el Panel View. ....	162

<b>Figura 143.</b> Ventana de calibración manual implementada en el Panel View.....	163
<b>Figura 144.</b> Implementación código para rutina de pintura Software.....	163
<b>Figura 145.</b> Código para pintar, cargado al controlado del robot desde .....	164
<b>Figura 146.</b> Programación de rutina de pintura en base cero. ....	166
<b>Figura 147.</b> Resultados de la superficie del inodoro pintada en base cero. ....	167
<b>Figura 148.</b> Programación de rutina de pintura en base móvil. ....	167
<b>Figura 149.</b> Resultados de la superficie del Inodoro pintado en base móvil.....	168

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en el diseño, simulación e implementación de un prototipo de celda robotizada para el proceso de pintura de inodoros a escala. Para esto se investigó procesos similares a nivel industrial, teniendo como resultado que actualmente no se realiza la pintura de inodoros mientras estos se trasladan y rotan. Se procede con el diseño de: un mecanismo de traslación lineal y un mecanismo de rotación que conforman el sistema transportador del inodoro. Mediante el uso de sensores, actuadores y un panel de control se integró este sistema, para una posterior interacción con el controlador KUKA KR C4 compact y el manipulador robótico KUKA KR3 R540, disponibles en el Laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. Después se realizó el montaje e implementación del suministro de pintura, el cual consta de una bomba, mangueras y un aerógrafo, como elemento dosificador. Posteriormente se utilizó el software KUKA SIM PRO 3.0 para modelar los componentes de la celda y generar las trayectorias de pintura. Finalmente se implementaron los componentes de la celda y se realizaron pruebas individuales y en conjunto.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **SISTEMA TRANSPORTADOR**
- **KUKA SIM PRO 3.0**
- **PINTURA**
- **INODOROS**

## **ABSTRACT**

The present titling work consists in the design, simulation and implementation of a prototype robotic cell for the process of painting toilets on a scale. For this purpose, similar processes were investigated at the industrial level, resulting in the fact that currently the painting of toilets is not carried out while they are moved and rotated. We proceed with the design of: a linear translation mechanism and a rotation mechanism that constitute the toilet conveyor system. Through the use of sensors, actuators and a control panel the system was integrated, for the subsequent interaction with the KUKA KR C4 compact controller and the KUKA KR3 R540 robotic manipulator, components which are available in the Robotics and PLC Laboratory of the Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. then the assembly and implementation of the paint supply was carried out, which consists of a pump, hoses and an airbrush, as a dosing element. Later, the KUKA SIM PRO 3.0 software was used to model the cell components and for generate the paint paths. Finally, the cell components were implemented and individual and joint tests were performed.

### **KEYWORDS:**

- **CONVEYOR SYSTEM**
- **KUKA SIM PRO 3.0**
- **PAINT**
- **TOILET**

## **CAPÍTULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1. Justificación e importancia**

En el competitivo mercado actual, son cada vez más las empresas que optan por automatizar sus procesos con el fin de ser más rentables, eficientes y productivas. La automatización es una prioridad dentro de las industrias para hacer más fácil y efectivo el desarrollo de productos. Actualmente en el Ecuador el proceso de pintura de inodoros se ejecuta de manera manual, por lo tanto, se contempla realizar un prototipo, en donde se combina el funcionamiento de un sistema de transporte lineal y rotacional, juntamente con un manipulador robótico, que realice el proceso de pintura de manera continua, con el fin de probar y analizar parámetros de interés, para automatizar este tipo de procesos.

#### **1.2. Área de influencia**

El proyecto está destinado principalmente a simular procesos de pintura en serie, utilizando un manipulador robótico con el fin de desarrollar alternativas para automatizar este tipo de procesos en el área industrial.

#### **1.3. Objetivos**

Implementar un prototipo de celda robotizada de pintura para la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, con el fin de obtener un acabado superficial uniforme en inodoros a escala.



### 1.3.1. Objetivos específicos

- Diseñar y construir el sistema transportador para generar el movimiento lineal y rotacional de un inodoro a escala.
- Diseñar y construir la cabina de pintura, con el propósito de proteger el entorno de trabajo.
- Integrar eléctrica y mecánicamente: instrumentación, actuadores y panel de control con el controlador del manipulador robótico y el sistema transportador.
- Programar un controlador lógico programable (PLC, con sus siglas en inglés) y el controlador KUKA KR C4 compact, para la sincronización del movimiento del manipulador robótico KUKA KR3 R540 con el sistema transportador que permita pintar un inodoro a escala.

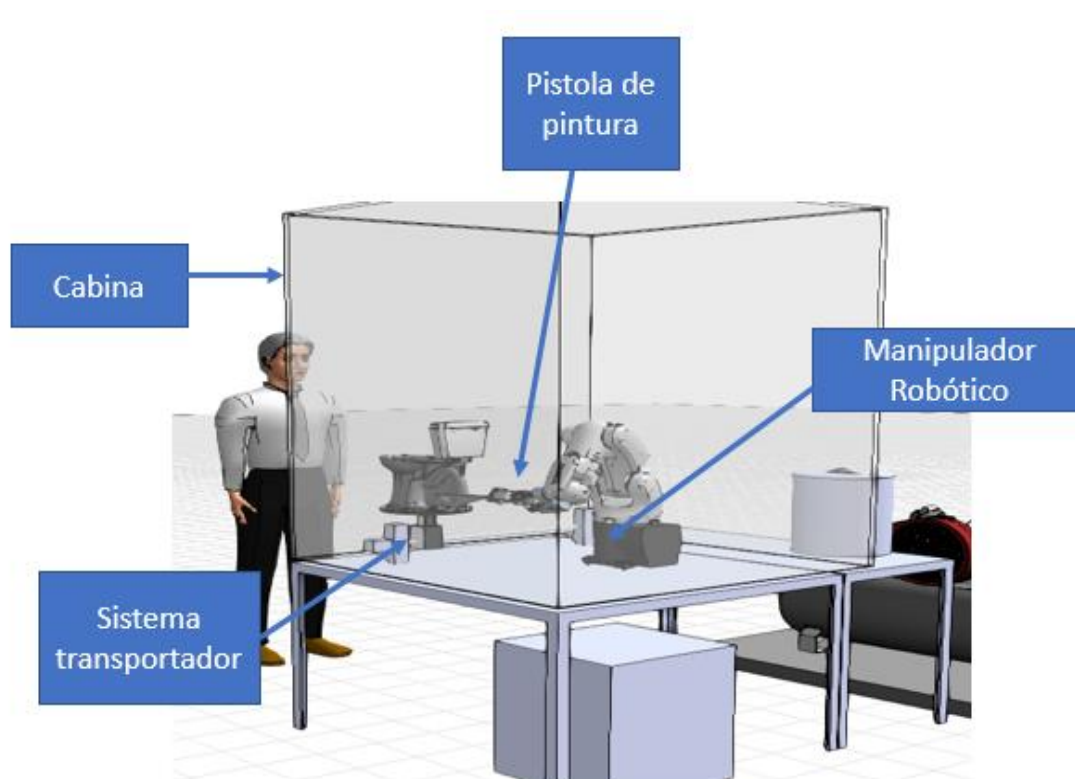
### 1.4. Descripción general del proyecto

El proyecto de investigación consiste en el diseño, simulación, construcción y puesta en marcha de un prototipo de celda robotizada, para el proceso de pintura de inodoros a escala en serie, compuesto por tres elementos, un sistema transportador encargado de desplazar linealmente y de manera rotacional a un inodoro a escala sobre su propio eje. Además, el prototipo constará con una cabina para pintura construida con la finalidad de evitar la contaminación del entorno de trabajo y un manipulador robótico que pintará el inodoro.

Se realizará el control e integración de los componentes del prototipo a través del uso de un PLC, que se interconectará con el: manipulador robótico, sistema transportador, cabina, sistema de dosificación y aplicación de pintura, y como interfaz de monitoreo y control, se utilizará un panel de mando virtual.

### 1.4.1. Alcance del proyecto

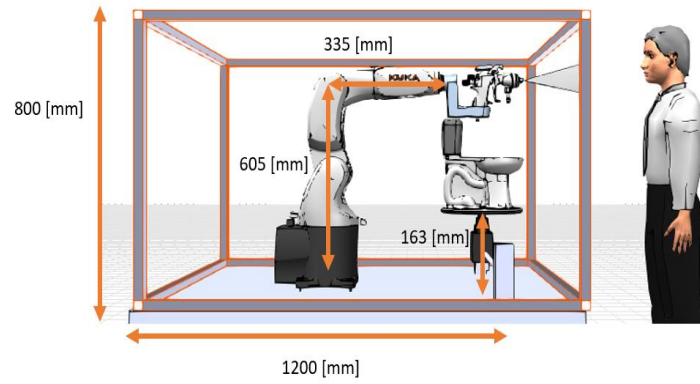
El esquema general del prototipo de celda robotizada del proceso de pintura en serie se muestra en la Figura 1.



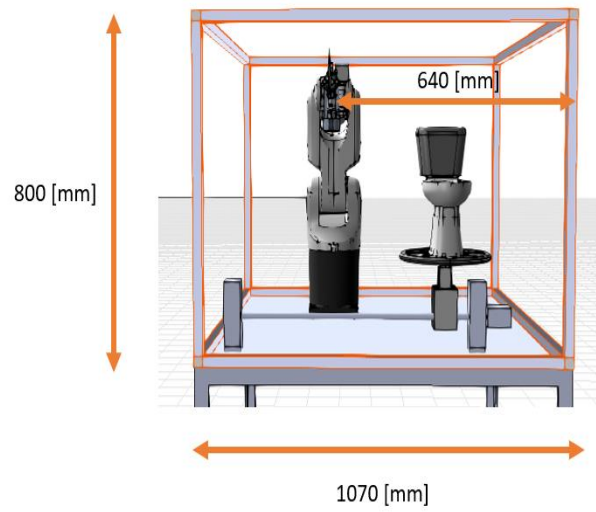
**Figura 1.** Esquema general del prototipo de celda robotizada del proceso de pintura.

#### ***Espacio de trabajo de la celda robotizada***

En las Figura 2 y 3 se muestra el espacio de trabajo del prototipo de celda robotizada del proceso de pintura dentro del Laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.



**Figura 2.** Vista lateral del espacio de trabajo.



**Figura 3.** Vista frontal del espacio de trabajo.

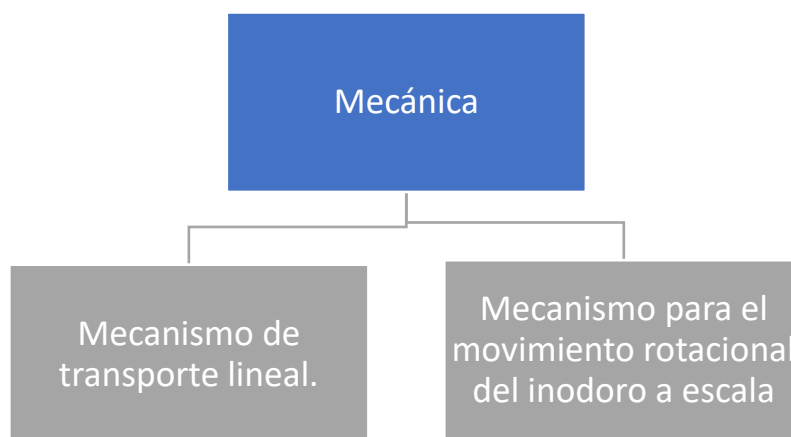
A continuación, se detalla las partes que constituyen la celda robotizada:

- Sistema transportador: lineal y rotacional.
- Sistema de dosificación y aplicación de pintura.
- Manipulador robótico para pintura.
- Cabina de pintura.
- Panel de control-sistema de integración.

#### 1.4.2. Componentes mecánicos del sistema transportador para pintura.

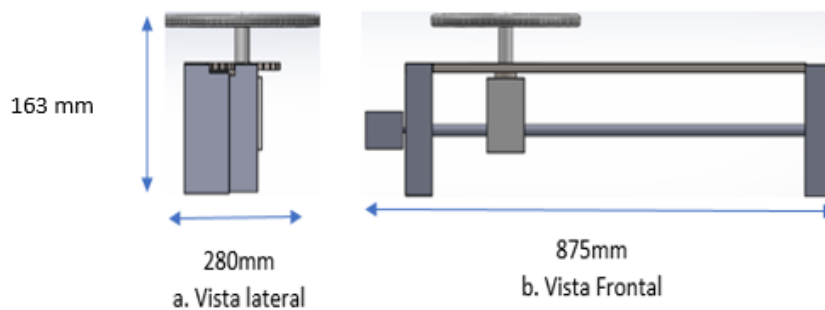
- Mecanismo de transporte lineal: mecanismo que genera movimiento lineal.
- Mecanismo para el control del movimiento rotacional: mecanismo necesario para controlar el giro del soporte para el inodoro a escala.

En la Figura 4, se muestra los componentes mecánicos del sistema transportador del proyecto de titulación.



**Figura 4.** Componentes mecánicos del proyecto de titulación.

Las dimensiones preliminares del sistema transportador se muestran en la Figura 5.

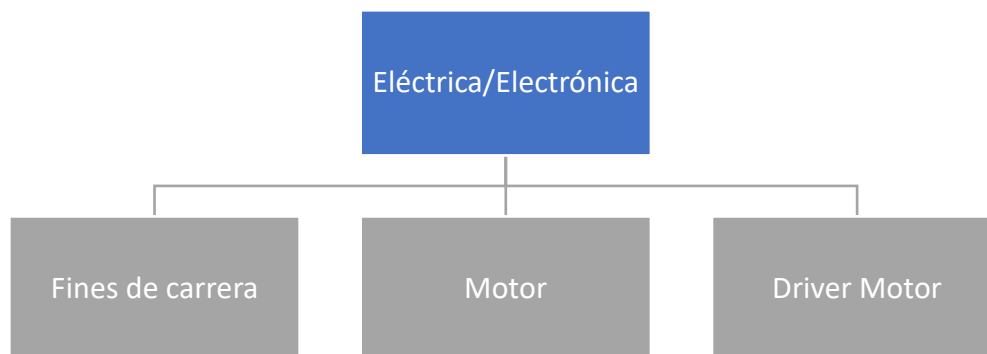


**Figura 5.** Vista lateral y frontal del sistema transportador.

#### 1.4.3. Componentes eléctricos y electrónicos del sistema transportador.

- Fines de carrera.
- Motores.
- Driver motor.

En la Figura 6, se muestra los componentes eléctricos y electrónicos del sistema transportador del proyecto de titulación.



**Figura 6.** Componentes eléctricos y electrónicos del sistema transportador.

## 1.5. Sistema de dosificación y aplicación de pintura

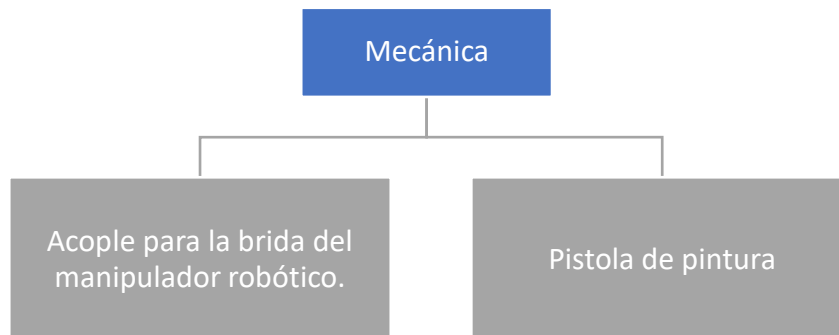
### 1.5.1. Accesorios

- Tanque de almacenamiento: lugar en donde se almacena la pintura.
- Mangueras: elementos utilizados para transportar pintura y aire.

### 1.5.2. Componentes Mecánicos

- Acople mecánico para la brida del manipulador robótico: Mecanismo de sujeción de la herramienta.
- Pistola de pintura.

En la Figura 7 se describen los componentes mecánicos del sistema de dosificación y aplicación de pintura.

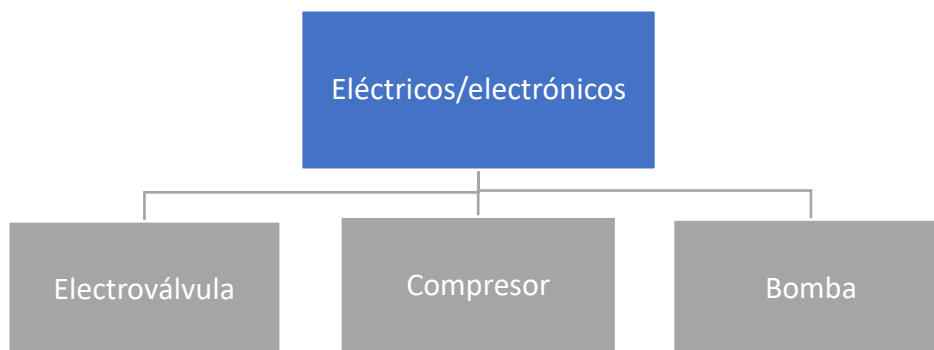


*Figura 7.* Componentes mecánicos del sistema de dosificación y aplicación de pintura.

### 1.5.3. Componentes Eléctricos/electrónicos

- Electroválvula: actuador utilizado para ejecutar conmutación.
- Compresor: dispositivo que dosifica aire necesario para la pulverización de pintura.
- Bomba: actuador que alimenta de pintura a la pistola.

En la Figura 8 se describen los componentes eléctricos/electrónicos necesarios para la cabina de pintura.



**Figura 8.** Componentes eléctricos y electrónicos del sistema de dosificación de pintura.

#### 1.6. Manipulador robótico para pintura

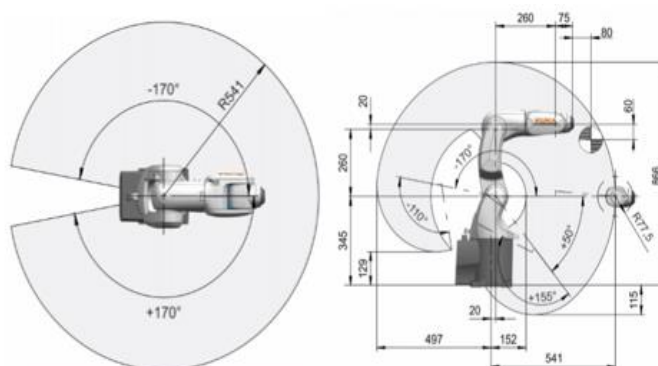
Se utilizará el manipulador robótico KUKA KR3 R540 descrito en la Figura 9 debido a que existe su disponibilidad en el Laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE.



**Figura 9.** KUKA KR3 R540.

Fuente: Catálogo KUKA KR3 R540 (KUKA KR3, 2018).

En la Figura 10, se muestra el área de trabajo del robot KUKA KR3 R540.

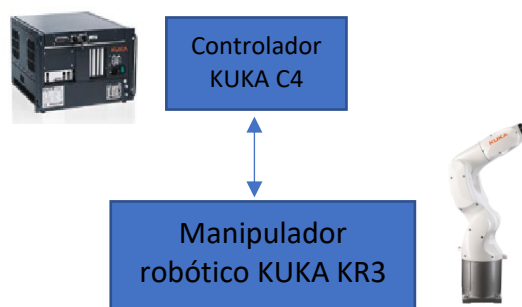


**Figura 10.** Área de trabajo KUKA KR3 R540.

Fuente: Catálogo KUKA KR3 R540 (KUKA KR3, 2018)

### 1.7. Controlador KUKA KR C4 Compact

En la Figura 11 se visualiza el esquema utilizado para la programación del control de movimiento del manipulador KUKA KR3 R540. La programación del controlador se la realizará en lenguaje KRL (KUKA ROBOT LANGUAGE) utilizando modo usuario y modo experto, y será cargada al controlador KUKA KR C4 Compact.



**Figura 11.** Interconexión del Controlador C4.



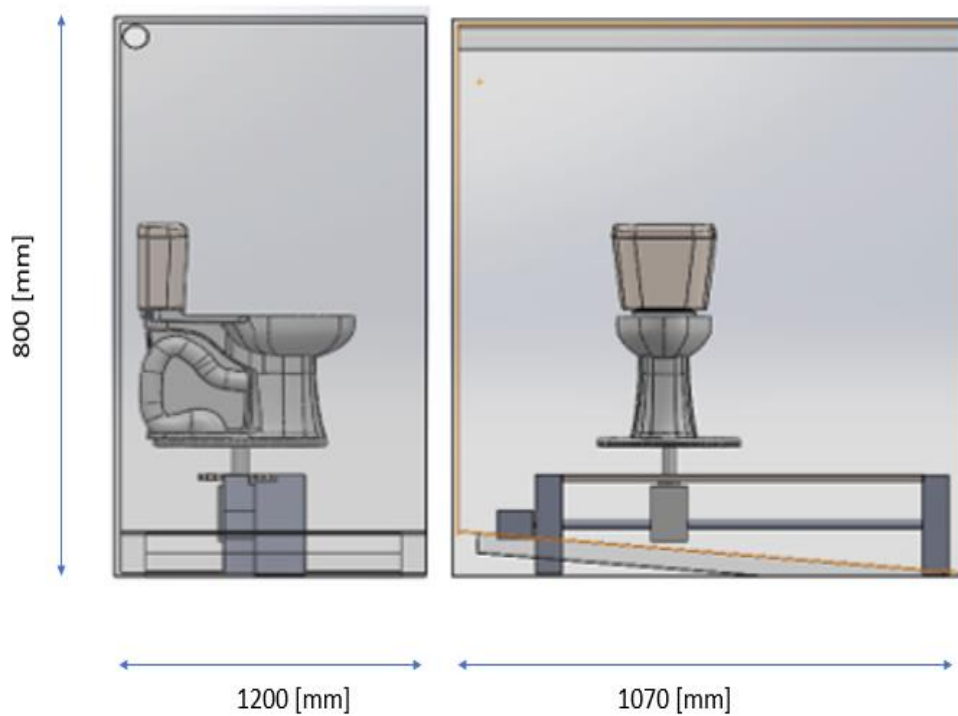
## 1.8. Diseño y construcción de la cabina de pintura

### 1.8.1. Componentes mecánicos de la cabina de pintura

- Cubierta de acrílico: Sirve para delimitar el espacio de trabajo de la celda robotizada y para aislar el proceso de pintura, con el fin de evitar contaminación del Laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Estructura cabina: Estructura metálica para soporte del acrílico.

### 1.8.2. Dimensiones de la cabina

Las dimensiones de la cabina de pintura son: 1.07 m de largo, 1.2 m de ancho por 0.8 m de alto con el objeto de permitir el libre paso de los estudiantes por el laboratorio, tal como se muestra en la Figura 12.

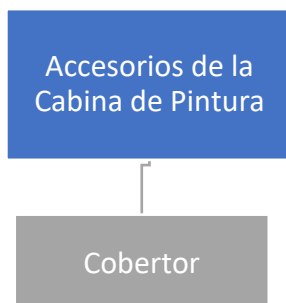


*Figura 12.* Vista lateral y frontal de prototipo de celda robotizada.

### 1.8.3. Accesorios de la cabina de pintura

- Cobertor: Protección para el robot.

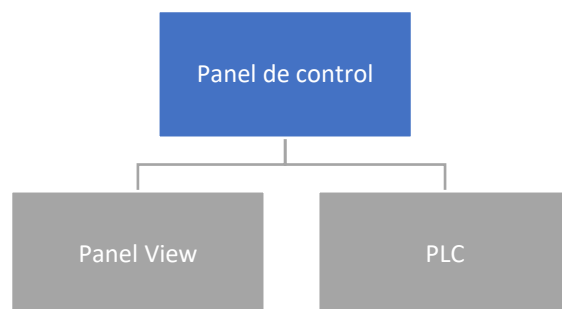
En la Figura 13, se muestra los accesorios de la cabina de pintura.



*Figura 13.* Accesorios de la Cabina de Pintura.

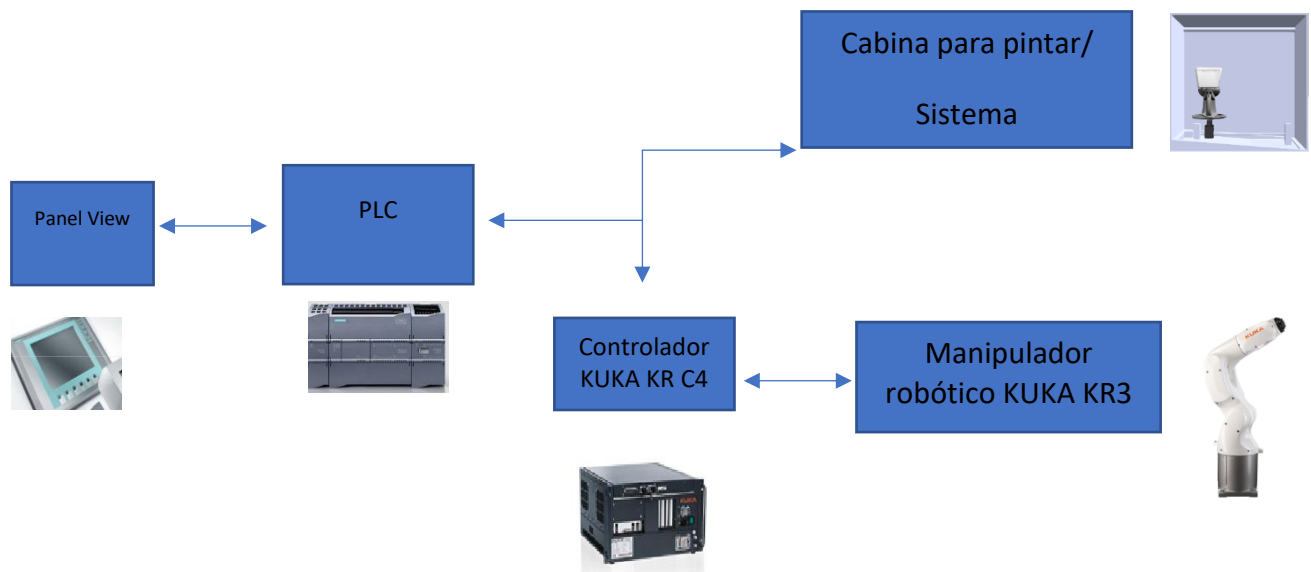
### 1.9. Integración de componentes

El panel de mando del proceso será un Panel View, que se encontrará conectado directamente con un PLC, estos equipos se encuentran disponibles en el Laboratorio de Robótica y PLC. El mando de control tal como se describe en la Figura 14, se encuentra compuesto por indicadores visuales que alertan sobre eventos que ocurren en el prototipo de celda robotizada: inicio o fin del recorrido del inodoro a escala, así como de interruptores que permitan activar o desactivar el sistema y un paro de emergencia del proceso.



*Figura 14.* Componentes del Panel de Control.

La integración de la celda robotizada consta de una HMI, presentada en el Panel View Siemens, desde la cual se ejecutarán accionamientos y se visualizará el estado del proceso, el PLC se programará para el control de los motores del sistema transportador, tanto para el desplazamiento horizontal, como para el movimiento rotacional del soporte del inodoro a escala. El controlador KUKA KR C4 compact será programado para definir las trayectorias del manipulador robótico para realizar el proceso de pintura. La Figura 15 muestra los componentes del sistema de integración de la celda robotizada.



*Figura 15.* Integración de celda robotizada.

#### 1.10. Software para implementación, análisis y simulación

- SolidWorks
- KUKA. Sim Pro 3.05 (Licencia)
- TIA Portal
- WorkVisual 4.0

## CAPÍTULO II

### ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Ejemplos de automatización del proceso de pintura

##### 2.1.1. Proceso de pintura en cabinas-carrusel

Dentro del mercado mundial se encuentran varias soluciones presentadas por distintas compañías; se ha considerado citar los ejemplos de Genitec y Setec Group, instituciones que han desarrollado un nivel de automatización en el proceso de pintura de sanitarios.

##### *Genitec*

En el proceso robotizado, de pintura de sanitarios descrito en la Figura 16, realizado por la empresa especializada en la automatización de procesos de fabricación de porcelana sanitaria Genitec, se evidencia una metodología que ha sido desarrollada en la industria con el objeto de mejorar la productividad, sin embargo, no se ha logrado llevar a cabo una producción en serie realmente efectiva, debido a que existe la problemática de detener el objeto que es procesado para pintarlo.

Según la Figura 16, en el proceso de pintura en cabinas con robots, existe un mecanismo externo al robot que desplaza la pieza desde un transportador lineal, hasta una cabina de pintura, operación realizada gracias al giro sobre su propio eje. Una vez en la posición requerida, se realiza el movimiento controlado de la mesa que sostiene el producto, lo que permite abarcar la superficie completa de la porcelana sanitaria, debido a la operación de un robot KUKA. Terminado el proceso,

este mecanismo posiciona nuevamente el producto fuera de la cabina de pintura hacia el transportador.

De acuerdo con el programa seleccionado, el robot comienza a esmaltar inmediatamente. El robot puede realizar distintos tipos de movimientos. (Genitec, 2018).



**Figura 16.** Proceso de pintura robotizado en cabinas.

Fuente: (Genitec, 2018).

### *Características del sistema*

- Robot de 6 ejes KUKA KR 16 L8.
- Carril de 2 brazos con puerta.
- Panel de control.
- 3 posicionadores (7,8,9 eje).
- Sistema de filtrado y otros equipos.

Se utiliza el robot industrial KUKA para pintura, el software de proceso está directamente relacionado con el sistema KUKA y toda la comunicación entre el PLC y el software del robot es modificable.

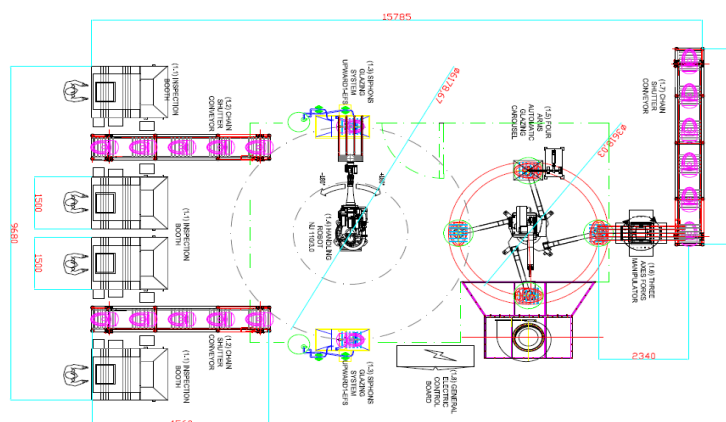
El software del robot está basado en Windows. Además, posee la facilidad de programar en modo fuera de línea, mediante el software de simulación, que permite elaborar trayectorias en el computador y posteriormente utilizarlas en el robot, existiendo también la posibilidad de enseñar movimientos con el panel de control de KUKA. El código desarrollado es accesible a través de conexión a Internet mediante el protocolo Ethernet.(Genitec, 2018).

A continuación, se describe el proceso utilizado por Setec Group, conjunto de compañías que poseen una gran representación en Europa, dentro a lo que concierne la automatización de procesos.

### ***Setec Group***

Es un grupo de empresas que ha unido sus esfuerzos para automatizar el proceso de pintura, así como otros procesos relacionados a la fabricación de porcelana sanitaria, motivos por los cuales han desarrollado varias alternativas que aumentan la productividad de las fábricas de sanitarios. A continuación, se muestra una línea de pintura automatizada, implementada por este consorcio.

La línea de pintura está equipada con un manipulador robótico central, como se muestra en la Figura 17 que lleva a cabo las principales operaciones de transferencia de los artículos de cerámica, entre las diferentes etapas del proceso.



**Figura 17.** Layout planta de pintura Setec Group.

Fuente: (Azienda in fiera, 2018).

Después del último acabado e inspección manual en blanco, las piezas se almacenan temporalmente en dos transportadores de cadena. En el caso de pintura de inodoros, los artículos se transfieren automáticamente a dos trampas de tipo máquina de pintura, por medio del robot de manejo central. Estas máquinas ejecutan automáticamente la pintura de las partes internas del inodoro (sifón, lavabo, borde) aumentando la calidad de los productos finales y reduciendo los tiempos de producción.

El mismo manipulador transfiere nuevamente los inodoros desde las máquinas hacia la posición de carga de un carrusel de 4 brazos que posiciona a la pieza que va a hacer pintada. Se utiliza un robot antropomórfico para el proceso de pintura final (proceso descrito en la Figura 18).



**Figura 18.** Robot centralizado para proceso de pintura

Fuente: (Azienda in fiera, 2018)

Luego de finalizar el proceso de pintura, el carrusel de 4 brazos lleva los artículos a la posición de descarga donde un manipulador de horquilla giratoria transfiere los artículos terminados a la cinta transportadora de descarga.

Una estación de lavado automático limpia los soportes giratorios del carrusel, para que estén listos para las próximas piezas.

El sistema completo está controlado por un panel de control central y se puede administrar y personalizar fácilmente según las necesidades.(Azienda in fiera, 2018).

Productividad indicativa:

- 60 cuencas / hora.
- 120 cisterna / hora.
- 90 pedestal / hora.
- 40 WC, bidet / hora.



### 2.1.2. Tipos de manipuladores para pintura

Dentro de la industria existen varios manipuladores robóticos como los mostrados en la Figura 19, que son utilizados para procesos de pintura o esmaltado, cada uno se encuentra diseñado para poder trabajar en ambientes industriales, y dependiendo de las características de la pintura o esmalte a aplicar, el nivel de protección del robot, puede variar, desde el utilizar un traje especial para evitar la contaminación o ser lo suficientemente robustos para soportar explosiones provocadas por la volatilidad de la pintura. Los manipuladores del tipo foundry, pueden trabajar en condiciones de alta humedad o en contacto directo con fluidos.

En la Tabla 1 se describen algunos de los manipuladores robóticos que existen en el mercado para automatizar el proceso de pintura.



*Figura 19.* Manipuladores robóticos para el proceso de pintura.

**Tabla 1.**

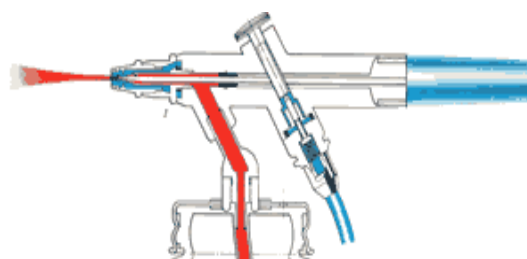
*Robots especializados en pintura, marcas KUKA, ABB y Yaskawa.*

<b>Robots de pintura</b>	<b>KUKA</b>	<b>ABB</b>	<b>Yaskawa</b>
	Kuka KR2 ready to spray	IRB 5400	MPX2600
	Kr5 (propósito general)	IRB 52	MPX1150
	Kr16(propósito general)	IRB 5500-22	MPX3500
		IRB 5500-25	EPX2800
		IRB 5510	EPX1250
		IRB 5350	EPX2050
		*IRB 580	MH24
		IRB6620	

\*El robot IRB 580 descontinuo su producción desde el mes de agosto del 2018.

### 2.1.3. Rociado de pintura

Como se muestra en la Figura 20, la pintura que es aplicada sobre una superficie es pulverizada debido a la presión ejercida por un flujo de aire.



**Figura 20.** Funcionamiento sistema de pulverización.

Fuente: (hobbymex, 2017).

### 2.1.4. Pistolas para esmalte o pintura

Dependiendo del fluido con el que se desee trabajar en una aplicación de pintura o esmalte, existen pistolas, como las mostradas en la Figura 21, que se encuentran diseñadas para soportar la abrasión producida por el contacto continuo entre el líquido y el aplicador, pudiéndose encontrar la utilización de materiales de fabricación como acero inoxidable, o carburo de tungsteno.

Considerando las propiedades del abanico, se selecciona el tamaño de la boquilla y el tipo de accionamiento a utilizar, pudiéndose encontrar pulverización neumática o hidráulica. En la porcelana sanitaria en específico, se utiliza aplicadores con pulverización neumática debido a que permite un menor tamaño de gota de pintura, obteniéndose una mejor adherencia del esmalte sobre la superficie a recubrir.

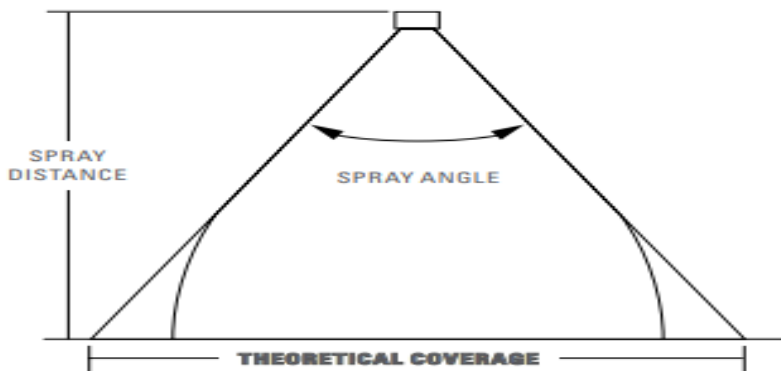


**Figura 21.** Pistola de rociado para robots.

Fuente: (Graco, 2017).

### **2.1.5. Ángulo de rociado y cubierta**

El ángulo de rociado efectivo de la Figura 22 varía según la distancia de rociado, los líquidos más viscosos que el agua forman relativamente ángulos de rociado más pequeños dependiendo de la viscosidad, la boquilla y la presión de rociado. Los líquidos con tensiones superficiales menores que el agua producen mayores ángulos de rocío.



**Figura 22.** Cobertura de pintura en función de la distancia de aplicación y el ángulo de rociado.

Fuente: (Systems, 2018).

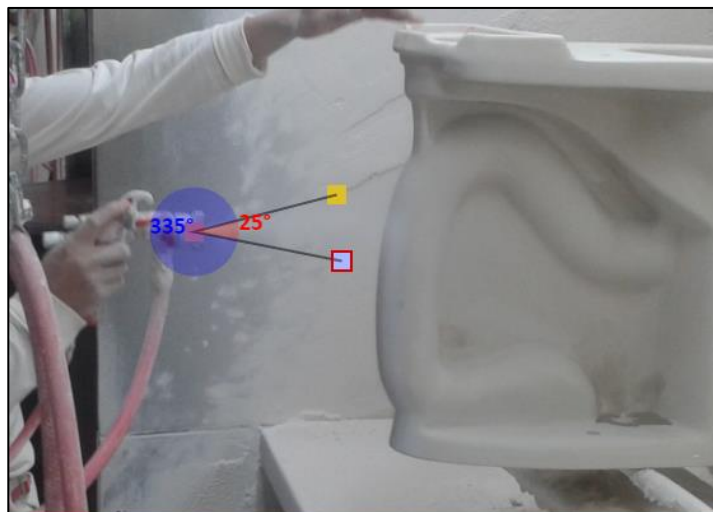
La tabla de ángulos de rociado mostrados en la Figura 23 y 24, indican aproximadamente la cantidad de superficie que cubre el abanico basado en la distancia de aplicación.

**THEORETICAL SPRAY COVERAGE AT VARIOUS DISTANCES IN INCHES (CM) FROM NOZZLE ORIFICE**

Spray Angle	2 in.	5 cm	4 in.	10 cm	6 in.	15 cm	8 in.	20 cm	10 in.	25 cm	12 in.	30 cm	15 in.	40 cm	18 in.	50 cm	24 in.	60 cm
5°	.2	.4	.4	.9	.5	1.3	.7	1.8	.9	2.2	1.1	2.6	1.3	3.5	1.6	4.4	2.1	5.2
10°	.4	.9	.7	1.8	1.1	2.6	1.4	3.5	1.8	4.4	2.1	5.3	2.6	7.0	3.1	8.8	4.2	10.5
15°	.5	1.3	1.1	2.6	1.6	4.0	2.1	5.3	2.6	6.6	3.2	7.9	3.9	10.5	4.7	13.2	6.3	15.8
25°	.9	2.2	1.8	4.4	2.7	6.7	3.5	8.9	4.4	11.1	5.3	13.3	6.6	17.7	8.0	22.2	10.6	26.6
30°	1.1	2.7	2.1	5.4	3.2	8.0	4.3	10.7	5.4	13.4	6.4	16.1	8.1	21.4	9.7	26.8	12.8	32.2
35°	1.3	3.2	2.5	6.3	3.8	9.5	5.0	12.6	6.3	15.8	7.6	18.9	9.5	25.2	11.3	31.5	15.5	37.8
40°	1.5	3.6	2.9	7.3	4.4	10.9	5.8	14.6	7.3	18.2	8.7	21.8	10.9	29.1	13.1	36.4	17.5	43.7
45°	1.7	4.1	3.3	8.3	5.0	12.4	6.6	16.6	8.3	20.7	9.9	24.9	12.4	33.1	14.9	41.4	19.9	49.7
50°	1.9	4.7	3.7	9.3	5.6	14.0	7.5	18.7	9.3	23.3	11.2	28.0	14.0	37.3	16.8	46.6	22.4	56.0
55°	2.1	5.2	4.2	10.4	6.3	15.6	8.3	20.8	10.3	26.0	12.5	31.2	15.6	41.7	18.7	52.1	25.0	62.5
60°	2.3	5.8	4.6	11.6	6.9	17.3	9.2	23.1	11.5	28.9	13.8	34.6	17.3	46.2	20.6	57.7	27.7	69.3
65°	2.5	6.4	5.1	12.7	7.6	19.1	10.2	25.5	12.7	31.9	15.3	38.2	19.2	51.0	22.9	63.7	30.5	76.5
70°	2.8	7.0	5.6	14.0	8.4	21.0	11.2	28.0	14.0	35.0	16.8	42.0	21.0	56.0	25.2	70.0	33.6	84.0
75°	3.1	7.7	6.1	15.4	9.2	23.0	12.3	30.7	15.3	38.4	18.4	46.0	23.0	61.4	27.6	76.7	36.8	92.1
80°	3.4	8.4	6.7	16.8	10.1	25.2	13.4	33.6	16.8	42.0	20.2	50.4	25.2	67.1	30.3	83.9	40.3	101
85°	3.7	9.2	7.3	18.3	11.0	27.5	14.7	36.7	18.3	45.8	22.0	55.0	27.5	73.3	33.0	91.6	44.0	110
90°	4.0	10.0	8.0	20.0	12.0	30.0	16.0	40.0	20.0	50.0	24.0	60.0	30.0	80.0	36.0	100	48.0	120
95°	4.4	10.9	8.7	21.8	13.1	32.7	17.5	43.7	21.8	54.6	26.2	65.5	32.8	87.3	39.3	109	52.4	131
100°	4.8	11.9	9.5	23.8	14.3	35.8	19.1	47.7	23.8	59.6	28.6	71.5	35.8	95.3	43.0	119	57.2	143
110°	5.7	14.3	11.4	28.6	17.1	42.9	22.8	57.1	28.5	71.4	34.3	85.7	42.8	114	51.4	143	68.5	171
120°	6.9	17.3	13.9	34.6	20.8	52.0	27.7	69.3	34.6	86.6	41.6	104	52.0	139	62.4	173	83.2	208
130°	8.6	21.5	17.2	42.9	25.7	64.3	34.3	85.8	42.9	107	51.5	129	64.4	172	77.3	215	103	257
140°	10.9	27.5	21.9	55.0	32.9	82.4	43.8	110	54.8	137	65.7	165	82.2	220	98.6	275	-	-
150°	14.9	37.3	29.8	74.6	44.7	112	59.6	149	74.5	187	89.5	224	112	299	-	-	-	-

**Figura 23.** Cobertura de superficie en función de la distancia de aplicación y ángulo.

Fuente: (Systems., 2018).



**Figura 24.** Aplicación de esmalte sobre porcelana sanitaria.

### 2.1.6. Atomización

El menor tamaño de partículas mostrado en la Tabla 2, se logra con boquillas atomizadoras a base de aire, mientras que partículas más grandes se generan con boquillas hidráulicas o con patrones de cono.

#### **Tabla 2.**

*Tamaño de gota a partir de boquillas atomizadoras a base de aire.*

Tamaño de gotas

.	500 um
•	1200 um
●	5500 um

Nota. Tamaño de partícula respecto al orificio de la boquilla, (Systems., 2018).

Las propiedades del líquido, boquilla, presión de rociado son causantes en la variación del tamaño de las partículas, como se muestra en la Figura 25 . Menores presiones de rociado proveen mayor tamaño de partículas, de la misma manera mayores presiones producen menores tamaños.

Spray Pattern Type	10 psi (0.7 bar)			40 psi (2.8 bar)			100 psi (7 bar)		
	Capacity		VMD	Capacity		VMD	Capacity		VMD
	gpm	lpm	microns	gpm	lpm	microns	gpm	lpm	microns
Air Atomizing	.005 .02	.02 .08	20 100	.008 8	.03 30	15 200	12	45	400
Fine Spray	.22	.83	375	.03 .43	.1 1.6	110 330	.05 .69	.2 2.6	110 290
Hollow Cone	.05 12	.19 45	360 3400	.10 24	.38 91	300 1900	.16 38	.61 144	200 1260
Flat Fan	.05 5	.19 18.9	260 4300	.10 10	.38 38	220 2500	.16 15.8	.61 60	190 1400
Full Cone	.10 12	.38 45	1140 4300	.19 23	.72 87	850 2800	.30 35	1.1 132	500 1720

**Figura 25.** Tamaño de partícula en función de presión y caudal

Fuente: (Systems., 2018)

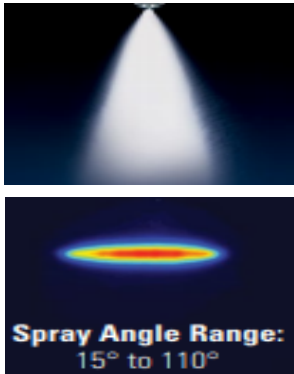
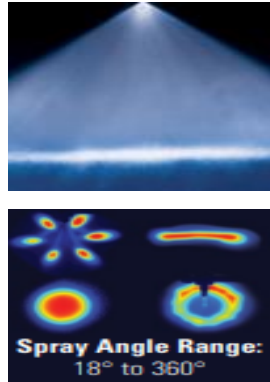
En la Tabla 3, se describen las características de aspersión según el tipo de boquilla.

**Tabla 3.**

*Características del patrón de aspersión y aplicaciones según tipo de boquilla.*

<b>Boquillas con atomizador a base de aire y asistidas con aire</b>	<b>Boquillas de spray plano</b>
Produce una variedad de conos, con patrones de aspersión planos a través de la atomización del líquido por aire comprimido	Produce un patrón de rociado plano de borde cónico
<b>Aplicaciones típicas</b>	<b>Aplicaciones típicas</b>
Revestimiento	Esmaltado
Enfriamiento evaporativo	Lubricación
Humidificación	Revestimiento

CONTINÚA

**Ejemplos****Ejemplos****2.1.7. Suministro de fluidos**

En concordancia con el manipulador existen pistolas que se encuentran diseñadas específicamente para robots con muñeca hueca o con robots con muñeca sólida, en los robots con muñeca hueca el aplicador se coloca directo en la brida, permitiendo pasar los cables de alimentación de fluido y control por dentro del brazo del robot, este tipo de aplicador es comúnmente utilizado en procesos de pintura de autos, para la robots de muñeca sólida en el mercado se encuentran distintos acoples para la brida y la pistola, en este caso la alimentación del fluido se realiza por fuera del bastidor del robot, en la Figura 26, se muestran algunos ejemplos de montaje.



**Figura 26.** Comparación de robots de pintura con muñecas huecas y sólida.

Fuente: (Graco-Setec Group, 2017.).

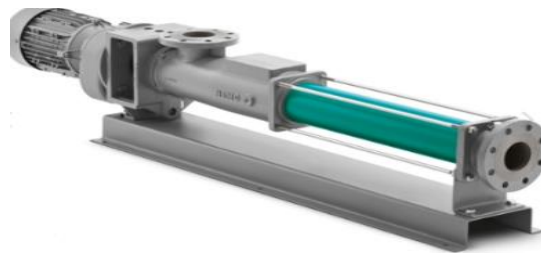
### 2.1.8. Bombas

Cada boquilla para rociado necesita un método que provea flujo, el cual puede ser provisto gracias a la gravedad o por presión de aire producida por bombas mecánicas.

Es importante entender que las bombas producen flujo no presión, la presión es el resultado del flujo restringido, la salida de una bomba sin restricción es de 0 psi o 0 bares, cuando se genera una restricción en el fluido, aparece presión en la línea. En la Figura 27 y 28 se muestran dos tipos de bombas comúnmente utilizadas.

#### *Bombas de desplazamiento positivo*

Utilizadas para altas presiones.



**Figura 27.** Bomba de desplazamiento positivo.

Fuente: (NETZSCH, 2016).

#### *Bombas centrífugas*

Para altos flujos



**Figura 28.** Bombas centrífugas.

Fuente: (NETZSCH, 2016).



### **2.1.9. Software de simulación**

Existe diversidad de Software disponible en el mercado ya sean licenciados o no que permiten realizar la programación de manipuladores robóticos de forma offline, con el objeto de diseñar celdas de manufactura, y automatización de procesos dentro de las fábricas con el menor coste posible, permitiendo agilizar el proceso de ingeniería, mediante la selección adecuada de los componentes necesarios para la puesta en marcha de futuros proyectos, ahorrando tiempos de diseño y permitiendo anticipar posibles errores dentro de la implementación de nueva tecnología.

Una de las ventajas de estas herramientas, es generar el código para las trayectorias del robot, mediante la simulación del proceso, posteriormente se puede cargar el programa desarrollado al controlador del manipulador, evitando paradas en los procesos productivos, comúnmente generados por la metodología de programación online.

#### ***ROBOT STUDIO ABB***

Robot Studio es una aplicación de PC destinada al modelado, la programación fuera de línea y la simulación de células de robot como se muestra en la Figura 29.

Simulador comercial potente, con diversas características y capacidades de creación automática de cualquier tipo de estación. Este simulador permite la importación de geometrías y modelos 3D de cualquier formato. Programar y simular la cinemática de las estaciones para exportar los resultados obtenidos en simulación a la estación real. (ABB software, 2018).



**Figura 29.** Celda robotizada simulada en el software de ABB Robot Studio.

Fuente: (ABB,2019).

### ***KUKA SIM PRO 3.0***

Software para la programación offline: basado en la plataforma de Visual Components, permite realizar simulaciones para optimizar o implementar la producción de complejos industriales y robots.

En Visual Components se puede realizar el modelamiento de los entornos físicos en los que se encuentra el manipulador robótico, tal como se muestra en la Figura 30, mediante el uso de herramientas que otorgan atributos como velocidad, aceleración, masa, a los objetos que trabajarán con el robot, permitiendo de esta manera generar soluciones en procesos complejos, sin la necesidad de una inversión elevada, para así gestionar o no la implementación en planta de una solución de automatización.



**Figura 30.** Simulación de proceso KUKA SIM PRO 3.0.

Fuente: (KUKA,2019).

En la Tabla 4, se enlista software de simulación y programación off-line disponible en el mercado.

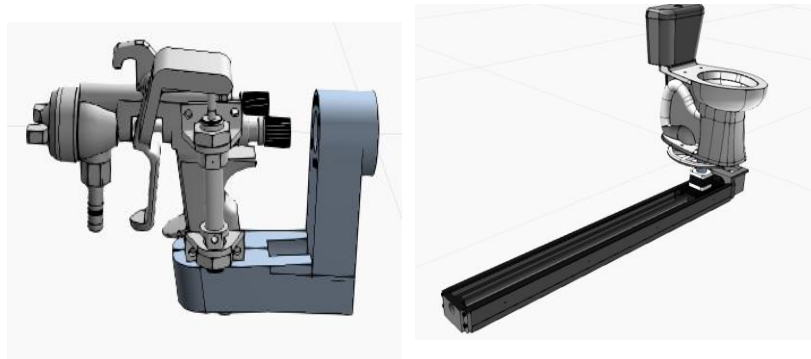
**Tabla 4.**

*Software de simulación disponible en el mercado.*

Software simulación	KUKA SIM 3.0(Software de prueba 14 días)	Robot Studio (Software de prueba 30 días)	MotoSim EG-VRC simulation software (Se necesita comprar software)
		Painting power pac	

**2.1.10. Componente visual**

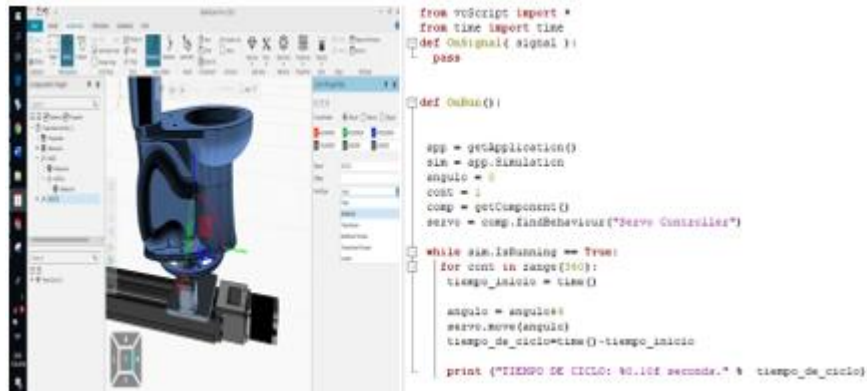
A un ensamble o dibujo en CAD se lo puede configurar como un conjunto de eslabones con sus respectivas propiedades físicas, tipo de movimiento, etc., con el objeto de generar el entorno con el que trabajará el manipulador robótico, por consiguiente, se puede modelar: herramientas, gripper, ejes adicionales, cables, bandas transportadoras, posicionadores, incluso el producto que se desea manipular con el robot, véase la Figura 31.



**Figura 31.** Componentes modelados en KUKA SIM PRO 3.0.

### 2.1.11. Scripts

Para el desarrollo de entornos complejos es posible asignar comportamientos específicos a los elementos modelados en el software mediante el uso de programación convencional, como por ejemplo un script en Python como se muestra en la Figura 32.

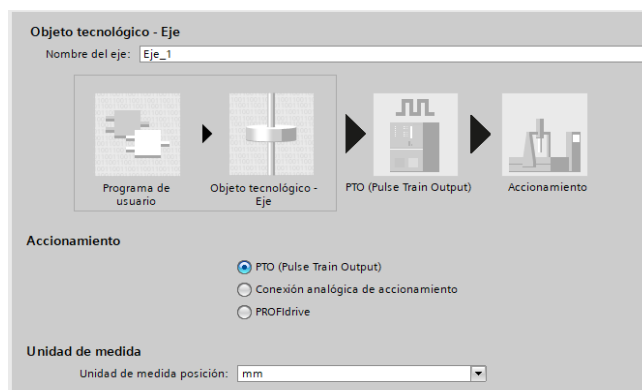


**Figura 32.** Script de Python para la configuración de mecanismos.

### 2.1.12. Motion Control

Complemento que se encuentra disponible en los PLC de marca siemens y que permite configurar el funcionamiento de servo motores y de motores a pasos para controlar ejes adicionales, por lo cual se necesitan dos salidas tipo transistor por cada tipo de movimiento a controlar, una salida se encuentra destinada en proporcionar la cantidad de pulsos que se envía al actuador, y la otra se encarga de manipular la dirección de desplazamiento a través de su conmutación.

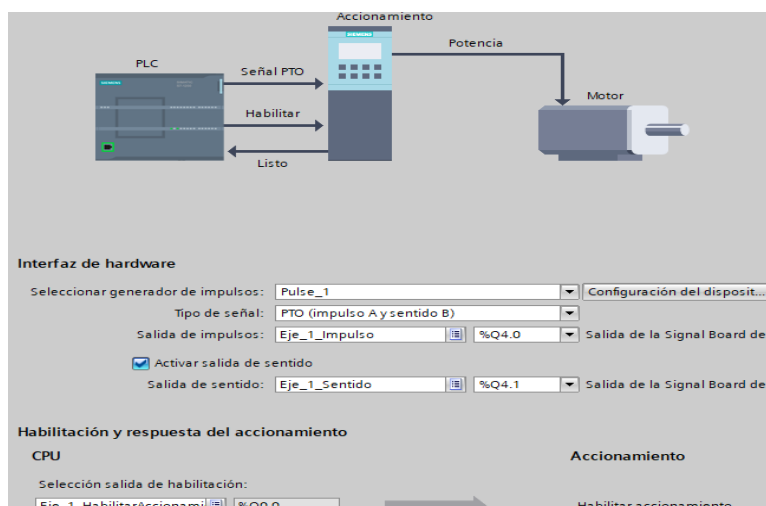
Como se muestra en la Figura 33, se debe configurar el tipo de lazo de control que se desea para la manipulación de los ejes (lazo abierto) PTO, en función del tipo de desplazamiento que realiza el eje se puede programar el avance ya sea en mm o en grados.



**Figura 33** Configuración del tipo de control

y avance del actuador.

La Figura 34 muestra el proceso de configuración de las salidas que estarán destinadas tanto a dirección como cantidad de pulsos, también existe la posibilidad de configurar una salida adicional para controlar la habilitación del motor.

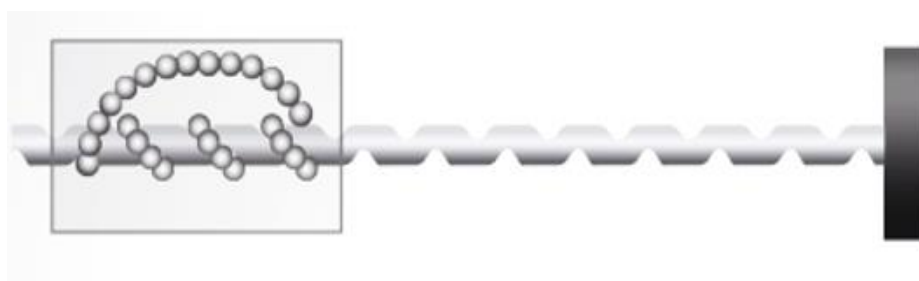


**Figura 34.** Configuración de salidas para el control de ejes.

### 2.1.13. Tipos de sistemas transportadores

#### *Tornillo sin fin*

El mecanismo de la Figura 35, funciona con una conexión directa del mecanismo de transmisión de movimiento con el motor, la superficie móvil es sostenida por vigas de sección circular paralelas al tornillo sin fin.



**Figura 35.** Mecanismo de transmisión de movimiento tornillo sin fin.

Fuente:(RealPars, 2019).

En la Tabla 5, se enlista las ventajas y desventajas de utilizar un mecanismo accionado por un tornillo sin fin.

**Tabla 5.**  
*Ventajas y desventajas de utilizar un tornillo sin fin.*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Económico	Lubricación
Fácil accesibilidad en el mercado	Carreras cortas
Elevada transmisión de fuerza de empuje	Velocidades medias
Buena precisión	
Poseen mayor rigidez	

### ***Banda dentada***

El mecanismo de la Figura 36 es utilizado para aplicaciones de alta velocidad y largas distancias de posicionamiento, así como cargas pesadas con mayores momentos de inercia, su funcionamiento es similar al de una banda transportadora, el movimiento rotacional del motor es transformado a lineal mediante una correa dentada que se encuentra sujeta entre dos poleas, esta barra se encuentra montada sobre un perfil que la sostiene.



**Figura 36.** Transmisión de movimiento lineal mediante banda dentada.

Fuente:(RealParts,2019).

En la Tabla 6, se muestran las ventajas y desventajas de utilizar un transportador lineal con una banda dentada.

**Tabla 6.**

*Ventajas y desventajas de mecanismo accionado por banda dentada.*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Asequible en el mercado nacional	Transmisión baja de fuerzas
Transmisión directa con el motor	Ajuste por tensión
Alto rango de velocidades/aceleraciones	Susceptible a desgaste de la banda por cargas de impacto
No generan mucho ruido	
Buena operación ciclos de trabajo elevados	

### 2.1.14. Tipos de motores

#### *Servos motores*

Los servos motores como se muestra en la Figura 37, son actuadores utilizados en aplicaciones donde se necesitan generar movimientos bastante precisos independientemente de la carga que estos transporten, además de ser capaces de trabajar a altas velocidades, poseen un sistema de retroalimentación a través de un encoder que mide la posición en la que se encuentra, garantizado una mayor precisión. En la Tabla 7, se describen las ventajas y desventajas de la utilización de servo motores.



**Figura 37.** Servo motor.

Fuente: (Cubre, 2019).



**Tabla 7.**

*Ventajas y desventajas de un servomotor.*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Precisión	Tres veces más costoso que un motor a pasos
Control a lazo cerrado (Control PID)	Necesita circuito de protección eléctrica
El torque se mantiene constante independientemente de la velocidad	Se pueden dañar si se los somete demasiado tiempo a una carga elevada
Alcance de mayores velocidades	
Alta potencia	
Silenciosos	

### ***Motor a pasos***

El motor de la Figura 38, es utilizado en aplicaciones donde el torque no es determinante en la aplicación, posee bastante precisión, su costo es bajo en comparación con otro tipo de motores., sus ventajas y desventajas se muestran en la Tabla 8.



***Figura 38.*** Motor a pasos

Fuente: (Xinje & Co, 2017).

**Tabla 8.***Ventajas y desventajas de un motor a pasos*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Control a lazo abierto	Si se aumenta la carga del motor a pasos, se pierde la precisión de control
Alto torque de retención/torque residual	Bajas eficiencia
Alto torque a baja velocidad	Disminuye el torque al aumentar la velocidad
Bajo mantenimiento	Se calienta cuando trabaja a regímenes fuertes
	Ruidoso

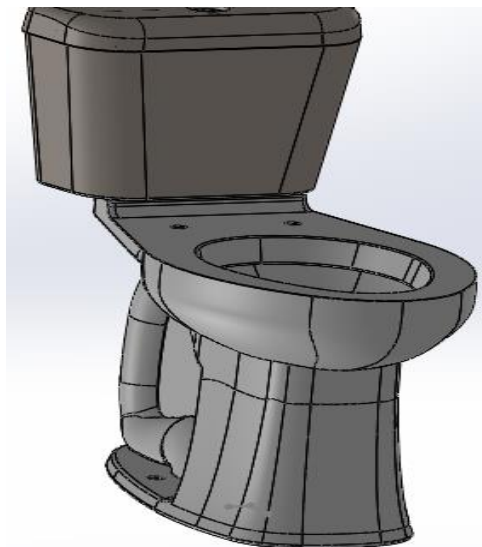
## CAPÍTULO III

### DISEÑO

Con el fin de alcanzar un acabado superficial uniforme en un inodoro a escala, se propone un diseño basado en: una metodología de pintura y una estructura de control de lazo abierto, los elementos de este diseño son descritos a continuación.

#### 3.1. Inodoro a escala

Considerando las características descritas en el apartado 1.4.1 respecto al Espacio de trabajo de la celda robotizada se selecciona un inodoro estándar, el cual es escalado a 0.35 del tamaño original, obteniendo el diseño en CAD que se muestra en la Figura 39 que posee las siguientes dimensiones: alto 30.76 cm, largo 27.56 y 16.9 cm de ancho.



*Figura 39.* Inodoro genérico a escala.

## **3.2. Metodología de pintura**

### **3.2.1. Trayectoria de aplicación de pintura**

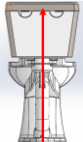
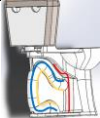
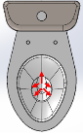

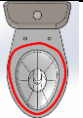


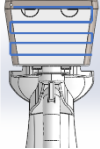
Dentro de la industria de porcelana sanitaria los factores determinantes en la trayectoria realizada por el operador son: densidad y presión de aire. Estos parámetros permiten tener el control: del tiempo de secado de la pieza, del escurrimiento por exceso de pintura, del grosor de recubrimiento que tiene el inodoro al final del proceso, de las posibles salpicaduras, y defectos varios que afectan directamente la calidad de la pieza.

La pintura de secado lento, de baja densidad, es bastante líquida por lo que no resulta determinante la trayectoria utilizada por el operador, ya que cumple con el objetivo de cubrir la pieza con pintura, independientemente de las pasadas que se necesite para llegar a un espesor requerido, esto genera comúnmente un desperdicio considerable, debido al tamaño del abanico.

En cambio, una pintura con mayor densidad tiene la propiedad de secarse más rápidamente y por la cantidad de sólidos presentes, alcanza más rápido el espesor requerido para la comercialización del producto, necesitando menos pasadas de pintura, generando así menor desperdicio y mayor rentabilidad, por tal motivo el orden y la velocidad con la cual se aplica la pintura es determinante para garantizar la calidad del producto.

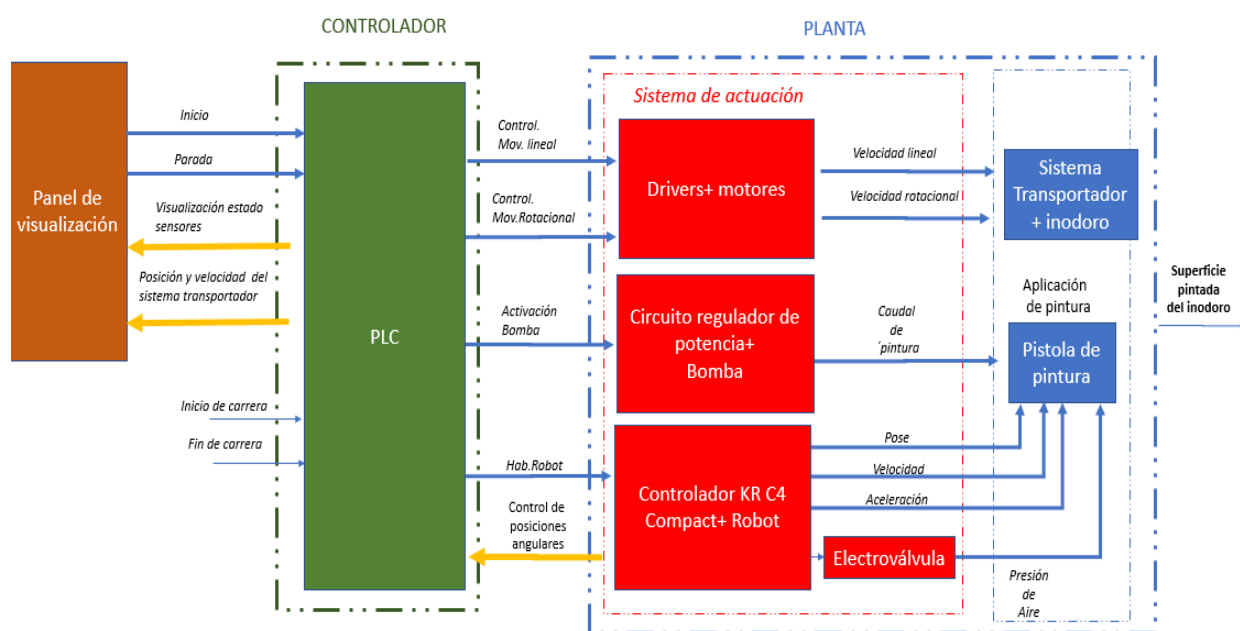
Se considera el trabajar con una pintura de secado rápido, por tal motivo se sigue un patrón convencional para aplicación de pintura, que sigue el orden descrito en la Tabla 9.

**Tabla 9.**  
*Metodología propuesta para pintar sanitarios.*

SECCIÓN DEL INODORO	TRAYECTORIA
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación de pintura sobre nervadura</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tripa de inodoro a ambos lados</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sifón interno</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Palangana</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anillo</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parte frontal del tanque</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laterales a ambos lados</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parte trasera del tanque</li> </ul>	

### 3.3. Estructura de control

Al ser identificados los subsistemas de la celda robotizada descritos en el apartado 1.4.1, para el diseño del prototipo se propone, utilizar una metodología basada en una estructura de control a lazo abierto como la descrita en la Figura 40, en donde el orden de dimensionamiento de sus elementos es el siguiente: el sistema de dosificación y aplicación de pintura, el sistema transportador, el controlador para el proceso, y un panel de visualización.



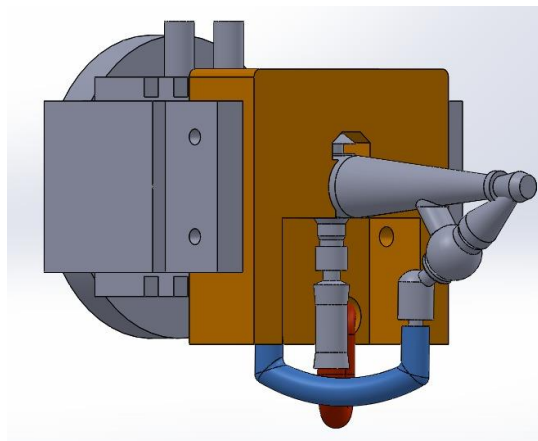
**Figura 40.** Sistema de control del prototipo de pintura.

### 3.4. Sistema de dosificación y aplicación de pintura

#### 3.4.1. Pistola de pintura

El costo de un aplicador, de esmalte o pintura, para un robot más su sistema de control de dosificación, es muy elevado, su valor oscila desde los dos mil hasta los treinta y ocho mil dólares, debido a esta consideración se decide utilizar un aerógrafo con el objeto de sustituir la pistola de pintura, abaratando así los costos, con la desventaja de disminuir el nivel de control de caudal, presión y tamaño de abanico requerido para una óptima aplicación.

Se diseña el modelo en CAD de la pistola de la Figura 41 debido a que brinda las coordenadas del TCP necesarias para la programación del robot.



**Figura 41.** Diseño del accionador del aerógrafo.

La pistola de pintura Figura 41 se encuentra compuesta por los siguientes elementos:

#### ***Pinza neumática***

La herramienta de la Figura 42 se encuentra en la brida del manipulador robótico, en consecuencia, se decide diseñar un soporte para el aerógrafo a partir de este elemento, con el objeto de conservarlo en proyectos futuros.



**Figura 42.** Gripper neumático SMC.

Fuente: (SMC, 2017)

### ***Aerógrafo***

El aerógrafo utilizado es de la marca, Paasche, de tipo succión y simple acción que se muestra en la Figura 43, posee la capacidad de regular la cantidad de pintura, permitiendo obtener varios abanicos en función del control de este parámetro.



**Figura 43.** Aerógrafo tipo Paasche

Fuente: (Epauk, 2010)

La Tabla 10. Describe las características del aerógrafo Paasche.



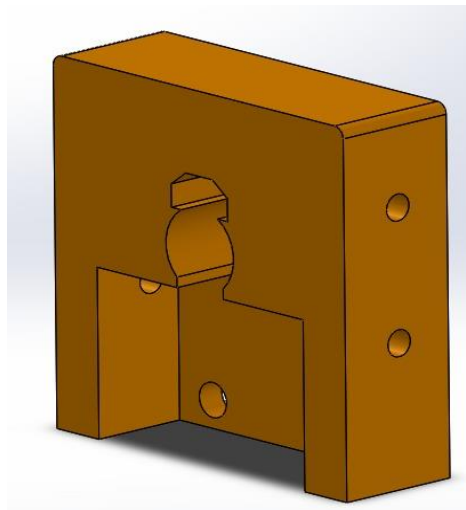
**Tabla 10.**

*Características del aerógrafo Paasche.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Marca	Paashe
Sistema	Simple acción
Consumo de aire	20-30psi
Boquilla	1-3-5 [mm]

### ***Acople***

Pieza diseñada en SolidWorks, y en impresa en plástico ABS, como se muestra en la Figura 44 es utilizada para acoplar el aerógrafo.



***Figura 44.*** Acople para aerógrafo Paasche.

### 3.4.2. Bomba

La bomba vibratoria de la Figura 45 es utilizada como actuador para suministrar pintura al aerógrafo.



*Figura 45.* Bomba utilizada para la succión de pintura.

Las características de la bomba se encuentran descritas en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

*Características de la bomba LXDQ.*

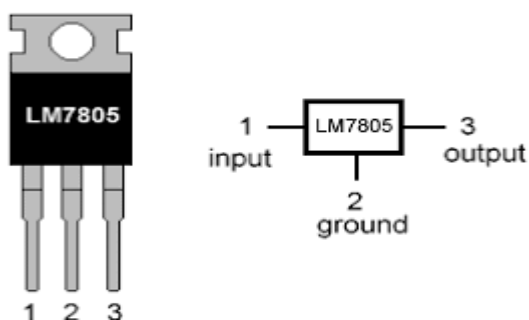
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Alimentación	110 V
Frecuencia	60 HZ
Potencia	48 W

### 3.4.3. Circuito de activación y control de bomba de pintura

El circuito utilizado para el suministro de pintura se encuentra compuesto por tres etapas: un regulador de voltaje, un circuito optoacoplador y un dimmer, los esquemas de funcionamiento son descritos en el siguiente apartado.

### Regulador de voltaje

El regulador de voltaje de la Figura 46, es utilizado para la activación de la bomba que suministra la pintura, se utiliza un circuito integrado LM 7805 que permite disminuir la señal de control del PLC de 24[V] a 5 [V].

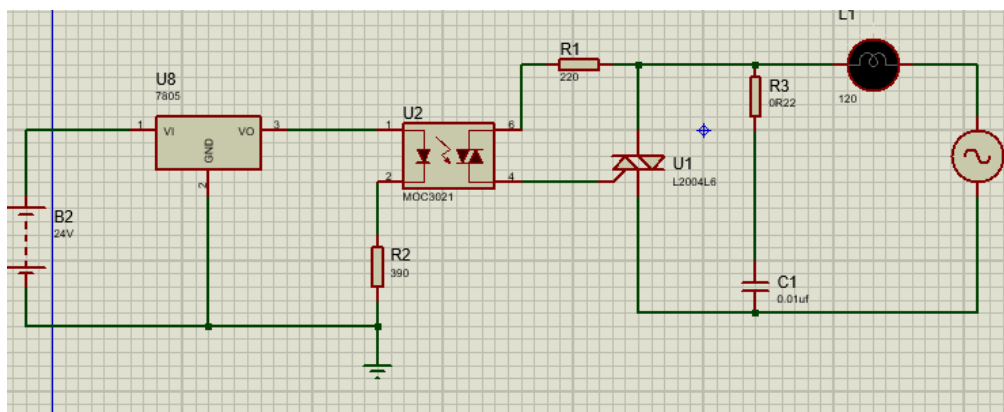


**Figura 46.** Integrado regulador de voltaje

Fuente: (Veloso, 2016)

### Circuito optoacoplador

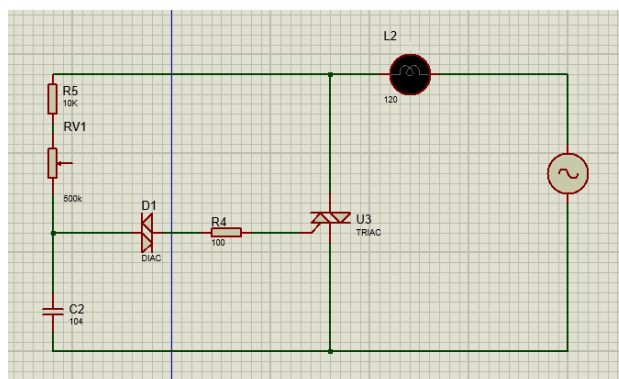
A partir de la señal de control se utiliza un circuito optoacoplador descrito en la Figura 47 para alimentar el dispositivo.



**Figura 47.** Esquema del circuito optoacoplador utilizado para accionar la bomba.

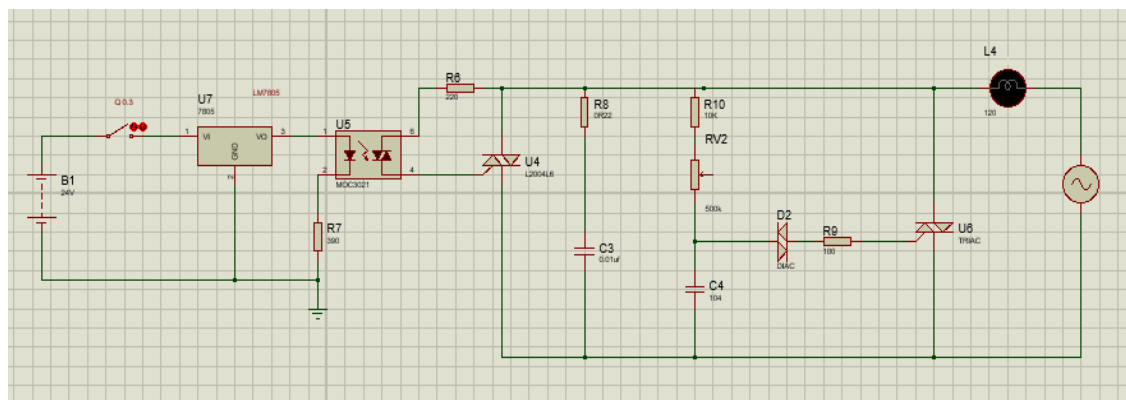
### *Circuito regulador de potencia*

Considerando la elevada potencia del actuador se diseña un circuito (Dimmer) descrito en la Figura 48, que permite regular la alimentación del equipo para variar el caudal de pintura de acuerdo con el proceso que se realiza en el prototipo.



**Figura 48.** Circuito regulador de potencia Dimmer

El circuito de la Figura 49, es el utilizado para activar la bomba para la pintura y regular la potencia suministrada al dispositivo.



**Figura 49.** Circuito de activación y regulación de potencia para bomba de pintura.

### 3.4.4. Electroválvula AIGNEP de accionamiento

Para controlar de manera automática el paso del aire que necesita el aerógrafo para pulverizar, se utiliza la electroválvula AIGNEP descrita en la Figura 50 que pertenece a la estación de trabajo del laboratorio.



*Figura 50.* Electroválvula AIGNEP.

### 3.4.5. Compresor

El compresor de la Figura 51, el cual se encuentra en las instalaciones del laboratorio, entrega una presión máxima de 60 Psi. La presión de trabajo para el aerógrafo fue de 50 Psi.



*Figura 51.* Compresor de las instalaciones del laboratorio.

### 3.5. Diseño del sistema transportador

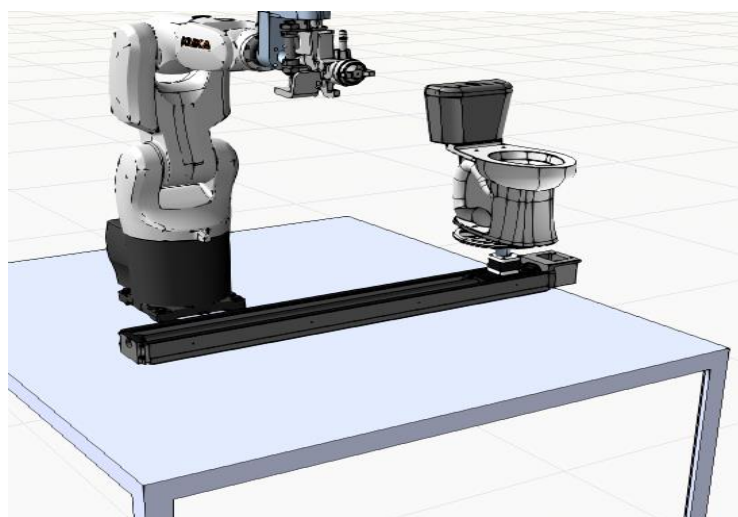
#### 3.5.1. Simulación

Se realiza una simulación en el software KUKA SIM PRO 3.0, en donde se programan los movimientos del robot, de acuerdo a la metodología descrita en el apartado 3.2, para realizar una rutina de pintura.

Esta simulación integra: el inodoro a escala, el aplicador de pintura y elementos constitutivos de la celda robotizada, con el fin de caracterizar el perfil de movimiento de los motores, y no sobredimensionar el resto de los componentes de la celda, considerando los aspectos mencionados en el apartado 1.4.1.

La Figura 52, representa el entorno en el cual se realiza la simulación, en donde el robot, trabajando a su máxima velocidad de funcionamiento y con un abanico estándar de acuerdo al apartado 2.1.5, es capaz de pintar el inodoro mientras se traslada y rota.

Entendiéndose que no existe registro de procesos en condiciones similares, es pertinente partir de una base práctica para no forzar al manipulador robótico, ni al proceso como tal.

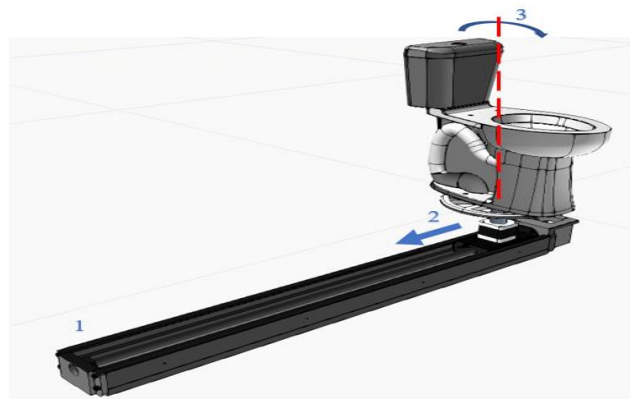


**Figura 52.** Simulación inicial del proceso de pintura de inodoros.

En los apartados siguientes se procede a modelar las características dinámicas del sistema

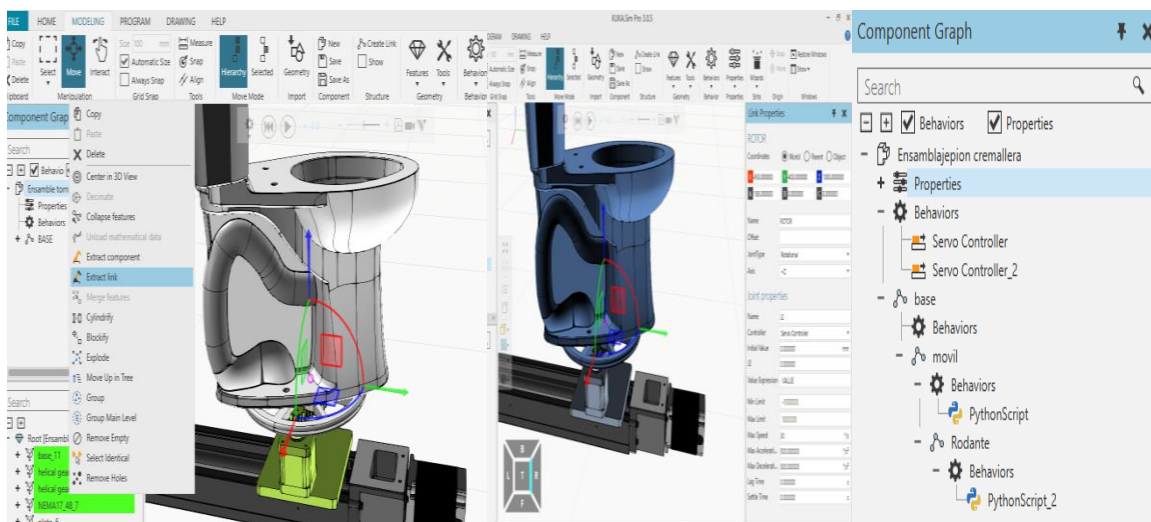
### *Modelamiento del desplazamiento lineal y rotacional del inodoro*

Se diseña un modelo en CAD, el cual se muestra en la Figura 53 que posee tres eslabones.



**Figura 53.** Mecanismo de tres eslabones

Cada eslabón es dependiente de su predecesor, el modelo es importado al software de simulación, y se asigna a cada elemento móvil un motor para generar el tipo de movimiento deseado, la configuración del mecanismo se muestra en la Figura 54.



**Figura 54.** Elementos modelados en el simulador, a partir de un mecanismo de tres eslabones.

*Eslabón base*

Plataforma en donde se genera el proceso de esmaltado o tierra del mecanismo.

*Eslabón traslación*

Mecanismo que traslada al inodoro.

*Script de Python del eslabón de traslación*

Basado en el programa de la Figura 55 que describe el funcionamiento del motor utilizado para la traslación lineal durante la simulación.

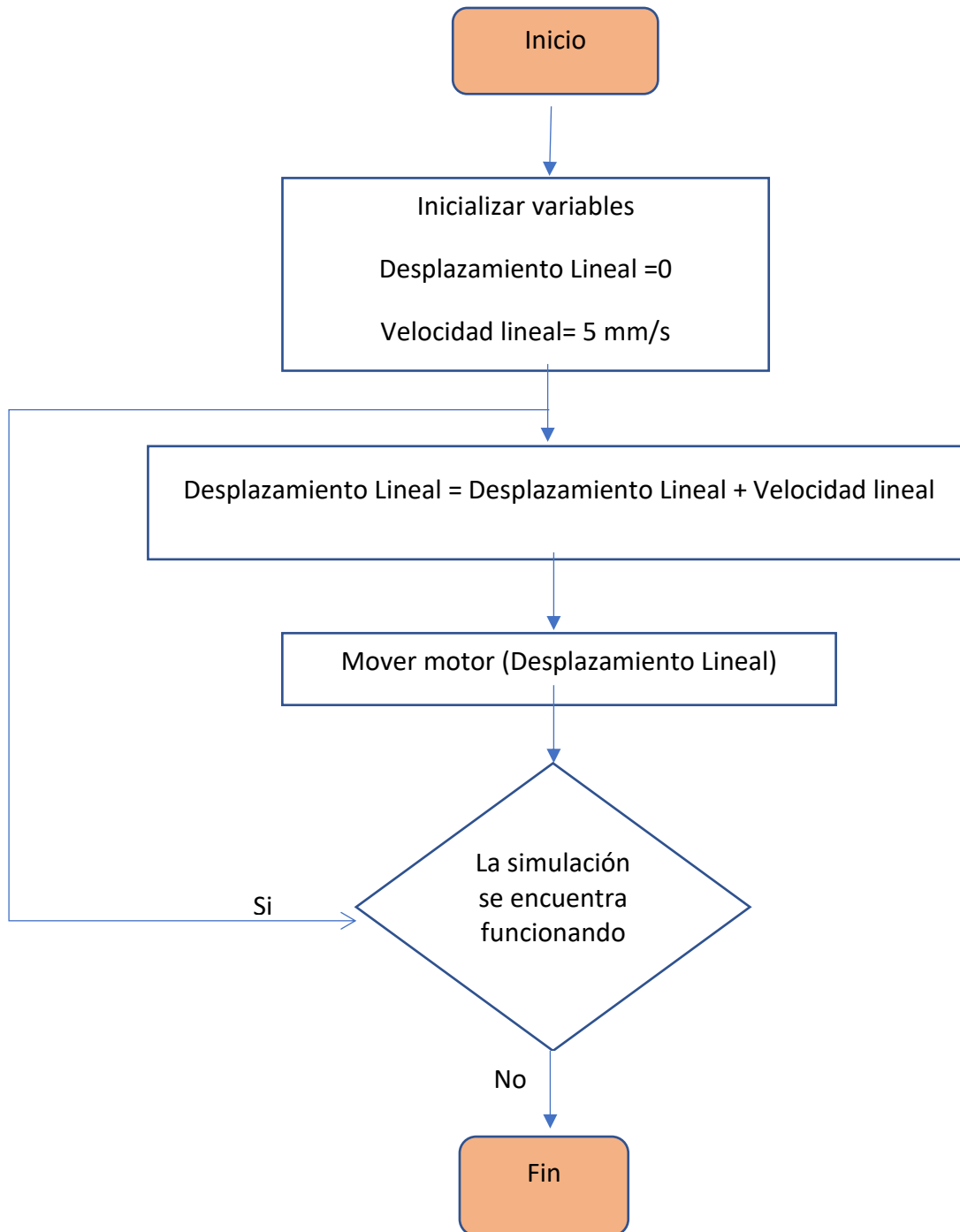
*Eslabón rotacional*

Mecanismo que rota al inodoro sobre su propio eje.

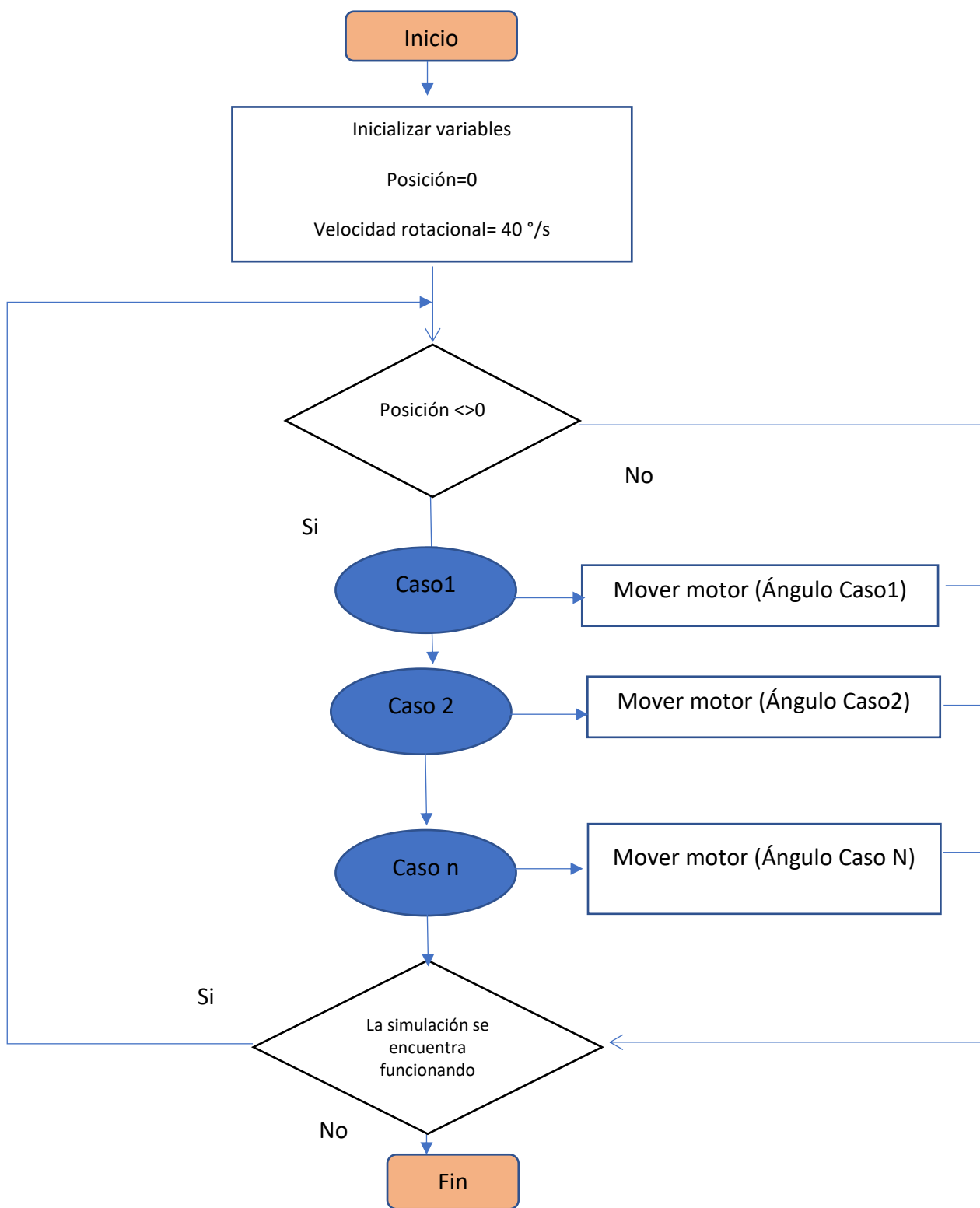
*Script de Python del eslabón rotacional*

Basado en el programa de la Figura 56 que describe el funcionamiento del motor utilizado para la rotación del Inodoro durante la simulación.





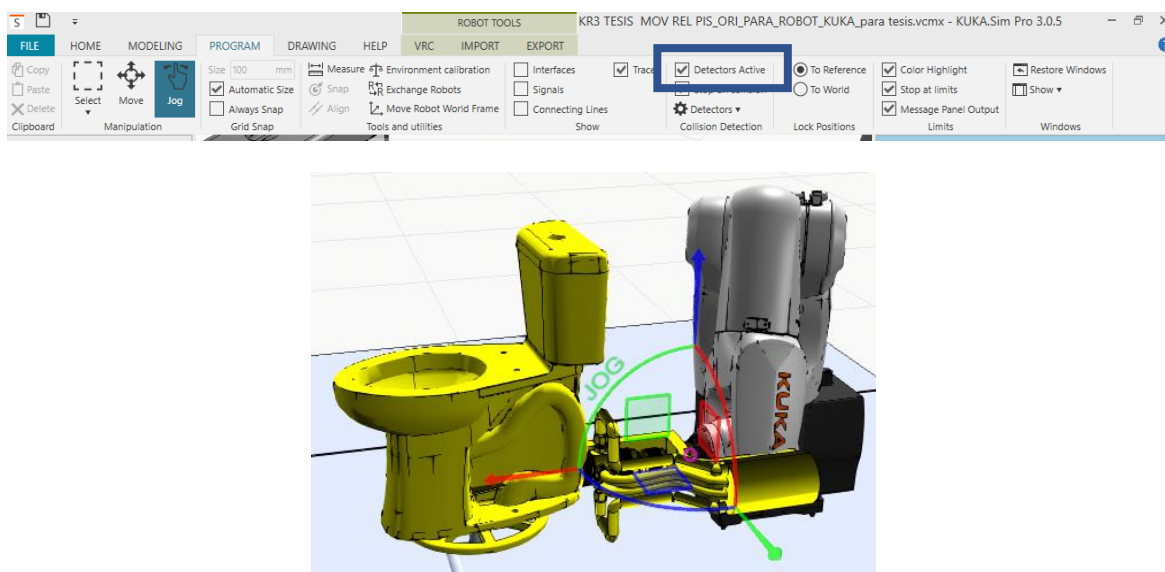
**Figura 55.** Lógica de programación utilizada para producir movimiento lineal.



**Figura 56.** Lógica de programación utilizada para producir movimiento rotacional.

## Colisiones

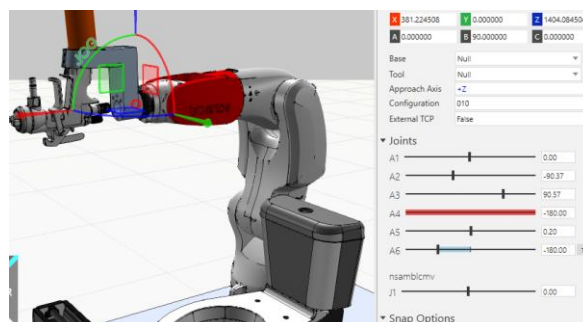
El software KUKA SIM PRO 3.0 tiene la posibilidad de identificar las posibles colisiones entre el manipulador robótico y su entorno, véase la Figura 57.



**Figura 57.** Detección de colisiones.

## Indeterminaciones del robot

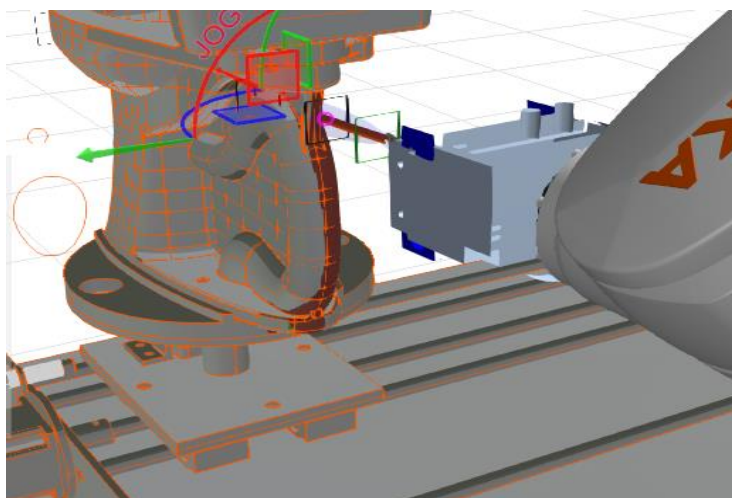
Al incluir la dinámica del proceso, el manipulador robótico al intentar seguir una trayectoria determinada adquiere configuraciones que le son imposibles de alcanzar, como la descrita en la Figura 58.



**Figura 58.** Indeterminación del manipulador.

### ***Painting tool KUKA SIM PRO 3.0***

La herramienta Painting Tool de KUKA SIM PRO 3.0 permite simular la pintura que es aplicada sobre la superficie como se muestra en la Figura 59, lo que permite identificar las secciones del inodoro que han sido recubiertas con pintura.



***Figura 59.*** Aplicación de pintura utilizando Painting Tool

A través de esta herramienta, se configuraron los parámetros de la pistola de pintura considerando los datos de la Tabla 12

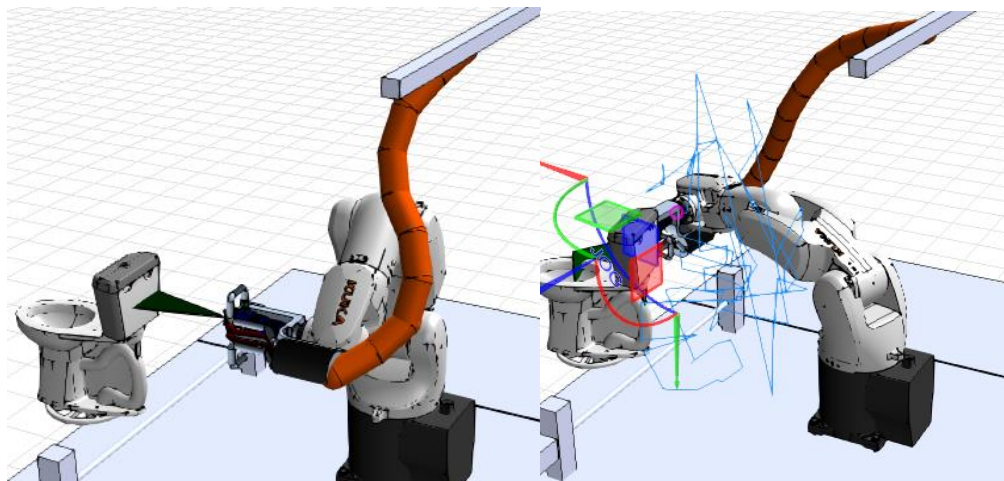
**Tabla 12.**

*Características del abanico de pintura a partir del apartado 2.1.5*

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Tamaño de abanico	100 [mm]
Distancia de aplicación hacia superficie	200 [mm]
Velocidad de operación media entre puntos	2[m/s]

### ***Modelamiento de cables de alimentación de fluidos conectados a la pistola.***

Con el fin de seguir las trayectorias necesarias para pintar el sanitario, el robot debe mover sus articulaciones considerando el movimiento de los cables de los fluidos de pintura y aire, como se muestra en la Figura 60; para evitar posibles roturas por torsión y colisiones con el inodoro, se toma en cuenta el modelamiento de estos elementos, lo que permite identificar la mejor configuración de los ejes para evitar posibles complicaciones.



***Figura 60.*** Simulación de cables de fluidos, durante la ejecución de la rutina de pintura.

### ***Parámetros de diseño del sistema transportador***

Una vez realizada la simulación en el software KUKA SIM PRO 3.0, en la Tabla 13 se resumen los parámetros que representan las condiciones dinámicas del proceso para garantizar un pintado uniforme del inodoro, siempre y cuando el manipulador robótico KUKA KR3 R540 entre cada movimiento se encuentre trabajando a su máxima velocidad de  $2 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

**Tabla 13***Parámetros para diseño de sistema*

<b>Velocidad Lineal</b>	<b>Velocidad de posicionamiento rotacional</b>
$v = 5 \left[ \frac{mm}{s} \right]$	$\omega = 40 \left[ \frac{^\circ}{s} \right]$
Tiempo de aceleración	
0.25 [s]	
Tiempo de desaceleración	
0.25 [s]	
Tiempo total de movimiento	Tiempo de movimiento entre cada posicionamiento
150 [s]	1 [s]
Distancia recorrida	
700 [mm]	40 [°]

### 3.5.2. Selección de tipo de mecanismo transportador y de motores

#### *Sistema de transporte lineal*

En función de los análisis establecidos en la Tabla 5 y Tabla 6 para el sistema de transporte de inodoros se selecciona el mecanismo tornillo sin fin, considerando el costo que implica fabricarlo y su bajo rango de velocidades de trabajo, tomando en cuenta que en la simulación se obtuvo una velocidad máxima de traslación de 5 [mm/s] .

#### *Tipo de motor*

Se decide utilizar un motor a pasos considerando las ventajas y desventajas de la Tabla 7 y 8 debido a que su costo es bajo, y no se prevé agregar mayores cargas a las establecidas en la celda.

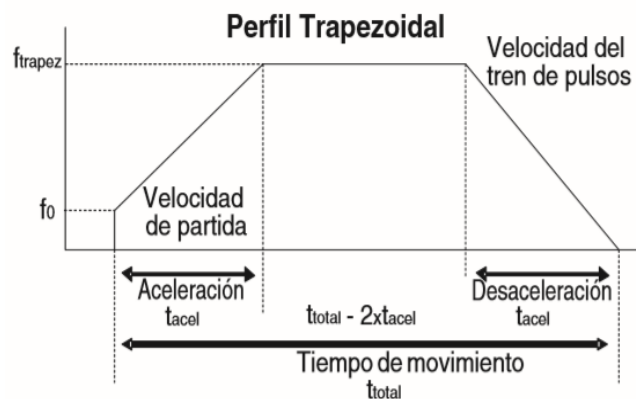
### 3.5.3. Perfil de movimiento del sistema transportador

Considerando los parámetros descritos en la Tabla 13, y considerando los requerimientos los motores deben cumplir, se establece un perfil de movimiento para cada actuador, tal como se muestra en la Figura 61. Por tal motivo se requiere conocer:

- Cuantos pulsos necesita entregar el controlador para alcanzar una posición determinada.
- La resolución de la posición de la carga.
- Frecuencia de pulsos generados por el controlador, para lograr el perfil de movimiento deseado.
- Torque necesario que debe suministrar el motor.
- Inercia del motor respecto a la inercia de la carga.

*Frecuencia de pulsos para obtener el tiempo de movimiento.*

Se consideran los siguientes aspectos:



**Figura 61.** Perfil de movimiento de actuadores.

Fuente: (AutomationDirectcom, 2005)

- Aceleración y desaceleración controlada,
- Tiempo de aceleración y desaceleración igual
- Velocidad inicial

$$f_{Trapez} = \frac{P_{total} - (f_0 \cdot t_{acel})}{t_{total} - t_{acel}} \quad (1)$$

Donde:

$$f_0 = \text{Velocidad de partida}$$

$$t_{acel} = \text{Tiempo de aceleración o desaceleración}$$

- Pulsos necesarios para la aceleración.

$$P_{acel} = (f_{Trapez} - f_0) \cdot t_{acel} \quad (2)$$

- Pulsos necesarios para un movimiento constante

$$P_{cte} = (f_{Trapez}) \cdot (t_{total} - (t_{acel})) \quad (3)$$

- Pulsos necesarios para la desaceleración.

$$P_{desacel} = (f_{Trapez} - 0) \cdot (t_{acel}) \quad (4)$$

### *Torque*

El torque necesario que debe generar un motor para que se permita el funcionamiento correcto de un sistema, como se muestra en las Figura 62, y 63 es igual a la suma del torque necesario para



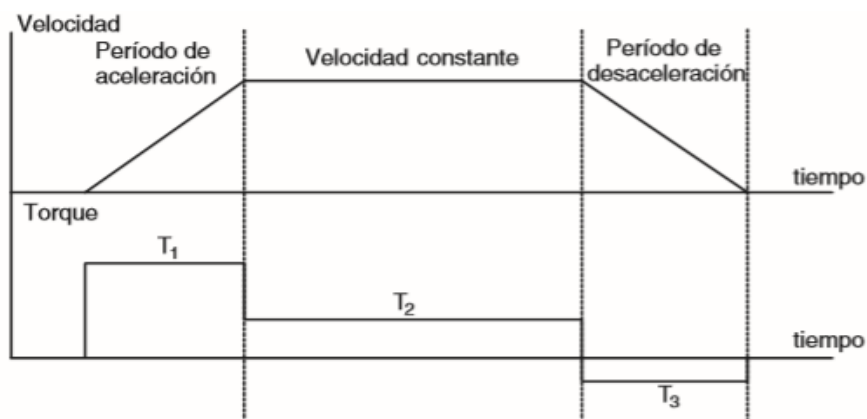
la aceleración y el torque resistivo del sistema generado a rapidez constante, siempre tomando en cuenta un factor de seguridad de entre el 20% y 100%, la definición de los elementos que constituyen el torque se encuentran descritos en la Tabla 14.

$$T_{motor} = (T_{acel} + T_{resist}) \quad (5)$$

**Tabla 14**

*.Componentes del torque requerido por el motor para desplazar una carga*

Componente	Definición
$T_{acel}$	Torque requerido para acelerar y desacelerar la inercia del sistema.
$T_{resist}$	Torque resistivo de la carga cuando se opera el actuador a una velocidad constante causado por la fricción, fuerzas externas a la carga, etc. (AutomationDirectcom, 2005).

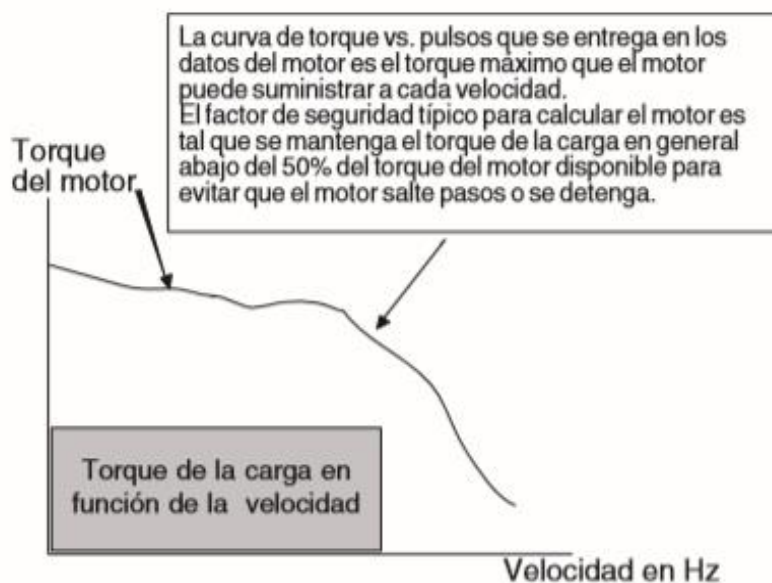


**Figura 62.** Variación de torque respecto al perfil de movimiento del sistema.

Fuente: (AutomationDirectcom, 2005).

### *Torque vs Velocidad*

Relación entre la variación de velocidad y disminución del torque producido



**Figura 63.** Gráfica de reducción de torque respecto de velocidad.

Fuente: (AutomationDirectcom, 2005).

A partir de la Tabla 13, y considerando la eficiencia del reductor utilizado en cada motor, se muestra en la Tabla 15 una descripción de los datos necesarios para el cálculo de los pulsos para obtener el perfil de movimiento.

**Tabla 15.**

*Determinación de cantidad de pulsos para lograr perfil de movimiento*

Característica	Descripción	Eje lineal	Eje rotacional
Tiempo de restitución [s]	Tiempo entre accionamiento de la carga	0.25	0.25

*CONTINÚA*

Frecuencia de partida $f_0$	Velocidad inicial de la carga a desplazarse	0	0
Eficiencia del reductor [%]	Efectividad del reductor	0.45	0.75
Razón de reducción del reductor de velocidad $i = \frac{rev_{motor}}{rev_{reductor}}$	Reducción producida gracias a la utilización de un reductor	1	3
Desplazamiento de la carga $d_{carga}$	Desplazamiento que se mueve la carga por rotación del eje del actuador	2 [mm]	360[°]
Resolución de posición $L_\theta = \frac{d_{carga}}{\theta_{paso}}$	Distancia recorrida por paso del motor	$L_\theta = 0.01mm$	1.8 [°]
Resolución del paso del accionamiento $(\frac{Pasos}{rev_{motor}})$ $\theta_{paso} = \frac{d_{carga}}{\frac{i}{L_\theta}}$	Cantidad de pulsos para realizar rotación del eje del motor	200	66.66

CONTINÚA

$\frac{P_{total}}{i} = \frac{D_{total}}{d_{carga}} \cdot \theta_{paso}$	Pulsos necesarios para realizar movimiento completo de la carga	70000	16.667
$f_{Trapez} = \frac{P_{total} - (f_0 \cdot t_{acel})}{t_{total} - t_{acel}}$	Rapidez a la que se desplaza la carga	467.446 [HZ] = 140.234 [RPM] = 14.685 $\left[\frac{rad}{seg}\right]$	21.889 [HZ]=20 [RPM] = 2.094 $\left[\frac{rad}{seg}\right]$

### ***Dimensionamiento del motor utilizado para generar el movimiento lineal del sistema transportador***

Velocidad rotacional del motor [RPM]

$$n_{motor} = V_{carga} \cdot P \quad (6)$$

Donde:

$$n_{motor} (RPM)$$

$$v_{carga} \left( \frac{mm}{min} \right)$$

*Torque requerido para acelerar y desacelerar la carga*

$$T_{acel} [Nm] = J_{total} [Kgm^2] * \frac{\Delta_{velocidad} [RPM]}{\Delta_{tiempo} [s]} \quad (7)$$

Para realizar el dimensionamiento del motor que se va a ocupar, se debe determinar cuál debe ser el torque necesario para vencer el estado de reposo en el cual se encuentra la masa que se desea desplazar considerando un perfil de aceleración adecuado para el proceso.

*Torque de fricción*

$$T_{resist}[kgm^2] = \frac{\left(\frac{F_{total}}{2\pi P} + T_{preload}\right)}{i} \quad (8)$$

*Fuerza total*

$$F_{total}[N] = F_{ext} + F_{fricción} + F_{gravedad} \quad (9)$$

*Inercia total del motor*

La inercia total del sistema es igual a la suma de las inercias de todos los elementos que van a ser sometidos a movimiento.

$$J_{total}[Kgm^2] = J_{motor} + J_{reductor} + \left(\frac{J_{acoplamiento} + J_{tornillo} + J_{carga}}{i^2}\right) \quad (10)$$

*Inercia de la carga*

$$J_{carga} = \left(\frac{Peso[kg] \cdot 2\pi P}{e}\right) \quad (11)$$

*Inercia del tornillo sin fin*

$$J_{tornillo}[kgm^2] = \frac{(\pi \cdot L \cdot p \cdot r^4)}{2} \quad (12)$$

$$J_{(tornillo+carga)/motor}[kgm^2] = \frac{(J_{tornillo} + J_w)}{i^2} \quad (13)$$

*Inercia (tornillo sin fin +carga)*

*Torque necesario para mover la carga*

$$J_{total}[Kgm^2] = J_{motor} + J_{reductor} + \left( \frac{J_{acoplamiento} + J_{tornillo} + J_{carga}}{i^2} \right)$$

$$J_{motor} = 57 \cdot 10^{-6}[kg \cdot m^2] \text{ dato del motor}$$

$$J_{reductor} = 0[gm \cdot cm^2]$$

$$J_{acoplamiento} = 3,29 \cdot 10^{-6}[Kg \cdot m^2]$$

dato obtenido desde software SolidWorks, se estima una carga de 5kg considerando las posibles variantes en el diseño.

$$J_{carga} = \left( \frac{Peso}{effi} \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Paso} \right)^2 \right)$$

$$J_{carga} = 6.755 \cdot 10^{-13}[kgm^2]$$

$$i = 1$$

$L = 0.860m$  longitud del tornillo

*Material del tornillo: Acero*

$$p = 7850 \frac{kg}{m^3}$$

$$J_{tornillo}[kgm^2] = \frac{(\pi \cdot L \cdot p \cdot r^4)}{2} = 1.374 \cdot 10^{-5}[kgm^2]$$

*Inercia del tornillo más la carga respecto del motor*

$$J_{(tornillo+carga)/motor}[kgm^2] = \frac{(J_{tornillo} + J_w)}{i^2} = 1.374 \cdot 10^{-5}[kgm^2]$$

*Inercia total del sistema*

$$J_{total}[Kgm^2] = J_{motor} + J_{reductor} + \left( \frac{J_{acoplamiento} + J_{tornillo} + J_{carga}}{i^2} \right) = 2.273 \cdot 10^{-5}[kgm^2]$$

*Torque de aceleración*

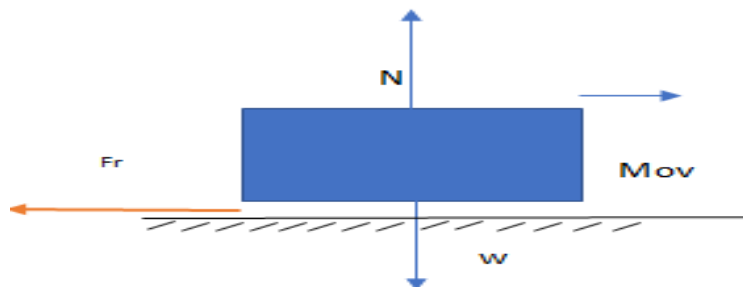
$$T_{acel}[Nm] = J_{total}[Kgm^2] * \frac{\Delta_{velocidad}[RPM]}{\Delta_{tiempo}[s]} = 4.3 \cdot 10^{-3} = 0.043[Nm]$$

*Consideración respecto a la fricción*

Al analizar el movimiento del tornillo sin fin se considera que no existe una fuerza externa al mecanismo que vaya en contra al movimiento del inodoro, por consiguiente,  $F_{ext} = 0$ , de la misma manera la fuerza de gravedad trabaja en un plano distinto al movimiento realizado, por tal motivo a esta fuerza también se la considera como cero  $F_{gravedad} = 0$ ,

Debido a que existe fricción entre las superficies en contacto: rodamientos, y tornillo sin fin, se considera el coeficiente de fricción de los rodamientos lineales  $u=0.14$ , en consecuencia la  $F_{fricción}$  mostrada en la Figura 64 será equivalente al valor de la normal por el coeficiente de fricción.

$$F_{fricción}[N] = u \cdot W \cdot g = 6.867[N] \quad (14)$$



**Figura 64.** Fuerza de fricción producida gracias al avance de la carga.

Fuente: (Rexroth Bosch, 2006)

El valor de la fuerza total externa será igual al valor de la fuerza de fricción.

$$F_{totalExt} = F_{fricción}$$

Considerándose que no existe precargar su valor será igual a cero  $T_{preload} = 0$

*Torque Resistivo*

$$T_{resist}[kgm^2] = \frac{\left(\frac{F_{total}}{2\pi P} + T_{preload}\right)}{i} = 2.186 \cdot 10^{-6}[Nm]$$

*Torque total del motor*

$$T_{motor} = (T_{acel} + T_{resist}) = 0.043[Nm]$$

*Potencia para acelerar el sistema*

$$Pot_{acel} = (T_{acel} \cdot \omega_0) = 0.64[W]$$

***Dimensionamiento de motor utilizado para generar el movimiento circular del sistema transportador***

*Velocidad a la entrada del reductor*

$$N_1 = 20 [RPM]$$

*Velocidad a la salida del reductor*

$$N_2 = \frac{N_1}{i} \quad (15)$$

$$N_2 = \frac{20 [RPM]}{i}$$

$$N_2 = 6.667[RPM]$$



### *Potencia de entrada*

#### *Ley fundamental del engrane*

“La razón de la velocidad angular entre los engranes debe ser constante a lo largo del acoplamiento” (Norton, 2011)

la razón de velocidad  $i$  es igual a la razón del radio de paso del engrane de entrada sobre el radio de paso del engrane de salida

$$i = \frac{\omega_{sal}}{\omega_{ent}} = \frac{r_{ent}}{r_{sal}} \quad (16)$$

Ángulo de presión  $\phi$ , es el ángulo entre la línea de acción (normal común), y la dirección de la velocidad en el punto de paso, los valores estándar son 14.5, 20 y 25

#### Razón de engranes

La razón de engranes se muestra como el número de dientes del engrane dividido para el número de dientes del piñón.

$$m_g = \frac{N_2}{N_1} \quad (17)$$

#### *Parámetros de diseño para la geometría de engranes rectos*

En la Tabla 16, se muestra el cálculo de los parámetros geométricos del piñón y el engrane del sistema rotacional

**Tabla 16**

*Cálculo de dimensiones correspondiente a geometría de piñón y engrane*

Característica	Fórmula	PIÑÓN [mm]	ENGRANE [mm]
Adendum	$a = m$	1.5	1.5
Dedendum	$b = 1.25 \cdot m$	1.875	1.87
Diámetro primitivo	$Dp = m \cdot N$	22.5	67.5
Diámetro exterior	$de = m(z + 2)$	25.5	70.5
Diámetro interno	$di = dp - 2.5m$	18.75	63.7
Paso circular	$Pc = \frac{\pi d}{z}$	4.7124	4.71
Paso base	$Pb = Pc \cdot \cos(\theta n)$	4.4282	4.42
Altura del diente	$h = 2.25 \cdot m$	3.375	3.37
Espesor del diente	$e = \frac{Pc}{2}$	2.3562	2.35
Ancho del engrane	$b = 10 \cdot m$	15	15
Número de dientes mínimo del piñón para que no exista interferencia	$N_p = \frac{2k}{(1 + 2m)(\sin(\phi))^2} \left( m + \sqrt{m^2 + (1 + 2m)(\sin(\phi))^2} \right)$	13.46	---
Número de dientes máximo de engrane para que no exista interferencia	$N_g = \frac{N_p^2 (\sin(\phi))^2}{4k - 2N_p (\sin(\phi))^2}$	--	45.4

### *Tabla de Inercias*

En la Tabla 17, se muestran los datos calculados por el software de simulación SolidWorks referente a las inercias de los elementos diseñados en CAD del sistema rotacional de la celda robotizada.

**Tabla 17***Inercias necesarias para el cálculo, del torque del motor*

<b>Ítem</b>	<b>Valor</b>
Inercia del engrane	48507.23[gr · mm <sup>2</sup> ]
Inercia del piñón	616.83[gr · mm <sup>2</sup> ]
Inercia de la carga	10443565.45[gr · mm <sup>2</sup> ]
Inercia del motor	54[gr · cm <sup>2</sup> ]

*Inercias*

$$Jl = J_{\text{piñon}} + \left( \frac{J_{\text{engrane}} + J_{\text{carga}}}{i^2} \right) \quad (18)$$

$$= 1.555 \cdot 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$$

*Inercia consideran el motor más el sistema*

$$Jt = J_{\text{motor}} + \left( \frac{Jl}{\eta} \right) = 1.561 \cdot 10^{-3} [\text{kg} \cdot \text{m}^2] \quad (19)$$

*Torque necesario para la aceleración*

$$Ta = Jt \cdot \left( \frac{w_0}{t_{\text{acel}}} \right) = 0.013 [\text{Nm}] \quad (20)$$

*Torque durante velocidad constante*

$$Tm = Jt \cdot \left( \frac{w_0}{t_{\text{mov}}} \right) = 3.268 \cdot 10^{-3} [\text{Nm}] \quad (21)$$

*Torque necesario para vencer la fricción*

*Fuerza de fricción*

$$Uc = 1.5 \cdot 10^{-3}$$

$$W = N = 5kg$$

$$Fr = Uc \cdot N = 0.074Nm \quad (22)$$

Radio de fricción considerando el radio del rodamiento

- Radio del rodamiento =0.0075[m]

$$T_{resist} = Fr \frac{r_{Fric}}{\eta} = 7.358 \cdot 10^{-4}[Nm] \quad (23)$$

*Torque total*

$$T_{motor} = (T_{acel} + T_{resist} + T_m) = 0.018[Nm] \quad (24)$$

$$Pot = T_{motor} \cdot \omega_0 = 0.037[W] \quad (25)$$

### ***Selección de motores.***

Los motores nema 17 y nema 23, se encuentran a disposición de los estudiantes y debido a que cumplen con los parámetros mencionados anteriormente, se los utiliza en el sistema transportador; sus características se detallan en la Tabla 18.

**Tabla 18.**  
*Selección de motores*

Motor sistema lineal	Motor sistema rotacional
T_motor_lineal=0.043[Nm]	T_motor_rotacional = 0.017 [Nm]
$w_o = 14.685 \frac{rad}{s}, n = 140.234 [rpm]$	$w_o = 2.094 \frac{rad}{s}, n = 6.66 [rpm]$
Pot=0.624 [w]	Pot=0.036 [w]
Nema 23 KL23H241-06-4"	Nema 17 17PM-K345-P2VS
Torque: 70 [oz·in] - 0.49[Nm]	Torque: 210 [mNm] - 0.21 [Nm]
Inercia:57 [g·cm <sup>2</sup> ]	Inercia:35 [g·cm <sup>2</sup> ]
Corriente 1[A]	Corriente 1[A]
Alimentación 10 [V]	Alimentación 10 [V]
1.8° /Paso	1.8° /Paso



Para poder controlar el funcionamiento de los motores a pasos se utilizan los drivers descritos a continuación.

#### ***Driver de motor a pasos HT-DIV-268N-5A***

Los drivers de la Figura 65 permiten controlar los motores nema gracias a las varias configuraciones que se pueden ajustar mediante el manejo de un deep switch. El driver puede soportar hasta 5[A], con motores de alimentación entre los 12 [V] a 48 [V] en continua, se caracteriza por poseer protección sobre cortocircuitos, exceso de corriente, sobre y bajo voltaje.

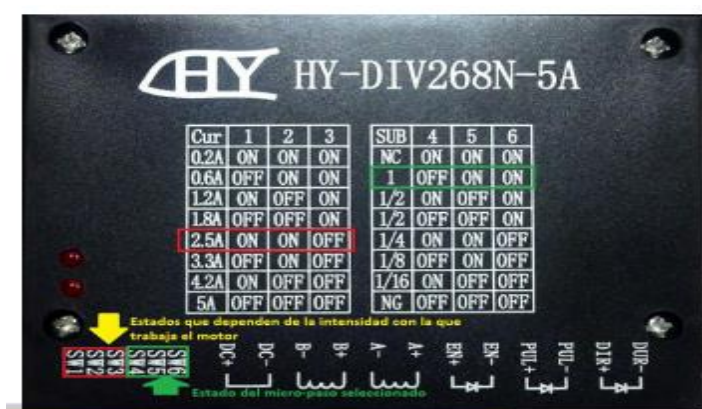
Su funcionamiento es controlado gracias al Chip TB6600, la temperatura a la que puede trabajar oscila entre los -10 y 45 [°C], las señales de control aisladas de manera óptica y posee control de

capacidad de corriente de 0.2 a 5 [A], sus pines de conexión se encuentran descritos en la Tabla 19.

**Tabla 19.**

*Pines para la conexión de la etapa de control*

PUL+	La señal pulso en flanco de subida
PUL-	Señal de pulso en flanco de bajada
DIR+	Dirección del paso configurada en flanco de subida
DIR-	Dirección del paso configurada en flanco de bajada
EN+	Activación del motor a pasos con flanco positivo
EN-	Activación del motor a pasos con flanco negativo



**Figura 65.** Driver de motor a pasos HY-DIV268N-5A.

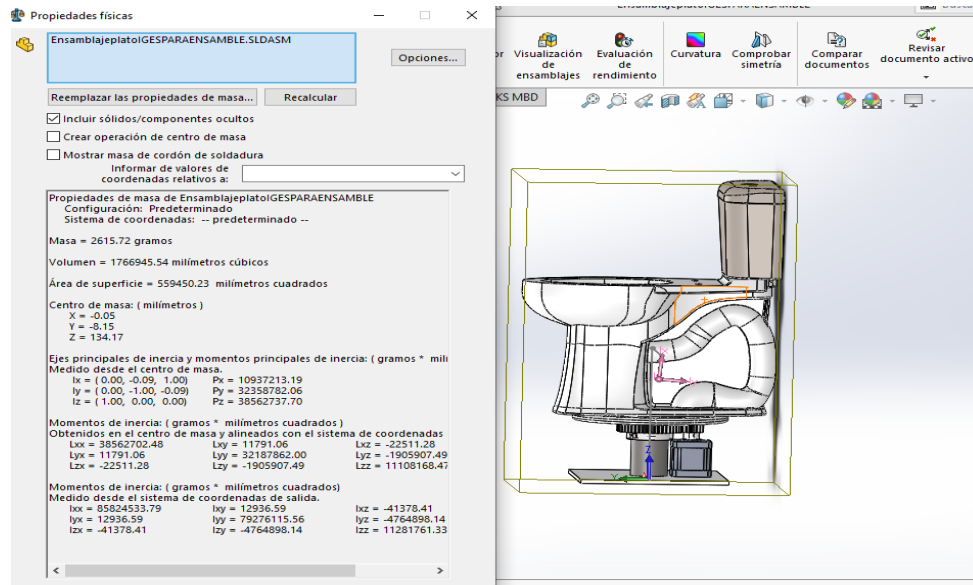
Fuente: (Electropro, 2018)

### 3.5.4. Dimensionamiento del mecanismo de traslación lineal del sistema transportador

El diseño del mecanismo de traslación tiene como objetivo determinar el diámetro de los ejes que constituyen el transportador lineal, se analiza la carga que deben soportar los ejes destinados al soporte del inodoro, y la flexión del tornillo sin fin que lo traslada.

## Diseño de ejes de carga

Para el diseño de los ejes que soportan la carga del mecanismo de traslación lineal es necesario conocer el centro de masa de la carga que se desea transportar tal como se muestra en la Figura 66.

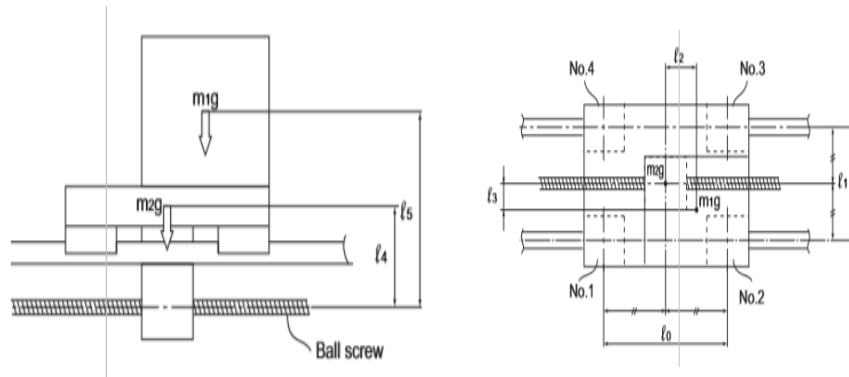


**Figura 66.** Ubicación del centro de gravedad del plato.

### Ubicación de centro de gravedad

- X = -0.05
- Y = -8.15
- Z = 134.17

Para el diseño de ejes se tomó en cuenta la guía elaborada por la empresa THK la cual expresa que para un mecanismo de traslación lineal de 4 soportes y cargas no concéntricas, la distribución de fuerzas en los apoyos se muestra en la Figura 67.



**Figura 67.** Distribución de carga en mecanismo de traslación lineal

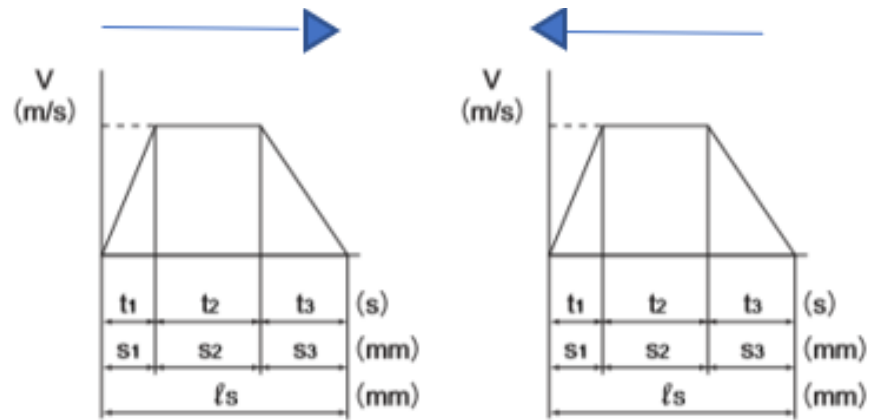
Fuente: (THK, 2001)

Entendiéndose que garantizar la concentricidad entre el centro de gravedad del inodoro con la del soporte no es posible se considera el dimensionamiento en los puntos más críticos de soporte.

- $m1_g = (x, x)[mm]$
- $m2_g = (-x, x)[mm]$
- $m3_g = (x, -x)[mm]$
- $m4_g = (-x, -x)[mm]$

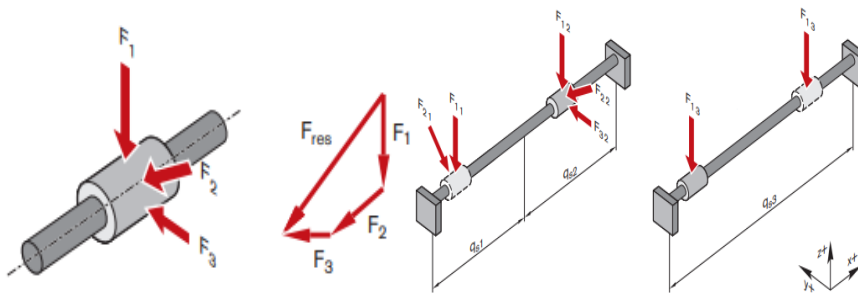
Realizándose el análisis respectivo para cada caso. Durante el estudio de movimiento se analiza la distribución de cargas en sentido izquierda derecha y viceversa tal como se muestra en la Figura 68, así como en el caso de aceleración, movimiento constante y desaceleración.





**Figura 68.** Perfil de movimiento de la carga ambas direcciones

Considerando que en un rodamiento circular existen varias cargas que actúan sobre él, la carga total existente es igual a la sumatoria de cada uno de sus componentes Figura 69.



**Figura 69.** Sumatoria de fuerzas producidas dentro de un rodamiento

Fuente:(Rexroth Bosch, 2006)

$$F_{res} = F_1 + F_2 + F_3 + \dots F_k \quad (26)$$

***Distribución de carga sobre soporte del tornillo sin fin durante movimiento uniforme***

$$P_1 = \frac{m_1 g}{4} - \frac{m_1 g \cdot l_2}{2l_0} + \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} + \frac{m_2 g}{4} \quad (27)$$

$$P_2 = \frac{m_1 g}{4} + \frac{m_1 g \cdot l_2}{2l_0} + \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} + \frac{m_2 g}{4} \quad (28)$$

$$P_3 = \frac{m_1 g}{4} + \frac{m_1 g \cdot l_2}{2l_0} - \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} + \frac{m_2 g}{4} \quad (29)$$

$$P_4 = \frac{m_1 g}{4} - \frac{m_1 g \cdot l_2}{2l_0} - \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} + \frac{m_2 g}{4} \quad (30)$$

***Distribución de carga sobre soporte del tornillo sin fin durante aceleración hacia la izquierda***

*Carga radial  $P\ell a_n$*

$$P\ell a_1 = P_1 - \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (31)$$

$$P\ell a_2 = P_2 + \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (32)$$

$$P\ell a_3 = P_3 + \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (33)$$

$$P\ell a_4 = P_4 - \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (34)$$

*Carga lateral  $Pt\ell a_n$*

$$Pt\ell a_1 = -\frac{m_1\alpha_1\ell_3}{2\ell_o} \quad (35)$$

$$Pt\ell a_2 = +\frac{m_1\alpha_1\ell_3}{2\ell_o} \quad (36)$$

$$Pt\ell a_3 = +\frac{m_1\alpha_1\ell_3}{2\ell_o} \quad (37)$$

$$Pt\ell a_4 = -\frac{m_1\alpha_1\ell_3}{2\ell_o} \quad (38)$$

*Distribución de la carga durante la desaceleración respecto al movimiento hacia la izquierda  $P\ell d_n$*

*Carga aplicada en dirección radial  $P\ell d_1$*

$$P\ell d_1 = P_1 + \frac{m_1\alpha_3\ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2\alpha_3\ell_4}{2\ell_o} \quad (39)$$

$$P\ell d_2 = P_2 - \frac{m_1\alpha_3\ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2\alpha_3\ell_4}{2\ell_o} \quad (40)$$

$$P\ell d_3 = P_3 - \frac{m_1\alpha_3\ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2\alpha_3\ell_4}{2\ell_o} \quad (41)$$

$$P\ell d_4 = P_4 + \frac{m_1\alpha_3\ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2\alpha_3\ell_4}{2\ell_o} \quad (42)$$

*Carga aplicada en dirección lateral  $Pt\ell d_n$*

$$Pt\ell d_1 = + \frac{m_1 \alpha_3 \ell_3}{2\ell_o} \quad (43)$$

$$Pt\ell d_2 = - \frac{m_1 \alpha_3 \ell_3}{2\ell_o} \quad (44)$$

$$Pt\ell d_3 = - \frac{m_1 \alpha_3 \ell_3}{2\ell_o} \quad (45)$$

$$Pt\ell d_4 = + \frac{m_1 \alpha_3 \ell_3}{2\ell_o} \quad (46)$$

***Aceleración hacia la derecha***

*Carga aplicada en dirección radial  $Pra_n$*

$$Pra_1 = P_1 + \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (47)$$

$$Pra_2 = P_2 - \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (48)$$

$$Pra_3 = P_3 - \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (49)$$

$$Pra_4 = P_4 + \frac{m_1 \alpha_1 \ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2 \alpha_1 \ell_4}{2\ell_o} \quad (50)$$

*Carga aplicada en dirección lateral  $Ptra_n$*

$$Ptra_1 = + \frac{m_1 \alpha_1 \ell_3}{2\ell_o} \quad (51)$$

$$Ptra_2 = - \frac{m_1 \alpha_1 \ell_3}{2\ell_o} \quad (52)$$

$$Ptra_3 = - \frac{m_1 \alpha_1 \ell_3}{2\ell_o} \quad (53)$$

$$Ptra_4 = + \frac{m_1 \alpha_1 \ell_3}{2\ell_o} \quad (54)$$

*Desaceleración radial hacia la derecha  $Prd_n$*

$$Prd_1 = P_1 - \frac{m_1 \alpha_3 \ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2 \alpha_3 \ell_4}{2\ell_o} \quad (55)$$

$$Prd_2 = P_2 + \frac{m_1 \alpha_3 \ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2 \alpha_3 \ell_4}{2\ell_o} \quad (56)$$

$$Prd_3 = P_3 + \frac{m_1 \alpha_3 \ell_5}{2\ell_o} + \frac{m_2 \alpha_3 \ell_4}{2\ell_o} \quad (57)$$

$$Prd_4 = P_4 - \frac{m_1 \alpha_3 \ell_5}{2\ell_o} - \frac{m_2 \alpha_3 \ell_4}{2\ell_o} \quad (58)$$

*Desaceleración lateral hacia la derecha  $Ptrd_n$*

$$Ptrd_1 = -\frac{m_1\alpha_3\ell_3}{2\ell_o} \quad (59)$$

$$Ptrd_2 = +\frac{m_1\alpha_3\ell_3}{2\ell_o} \quad (60)$$

$$Ptrd_3 = +\frac{m_1\alpha_3\ell_3}{2\ell_o} \quad (61)$$

$$Ptrd_4 = -\frac{m_1\alpha_3\ell_3}{2\ell_o} \quad (62)$$

### ***Combinación de cargas***

*Durante aceleración hacia la izquierda*

$$P_E\ell a_1 = |P\ell a_1| + |Pt\ell a_1| \quad (63)$$

$$P_E\ell a_2 = |P\ell a_2| + |Pt\ell a_2| \quad (64)$$

$$P_E\ell a_3 = |P\ell a_3| + |Pt\ell a_3| \quad (65)$$

$$P_E\ell a_4 = |P\ell a_4| + |Pt\ell a_4| \quad (66)$$

*Durante la desaceleración hacia la izquierda*

$$P_E \ell d_1 = |P \ell d_1| + |P t \ell d_1| \quad (67)$$

$$P_E \ell d_2 = |P \ell d_2| + |P t \ell d_2| \quad (68)$$

$$P_E \ell d_3 = |P \ell d_3| + |P t \ell d_3| \quad (69)$$

$$P_E \ell d_4 = |P \ell d_4| + |P t \ell d_4| \quad (70)$$

*Durante aceleración hacia la derecha*

$$P_E r a_1 = |P r a_1| + |P t r a_1| \quad (71)$$

$$P_E r a_2 = |P r a_2| + |P t r a_2| \quad (72)$$

$$P_E r a_3 = |P r a_3| + |P t r a_3| \quad (73)$$

$$P_E r a_4 = |P r a_4| + |P t r a_4| \quad (74)$$

*Durante la desaceleración hacia la derecha*

$$P_E r d_1 = |P r d_1| + |P t r d_1| \quad (75)$$

$$P_E r d_2 = |P r d_2| + |P t r d_2| \quad (76)$$

$$P_E r d_3 = |P r d_3| + |P t r d_3| \quad (77)$$

$$P_E r d_4 = |P r d_4| + |P t r d_4| \quad (78)$$

### Obtención de la carga promedio

Para la obtención de la carga promedio es necesario conocer los valores de  $s_1, s_2, s_3$  que son correspondientes a las distancias que recorre la carga durante la aceleración, desaceleración y movimiento constante.

$$Pm_1 = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \cdot \ell_S} (P_E \ell a_1^3 \cdot s_1 + 2P_{E1}^3 \cdot s_2 + P_E \ell d_1^3 \cdot s_3 + P_{E1} r a_1^3 \cdot s_1 + P_{E1} r d_1^3 \cdot s_3)} \quad (79)$$

$$Pm_2 = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \cdot \ell_S} (P_E \ell a_2^3 \cdot s_1 + 2P_{E2}^3 \cdot s_2 + P_E \ell d_2^3 \cdot s_3 + P_{E2} r a_2^3 \cdot s_1 + P_{E2} r d_2^3 \cdot s_3)} \quad (80)$$

$$Pm_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \cdot \ell_S} (P_E \ell a_3^3 \cdot s_1 + 2P_{E3}^3 \cdot s_2 + P_E \ell d_3^3 \cdot s_3 + P_{E3} r a_3^3 \cdot s_1 + P_{E3} r d_3^3 \cdot s_3)} \quad (81)$$

$$Pm_4 = \sqrt[3]{\frac{1}{2 \cdot \ell_S} (P_E \ell a_4^3 \cdot s_1 + 2P_{E4}^3 \cdot s_2 + P_E \ell d_4^3 \cdot s_3 + P_{E4} r a_4^3 \cdot s_1 + P_{E4} r d_4^3 \cdot s_3)} \quad (82)$$

### Tabla de fuerzas desarrolladas

En la Tabla 20., se muestra un resumen de la distribución de cargas que deben soportar los ejes en el sistema transportador.

#### Tabla 20.

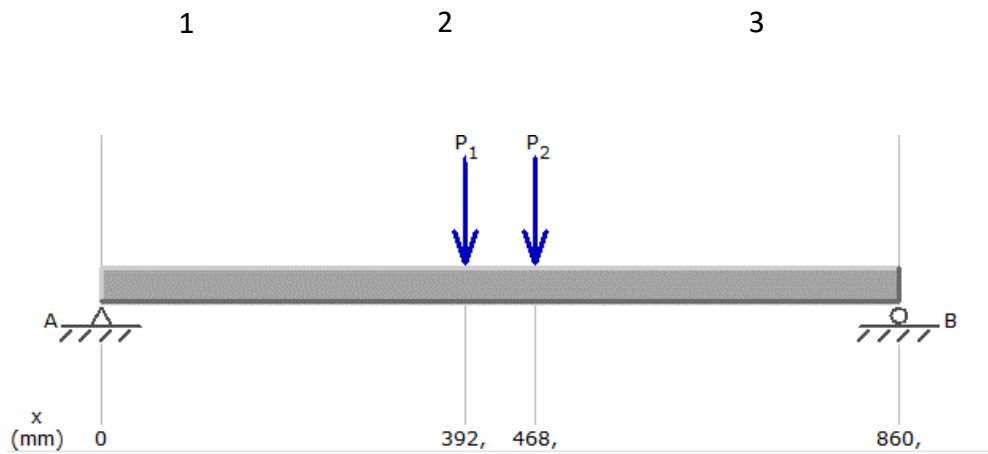
*Distribución de fuerzas respecto a posicionamiento de la carga*

(-20,20) mm	(20,20) mm	(20,-20) mm	(-20,-20) mm
<b><math>Pm_1 = 15.132[N]</math></b>	$Pm_1 = 12.444[N]$	$Pm_1 = 10.402 [N]$	$Pm_1 = 13.089 [N]$
$Pm_2 = 12.444 [N]$	<b><math>Pm_2 = 15.132[N]</math></b>	$Pm_2 = 13.089 [N]$	$Pm_2 = 10.402[N]$
$Pm_3 = 10.402 [N]$	$Pm_3 = 13.089[N]$	<b><math>Pm_3 = 15.132 [N]</math></b>	$Pm_3 = 12.444[N]$
$Pm_4 = 13.089 [N]$	$Pm_4 = 10.402[N]$	$Pm_4 = 12.444 [N]$	<b><math>Pm_4 = 15.132 [N]</math></b>



### *Análisis de deflexión de primer soporte*

Considerando el comportamiento de la distribución de cargas sobre las guías, se analiza su comportamiento como si estas fueran vigas, y debido a que la magnitud de la carga neta aplicada sobre el eje no varía respecto a la ubicación del centro de gravedad del inodoro, respecto al mecanismo de traslación lineal, se utiliza una sola configuración para el análisis respectivo de flexión, tal como se muestra en la Figura 70.



**Figura 70.** Distribución de cargas viga de soporte 1

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 = 15,132[N] + 12.444[N]$$

$$R_1 + R_2 = 27.576[N]$$

$$\sum M_1 = 0$$

$$-15,132[N](0.392m) - 12.444[N](0.468m) + R_B(0.860m) = 0$$

$$R_2 = \frac{11,75Nm}{0.86m}$$

$$R_2 = 13.67[N]$$

$$R_1 = 13.91[N]$$

*Análisis de cortante*

1)

$$\sum F_y = 0$$

$$V = R_1$$

$$V = 13.91[N]$$

$$\sum M_x = 0$$

$$-13.91x + M = 0$$

$$M = 13.91x$$

2)

$$\sum F_y = 0$$

$$V = 13.91 - 15.132$$

$$V = -1.22$$

$$\sum M_x = 0$$

$$-13.91x + 15.132(x - 0.392) + M = 0$$

$$M = 5.932 - 1.22x$$

3)

$$\sum F_y = 0$$

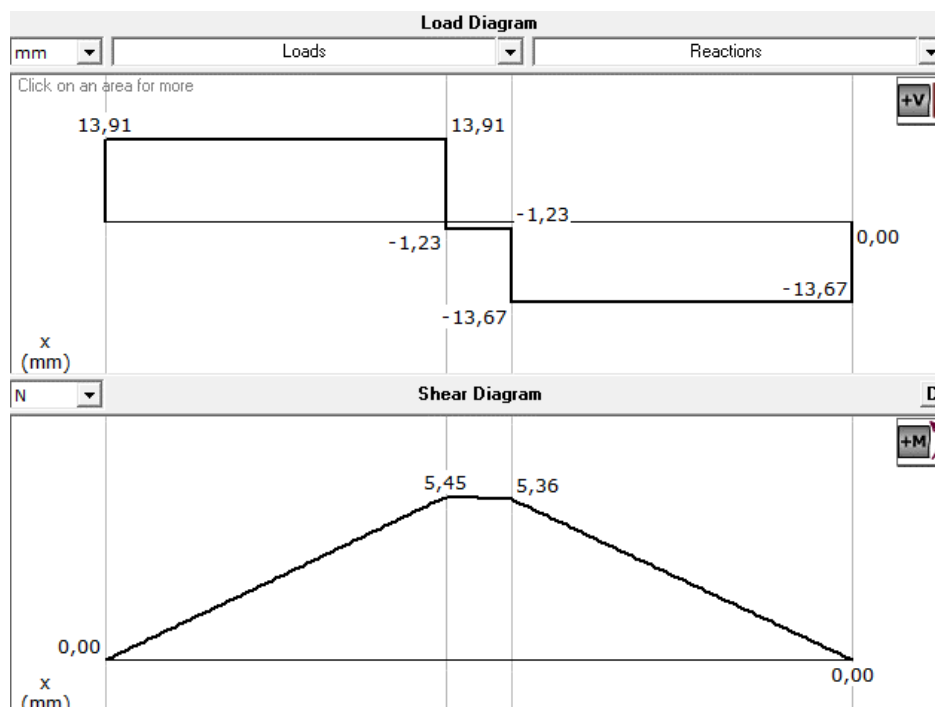
$$V = 13.91 - 15.132 - 12.444$$

$$V = -13.67[N]$$

$$\sum M_x = 0$$

$$M = 13.91x - 15.132(x - 0.392) - 12.444(x - 0.698)$$

En la Figura 71. Se muestra el diagrama de esfuerzo cortante y momento flector de la viga de soporte 1.



**Figura 71.** Diagrama de cortantes y momentos viga de soporte 1

Se utiliza el método de la doble integración con el objeto de determinar la deflexión máxima de la viga.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = 13.91x - 15.132(x - 0.392) - 12.444(x - 0.698)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{13.91}{2}x^2 - \frac{15.132}{2}(x - 0.392)^2 - \frac{12.444}{2}(x - 0.698)^2 + c_1$$

$$EIy = \frac{13.91}{6}x^3 - \frac{15.132}{6}(x - 0.392)^3 - \frac{12.444}{6}(x - 0.698)^3 + c_1x + c_2$$

Condiciones de frontera

$$x = 0, c_2 = 0$$

Condiciones de frontera

$$x = 0.860[m], c_1 = -1.50$$

$$EIy = \frac{13.91}{6}x^3 - \frac{15.132}{6}(x - 0.392)^3 - \frac{12.444}{6}(x - 0.698)^3 - 1.50x$$

La máxima deflexión ocurre en  $x = 0.430$ , como el valor del paréntesis  $(0.430 - 0.698)^3[m]$

es negativo, este se elimina de la ecuación

$$EIy \frac{13.91}{6}x^3 - \frac{15.132}{6}(x - 0.392)^3 - 1.50x$$

$$EIy = \frac{13.91}{6}(0.430)^3 - \frac{15.132}{6}(0.430 - 0.392)^3 - 1.50(0.430)$$

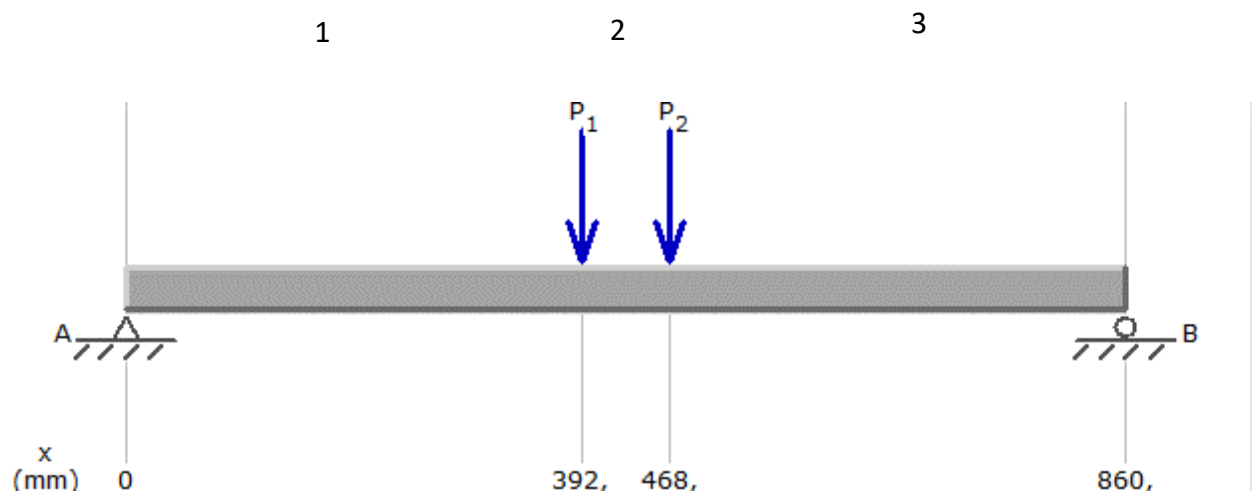
$$EIy = -0.46Nm^3$$

$$y = -\frac{0.46}{E \cdot \frac{\pi \cdot r^4}{4}}$$

$$y = -2.25[mm]$$

### Análisis de deflexión de segundo soporte

El análisis de deflexiones, se lo observa en la Figura 72.



**Figura 72.** Distribución de cargas en viga de soporte 2.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_3 + R_4 = 13.089 + 10.402$$

$$R_3 + R_4 = 23.491[N]$$

$$\sum M_3 = 0$$

$$-13.089(0.392) - 10.402(0.468) + R_B(0.860) = 0$$

$$R_4 = \frac{9.999Nm}{0.86m}$$

$$R_4 = 11.63[N]$$

$$R_3 = 11.86[N]$$

*Análisis de cortante*

El esfuerzo cortante es descrito en la Figura 73.

1)

$$\sum F_y = 0$$

$$V = R_3$$

$$V = 11.86[N]$$

$$\sum M_x = 0$$

$$-11.86x + M = 0$$

$$M = 11.86x$$

2)

$$\sum F_y = 0$$

$$V = 11.86 - 13.089$$

$$V = -1.229[N]$$

$$\sum M_x = 0$$

$$-11.86[N]x[m] + 13.089[N](x - 0.392)[m] + M = 0$$

$$M = 5.11[Nm] - 1.179[N]x[m]$$

3)

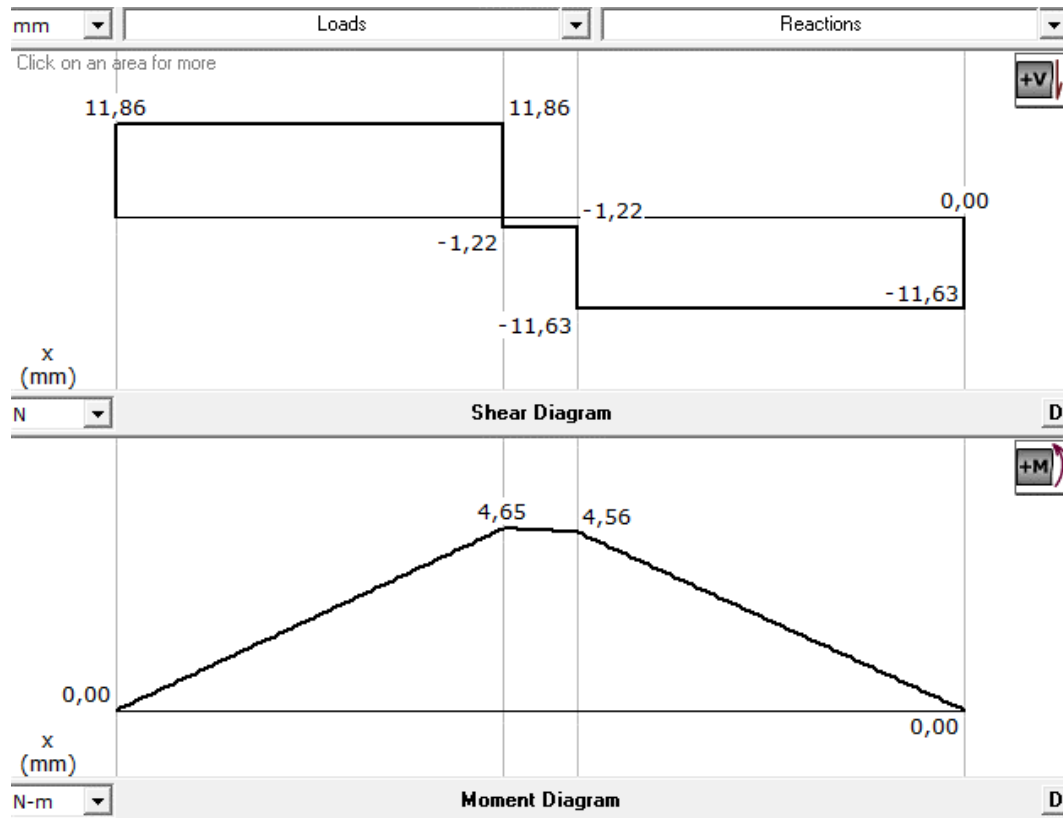
$$\sum F_y = 0$$

$$V = 11.86[N] - 13.089[N] - 10.402[N]$$

$$V = -11.631[N]$$

$$\sum M_x = 0$$

$$M = 11.86x - 13.089(x - 0.392) - 10.402(x - 0.698)$$



*Figura 73.* Diagrama de cortantes y de momentos viga de soporte 2

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = 11.86x - 13.089(x - 0.392) - 10.402(x - 0.698)$$

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{11.86}{2}x^2 - \frac{13.089}{2}(x - 0.392)^2 - \frac{10.402}{2}(x - 0.698)^2 + c1$$

$$EIy = \frac{11.86}{6}x^3 - \frac{13.089}{6}(x - 0.392)^3 - \frac{10.402}{6}(x - 0.698)^3 + c1x + c2$$

Condiciones de frontera

$$x = 0, c2 = 0$$

Condiciones de frontera

$$x = 0.860[m], c1 = -1.081$$

$$EIy = \frac{11.86}{6}x^3 - \frac{13.089}{6}(x - 0.392)^3 - \frac{10.402}{6}(x - 0.698)^3 - 1.08x$$

La máxima deflexión ocurre en  $x = 0.430$ , como el valor del paréntesis  $(0.430 - 0.698)^3$  es negativo, este se elimina de la ecuación.

$$EIy = \frac{11.86}{6}x^3 - \frac{13.089}{6}(x - 0.392)^3 - 1.08x$$

$$EIy = \frac{11.86}{6}(0.430)^3 - \frac{13.089}{6}(0.430 - 0.392)^3 - 1.08(0.430)$$

$$EIy = -0.31$$

$$y = -\frac{0.31Nm^3}{E \cdot \frac{\pi \cdot r^4}{4}}$$

$$y = -1.5[mm]$$



### ***Diámetro de viga de sección circular***

Después de haber determinado el momento máximo que se produce en ambas vigas, se procede con el cálculo del diámetro de la sección circular, a partir de las fórmulas obtenidas del libro “Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley”.

$$S_y = 210 \frac{N}{mm^2}$$

$$F_s = 1,5$$

$$M = 5450 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{m\acute{a}ximo} = \frac{S_y}{F_s} = 1.4 \cdot 10^8 [Pa] \quad (83)$$

$$S_m = \frac{M}{\sigma_{m\acute{a}ximo}} = 38.929 \quad (84)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot S_m}{\pi}} \quad (85)$$

$$d = 7.34 [mm]$$

Una vez obtenido el valor del diámetro mínimo para garantizar el funcionamiento del sistema, se selecciona una viga de sección circular de 12 mm de diámetro.

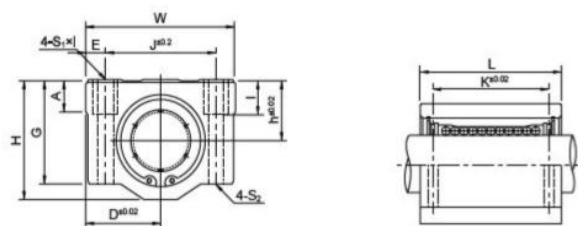
### ***Selección de rodamiento lineal***

El rodamiento lineal seleccionado es el sc12suu que se muestra en la Figura 74, el criterio de elección se lo realiza a través del análisis de la tabla descrita en la Figura 75.



**Figura 74.** Rodamiento lineal

Fuente: (Ningbo, 2010)



Standard		Basic load rating		Weight (gf)	Length Type		Basic load rating		Weight(gf)	Shorten Type	
Designation	Liner Bearing	Dynamic C N	Static Co N		Designation	Liner Bearing	Dynamic C N	Static Co N		Designation	Liner Bearing
SC8UU	LM8UU	274	392	56	SC8LUU	2xLM8UU	431	784	94	SC8SUU	LM8UU
SC10UU	LM10UU	372	549	90	SC10LUU	2xLM10UU	588	1100	147	SC10SUU	LM10UU
SC12UU	LM12UU	510	784	112	SC12LUU	2xLM12UU	813	1570	220	SC12SUU	LM12UU
SC13UU	LM13UU	510	784	123	SC13LUU	2xLM13UU	813	1570	245	SC13SUU	LM13UU
SC16UU	LM16UU	774	1180	189	SC16LUU	2xLM16UU	1230	2350	376	SC16SUU	LM16UU
SC20UU	LM20UU	882	1370	237	SC20LUU	2xLM20UU	1410	2740	476	SC20SUU	LM20UU

Basic load rating		Wgight (gf)	Dimensions (mm)																
Dynamic C N	Static Co N		Shaft Diameter	Nominal Dimensions(mm)										SC...UU		SC...LUU		SC...SUU	
				h	D	W	H	G	A	J	E	S1xI	S2	K	L	k&	L&	LS	
260	400	36	Φ8	11	17	34	22	18	6	24	5	M4x8	Φ3.4	18	30	42	58	15.4	
370	540	63	Φ10	13	20	40	26	21	8	28	6	M5x12	Φ4.3	21	35	46	68	19.5	
410	590	74	Φ12	15	21	42	28	24	8	30.5	5.75	M5x12	Φ4.3	26	36	50	70	20.5	
500	770	85	Φ13	15	22	44	30	24.5	8	33	5.5	M5x12	Φ4.3	26	39	50	75	20.5	
770	1170	132	Φ16	19	25	50	38.5	32.5	9	36	7	M5x12	Φ4.3	34	44	60	85	23.5	
860	1370	170	Φ20	21	27	54	41	35	11	40	7	M6x12	Φ5.2	40	50	70	96	27.4	
980	1560	405	Φ25	26	38	76	51.5	42	12	54	11	M8x18	Φ7	50	67	100	130	37.4	
1560	2740	495	Φ30	30	39	78	59.5	49	15	58	10	M8x18	Φ7	58	72	110	140	40.9	
1660	3130	790	Φ35	34	45	90	68	54	18	70	10	M8x18	Φ7	60	80	120	155	45.4	
2150	4010	1220	Φ40	40	51	102	78	62	20	80	11	M10x25	Φ8.7	60	90	140	175	56.4	
3820	7930	2300	Φ50	52	61	122	102	80	25	100	11	M10x25	Φ8.7	80	110	160	215	68.9	

**Figura 75.** Catálogo de rodamientos lineales

Fuente: (Ningbo, 2010)

### *Carga estática*

Es el índice que evalúa la capacidad de un sistema lineal para absorber momentos y cargas estáticas  $C_0$  según la Figura 75 es 410 [N].

### *Factor de seguridad estático*

El factor de seguridad estático entrega el margen de seguridad contra la deformación permanente inadmisibles en elementos rodantes, se obtiene a partir de la ecuación:

$$a_s = \frac{f_c \cdot f_b \cdot C_0}{P} \quad (86)$$

Donde

$f_c$  = factor de contacto

$f_b$  = factor de layout de recirculaciones

$C_0$  = Capacidad de carga estática [N]

$P =$  Carga máxima aplicada [N]

### Factor de contacto

El factor de contacto que se muestra en la Figura 76, está determinado por cuantos rodamientos son utilizados sobre una viga de sección circular.

Número de casquillos por cada eje Number of linear bearings for shaft	$f_c$
1	1.0
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61

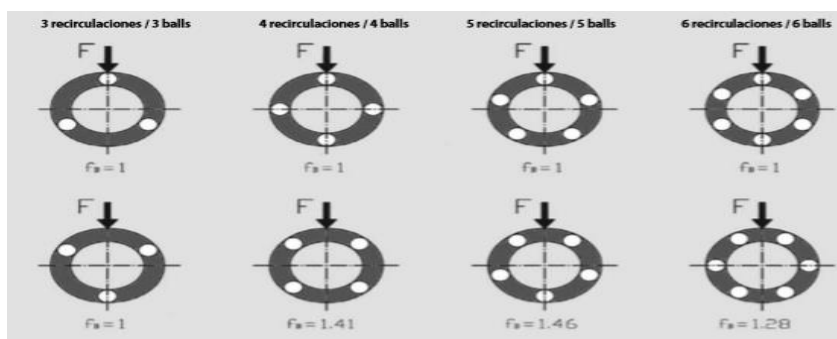
**Figura 76.** Tabla de factor de contacto.

Fuente: (NBS, 2012).

$$f_c = 0.81$$

### Factor de layout de recirculaciones

Factor que es determinado por la distribución de rodamientos en el mecanismo, Figura 77.



**Figura 77.** Factor que depende de la distribución de los rodamientos.

Fuente: (NBS, 2012).

*Carga máxima aplicada*

$$P = 15.132 [N]$$

$$a_s = \frac{f_c \cdot f_b \cdot C_o}{P} = 31.58$$

*Carga dinámica*

Índice que evalúa la capacidad del sistema lineales para absorber cargas dinámicas, esta se puede ver afectada por el ciclo y velocidad de funcionamiento, así como la flexión en el eje, y por fuerzas y momentos aplicados, el valor de  $C = 588 [N]$  según la Figura 75.

*Obtención de la vida nominal  $L_n$ .*

Se lo define como el recorrido teórico que puede alcanzar el rodamiento sin aparición de fatiga.

$$L_n = a_1 \cdot \left( \frac{f_h \cdot f_t \cdot f_c \cdot f_b \cdot C}{(f_w \cdot P)^3} \right) \cdot 50 \quad (87)$$

donde

- $L =$  vida útil nominal [km]
- $a_1 =$  Factor de probabilidad de fallo
- $f_h =$  Factor de dureza
- $f_t =$  Factor de temperatura
- $f_c =$  Factor de contacto
- $f_b =$  Coeficiente layout
- $f_w =$  factor de carga
- $C =$  Capacidad de carga dinámica
- $P =$  Carga equivalente aplicada

$L$ = vida útil nominal [km]

$a_1$ =Factor de probabilidad de fallo

Factor descrito en la Figura 78, que evalúa la probabilidad de fallo del rodamiento.

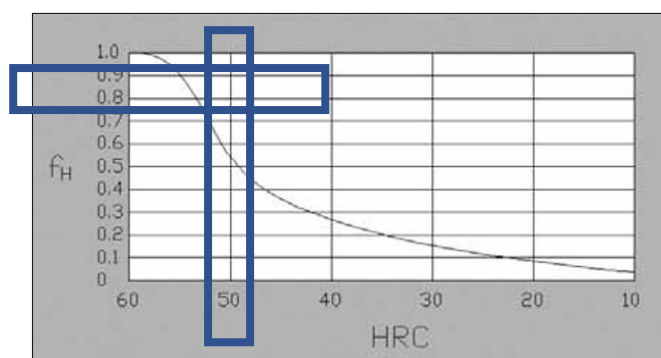
C%	80	85	90	92	95	96	97	98	99
$a_1$	1.96	1.48	1.00	0.81	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

**Figura 78.** Tabla factor de probabilidad de fallo

Fuente:(NBS, 2012)

$f_H$ =factor de dureza

Dureza de la superficie de contacto debe ser mayor a 58 HRC para favorecer la vida útil del sistema  $f_H=0.9$ , el factor de dureza se determina mediante el análisis de la Figura 79.

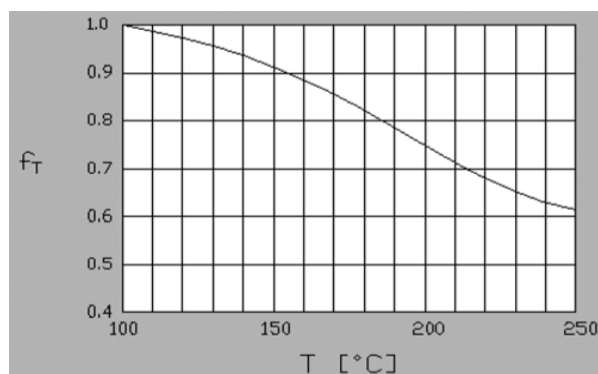


**Figura 79.** Factor de dureza.

Fuente: (NBS, 2012).

$f_t$ =Factor de temperatura

Factor que se evalúa Figura 80, que considera la temperatura de trabajo en la cual se desenvuelve el rodamiento.



**Figura 80.** Factor de temperatura.

Fuente: (NBS, 2012).

$f_b$ =Coeficiente layout y  $f_c$ =Factor de contacto

Factores considerados en el apartado del factor de seguridad estático.

$f_w$ =Factor de carga

Factor que considera las fuerzas de inercia y respectivos pares generados por la velocidad de trabajo del sistema véase la Figura 81

Condiciones de trabajo Working conditions	$f_w$
Ausencia de impactos y vibraciones y/o velocidad baja No impacts, no vibrations and/or slow speed ( $v \leq 15$ m/min)	1.0 ÷ 1.5
Impactos y vibraciones leves y/o velocidad media Light impacts and light vibrations, medium speed ( $15 < v < 60$ m/min)	1.5 ÷ 2.0
Impactos y vibraciones fuertes y/o velocidad alta Hard impacts and hard vibrations, high speed ( $v \geq 60$ m/min)	2.0 ÷ 3.5

**Figura 81.** Factor de condiciones de trabajo.

Fuente (NBS, 2012)

$C$ =Capacidad de carga dinámica

Valor otorgado por el fabricante, obtenido de la Figura 75

$P$ =Carga equivalente aplicada

15.132[N]

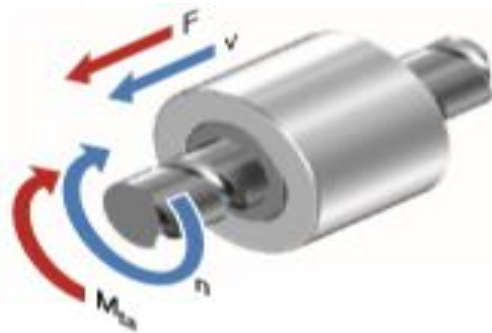
$$L_n = a_1 \cdot \left( \frac{f_h \cdot f_{t1} \cdot f_c \cdot f_b \cdot C}{(f_w \cdot P)^3} \right) \cdot 50$$

$$L_n = 29.405 \text{ [km]}$$

### ***Diseño de tornillo sin fin***

Para determinar el diámetro del tornillo es necesario considerar las cargas a las que es sometido.

El principio del funcionamiento de un tornillo sin fin, radica en el torque aplicado por el motor, genera la rotación del tornillo, produciéndose una fuerza de avance entre las superficies conductoras y conducidas, véase Figura 82.



**Figura 82.** Generación de fuerza de empuje.

Fuente: (Rexroth Bosch, 2006).



### ***Fuerza axial generada***

El eje del tornillo de la Figura 83, al ser sometido a una fuerza de compresión en la dirección axial, comenzará a doblarse, proporcionalmente a la magnitud de la carga.



**Figura 83.** Carga axial generada durante el recorrido de la carga.

Fuente: (Rexroth Bosch, 2006).

### ***Coefficiente de fricción***

En el análisis de la Figura 84, se considera la fricción existente entre el tornillo y acople para el movimiento de la carga, tomando en cuenta el material que se encuentre en contacto, y si existe lubricación.

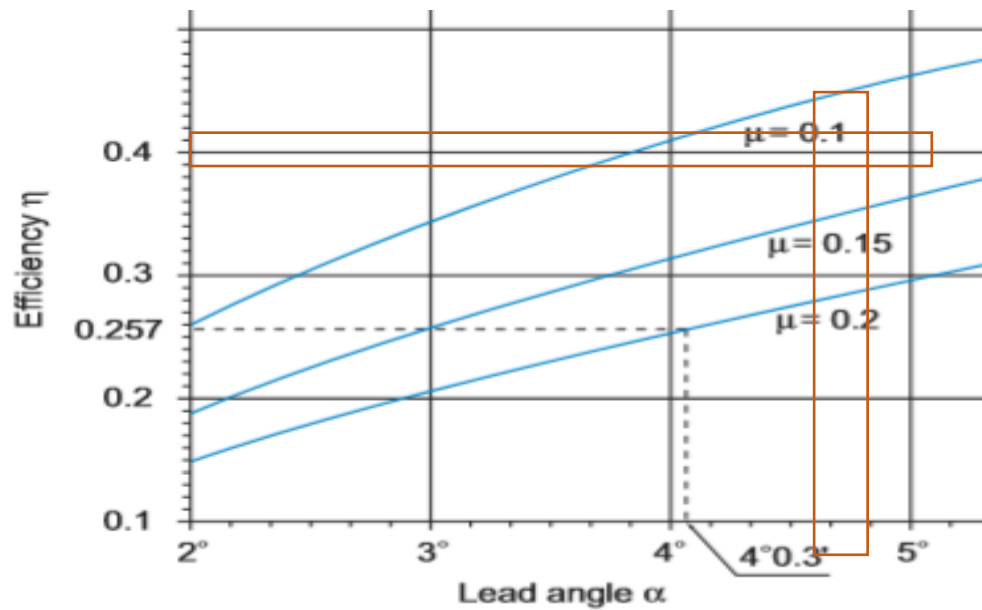
Material del tornillo	Material de la tuerca			
	Acero	Bronce	Latón	Hierro fundido
Acero, seco	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
Acero, aceite para máquina	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
Bronce	0.08-0.12	0.04-0.06	—	0.06-0.09

**Figura 84.** Tabla de coeficientes de fricción en función.

Fuente:(Shigley, 2008).

### ***Eficiencia del sistema***

Considerando la fricción entre ambas superficies la eficiencia del tornillo se encuentra determinada por el ángulo de paso que este posee, esta relación se muestra en el gráfico de la Figura 85.



**Figura 85.** Eficiencia en función del ángulo del tornillo y el coeficiente de fricción

Fuente: (THK, 2001)

$$\eta = 0.4$$

$$Paso = 2mm$$

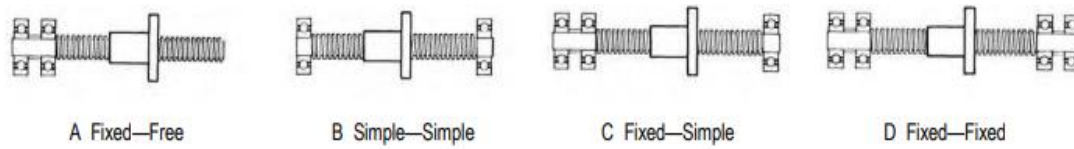
$$T = 0.043 Nm$$

$$F_a = \frac{2\pi\eta T}{P_{aso} \cdot (10)^{-3}} \quad (88)$$

$$F_a = 53.41 [N]$$

### **Montaje de cojinetes a lo largo del eje**

El montaje del tornillo sobre el bastidor proporciona un factor que es utilizado en el cálculo de la fuerza axial producido sobre la flecha. Véase la Figura 86.



**Figura 86.** Tipos de soporte para tornillo sin fin respecto a soportes.

Fuente: (SDP/SI, 2015)

case A.: 0.36  
 case B.: 1.00  
 case C.: 1.47  
 case D.: 2.23

$$F_c = f_b \left( \frac{d_1^4}{L^2} \right) \cdot 10^4 \quad (89)$$

Donde

$F_c =$  Máxima carga de compresión (N)

$f_b =$  factor basado en el tipo de sujeción del eje

$d_1 =$  Diámetro de raíz del tornillo (mm)

$L^2 =$  Recorrido de la carga (mm)

$$d_1 = \sqrt[4]{\frac{F_c \cdot L^2}{f_b \cdot 10^4}} \quad (90)$$

$$d_1 = 7.92[mm]$$

Considerando que el diámetro mínimo de la rosca es  $d_1 = 7.92[mm]$ , se selecciona un  $d_1 = 12 [mm]$ .

### *Análisis de la velocidad crítica*

El mecanismo de la Figura 87 posee una máxima velocidad crítica de funcionamiento, que ocurre a su frecuencia natural generando resonancia en el sistema, lo cual puede destruir el ensamble, este valor límite puede aumentarse al utilizar un tornillo de diámetro mayor, permitiendo trabajar a un mayor rango de velocidades, por tal motivo se selecciona un tornillo de diámetro 12[mm].



**Figura 87.** Comportamiento del tornillo a velocidad crítica.

Fuente: (Rexroth Bosch, 2006)

$$n_c = f_c \left( \frac{d_r}{L_c^2} \right) \cdot 10^7 (\text{min}^{-1}) \quad (91)$$

Donde

$n_c = \text{velocidad crítica (rpm)}$

$f_c = \text{Factor basado en los soportes del mecanismo}$

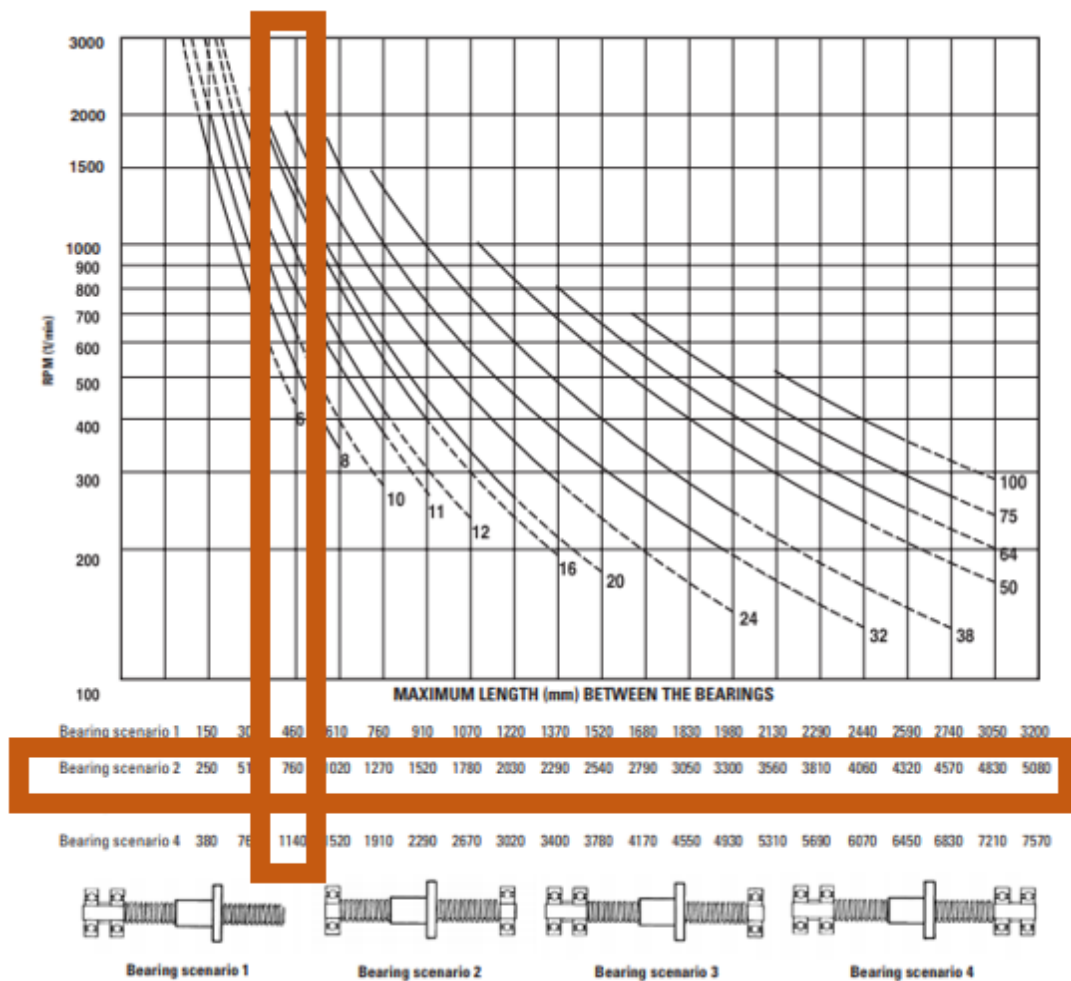
$d_r = \text{Diámetro de raíz del tornillo (mm)}$

$L_c = \text{espacio en el cual el tornillo no se encuentra sostenido (mm)}$

$$n_c = 1 \left( \frac{12}{860^2} \right) \cdot 10^7 (\text{min}^{-1})$$

$$n_c = 162.25 \text{ rpm}$$

En la Figura 88, se muestra la relación entre la velocidad crítica a la cual puede trabajar el tornillo, el tipo de soporte que este posee, y la longitud que posee.



**Figura 88.** Gráfica para determinar la velocidad rotacional crítica.

Fuente: (Thomson, 2014.)

### Tabla de eficiencias del tornillo

En la Figura 89, se muestra la tabla de eficiencias del tornillo

Shaft diameter (mm)	Lead (mm)	Part number			Minor diameter (mm)	Efficiency (coefficient of friction of 0.15) (%)
		Prefix for precision accuracy	Prefix for standard accuracy	Size		
4	1	SPR	SRA	4 x 1M	2.7	48
	4	SPR	SRA	4-4 x 1M	2.7	76
	8	-	SRA	8-4 x 1M	2.7	82
6	1	SPR	SRA	6 x 1M	4.6	37
	6	SPR	SRA	4-6 x 1.5M	4.5	69
	12	-	SRA	8-6 x 1.5M	4.5	81
10	18	-	SRA	9-6 x 2M	4.5	82
	2*	SPT	SRT	10 x 2M	7.4	42
	3*	SPT	SRT	10 x 3M	6.4	53
	4	SPT	SRT	2-10 x 2M	7.4	59
	5	SPR	SRA	2-10 x 2.5M	7.1	64
	6	SPR	SRA	4-10 x 1.5M	8.2	66
	10	SPR	SRA	5-10 x 2M	7.5	76
12	20	-	SRA	6-10 x 3.3M	8.4	81
	3*	SPT	SRT	12 x 3M	8.0	48
	4	SPR	SRA	2-12 x 2M	9.2	54
	5*	SPT	SRT	2-12 x 2.5M	8.9	59
	6	SPR	SRA	3-12 x 2M	9.1	63
	10*	SPT	SRT	4-12 x 2.5M	8.9	73
	15	SPR	SRA	6-12 x 2.5M	8.7	78
16	25	-	SRA	10-12 x 2.5M	9.2	82
	45	-	SRA	15-12 x 3M	9.6	81
	4*	SPT	SRT	16 x 4M	11.3	48
	5	SPR	SRA	2-16 x 2.5M	12.2	52
	8	SPR	SRA	4-16 x 2M	13.0	63
	16	SPR	SRA	7-16 x 2.3M	12.6	75
20	25	-	SRA	5-16 x 5M	11.5	80
	35	-	SRA	7-16 x 5M	12.2	82
	4*	SPT	SRT	20 x 4M	15.3	42
	8	SPR	SRA	2-20 x 4M	14.8	59
	12	SPR	SRA	3-20 x 4M	15.0	67
	16	SPR	SRA	4-20 x 4M	15.0	72
	20	-	SRA	5-20 x 4M	15.0	76
24	45	-	SRA	9-20 x 5M	15.8	82
	50	-	SRA	10-20 x 5M	16.5	82
	5*	SPT	SRT	24 x 5M	18.5	42

\*complies with the requirements specified in DIN 103 Parts 1 and 2. Tolerance class 7e.  
 \*\*complies with the requirements specified in DIN 103 Part 1, not defined in Parts 2 and 3.  
 See page 5 for maximum available shaft lengths  
 See page 9 for notes on ordering

Figura 89. Tabla de eficiencias del tornillo sin fin

Fuente: (Thomson, 2014)

### 3.5.5. Dimensionamiento del mecanismo rotacional del sistema transportador

#### Selección de material de engranes

El material utilizado para la fabricación de los engranes es duralón (Nylon), debido a que este ofrece muy poco desgaste y no necesita un sistema de lubricación para asegurar su funcionamiento,

así como es más fácil de fabricar debido a la poca dureza que este ofrece y al bajo precio en el mercado.

### ***Duralón (Nylon)***

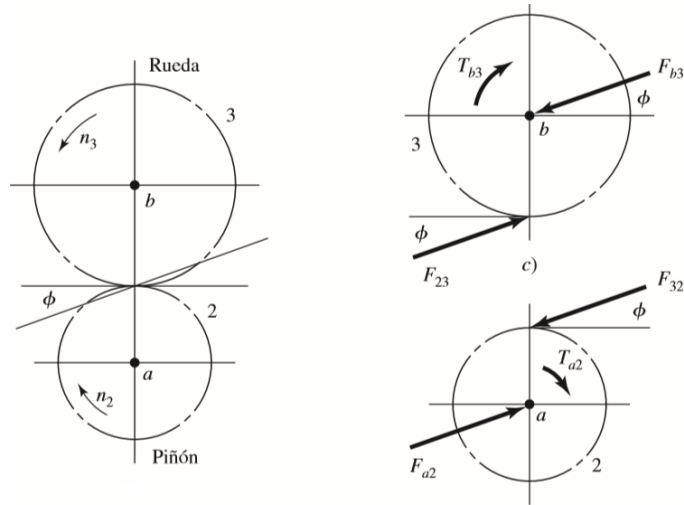
Material polímero termoplástico cuyas características se encuentran descritas en la Tabla 21, se caracteriza por ser fácil de maquinar, que poseer baja densidad, alta resistencia eléctrica, baja fricción superficial, alta lubricidad, buena resistencia a la abrasión, buen desempeño a altas temperaturas, debido a que mantienen sus propiedades mecánicas hasta los 150°C.

**Tabla 21.**  
*Propiedades de nylon*

Propiedades físicas	Densidad	1.14
	Absorción al agua	1.80
Propiedades mecánicas	Resistencia a la tensión	720-840
	Dureza rockwell HDR	D75-80
	Resistencia al impacto	18.0-25.0
	Coefficiente de fricción	0.37
	Módulo de elasticidad	2900 [Mpa]
Propiedades térmicas	Coefficiente lineal de expansión X 10.5/ °C	8 8.0
	Conductividad térmica Kcal/m Hr. °C	0.18
	Temperatura de distorsión °C	55-58
	Resistencia a temperatura °C	79-121

### Fuerza en engranes rectos

Para el cálculo de las fuerzas que existen en los engranes cilíndricos rectos, de la Figura 90 se considera la siguiente ecuación:



**Figura 90.** Fuerza en engranes rectos.

Fuente: (Shigley, 2008)

$$F_t = \frac{60000 \cdot Pot}{\pi \cdot d \cdot n} \quad (92)$$

Donde

- $Pot =$  Potencia del reductor [KW]
- $d =$  diametro del engrane [mm]
- $N =$  velocidad rotacional [rpm]



En la Tabla 22, se describe los parámetros de entrada para el análisis de esfuerzos en engranes rectos.

**Tabla 22.**  
*Parámetros para el análisis de esfuerzos en engranes.*

Piñón	Engrane
$pot = 0.000036[kw]$	$pot = 0.000036[kw]$
$d = 22.5 [mm]$	$d = 67.5 [mm]$
$Np = 20[rpm]$	$Ng = 6.66[rpm]$
$F_{tp} = 1.53[N]$	$F_{tg} = 1.53[N]$

### *Análisis de esfuerzos*

#### *Esfuerzo de picadura (pitting)*

Se concibe como el desprendimiento de partículas de material en la superficie del diente, producido por fuerzas de contacto aplicado sobre ellas, se encuentra dado por la siguiente ecuación.

$$\sigma_H = Z_E \sqrt{F_t K_0 K_V K_S \frac{K_H}{d_{w1} b} \frac{Z_R}{Z_I}} \quad (93)$$

Se establece el no realizar el análisis de picadura en los engranes rectos debido a que estos no van a ser sometidos a cargas repetitivas ni constantes, debido a que el uso es de manera intermitente.

#### *Análisis de flexión*

El cálculo de los factores utilizados para el análisis de flexión se encuentra en la Tabla 23.

$$\sigma_F = F_t K_0 K_V K_S \frac{K_H K_B}{b m_t Y_J} \quad (94)$$

$K_0 =$  Factor de sobrecarga

$K_V =$  Factor dinámico

$K_S =$  Factor de tamaño

$K_H =$  Factor de distribución de carga

$K_B =$  Factor de espesor del anillo

$Y_J =$  Factor geométrico (J)

$m_t =$  Módulo transversal

$b =$  Ancho de cara

$F_t =$  Carga tangencial

### **Factor de seguridad**

$$\sigma_F = \frac{\sigma_{FP} Y_N}{S_f Y_\theta Y_Z} \quad (95)$$

$\sigma_{FP} =$  Resistencia a la flexión

$Y_N =$  Factor de esfuerzo cíclico

$S_f =$  Factor de seguridad

$Y_\theta =$  Factor de temperatura

$Y_Z =$  Factor de confiabilidad

**Tabla 23.**  
*Factores para el cálculo de resistencia por flexión*

Factor	Definición	Consideración	Fórmula	Valor																				
$K_0$ (Factor de sobrecarga)	Comparación del soporte de cargas momentáneas excesivas respecto a la carga tangencial nominal, sobre la superficie de contacto	La carga va a estar encendiéndose y apagándose todo el tiempo	<div style="border: 2px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Tabla de factores de sobrecarga, <math>K_0</math></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Máquina impulsada</th> </tr> <tr> <th style="text-align: left;">Fuente de potencia</th> <th style="text-align: center;">Uniforme</th> <th style="text-align: center;">Impacto moderado</th> <th style="text-align: center;">Impacto pesado</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Uniforme</td> <td style="text-align: center;">1.00</td> <td style="text-align: center;">1.25</td> <td style="text-align: center;">1.75</td> </tr> <tr> <td>Impacto ligero</td> <td style="text-align: center;">1.25</td> <td style="text-align: center;">1.50</td> <td style="text-align: center;">2.00</td> </tr> <tr> <td>Impacto medio</td> <td style="text-align: center;">1.50</td> <td style="text-align: center;">1.75</td> <td style="text-align: center;">2.25</td> </tr> </tbody> </table> </div> <p>Shigley pag 776 fig 14-17</p>	Máquina impulsada				Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado	Uniforme	1.00	1.25	1.75	Impacto ligero	1.25	1.50	2.00	Impacto medio	1.50	1.75	2.25	$K_0 = 1$
Máquina impulsada																								
Fuente de potencia	Uniforme	Impacto moderado	Impacto pesado																					
Uniforme	1.00	1.25	1.75																					
Impacto ligero	1.25	1.50	2.00																					
Impacto medio	1.50	1.75	2.25																					
$K_v$ (Factor dinámico)	Generación de cargas dinámicas a causa de la vibración, debido a: desbalance dinámico, deflexión del eje, etc.	La calidad de los engranes se lo considera como comerciar $AV=12$	<p>donde:</p> $K_v = \left( \frac{C}{C + \sqrt{196.85v_t}} \right)^{-B}$ $v_{tmax} = \frac{[C + (14 - A_v)]^2}{196.85}$ $C = 50 + 56(1 - B) \text{ para } 6 \leq A_v \leq 12$ $B = 0.25(A_v - 5.0)^{0.667}$ <p>Norma Ansi/Agma 2101-D04 sección 8.3.2 pag 22</p>	$K_v = 1.97$																				
$K_s$ (Factor de tamaño)	Factor que considera la falta de uniformidad existente en el diente de un engrane debido a factores como: ancho de cara del diente, diámetro, tamaño y dureza	Según consideraciones de la norma ANSI/AGMA 2001-D04 sección 20 pág 46 este valor debe ser considerado mayor que la unidad	$K_s \geq 1$	$K_s = 1$																				

**CONTINÚA**

$$K_{H\beta} = 1 + K_{Hmc} (K_{Hpf} K_{Hpm} + K_{Hma} K_{He}) \quad 1.25$$

Donde

$K_{Hmc}$  (factor de corrección de paso)

Se recomienda según la norma ANSIAGMA 2101 pag 28, Se utilice el factor 1 por que no posee pasos modificados

$K_{Hpf}$  (Factor de proporción del piñón)

Cuando  $b \leq 25$

$$K_{Hpf} = \frac{ba1}{10d1} - 0.025$$

$K_{Hpm}$  Modificador de proporción del piñón = 1 (necesito saber el valor del eje)

$K_{Hma}$  factor de alineación de malla

$$KHma = A + B \cdot ba + C \cdot ba^2$$

Donde A, B, C son factores considerados para un conjunto de engranes abiertos

ANSI/AGMA2101-D04 tabla 2 pág. 30

$K_h$  (Factor de distribución de la carga)

Es la comparación entre la carga máxima vs la carga promedio aplicada sobre el ancho de cara de un engrane

$K_{He}$  Factor de corrección de alineación de la malla,

Se utiliza el valor de igual a 0.8, debido a que el diseño del engrane se ajusta al ensamble ANSI/AGMA 2101-D204 pág. 30

Factor del espesor del anillo  $K_B$

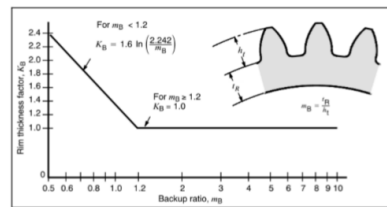
Es la relación entre el grosor del borde debajo de la raíz del diente, respecto a la altura total del diente,

$$m_B = \frac{t_R}{h_t}$$

Donde  $t_R$  (16.25mm) Grosor del borde del diente  $h_t$  (3.375mm) profundidad del diente

$$m_B = 1$$

$$K_B = 1$$

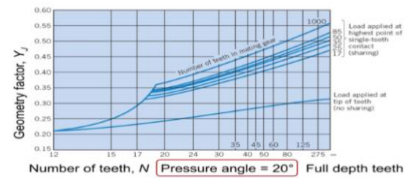


Factor de acabado geométrico  $Y_j$

Evalúa la forma del diente y la posición a la que la carga más crítica es aplicada

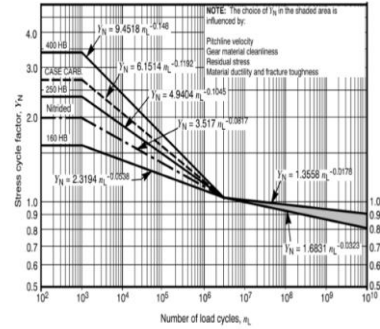
**FACTOR GEOMÉTRICO  $Y_j$  (J)**

$$Y_j = 0.2$$



**CONTINÚA**

Factor de esfuerzos cíclicos por flexión $Y_N$	Vida útil del diente a un número determinado de ciclos	$Y_N = 1.3558 \cdot N_{ciclos}^{-0.0176}$	$Y_N = 0.9938$
	$N_{ciclos} = V_{in} \cdot 60 \cdot \#horas \cdot \#días \cdot \#años$ Donde: $V_{in} = 60rpm$ $\#horas = 8$ $\#días = 180$ $\#años = 10$ $N_{ciclos} = 4.608 \cdot 10^7$		



$Y_Z$ Factor de confiabilidad	Distribución normal de falla considerada como un 99% a $10^7$	$Y_Z = 1.50$	<b>Table 11 - Reliability factors, <math>Y_Z</math></b> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Requirements of application</th> <th><math>Y_Z^{(1)}</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fewer than one failure in 10 000</td> <td>1.50</td> </tr> <tr> <td>Fewer than one failure in 1000</td> <td>1.25</td> </tr> <tr> <td>Fewer than one failure in 100</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Fewer than one failure in 10</td> <td>0.85<sup>(2)</sup></td> </tr> <tr> <td>Fewer than one failure in 2</td> <td>0.70<sup>(2) (3)</sup></td> </tr> </tbody> </table>	Requirements of application	$Y_Z^{(1)}$	Fewer than one failure in 10 000	1.50	Fewer than one failure in 1000	1.25	Fewer than one failure in 100	1.00	Fewer than one failure in 10	0.85 <sup>(2)</sup>	Fewer than one failure in 2	0.70 <sup>(2) (3)</sup>	$Y_Z = 1.5$
Requirements of application	$Y_Z^{(1)}$															
Fewer than one failure in 10 000	1.50															
Fewer than one failure in 1000	1.25															
Fewer than one failure in 100	1.00															
Fewer than one failure in 10	0.85 <sup>(2)</sup>															
Fewer than one failure in 2	0.70 <sup>(2) (3)</sup>															

$Y_\theta$ Factor de temperatura	<b>FACTOR DE TEMPERATURA (<math>Y_\theta</math>)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><math>Y_\theta = 1</math> cuando la temperatura del aceite no excede los 120 °C.</li> <li><math>Y_\theta &gt; 1</math> cuando la temperatura es mayor a 120 °C.</li> <li>Si la temperatura es mayor a 150 °C se debe considerar disminución en la dureza y en la resistencia del material. Además, podría existir creep.</li> </ul>	$Y_\theta = 1$
----------------------------------	--	----------------

$\sigma_{FP}$ Esfuerzo máximo a flexión	Tesis francisco Velázquez	<b>Tabla 54</b> Esfuerzo máximo a Flexión. <table border="1"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Valor [MPa]</th> <th>Fuente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Nylon 6A</td> <td>77,85 – 79,88</td> <td>Francisco Velázquez</td> </tr> <tr> <td>Nylatron NSM</td> <td>110</td> <td>Quadrant</td> </tr> </tbody> </table>	Material	Valor [MPa]	Fuente	Nylon 6A	77,85 – 79,88	Francisco Velázquez	Nylatron NSM	110	Quadrant	$\sigma_{FP} = 77.85 [M]$
Material	Valor [MPa]	Fuente										
Nylon 6A	77,85 – 79,88	Francisco Velázquez										
Nylatron NSM	110	Quadrant										

**Cálculo factor de seguridad**

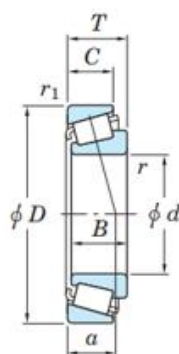
$$S_f = \frac{\sigma_{FP}}{\sigma_F} \frac{Y_N}{Y_\theta Y_Z}$$

$$S_f = 73.051$$

### Selección del rodamiento

Debido a que el rodamiento soportará carga axial (ejercida por el peso del inodoro y el plato) y radial (fuerzas generadas por el engrane), se selecciona uno que soporte cargas combinadas dentro de los catálogos.

Se elige un rodamiento de rodillos cónicos de una hilera, donde sus características se muestran en la Figura 91.



Dimensiones principales (mm)						Capacidad de carga básica (kN)		Carga límite de fatiga (kN)	Límites de velocidad ( $\text{min}^{-1}$ )		No. de rodamiento <sup>1)</sup>	
$d$	$D$	$T$	$B$	$C$	$r_{\text{min.}}$	$r_{1\text{ min.}}$	$C_r$	$C_{0r}$	$C_u$	Lub. Grasa		Lub. Aceite
15	35	11.75	11	10	0.6	0.6	19.8	14.5	2.00	12 000	16 000	30202R

**Figura 91.** Rodamiento de rodillos cónicos de una hilera.

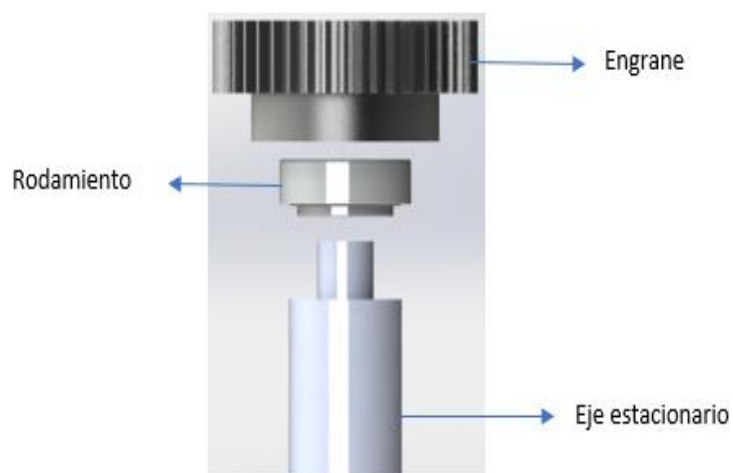
Fuente: (Koyo, 2019).

Sus dimensiones son adecuadas de acuerdo con el espacio disponible para su montaje y la capacidad de carga supera ampliamente a los requerimientos de la aplicación.

### Diseño del eje del mecanismo rotacional del sistema transportador

Para generar el movimiento rotacional del plato se utiliza un reductor de engranajes rectos junto a un motor a pasos; el engrane aloja al anillo exterior del rodamiento, y este su vez está montado axialmente sobre el eje estacionario vertical, como se muestra en la Figura 92. El diseño del eje

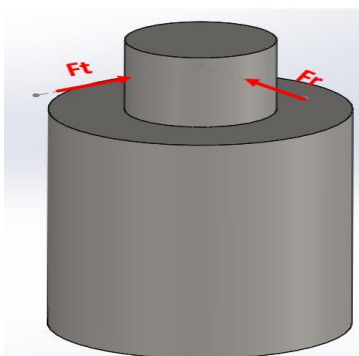
consta de dos partes: un análisis de deflexión debido a las fuerzas generadas por el engrane (radial y tangencial) y un análisis de compresión, ya que existe una carga axial por el peso del conjunto plato-inodoro.



**Figura 92.** Esquema del conjunto eje-rodamiento-engrane.

### ***Análisis de deflexión***

La fuerza tangencial se transmite al eje como si fuese radial, ver Figura 93.



**Figura 93.** Fuerzas transmitidas del engrane al eje.

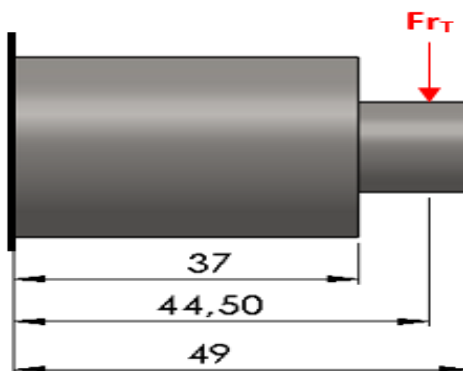
Estas fuerzas se encuentran en planos distintos por lo que se calcula una fuerza radial resultante de la siguiente manera:

$$Fr = 0.57 \text{ N}$$

$$Ft = 1.57 \text{ N}$$

$$Fr_T = \sqrt{Fr^2 + Ft^2} = 1.67 \text{ N}$$

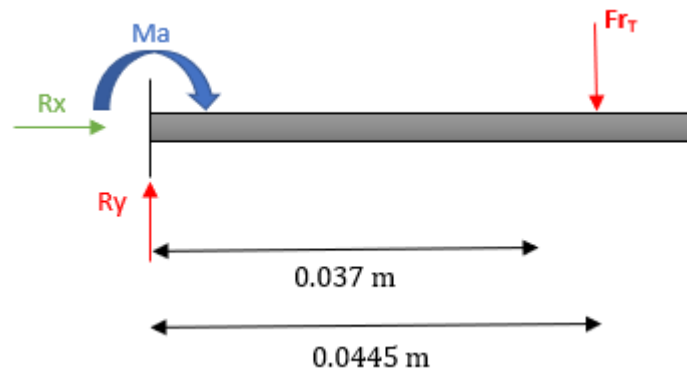
Para el análisis de deflexión, al eje se lo puede comparar con una viga empotrada en voladizo, como se muestra en la Figura 94.



**Figura 94.** Eje seccionado en voladizo. Dimensiones en mm.



*Diagrama de Cuerpo Libre*



**Figura 95.** Diagrama de Cuerpo libre del eje.

Para encontrar el valor de las fuerzas y del momento, se realiza el análisis estático.

$$\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$R_y - Fr_T = 0$$

$$R_y = Fr_T = 1.67 [N]$$

$$\curvearrowright \Sigma M_o = 0$$

$$-Ma - (Fr_T * 0.0445) = 0$$

$$Ma = -0.0743 [Nm]$$

A continuación, se realiza el método de cortes para encontrar la ecuación del momento flector.



**Figura 96.** Método de cortes para encontrar el momento flector.

$$\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$Ry - V_G = 0$$

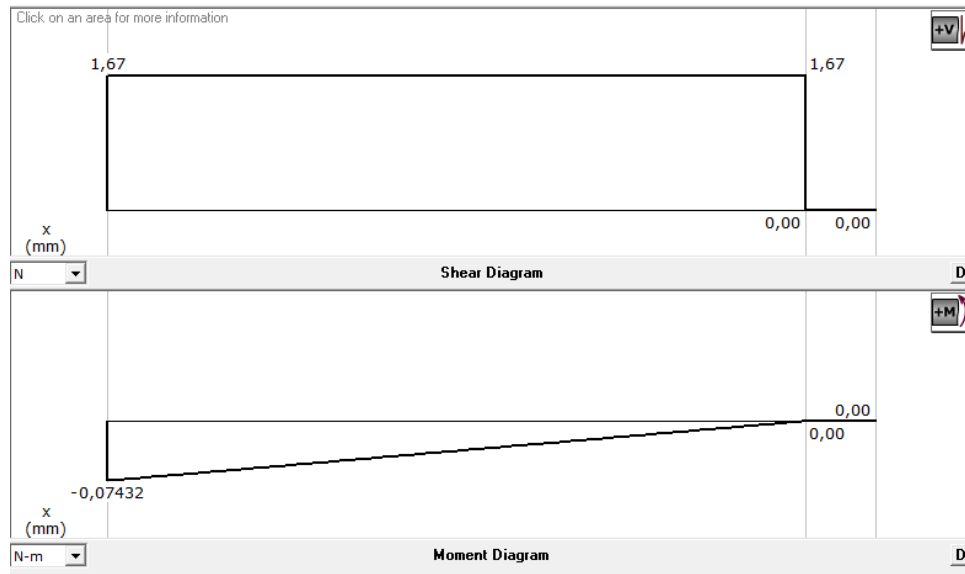
$$V_G = Ry = 1.67 [N]$$

$$\cup \Sigma M_G = 0$$

$$Ma + (Ry * x) - M_G = 0$$

$$\mathbf{M_G = Ma + (Ry * x)}$$

El diagrama de fuerza cortante y momento flector se muestran en la Figura 97.



**Figura 97.** Diagrama de Fuerza Cortante y Momento Flector.

Fuente: (MDSolids 3.5).

Como el eje tiene un cambio de sección a lo largo de su longitud se utiliza una variable  $x_1$  para representar la viga desde 0 hasta 0.037 m y una  $x_2$  para representarla desde 0.037 m hasta 0.049 m.

Se plantean entonces las ecuaciones del momento flector para cada sección.

$$M_1(x) = Ma + (Ry * x_1)$$

$$M_2(x) = Ma + (Ry * x_2)$$

Utilizando la expresión de la curva elástica y ángulo deformación se tiene las expresiones declaradas en la Tabla 24.

**Tabla 24.***Desarrollo de análisis de deflexión eje rotacional.*

Para  
 $0 < x_1 < 0.037$

$$EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = M_1(x)$$

$$EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = Ma + (Ry * x_1)$$

$$EI_1 \frac{d^2 y_1}{dx_1^2} = -0.0743 + 1.67x_1$$

**Primera Integración:**

$$EI_1 \frac{dy_1}{dx_1} = -0.0743x_1 + 1.67 \frac{x_1^2}{2} + c_1$$

**Segunda Integración:**

$$EI_1 y_1 = -0.0743 \frac{x_1^2}{2} + 1.67 \frac{x_1^3}{6} + c_1 x_1 + c_2$$

$$EI_1 y_1 = -0.037x_1^2 + 0.2783x_1^3 + c_1 x_1 + c_2$$

Para  
 $0.037 < x_2 < 0.049$

$$EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = M_2(x)$$

$$EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = Ma + (Ry * x_2)$$

$$EI_2 \frac{d^2 y_2}{dx_2^2} = -0.0743 + 1.67x_2$$

**Primera Integración:**

$$EI_2 \frac{dy_2}{dx_2} = -0.0743x_2 + 1.67 \frac{x_2^2}{2} + c_3$$

**Segunda Integración:**

$$EI_2 y_2 = -0.0743 \frac{x_2^2}{2} + 1.67 \frac{x_2^3}{6} + c_3 x_2 + c_4$$

$$EI_2 y_2 = -0.037x_2^2 + 0.2783x_2^3 + c_3 x_2 + c_4$$

Para encontrar el valor de las constantes  $c_1, c_2, c_3$  y  $c_4$  se aplican las siguientes condiciones de frontera:

a) En el empotramiento la deformación es cero.

$$x_1 = 0 \rightarrow y_1 = 0$$

$$EI_1(0) = -0.037(0)^2 + 0.2783(0)^3 + c_1(0) + c_2$$

$$c_2 = 0$$

b) En el empotramiento la pendiente es cero.

$$x_1 = 0 \rightarrow \frac{dy_1}{dx_1} = 0$$

$$EI_1(0) = -0.0743(0) + 1.67 \frac{(0)^2}{2} + c_1$$

$$c_1 = 0$$

Por lo tanto

$$y_1 = \frac{-0.037x_1^2 + 0.2783x_1^3}{EI_1}$$

c) Aunque exista un cambio de sección, el ángulo a lo largo del segmento debe tener continuidad,

es decir:

$$x_1, x_2 = 0.037 \rightarrow \frac{dy_1}{dx_1} = \frac{dy_2}{dx_2}$$

$$\frac{-0.0743x_1 + 0.835x_1^2 + c_1}{EI_1} = \frac{-0.0743x_2 + 0.835x_2^2 + c_3}{EI_2}$$

$$c_3 = \frac{I_2}{I_1}(-0.0743x + 0.835x^2) + 0.0743x - 0.835x^2$$

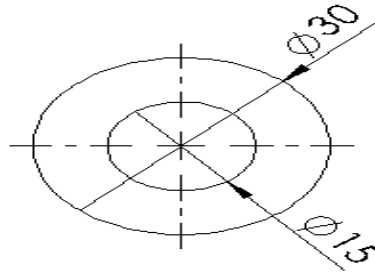
Para el cálculo de  $I$  se tiene:

$$I_{\text{círculo}} = \frac{1}{4}\pi R^4$$

Donde

$I$ : Momento de inercia del área transversal

*R: radio*



**Figura 98.** Vista lateral del eje

$$I_1 = 39760.78 \text{ mm}^4$$

$$I_2 = 2485.048 \text{ mm}^4$$

Por lo tanto

$$c_3 = 0,0015 \text{ [Nm}^2\text{]}$$

d) Entre cambios de sección, también se debe garantizar la continuidad en la función de deformación.

$$x_1, x_2 = 0.037 \rightarrow y_1 = y_2$$

$$\frac{-0.037x_1^2 + 0.2783x_1^3 + c_1x_1 + c_2}{EI_1} = \frac{-0.037x_2^2 + 0.2783x_2^3 + c_3x_1 + c_4}{EI_2}$$

$$c_4 = \frac{I_2}{I_1}(-0.037x^2 + 0.2783x^3) + 0.037x^2 - 0.2783x^3 - c_3x_1$$

$$c_4 = -0.000021 \text{ [Nm}^3\text{]}$$

$$y_2 = \frac{-0.037x_2^2 + 0.2783x_2^3 + 0.0015x_2 - 0.000021}{EI_2}$$

Se tiene como datos:

$$x_2 = 0.0445 \text{ m}$$

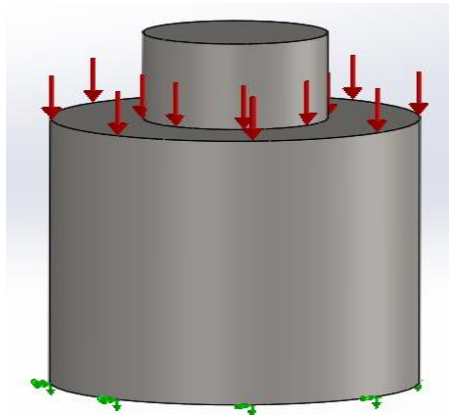
$$E_{acero} = 200 \text{ [GPa]} \rightarrow 200 \times 10^9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$I_2 = 2.485 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$y_2 = -0.000006 \text{ mm}$$

### *Análisis de Compresión*

Para este análisis se toma en cuenta la sección del eje en donde se asienta axialmente el rodamiento, ver Figura 99.



**Figura 99.** Análisis de Compresión

Como se trata del mismo eje, para este análisis se lo considera como una viga en cantiléver.

La carga crítica axial para el pandeo elástico de acuerdo con el criterio de Euler se define como:

$$P_{crí} = \frac{\pi^2}{(2L)^2} EI$$

Donde:

*E: Módulo de elasticidad del material.*

*I: Momento de Inercia del área transversal*

*L: Longitud de la viga.*

Por lo tanto

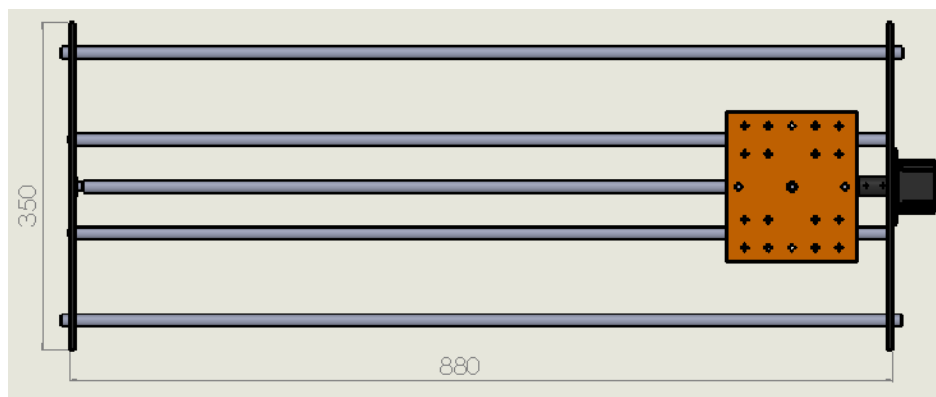
$$P_{crí} = \frac{\pi^2}{(2 \cdot 0.037m)^2} 200 \times 10^9 \frac{N}{m^2} 3.976 \times 10^{-8} m^4$$

$$\mathbf{P_{crí} = 14332.2 [KN]}$$

Por lo que se puede decir que el eje en esa sección no resultará afectado ya que la fuerza que soportará será de aproximadamente 50 N.

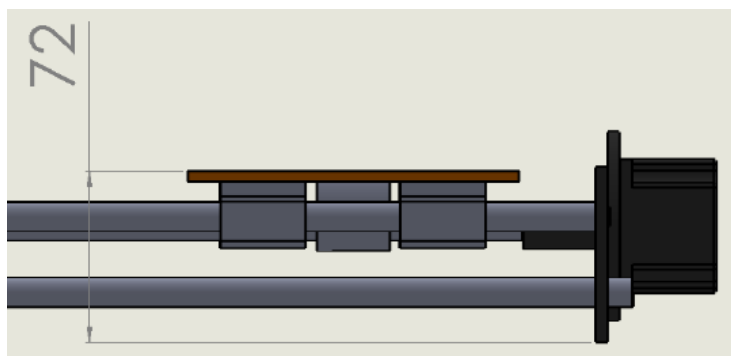


### 3.5.6. Dimensiones del mecanismo de traslación lineal



**Figura 100.** Mecanismo de traslación lineal del sistema transportador [mm].

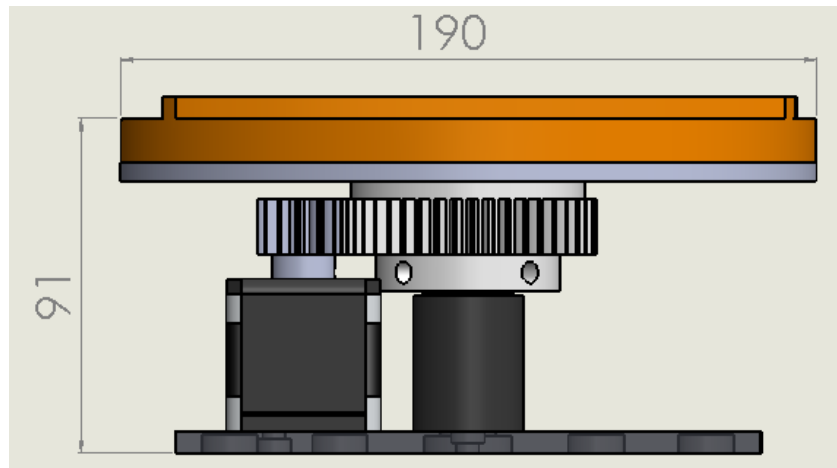
Tras haber realizado el diseño mecánico de los elementos del mecanismo de traslación lineal en el apartado 3.5.4, se realiza el CAD que posee las dimensiones finales del sistema transportador que se muestran en Figura 100 y Figura 101.



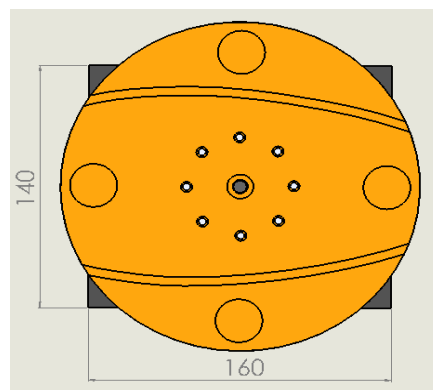
**Figura 101.** Altura en [mm] del mecanismo de traslación lineal .

### 3.5.7. Dimensiones del mecanismo rotacional

Considerando el apartado 3.5.5. La Figura 102 y Figura 103 muestran las dimensiones finales del mecanismo rotacional.



*Figura 102.* Alto y ancho del mecanismo rotacional en [mm].



*Figura 103.* Base del mecanismo rotacional [mm].

### 3.6. Sensores

Para determinar la posición del mecanismo de traslación lineal se utilizan los sensores inductivos LJWA3-4-Z/BY como fines de carrera.

#### 3.6.1. Sensores inductivos modelo LJ12A3-4-Z/BY

El sensor de la Figura 104 es utilizado para el control del inicio y fin de carrera del mecanismo mediante la conmutación sin contacto, al encontrarse próximo a algún objeto metálico, la Tabla 25. describe las propiedades del sensor.



**Figura 104.** Sensor Inductivo.

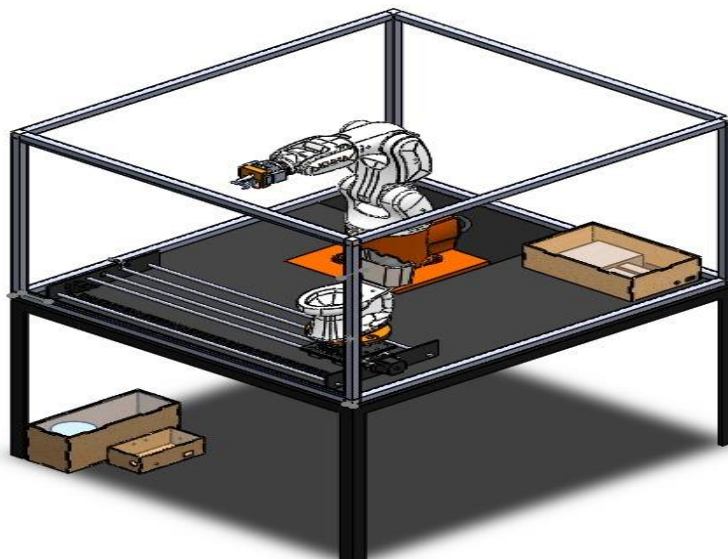
**Tabla 25.**

*Características de sensor inductivo*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Tipo de cable	Cilíndrico DC3 tipos de alambre (Negro, café, azul)
Tipo de apariencia del interruptor	Tipo cilíndrico
Funcionamiento	Sensor Inductivo
Tipo de salida	PNP NO (Normalmente abierto)
Diámetro de la cabeza	12 [mm]
Distancia de detección	4 [mm]
Voltaje de alimentación	6-36 [VDC]
Corriente de salida	300 mA
Temperatura de operación	-25 C a 55 C
Objeto de detección	Acero

### 3.7. Diseño en CAD prototipo de celda robotizada

Una vez dimensionados todos los elementos que constituyen el proyecto de titulación, descritos en las secciones: 1.8.2, 3.5.6, 3.5.7 se procede con el ensamble final descrito en la Figura 105.



*Figura 105.* Ensamble final del prototipo de celda robotizada.

### 3.8. Dimensionamiento del Controlador

Tras haber diseñado los elementos que pertenecen a la celda robotizada en los apartados 3.4 y 3.5 se determina el número de entradas y salidas necesarias por parte del controlador, como se muestra en la Tabla 26.

**Tabla 26.**

*Número de entradas y salidas necesarias para el controlador.*

<b>Entradas digitales</b>	N. de entradas	<b>Salidas digitales</b>	N. de salidas
Sistema transportador		<b>Sistema de dosificación y aplicación de pintura</b>	
Inicio de carrera	1	Activar bomba	1
Fin de carrera	1	<b>Comunicación PLC-Robot</b>	
<b>Comunicación Robot-PLC</b>		Habilitar robot	1
Comunicación 5 bits	5	Activar proceso	1
<b>Comunicación</b>		Paro del proceso	1
Profinet (HMI)		<b>Salidas Tipo Transistor</b>	
Ethernet (Computador)		Sistema de traslación lineal	2
		Sistema rotacional	2
<b>Total</b>	<b>7</b>		<b>8</b>

Debido a que el controlador trabaja con 15 variables, se concluye que no es necesario utilizar uno con una elevada velocidad de procesamiento, por tal motivo se utilizan los equipos del laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas, que satisfacen las necesidades básicas de control de la celda robotizada, en consecuencia se utilizara el PLC descrito en el apartado 3.8.1

### 3.8.1. Controlador CPU 1212C AC/DC/RLY 6ES7 212 1BE40-0XB0

El dispositivo de la Figura 106, controla el cambio de salidas a relé en función de las señales de entrada que recibe de acuerdo con una lógica de programación desarrollada por el usuario, estas instrucciones son utilizadas para el control del sistema transportador con el robot KUKA KR3 R540. En la Tabla 27 se describen las características del dispositivo.



**Figura 106.** PLC Siemens S71200 1212C AC/DC/RLY.

Fuente: (Siemens, 2015)

**Tabla 27.**

*Características del PLC siemens s71200*

Rendimiento	CPU 1212C
Velocidad de ejecución booleana	0.1us/instrucción
Velocidad de movimiento de caracteres	12us/instrucción
Velocidad de cálculos matemáticas	18us/instrucción
Voltaje de entrada	85-264 [V] a 47-63 [Hz]
Entradas digitales (DI)-	8 a 24[v]
Salidas digitales (DO)	6 tipo relé a 24 V
Entradas analógicas (AI)	0-10 VDC
Interface de comunicación	Profinet
Capacidad de ampliación	Si

Se adquiere un módulo de salidas digitales descrito en el apartado 3.8.2, para el control del sistema transportador, ya a que el PLC S71200 1212C AC/DC/RLY tienes salidas de relé, la señal de impulso no se puede emitir a través de las salidas integradas en el hardware, debido a que los relés no soportan las frecuencias de conmutación elevadas.

### 3.8.2. Módulo de salidas digitales DO

Para tener un control de ejes por lazo abierto como el mencionado en el apartado 2.1.12, es necesario utilizar salidas del tipo transistor, para una rápida conmutación que controla la velocidad de funcionamiento del actuador; se selecciona la Signal Board 6ES7222-1AD30-0XB0 que permite ampliar la CPU

El dispositivo de la Figura 107 permite controlar de movimiento de los ejes del sistema, en la Tabla 28 se describen sus características.



**Figura 107.** Signal Board 4DO 5V DC.

Fuente: (Siemens, 1998)

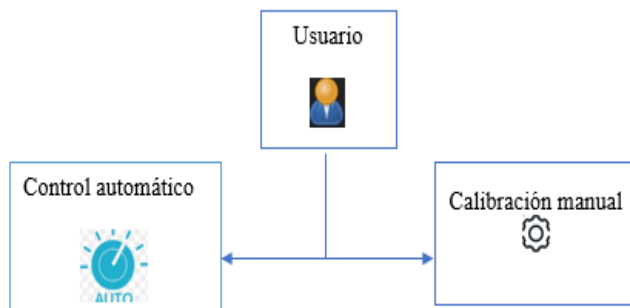
**Tabla 28***Características del módulo de salidas digitales*

Modelo	6ES7222-1AD30-0XB0
Tipo de salida	4 mosfet
Voltaje de salida	5 [V] a 200KHz

### 3.9. Interfaz Humano Máquina

#### 3.9.1. Diseño Interfaz Humano Máquina

El control de la celda de pintura, se lo realiza mediante la manipulación del HMI del panel view de Siemens, la cual consta de dos ventanas de navegación: control automático y calibración manual, el esquema de interacción por parte del usuario se encuentra descrito en la Figura 108.



**Figura 108.** Ventanas de navegación del usuario.

#### ***Control automático***

La ventana de la Figura 109, fue diseñada, con la finalidad de ejecutar la rutina para pintar el inodoro y se encuentra dividida en 3 áreas: mando del proceso, visualización de variables y navegación entre ventanas. Dentro de esta interfaz el usuario tiene la capacidad de:



### Mando del proceso

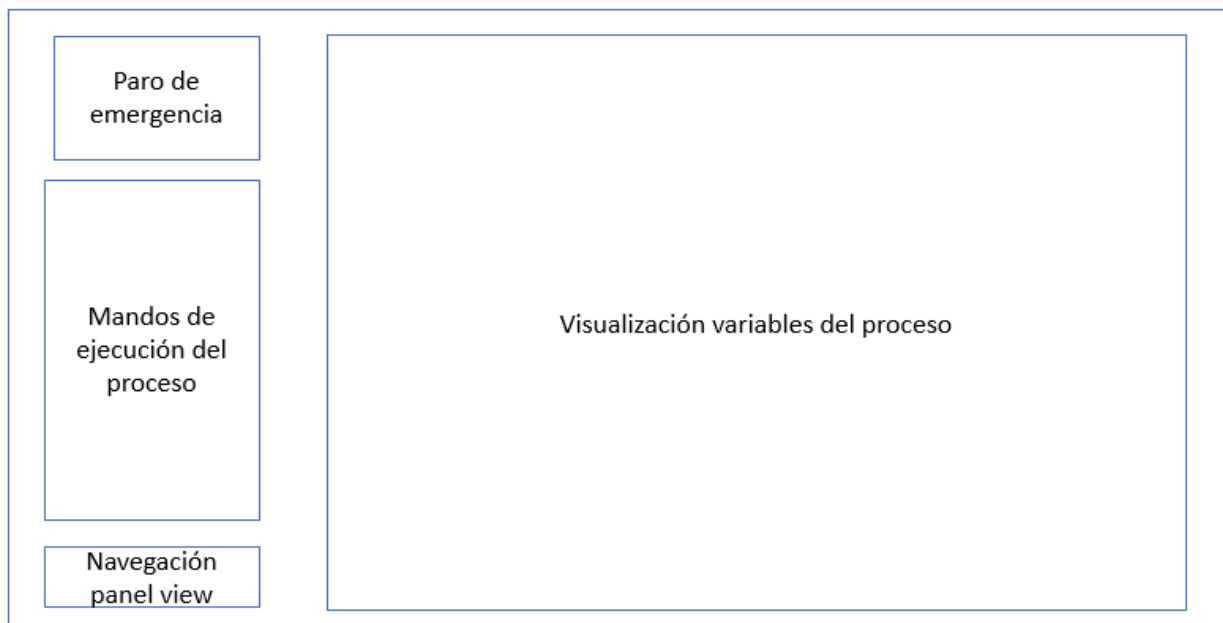
- Habilitar la comunicación con el manipulador robótico KUKA KR3 R540
- Iniciar y detener la rutina de pintura.

### Visualización de variables del proceso

- Monitorear el estado de la comunicación entre el PLC y el controlador KUKA CR4 Compact.
- Supervisar la posición angular, la velocidad de giro y traslación lineal del mecanismo.
- Identificar el estado de la bomba.

### Navegación

- Dirigirse a la ventana de calibración manual



**Figura 109.** HMI modo automático del control de proceso de pintura de inodoros a escala.

### ***Calibración manual***

La Figura 110, muestra la ventana de calibración manual, se encuentra dividida en 4 secciones:

#### Calibración manual eje lineal

- Interfaz que permite al operador manipular manualmente las condiciones del transportador del eje lineal, configurar la velocidad de desplazamiento y posición.

#### Calibración manual eje rotacional.

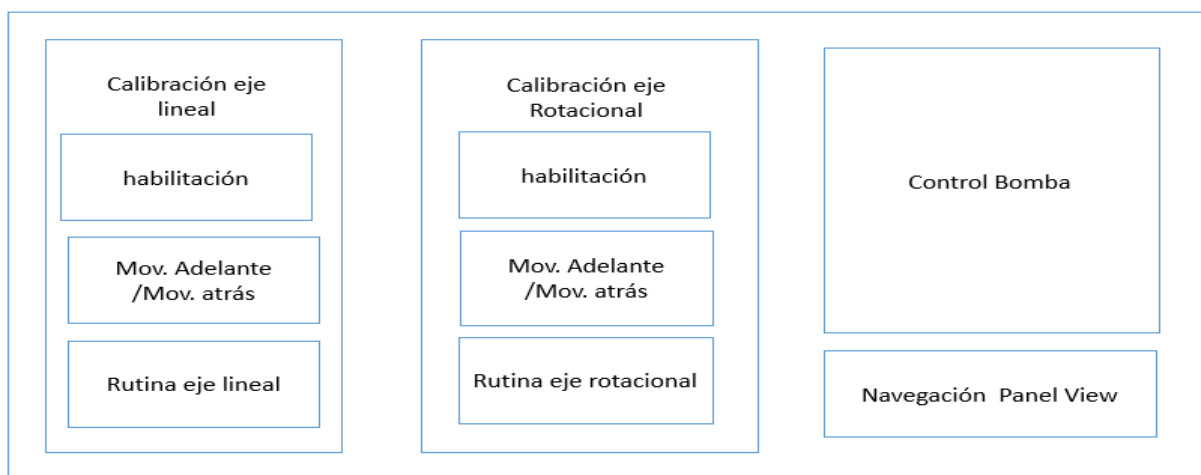
- Interfaz que permite al operador manipular manualmente las condiciones del eje rotacional, configurar la velocidad de desplazamiento del sistema al igual que su posición

#### Control de bomba

- Activar o desactivar la bomba de succión de pintura

#### Navegación

- Navegar hacia la ventana control automático.



***Figura 110.*** Ventana de calibración manual.

***SIMATIC HMI, KTP700 BASIC 6AV2123-2GB03-0AX0***

Para la implementación del HMI se utilizará la pantalla táctil mostrada en la Figura 111 la cual permite la supervisión y control de procesos.



***Figura 111.*** HMI siemens.

Fuente:(Siemens S.A, 2015)

En la Tabla 29, se muestran las características de la pantalla táctil.

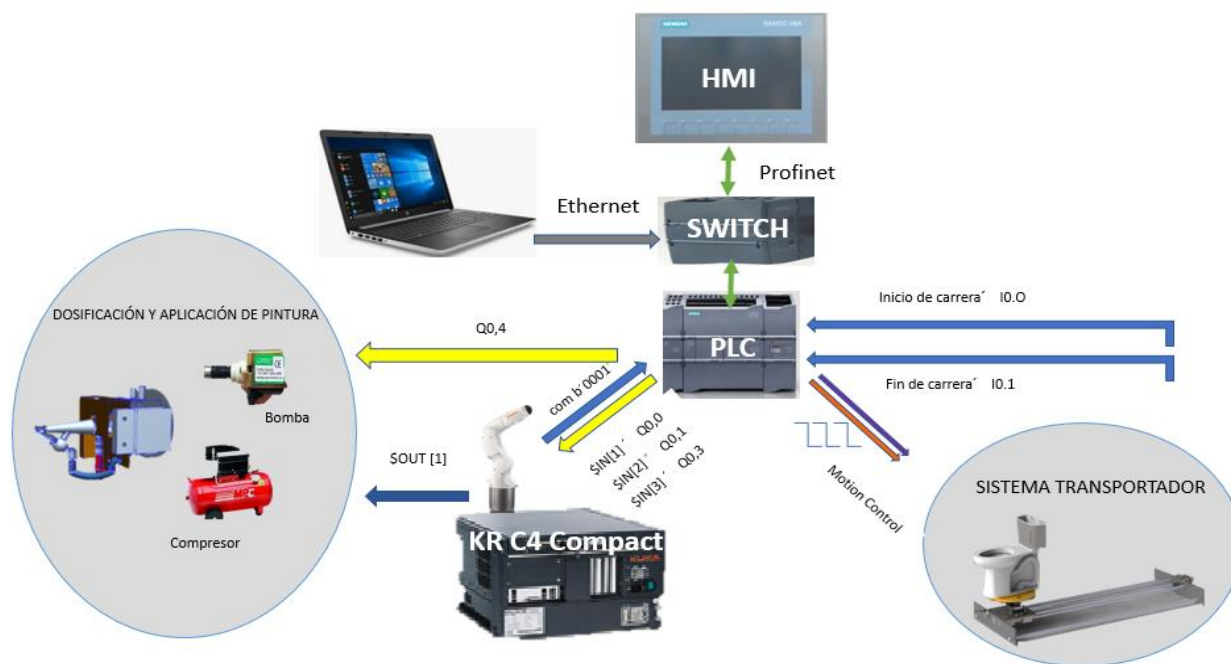
**Tabla 29.**

*Características de pantalla táctil*

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Marca	Siemens
Modelo	KTP700
Tamaño	7 pulg
Cantidad de colores	65 536
Tecnología	Táctil
Alimentación	24 [V]
Interface de comunicación	Ethernet/Profinet

### 3.10. Arquitectura de comunicación

Para cumplir con el sistema de control de la celda se utiliza la estrategia a lazo abierto descrita en el apartado 3.3 , se propone utilizar la arquitectura de comunicación de la Figura 112.



**Figura 112.** Arquitectura de comunicación de la celda robotizada.

Según la Figura 112 se utilizan los siguientes métodos de comunicación:

- Profinet para comunicar la HMI con el PLC
- Ethernet para comunicar la PC con el PLC
- Conexiones físicas para el intercambio de datos del resto de dispositivos.

### 3.11. Switch siemens CSM 1277

Se utiliza el dispositivo de la Figura 113, que se encuentra disponible en el laboratorio de Robótica y PLC para conectar en red el PLC con el HMI, sus características se encuentran descritas en la Tabla 30.



**Figura 113.** Switch siemens de 4 puertos.

Fuente: (Siemens, 2010)

**Tabla 30.**  
*Características Switch.*

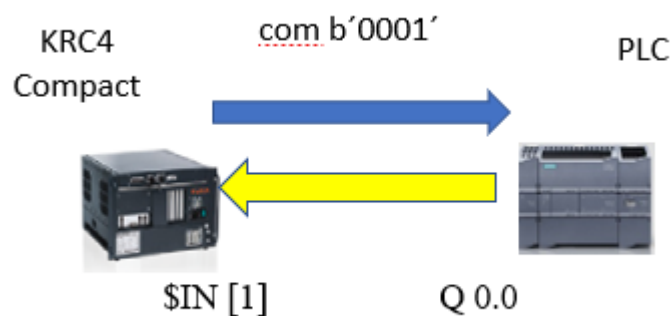
<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Marca	Siemens
Modelo	CSM1277
Diagnostico	LED
Cantidad de puertos	4 RJ 45
Alimentación	24 [V]

### 3.12. Intercambio de datos PLC-KUKA C4 compact

La comunicación entre el PLC y el controlador del robot, se la realiza de manera bidireccional. La Figura 114, indica la forma en que se comunica el PLC y el controlador KUKA KR C4 Compact utilizando salidas físicas de ambos dispositivos

- Para la comunicación entre el Robot y el PLC se usa una codificación de manera binaria, mediante un conjunto de salidas físicas.

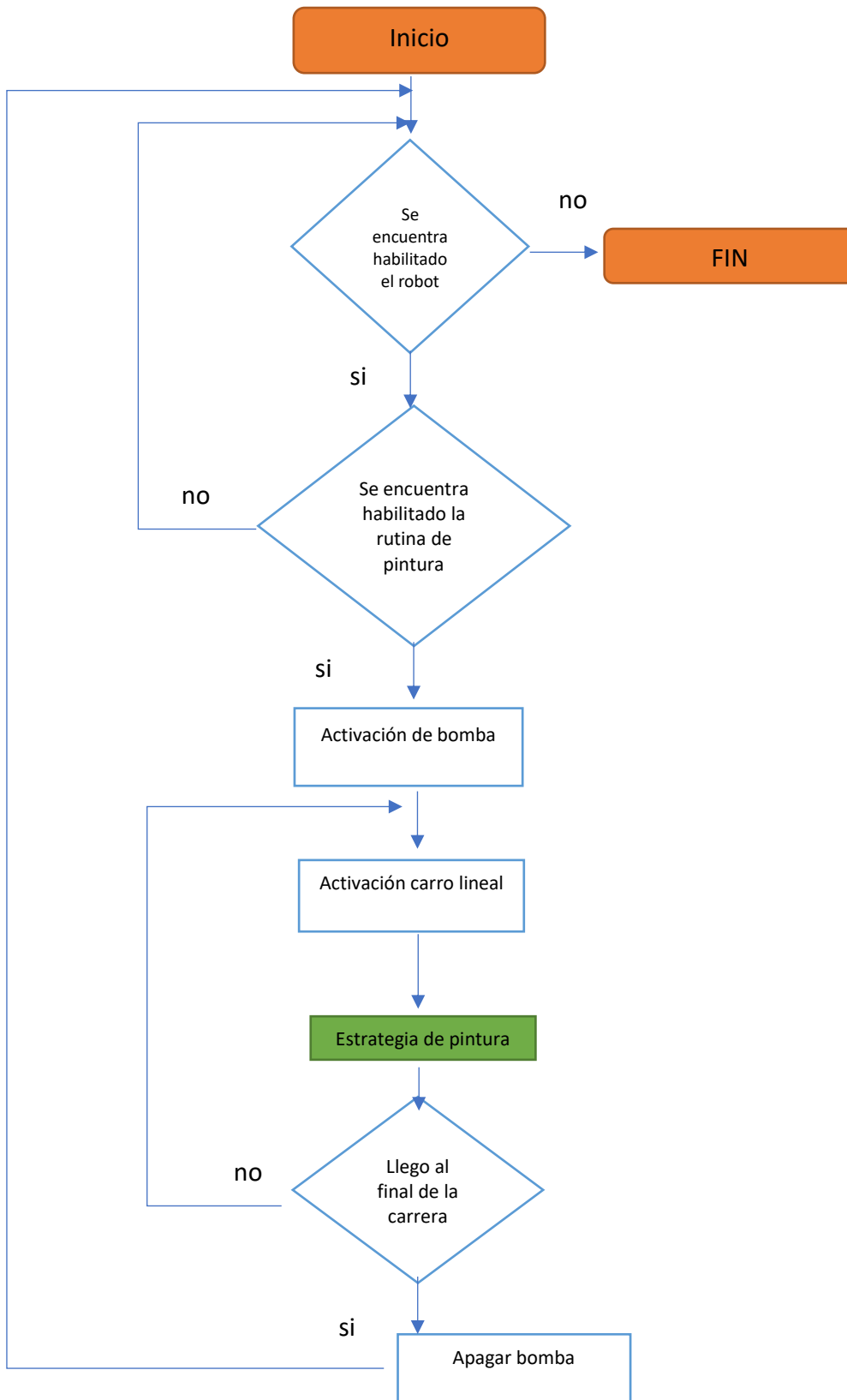
- Para la comunicación PLC-Robot una salida del PLC enciende una respectiva entrada del controlador del Robot.



*Figura 114.* Comunicación entre dispositivos.

### 3.13. Rutina de pintura en el controlador KUKA KR C4

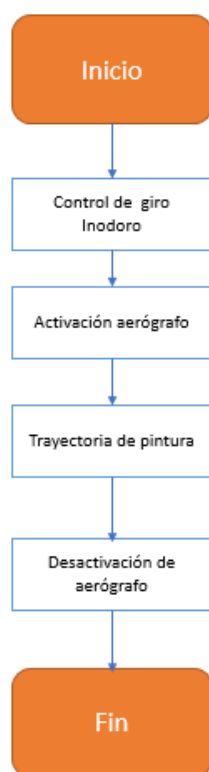
La Figura 115, representa el programa utilizado para el proceso de pintura del inodoro a escala, el cual necesita la habilitación del robot y la iniciación de la rutina desde el HMI de control



**Figura 115.** Rutina utilizada para la pintura del inodoro.

Una vez que el PLC manda la orden, al controlador del robot para comenzar la rutina de pintura, el controlador KR C4 Compact comunica al PLC que active la dosificación de pintura, y el movimiento del eje lineal hasta su fin de carrera.

La instrucción, estrategia de pintura, se la considera como un subprograma ya que depende de la sección del inodoro donde se aplique el recubrimiento. La Figura 116 representa el diagrama de flujo de esta instrucción.



**Figura 116.** Diagrama de flujo Instrucción estrategia de pintura.



### 3.14. Control de suministro de pintura

Durante la ejecución de la rutina de pintura el programa del robot ejecutado en el controlador KR C4 compact indica al PLC el momento en que la pintura debe ser bombeada, estas instrucciones se las realiza con la codificación mostrada en la Tabla 31.

**Tabla 31.**

*Instrucciones desde el controlador KRC4 Compact al PLC activas bomba.*

Instrucciones Controlador KRC4 Compact					Instrucciones PLC
1	1	1	1	1	Activar bomba de pintura
0	0	1	1	1	Desactivar bomba de pintura

El PLC una vez recibida la señal de activación de la bomba tal como se muestra en la Figura 117 activa la salida Q 0.3 del PLC que se encuentra conectada al circuito de accionamiento de la bomba descrito en el apartado 0.

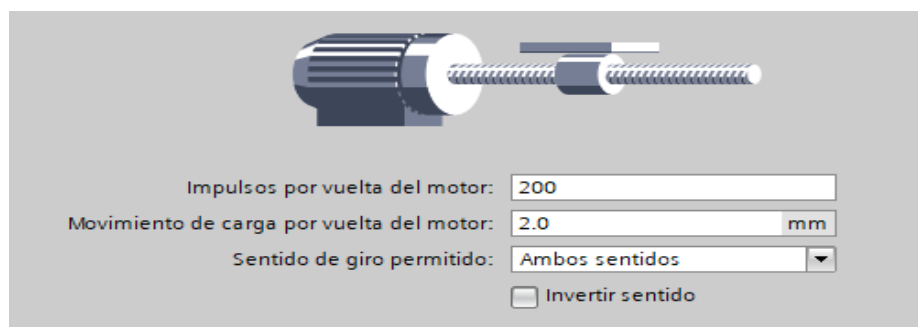


**Figura 117.** Accionamiento bomba.

### 3.15. Control de sistema de transporte

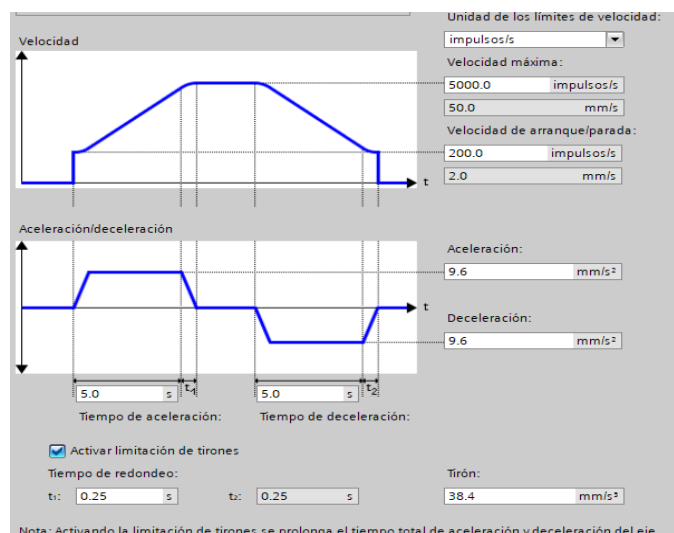
Para el control del sistema transportador se utiliza Motion Control, herramienta que fue descrita en apartado 2.1.12 y en base a la resolución de los motores nema 23 y nema 17 que es de 1.8 grados por paso, se concluye que se necesitan recibir un total de 200 pulsos para realizar una vuelta

completa en el caso del eje rotacional, o avanzar el paso especificado en el tornillo 2mm para el eje traslacional. El proceso para su configuración se encuentra descrito en la Figura 118.



**Figura 118.** Configuración de pulsos para realizar el avance del actuador.

La Figura 119, muestra el procedimiento para cargar la velocidad máxima de arranque y parada del sistema, la cual debe ir en función de la cantidad de pulsos mínimo para lograr el giro del actuador.



**Figura 119.** Configuración dinámica de ejes.

El resumen de la cantidad de pulsos necesarios para el arranque y parada de cada motor se muestra en la Tabla 32.

**Tabla 32.**

*Configuración de Motion Control para cada eje.*

	Velocidad máxima	Velocidad de arranque y parada
Lineal	500 pulsos $5 \left[ \frac{mm}{s} \right]$	100 pulsos $1 \left[ \frac{mm}{s} \right]$
Rotacional	133 pulsos $40 \left[ \frac{°}{s} \right]$	133 pulsos $40 \left[ \frac{°}{s} \right]$

### ***Instrucciones PLC S7-1200 -sistema transportador***

Utilizando la herramienta Motion Control, el PLC controlará el sistema transportador, a través de las instrucciones de la Tabla 33.

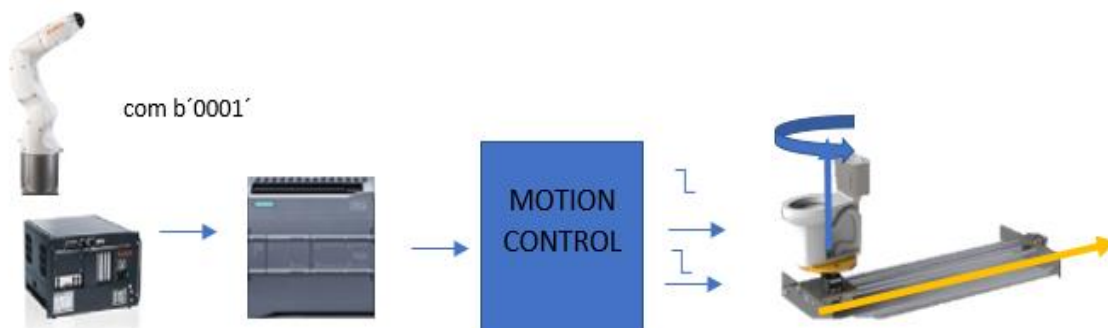
**Tabla 33.**

*Instrucciones PLC-Sistema transportador.*

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Inicio carrera	I 0.0
Fin de carrera	I 0,1
Habilitar motor mov. rotacional	Q 0.4
Habilitar motor mov. lineal	Q 0.5
Pulsos mov. lineal	Q 4.0
Sentido motor mov. lineal	Q 4.1
Pulsos mov. rotacional	Q 4.2
Sentido motor mov. rotacional	Q 4.3

### ***Instrucciones controlador KUKA KRC4 Compact -PLC S7-1200-sistema Transportador***

En la Figura 120 el controlador del robot KUKA KR3 R540 coordina el movimiento del manipulador robótico y ordena al PLC el accionamiento y posicionamiento angular del sistema transportador, la codificación de estas instrucciones se encuentran en la Tabla 34.



**Figura 120.** Esquema de envío de instrucciones desde KUKA KR C4 compact a PLC.

**Tabla 34.**

Comandos del controlador KUKA KR C4 Compact al PLC.

Posicionamiento de ángulos desde KRC4 Compact					Ángulos Motion Control-PLC
0	0	0	1	0	45
1	1	1	0	0	90
0	1	1	0	0	135
1	0	1	0	0	180
0	0	1	0	0	235
1	1	0	0	0	270
0	1	0	0	0	315
0	0	0	0	1	360
0	1	0	1	0	Activa funcionamiento carrera completa sistema transportador

### 3.15.1. Control de trayectorias

#### *Instrucciones PLC S7-1200 -controlador KUKA KRC4 Compact*

Desde la HMI conectada al PLC se habilita la ejecución del programa de pintura de inodoros mediante las instrucciones descritas en la Tabla 35.

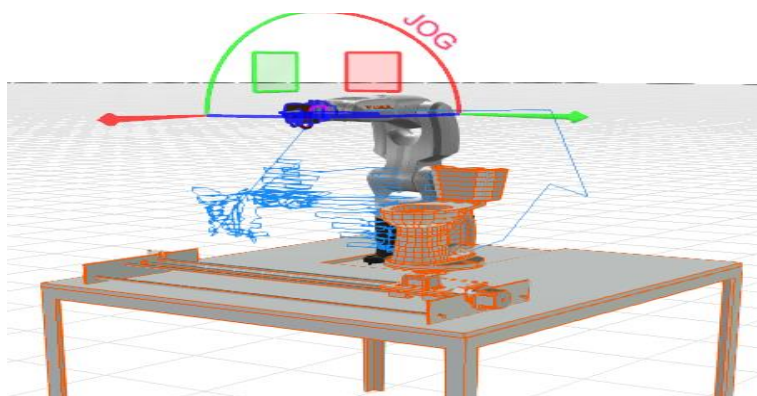
#### **Tabla 35.**

*Funciones desde el PLC hacia el controlador KUKA KRC4 Compact.*

Variable	Valor PLC	Valor robot
Activar robot	Q 0,0	\$ IN [1]
Marcha proceso robot	Q 0,1	\$ IN [2]
Paro robot	Q 0,2	\$ IN [3]

#### *Programación Manipulador KUKA KR3 R540*

El código fuente utilizado en el robot durante el proceso de pintura es desarrollado gracias a la simulación del proceso en el software KUKA SIM PRO 3.0, tras haber cargado el diseño final en CAD del apartado 3.6.1. El entorno de trabajo para la programación de trayectorias se visualiza en la Figura 121.



**Figura 121.** Programación de trayectorias en KUKA SIM PRO 3.0.

## CAPITULO IV

### IMPLEMENTACIÓN PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 4.1. Implementación de los componentes mecánicos

Los elementos que conforman el sistema transportador (lineal y rotacional) y la estructura de la cabina de la celda, fueron diseñados por los alumnos responsables del trabajo de titulación y su manufactura se desarrolló fuera de las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

##### 4.1.1. Implementación mecanismo de traslación lineal

Los elementos que conforman el transportador lineal fueron manufacturados de acuerdo con las especificaciones de los planos del Anexo A1. El ensamble de la estructura fue realizado por los autores del presente proyecto como se muestra en la Figura 122.



*Figura 122.* Ensamble del transportador lineal.

#### 4.1.2. Implementación del mecanismo rotacional

De la misma manera, el ensamblaje del mecanismo rotacional se realizó por parte de los estudiantes responsables del proyecto como se muestran en la Figura 123 y 124. En los planos del Anexo A1, se muestran los detalles necesarios para su manufactura.

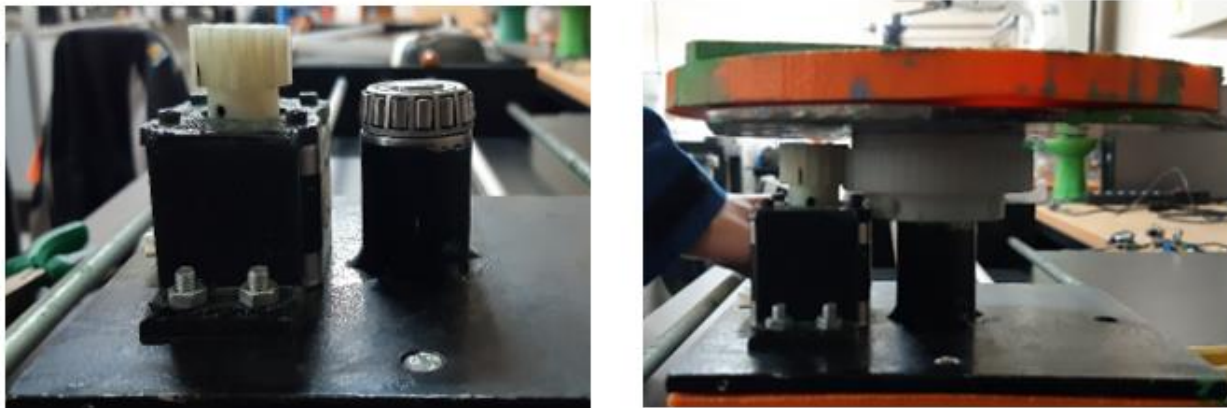


*Figura 123.* Ensamble del motor a la placa.



*Figura 124.* Ensamble del plato con el engrane.

El mecanismo rotacional se muestra en la Figura 125 .



*Figura 125.* Ensamble del plato con el engrane

#### 4.2 Implementación de componentes Eléctricos y Electrónicos

Como se explica en el apartado 3.8.1, se utiliza el controlador que se encuentra en el Laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE y se implementa el módulo de salidas digitales descrito en el apartado 3.8.2, como se muestra en la Figura 126.



*Figura 126.* Implementación del módulo al PLC.

También se realiza la conexión directa de las salidas digitales del controlador del robot, con las entradas digitales del PLC.



#### 4.2.1 Implementación de drivers

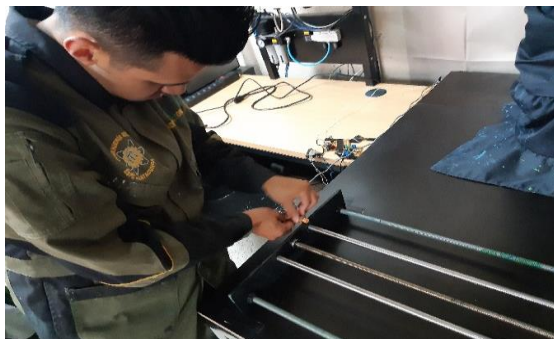
Se utilizan dos drivers que permiten controlar los movimientos del sistema transportador; en su implementación se conectan los cables de las bobinas de los motores a pasos, las señales de control desde el PLC y la alimentación de voltaje, como se muestra en la Figura 127. Además, se configura el número de pulsos requeridos mediante el dip switch.



*Figura 127.* Conexión de drivers de los motores al módulo de salidas digitales.

#### 4.2.2 Conexión de sensores

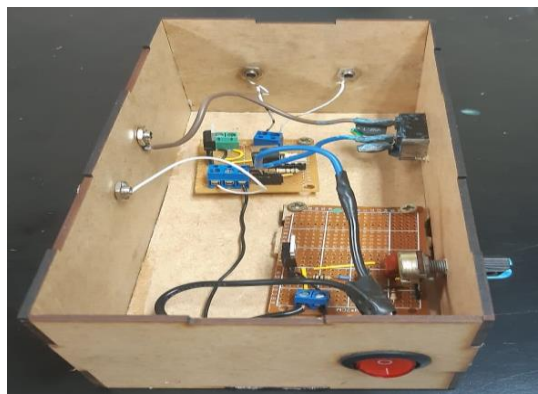
Se utilizan dos sensores inductivos a manera de finales de carrera, estos están colocados al inicio y al final de la trayectoria del transportador lineal como se muestra en la Figura 128, de igual manera están conectados directamente a las entradas del PLC.



*Figura 128.* Implementación de los sensores inductivos.

#### 4.2.3 Implementación de los Circuitos de Control de la bomba.

Como se explica detalladamente en la sección 3.4.3, para la bomba vibratoria, se utilizan 3 circuitos de control, el primero, es directamente un integrado regulador de voltaje, el segundo, es un circuito optoacoplador con triac y el tercero, es un circuito dimmer. En la Figura 129 se muestran los tres circuitos implementados.



*Figura 129.* Implementación de circuitos de control para la bomba.

### 4.3 Implementación de los componentes de la Celda

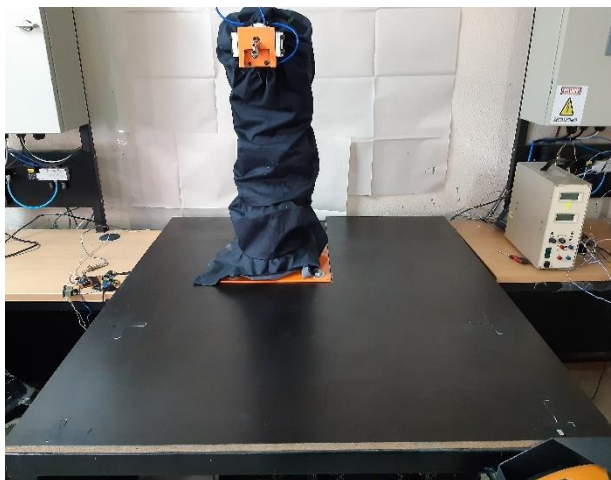
Para la implementación de la celda se siguieron los pasos que se detallan a continuación:

- a) Se cubre al manipulador robótico, con un traje impermeable para protegerlo de la pintura, como se muestra en la Figura 130.



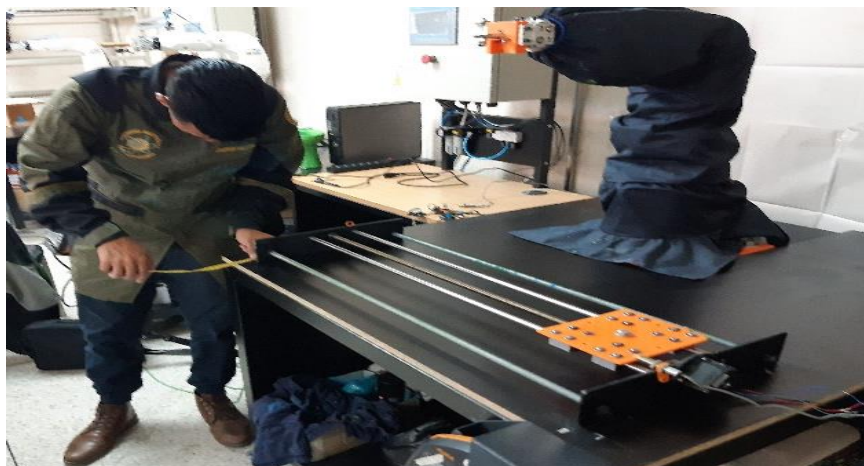
*Figura 130.* Traje protector del robot

- b) Debido a que la mesa de trabajo del robot no presenta una superficie totalmente uniforme, se coloca una base de madera como muestra la Figura 131.



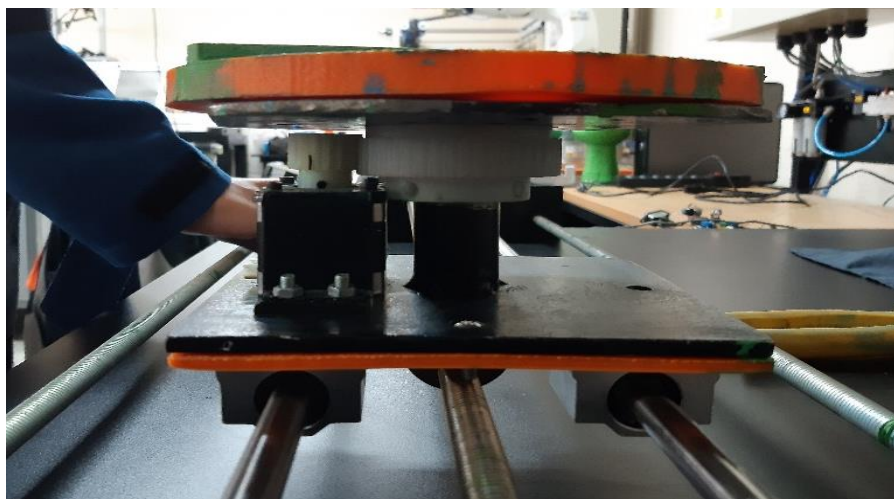
*Figura 131.* Base de madera.

- c) Como siguiente paso, se procede a centrar el transportador lineal, de acuerdo al espacio de trabajo disponible. Véase Figura 132.

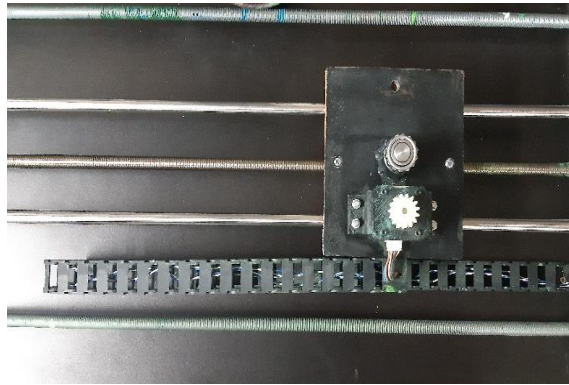


*Figura 132.* Montaje del transportador lineal en la mesa de trabajo.

- d) Se ensambla el mecanismo rotacional al transportador lineal, y se procede a sujetar el riel que transportará los cables de las bobinas del motor. Ver Figura 133 y 134.



*Figura 133.* Montaje del mecanismo rotacional sobre el transportador lineal.



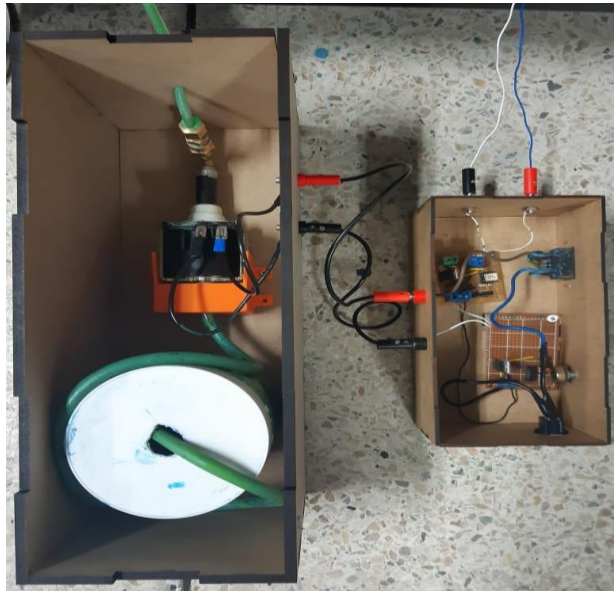
**Figura 134.** Riel para cables del motor.

- e) Se arman los acoples para las mangueras de pintura que entran y salen de la bomba como se muestra en la Figura 135.



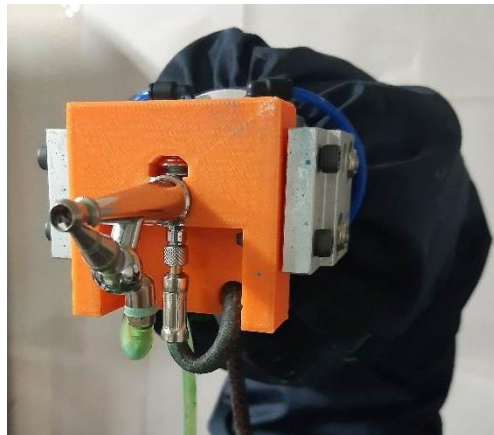
**Figura 135.** Acoples para mangueras.

- f) Se arma la caja que contienen a la bomba con el recipiente de pintura y la caja de los circuitos de control. Ver Figura 136.



**Figura 136.** Cajas de los componentes de la bomba.

- g) Se realiza el montaje del aerógrafo y su soporte en el gripper del robot, como se muestra en la Figura 137.



**Figura 137.** Soporte del aerógrafo

h) Los cables de los sensores y de los motores son introducidos en canaletas.



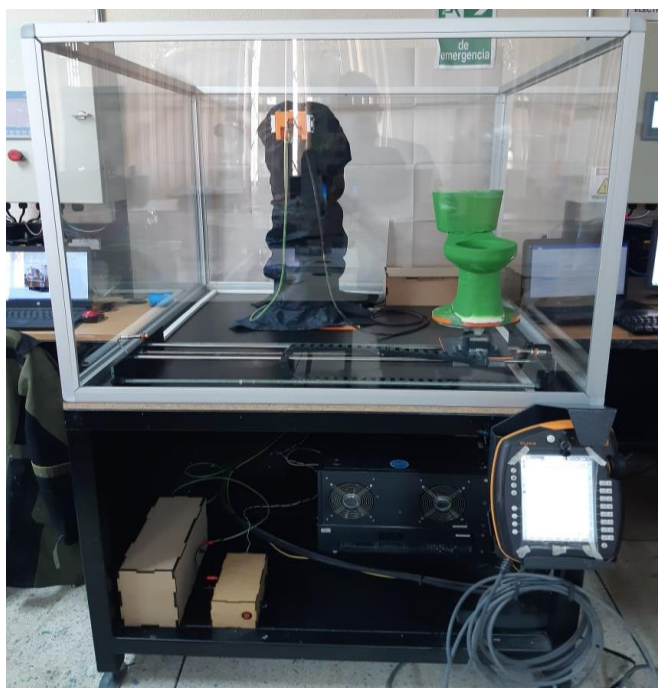
*Figura 138.* Canaletas para cables.

i) Se cortan los perfiles de aluminio, los perfiles en F y el acrílico de acuerdo con las medidas del diseño, y se ensamblan para formar la estructura de la cabina. Ver Figura 139.



*Figura 139.* Ensamble de la estructura de la cabina.

En la Figura 140 se muestra la implementación de la celda robotizada.



*Figura 140.* Celda Robotizada de Pintura.

#### **4.4 Pruebas de funcionamiento del sistema transportador.**

##### **4.4.1 Pruebas de funcionamiento del mecanismo de traslación lineal.**

El objetivo del mecanismo es generar una velocidad constante al transportar el inodoro. Se evalúa su desempeño al trabajar a varias velocidades, considerando: pérdida de paso y pandeo del tornillo sin fin, la escala de evaluación de cada uno de estos factores se describe en la Tabla 36.



**Tabla 36.**

*Escala de evaluación del desempeño del mecanismo de traslación lineal.*

Calificación	Valor
Frecuente	1
Medio	3
Esporádico	4
Ninguno	5

Los resultados de la evaluación del comportamiento del mecanismo de traslación lineal se resumen en la Tabla 37.

**Tabla 37.**

*Desempeño del mecanismo de traslación lineal.*

Criterio	Ponderación	Velocidades [mm/s]															
		1	2	3	4	5	6	7	8								
Perdida de paso	0,8	5	4	5	4	5	4	5	4	5	4	4	3	3	2,4	1	0,8
Pandeo del tornillo sin fin	0,2	5	1	5	1	4	0,8	4	0,8	4	0,8	4	1	4	0,8	3	0,6
Total		10	5	10	5	9	4,8	9	4,8	9	4,8	8	4	7	3,2	4	1,4

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 37, se determina que las velocidades de trabajo adecuadas se encuentran en un rango de 1 a 5 [mm/s], estas velocidades podrán emplearse al momento de programar el robot, sin que afecte el desempeño en conjunto de la celda.

#### 4.4.2 Pruebas de velocidad óptima del mecanismo de traslación lineal.

Se procede a determinar la velocidad adecuada a la que debe ir el mecanismo de traslación lineal con el fin de pintar toda la superficie del inodoro con un acabado superficial uniforme, considerando:

- Un espacio de trabajo de 700 [mm].
- Parámetros reales del abanico obtenidos en el apartado 4.5.

En la Tabla 38. se muestran los resultados de las pruebas de velocidad

**Tabla 38.**

*Velocidad del sistema transportador considerando variables reales*

Velocidad de traslación del sistema transportador[mm/s]	inodoro pintado
0,5	si
1	si
1,5	no
2	no
3	no

#### 4.4.3 Pruebas de funcionamiento del mecanismo rotacional

Para evaluar el desempeño del mecanismo, se analiza el equilibrio del plato en función de la velocidad angular de posicionamiento. La Tabla 39, muestra la métrica de evaluación.

**Tabla 39.**

*Equilibrio del plato en función de la velocidad de posicionamiento.*

Velocidad de posicionamiento [°/s]	Equilibrio
40	medio
50	Medio
60	Bueno

**CONTINÚA**

70	Bueno
90	Bueno
100	Bueno

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 39 se establece que las velocidades de trabajo adecuadas para la rotación del mecanismo se encuentran en un rango de 60 a 90 [°/s], para garantizar la estabilidad del conjunto plato-inodoro, al realizar posicionamiento.

#### **4.5 Pruebas de pintura**

Para la fabricación del inodoro se utilizó una impresora 3D que se encuentra disponible en el Laboratorio de Mecatrónica y Sistemas Dinámicos de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Se procede con la etapa de evaluación del material con el que se recubrirá el inodoro, para brindarle adherencia a la pintura, por lo que se utilizó distintos solventes.

##### **4.5.1 Tipos de recubrimiento**

Como primera prueba se aplica una capa de sellador en toda la superficie del inodoro para trabajar con pintura al thinner. Como segunda prueba se lo recubre de yeso para poder aplicar pintura de agua, en la Tabla 40, se ilustra los distintos tipos de recubrimiento utilizado.

**Tabla 40.**

*Aplicación de distintos tipos de recubrimiento a inodoro impreso en 3D*

Impresión 3D

Aplicación de sellador

Recubrimiento de yeso

***Pintura al thinner***

Para la prueba con este tipo de pintura se requiere recubrir previamente la pieza a hacer trabajada con un sellador que permite la adhesión del colorante al material, una vez aplicada la capa de pintura a base de thinner se concluye que existe adherencia, pero la concentración de gases genera un ambiente tóxico dentro del laboratorio.

En la Tabla 41, se indica el proceso utilizado para la aplicación de pintura al thinner.

**Tabla 41.**

*Proceso para aplicación de pintura al thinner*

Impresión

Aplicación de recubrimiento

Pintura con thinner



### *Pintura de agua*

Se recubre la pieza con yeso, al aplicar la pintura se obtiene un buen acabado superficial, ya que el yeso permite una mayor absorción, la Tabla 42 muestra el procedimiento de recubrimiento y pintura.

**Tabla 42**

*Proceso para aplicación de pintura al agua*

Impresión

Recubrimiento de Yeso

Aplicación de pintura de  
agua



### *Evaluación de los tipos de recubrimiento*

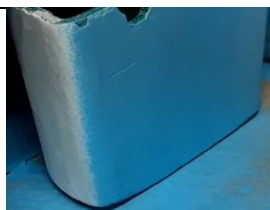
En la Tabla 43, se indican los resultados de recubrir el tanque del inodoro a escala con distintos tipos de pintura.

**Tabla 43.**

*Conclusiones tras aplicación de distintos tipos de recubrimiento*

Pintura al thinner

Pintura de agua



*CONTINÚA*

Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena absorción.</li> <li>• Buen acabado superficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de gases tóxicos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena absorción.</li> <li>• Buen Acabado superficial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cernir la pintura periódicamente.</li> </ul>

Se selecciona la pintura a base de agua, pues como se mencionó anteriormente permite un buen acabado superficial, se adhiere al yeso fácilmente y evita la generación de gases tóxicos dentro de ambientes cerrados.

#### 4.5.2 Pruebas de circuitos de control de la bomba

El caudal de la pintura está determinado por la potencia de trabajo de la bomba. En la Tabla 44 se evalúa la cantidad de pintura aplicada sobre una superficie en función a la energía eléctrica proporcionada al actuador, el valor de la potencia requerida queda determinado por la variación de la resistencia del potenciómetro descrito en el circuito del apartado 3.4.3.

#### **Tabla 44.**

*Cantidad de pintura respecto al valor de la resistencia del circuito.*

Valor resistencia K $\Omega$	Cantidad de pintura
10	ninguno
25	muy bajo
75	bajo
85	medio
95	bueno
200	chorreo
400	exceso

### 4.5.3 Caracterización pintura

Para el proceso de pintura de inodoros a escala se consideran tres parámetros importantes: densidad de pintura, velocidad de aplicación y distancia hacia la superficie del inodoro, con el objeto de obtener un abanico de diámetro constante que tenga la capacidad de recubrir la mayor superficie posible.

#### *Densidad de pintura*

Como se muestra en la Figura 141, se mide la densidad de la pintura comercial, para aerógrafos, con el fin de obtener un parámetro constante en la pintura de agua que se va a utilizar.



**Figura 141.** Medición de densidad de pintura utilizada.

En la Tabla 45 se detalla la densidad y el caudal utilizados para el proceso de pintura.

**Tabla 45.**

*Densidad base utilizada para el proceso de pintura de inodoros a escala*

Densidad	Caudal
1.323	4.43ml/s

Partiendo de una densidad constante, y de variar tanto la velocidad de aplicación de pintura y la distancia hacia la superficie del inodoro se obtuvo los valores que se detallan en la Tabla 46.

**Tabla 46.**

*Tamaño de abanico [mm] VS Velocidad de aplicación [m/s]*

Distancia de aplicación [mm]	35	55	80
Velocidad [m/s]	Tamaño de abanico [mm]		
0,025	22	23	32
0,0375	19,5	22	26
0,05	15	20	25
0,0625	15	18	24

Con esta primera prueba se pudo comprobar visualmente que la velocidad de aplicación más adecuada es de 0,05 m/s, ya que genera un acabado superficial uniforme.

La Tabla 47, muestra el resultado de aplicar la pintura variando la distancia a la superficie.

**Tabla 47.**

*Comparación de abanicos a distintas distancias y velocidad constante 0.05 [m/s]*

35 [mm]



55[mm]



80[mm]





Tras haber evaluado los distintos diámetros de abanicos, se considera utilizar una velocidad de aplicación de 0.05 [m/s] a una distancia de 55 [mm] para obtener un abanico medio de 20 [mm].

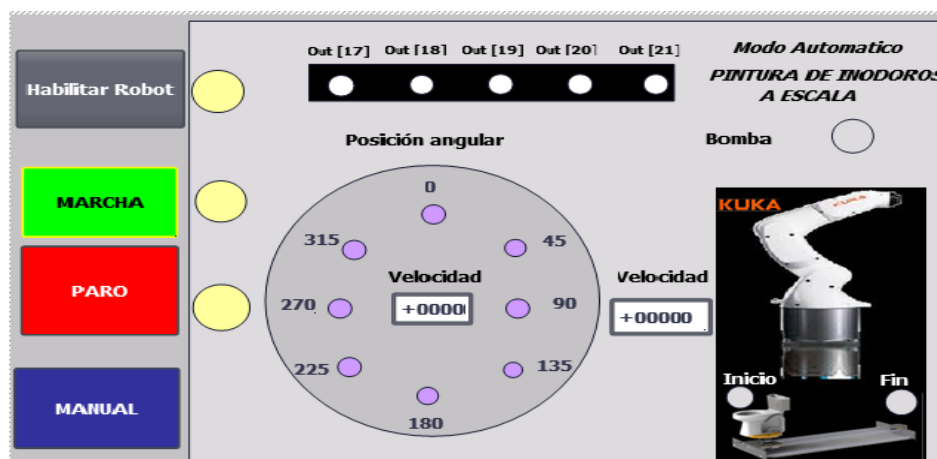
## 4.6 Implementación programación trayectorias

### 4.6.1 Implementación HMI

En función del apartado 3.9 Interfaz Humano Máquina, se realiza la implementación de las ventanas de navegación para el control monitoreo y calibración del prototipo de celda robotizada.

#### *Control Automático*

La Figura 142, describe la ventana para el accionamiento y monitoreo de la rutina de pintura.



**Figura 142.** Ventana de control automático implementada en el Panel View.

## Calibración Manual

La Figura 143, describe la ventana de calibración manual del sistema transportador y bomba.

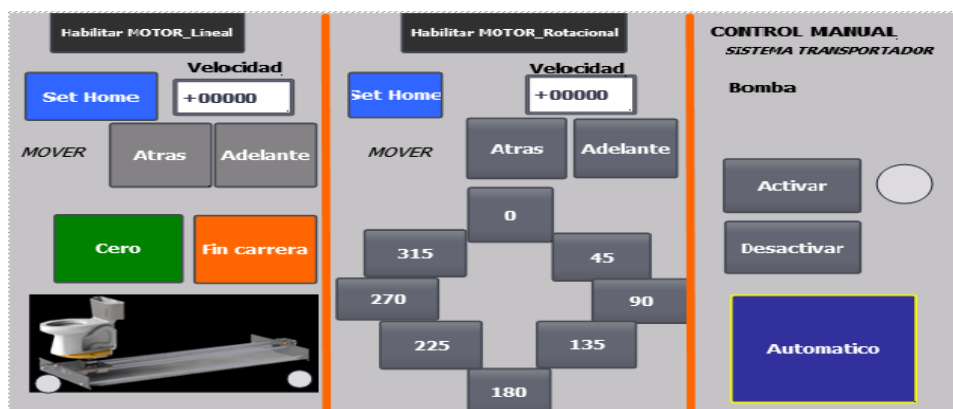


Figura 143. Ventana de calibración manual implementada en el Panel View.

### 4.6.2 Implementación rutina de pintura

Considerando las características del abanico obtenido en el apartado 4.5.3 , se generó las trayectorias en el Software KUKA Sim Pro-3.0. El código obtenido se cargará al controlador del manipulador a través del software WorkVisual 4.0.

El procedimiento de generación y carga de código en el controlador del robot se detalla en las Figura 144 y 145.

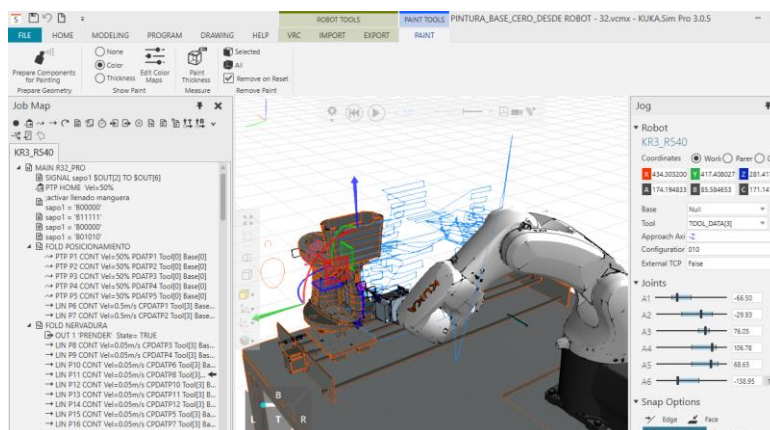
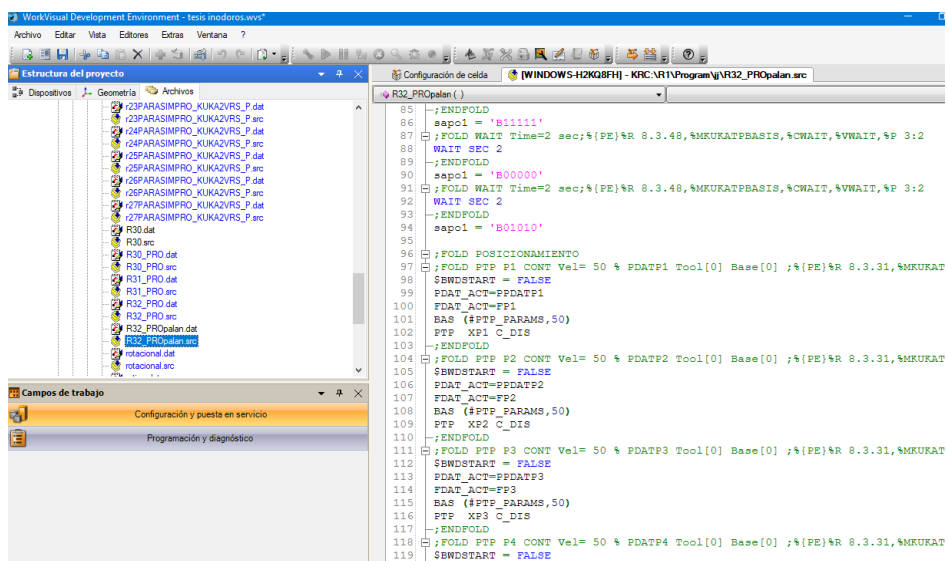


Figura 144. Implementación código para rutina de pintura Software

KUKA SIM PRO 3.0.



**Figura 145.** Código para pintar, cargado al controlado del robot desde WORK VISUAL.

## 4.7 Pruebas en la celda robotizada

Se realiza una evaluación del desenvolvimiento de la celda robotizada en condiciones críticas.

### 4.7.1 Pruebas de sensores como finales de carrera

Las pruebas se realizan con el objetivo de verificar el funcionamiento correcto de los sensores inductivos y evitar posibles colisiones del mecanismo rotacional con el bastidor del mecanismo lineal.

El operador a través de la ventana de calibración manual activa el motor que traslada al mecanismo rotacional, hasta el inicio y final de la trayectoria, los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 48.

**Tabla 48.**

*Desempeño de los fines de carrera al desactivar motor.*

	<b>Desempeño</b>
<b>Inicio de carrera</b>	Correcto
<b>Fin de carrera</b>	Correcto

#### **4.7.2 Prueba de fallo de energía**

En la prueba de fallo de energía se evalúa la respuesta de la celda robotizada ante un corte de suministro eléctrico, su comportamiento se muestra en la Tabla 49.

**Tabla 49.**

*Comportamiento de la celda robotizada respecto a fallos de energía*

<b>Elemento celda robotizada</b>	<b>Comportamiento</b>	<b>Observación</b>	<b>Solución</b>
Sistema transportador	Se detiene	No es posible reanudar la rutina de pintura	Volver a calibrar el sistema transportador
Robot KUKA KR3 R540	No se detiene		Reiniciar la rutina de pintura
Bomba de dosificación de pintura	Se detiene		Reiniciar la rutina de pintura

#### **4.7.3 Prueba de botón de paro de emergencia**

La prueba de botón de paro tiene como objetivo determinar el comportamiento de la celda robotizada al activar el botón, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 50.

**Tabla 50**

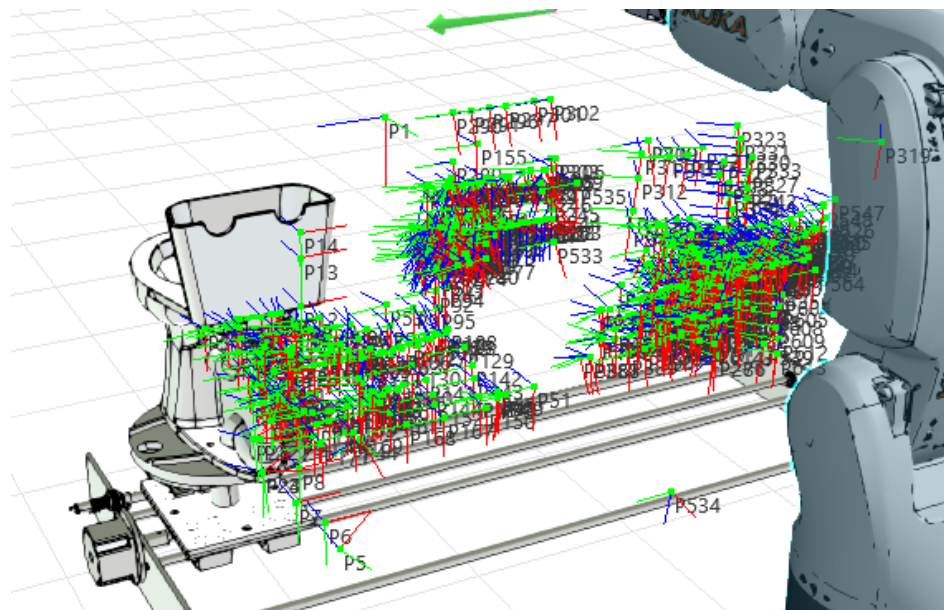
*Comportamiento de la celda robotizada tras pulsar el botón de paro.*

Elemento celda robotizada	Comportamiento	Solución
Sistema transportador	se detiene	Seleccionar el botón inicio de carrera de la ventana de calibración manual
Robot KUKA KR3 R540	se detiene	Reiniciar rutina de pintura
Bomba de dosificación de pintura	se detiene	Reiniciar rutina de pintura

#### 4.7.4 Pruebas de metodologías para programación de trayectorias

##### *Programación base cero*

Los puntos creados en base cero se generan a partir de las coordenadas world ( $x=0$ ,  $y=0$ ,  $z=0$ ,  $A=0$ ,  $B=0$ ,  $C=0$ ) del robot, mantienen su pose constante. Ver Figura 146.



**Figura 146.** Programación de rutina de pintura en base cero.

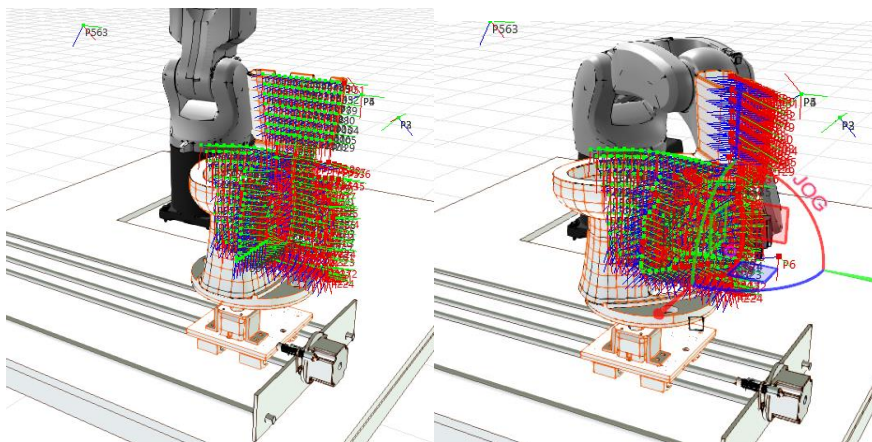
En la Figura 147 se muestra el inodoro pintado tras la utilización de la metodología base cero.



**Figura 147.** Resultados de la superficie del inodoro pintada en base cero.

### ***Programación base móvil***

A partir de las coordenadas del centro del plato del inodoro, se crea una nueva base, cuya pose varia respecto al tiempo, debido a la traslación y rotación del sistema transportador. Los puntos creados en referencia a esta base no son constantes. Ver Figura 148.



**Figura 148.** Programación de rutina de pintura en base móvil.

En la Figura 149 se muestra el inodoro pintado tras la utilización de la metodología base móvil.



**Figura 149.** Resultados de la superficie del Inodoro pintado en base móvil.

Se utilizaron estas dos metodologías para la programación de la rutina de pintura, su efectividad se evalúa a partir de las métricas descritas en la Tabla 51.

**Tabla 51.**

*Métricas de evaluación de la metodología de programación*

Complejidad de elaboración del programa	Parámetro que se refiere al tiempo medido en días para obtener el código de la rutina de pintura de un inodoro
Efectividad del programa	Propiedad que evalúa la cantidad de superficie recubierta con pintura tras haber ejecutado la rutina.
Complejidad de ejecución del código en el controlador del robot.	Esta métrica evalúa el nivel de dificultad en implementación del código elaborado desde el simulador al controlador.
Versatilidad de la metodología	Capacidad de reutilización del código generado, para ser ejecutado a distintas velocidades del mecanismo transportador lineal.

Tras considerar las métricas de Tabla 51, se procede a comparar las dos metodologías obteniéndose los resultados descritos en la Tabla 52.

**Tabla 52.**  
*Evaluación de las metodologías de programación*

	<b>Base cero</b>	<b>Base móvil</b>
Complejidad de elaboración del programa Tiempo de elaboración (Días)	3	5
Efectividad del programa (% de superficie recubierta)	97%	70%
Complejidad de ejecución del código en el controlador del robot	Baja	Alta
Versatilidad de metodología (Respuesta de la programación a variación de velocidad traslacional del inodoro)	ninguna	Baja

En función de los resultados obtenidos en la Tabla 52, y los inodoros pintados de la Figura 147 en la metodología en base cero, si bien no posee versatilidad, es menos compleja de implementar en la celda robotizada y genera la rutina con mayor efectividad en el recubrimiento del inodoro con pintura.



## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se diseñó, simuló e implementó un prototipo de celda robotizada, para el Laboratorio de Robótica y PLC de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, que permite identificar el proceso de pintura de inodoros a escala, mientras estos se trasladan y rotan.

Se diseñó y construyó el sistema transportador, constituido por: un mecanismo de traslación lineal y un mecanismo rotacional, que permite que el inodoro rote y se traslade mientras es pintado por el robot.

Se diseñó y construyó la cabina de pintura con perfiles de aluminio cuadrados de 1 pulgada, perfiles de aluminio en F y acrílico. Esta cabina protege el entorno de trabajo de las salpicaduras de la pintura dentro del laboratorio.

Se integró la parte eléctrica y mecánica, mediante el uso de sensores, actuadores, panel de control y el sistema transportador, con el controlador del manipulador robótico, obteniendo su interacción durante el proceso de pintura.

Se programó el PLC Siemens 1212C y el controlador del robot KUKA KR C4 compact, para sincronizar el movimiento del manipulador robótico KUKA KR3 R540 con el sistema transportador.

Si bien los distintos protocolos industriales tales como Profinet, Profibus y demás brindan prestaciones que facilitan el desempeño de procesos de automatización, no son indispensables a la hora de implementar una arquitectura de comunicación entre distintos dispositivos de una celda pues, a través de una codificación de 5 bits, se realizó el presente proyecto de titulación, lo cual

demuestra que existen procesos que pueden ser económicamente más viables, al utilizar todas la prestaciones de sus equipos.

Se modelaron, el sistema transportador y el dosificador de pintura partir de los diseños CAD, y se generaron las trayectorias del manipulador robótico para el proceso de pintura, en el simulador KUKA SIM PRO 3.0. Se cargó el código al controlador del robot mediante el software WorkVisual 4.0.

Al comparar la simulación elaborada para el dimensionamiento de los actuadores del sistema transportador, con los resultados obtenidos de la puesta en marcha de la celda, se concluye que el haber utilizado un abanico estándar y una máxima velocidad de trabajo del manipulador robótico, permitió que el mecanismo de traslación lineal sea capaz de trabajar a distintas velocidades, e identificar la rapidez adecuada con la que el inodoro se pueda pintar, una vez caracterizada la pintura.

Al analizar las pruebas de funcionamiento del mecanismo de traslación lineal se determinó que el rango de velocidades de trabajo idóneas está entre 1 y 5 [mm/s]; se concluye utilizar la de 1 [mm/s], debido a que el inodoro se termina de pintar a esta velocidad, en el espacio de trabajo disponible, como se determinó en la simulación.

Para garantizar el equilibrio del conjunto plato-inodoro, en los movimientos de rotación, la prueba determinó que el rango de velocidades de trabajo está entre 60 y 90 [°/s], se concluye utilizar la de 60 [°/s] debido a que en la simulación la sincronización es adecuada entre el manipulador robótico y la pieza.

Al observar las caras del inodoro que fueron pintadas, aplicando las dos metodologías de programación, se concluye que la programación en base cero tiene mayor efectividad pues se obtuvo un acabado superficial aceptable y un recubrimiento del 97% de la superficie.

Al implementar el código generado en base móvil surgió el inconveniente de actualizar el valor de la base con la que se generan los puntos en el controlador el robot, generando una falta de sincronización entre la rutina programada y el sistema transportador, lo que tuvo como resultado una superficie deficientemente pintada, no obstante esto no sugiere que la metodología en base móvil no sea viable dentro de un proceso industrial, pues brinda la flexibilidad de acoplarse a distintos rangos de velocidades de producción, en consecuencia se deben utilizar sensores que cierren un lazo de control para determinar la ubicación actual del inodoro.

Debido a que se utilizó una estructura de control a lazo abierto, la calidad del acabado superficial del inodoro, depende estrictamente de la calibración adecuada de todos sus actuadores, por tal motivo es necesario obtener una correcta caracterización e implementación del sistema de dosificación y aplicación de pintura identificando sus propiedades químicas y físicas, así como el tamaño del abanico utilizado, la distancia de la pistola hacia la superficie de la pieza y la velocidad con la que el robot debe aplicar la pintura sobre el inodoro.

El sistema de transporte utilizado evita tener tiempos muertos ya que la pieza permanece en la línea de producción y no hay que trasladarla a otro lugar para pintarla, obteniendo así un proceso en serie, lo cual genera una alta productividad y, por consiguiente, se obtendrá un mayor alcance y cobertura en el mercado.

La implementación de otras metodologías, así como generar y probar métodos no convencionales de programación utilizando funciones matemáticas, para la optimización del proceso, queda abierta, pues todavía se puede investigar todas las prestaciones que brinda el robot

KUKA KR3 R540 y su controlador KUKA KR C4 compact para perfeccionar la generación de trayectorias.

Se concluye que el programar trayectorias complejas en sistemas dinámicos en el software KUKA SIM PRO 3.0, es mucho más rápido y eficiente que desarrollar una rutina con una programación ON-LINE, debido a que permite modelar el entorno de trabajo del robot.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda lubricar los componentes mecánicos del sistema transportador para evitar el desgaste prematuro y asegurar su buen funcionamiento.

Es indispensable que circule agua en las mangueras de alimentación de pintura, el aerógrafo y la bomba al terminar de utilizar la celda, para evitar que se obstruya la pintura en estos componentes.

Calibrar la bomba mediante el potenciómetro de acuerdo a las necesidades requeridas de caudal de pintura para distintos procesos.

Se recomienda identificar de manera exacta la velocidad de ejecución de trayectorias por parte del manipulador, pues si bien el software KUKA SIM PRO 3.0 es una herramienta que permite observar el comportamiento de todos los elementos que constituyen una celda, este no brinda una correcta apreciación de la velocidad de trabajo del robot, lo cual puede inducir dimensionamientos errados de proceso industriales.

Limpiar la estación de trabajo al finalizar para evitar manchas permanentes de pintura.

Considerando que el prototipo fue desarrollado en base a un sistema de control a lazo abierto, se recomienda utilizar sistemas basados en visión artificial e implementar instrumentación en sistemas de lazo cerrado para optimizar y extrapolar el proceso de pintura a nivel industrial.

## CAPITULO VI

### BIBLIOGRAFÍA

- ABB software. (2018). *RobotStudio* / ABB.  
<https://new.abb.com/products/robotics/es/robotstudio/descargas>
- Ag, S. (2010). *Simatic Net s7-1200 Compact Switch Module CSM 1277*. 1–33.
- AutomationDirectcom. (2005). Cover. *Sure step*.  
<https://cdn.automationdirect.com/static/manuals/surestepmanualsp/surestepmanualsp.pdf>
- azienda in fiera. (2018). *Full automatic robotized glazing line for sanitary ware setec group*.  
<https://www.aziendainfiera.it/en/prodotto/linea-robotizzata-smaltatura-vasi-setec>
- Cubre, F. (2019). Servomotores EMME-AS. *Festo Servo Motors Catalogue*.
- Electropro. (2018). *Driver motor a pasos*. [www.electropro.pe](http://www.electropro.pe)
- Galisteo, A. J. (2018). *Aerógrafo tipo porten*.
- Genitec. (2018). *Total Sanitaryware Solutions*. 84. [http://www.genitec.com.tr/product\\_details/6-full-automatic-glazing-robot.html#.WzEUIKczbtQ](http://www.genitec.com.tr/product_details/6-full-automatic-glazing-robot.html#.WzEUIKczbtQ)
- Graco. (2017). Finishing Automation. *Graco Catalog*, 8.
- Kuka KR16. (2012). *The masterful movers in the low payload category KR 6-2 , KR 16-2*.  
[http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial\\_robots/low/kr6\\_2/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/en/products/industrial_robots/low/kr6_2/start.htm)
- NBS. (2012). Rodamientos para sistemas lineales Linear bearings. *Catalogo de Rodamientos*.
- NETZSCH. (2016). *Tornado® rotary lobe pump*.
- Ningbo. (2010). *Linear Motion Ball Bearing Slide Units SC ... UU : Product Description :*  
*Company Information : Company Name :*

Norton. (2011). *Diseño\_máquinas.pdf*.

Rexroth Bosch. (2006). *Linear Motion Technology Handbook*. 352.

SDP/SI. (2015). Ball & acme lead screw technical information. *Article-SDP/SI*, 11. WWW.SDP-SI.COM

Shigley. (2008). *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (McGrawHill (ed.); 8 va).

Siemens. (1998). Especificaciones técnicas Signal Board 6ES7222-1AD30-0XB0. *Data Sheet Funcionamiento Signal Board*, 6, ^.

Siemens. (2015). Especificaciones s71200. *Siemens*, 0(4), 49–53. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2015.55627>

Siemens S.A. (2015). *Simatic Hmi Ktp700 Basic Panel*. 6, 1–9.

SMC. (2017). *Mhl2 air gripper*.

SNP. (2017). *bete-french-catalog2.pdf*.

Systems., S. (2018). *General catalog. Catalog*, 166.

THK. (2001). Products & Information. *General Catalog Linear Motion Systems*, 23(3), 46–48. <https://doi.org/10.1111/j.1945-1474.2001.tb00350.x>

Thomson. (2014). BSA Lead Screws. *BSA Lead Screws*, 16.

Veloso, C. (2016). ⇔ *Regulador de voltaje 7805: ¿Qué es y como funciona?* <https://www.electrontools.com/Home/WP/2016/03/09/regulador-de-voltaje-7805/>

Xinje, W., & Co, E. (2017). *DPL / DP series digital stepper drive Stepper system*. 510.

**ANEXOS**

Anexo A1. Planos de diseño del Sistema trasportador.