

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

**OPTIMIZACIÓN MECÁNICA Y CINEMÁTICA DE UN BRAZO  
ROBÓTICO PARA REDUCIR EL TIEMPO DE CAMBIO DE  
PERNOS DE REVESTIMIENTO EN EL MOLINO DE  
BOLAS DE LA MINERA QUELLAVECO, 2024**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Alvaro José Quispe Quenta

Para optar al Título Profesional de:

**INGENIERO MECÁNICO**

TACNA – PERÚ

2026

# UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

## Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica

### “OPTIMIZACIÓN MECÁNICA Y CINEMÁTICA DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA REDUCIR EL TIEMPO DE CAMBIO DE PERNOS DE REVESTIMIENTO EN EL MOLINO DE BOLAS DE LA MINERA QUELLAVECO, 2024”

Tesis sustentada y aprobada el 23 de diciembre del 2025, estando el Jurado

Calificador integrado por:

PRESIDENTE



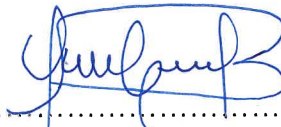
.....  
Mgr. Carlos Aurelio Garván Gamarra

1er. MIEMBRO  
(SECRETARIO)



.....  
Mgr. Willson Garcia Mamani

2do. MIEMBRO  
(VOCAL)



.....  
Msc. Alberto Enrique Cohaila Barrios

ASESOR



.....  
Mgr. Carlos Aurelio Garván Gamarra

## CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **CARLOS AURELIO GARVAN GAMARRA** en mi condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N. 8359-2024-FAIN/UNJBG de la tesis titulada: **"OPTIMIZACIÓN MECÁNICA Y CINEMÁTICA DE UN BRAZO ROBÓTICO PARA REDUCIR EL TIEMPO DE CAMBIO DE PERNOS DE REVESTIMIENTO EN EL MOLINO DE BOLAS DE LA MINERA QUELLAVECO, 2024"**, presentado por el Bachiller **ALVARO JOSÉ QUISPE QUENTA**, con Código N° 2017-104014 para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico.

Que, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del **software de similitud textual TURNITIN**, cuenta con el **nivel de similitud permitido** cuyo porcentaje permitido es **19%**. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para la obtención de título profesional, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Tacna, 25 de febrero del 2026



**FIRMA ASESOR**

Carlos Aurelio Garvan Gamarra  
No. ORCID: 0009-0007-0888-8779  
DNI: 06195019



**FIRMA TESISTA**

Alvaro José Quispe Quenta  
DNI: 75826193



## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis padres, por sus consejos, sacrificio y apoyo incondicional, que me guiaron paso a paso a lo largo de este camino.

Son un ejemplo para mí, que me inspiran tanto en lo personal y profesional.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecer primeramente a Dios por permitirme llegar a cumplir mis metas, cuidar de mí y de mis seres queridos.

Agradecer a mi asesor por el apoyo brindado, quien gracias a sus conocimientos compartidos permitió realizar de forma correcta este trabajo.

Agradecer a mi familia que se preocupó por mí y siempre estuvo apoyándome en cada paso que daba. A mi enamorada por brindarme su respaldo incondicional en momentos difíciles alentándome siempre a seguir adelante y a todas las personas que fueron parte de este proceso para llevar a cabo mi tesis.

**ÍNDICE GENERAL**

DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	x
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xi
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
CAPÍTULO I.....	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.1 Antecedentes del problema a investigar .....	4
1.2 Descripción del problema .....	5
1.3 Formulación del problema.....	5
1.3.1 Problema general .....	5
1.3.2 Problemas específicos:.....	5
1.4 Objetivos de la investigación.....	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos. ....	6
1.5 Justificación e importancia de la investigación .....	6
1.5.1 Justificación metodológica .....	7
1.5.2 Justificación económica.....	7

1.5.3	Justificación social.....	7
1.5.4	Justificación ambiental .....	8
1.6	Limitaciones.....	9
1.7	Viabilidad del estudio .....	9
1.8	Formulación de hipótesis .....	10
1.8.1	Hipótesis específicas.....	10
1.9	Variables.....	10
1.10	Operacionalización de las variables.....	11
CAPÍTULO II .....		12
MARCO TEÓRICO .....		12
2.1	Antecedentes del trabajo de investigación.....	12
2.2	Bases teóricas.....	18
2.2.1	Automatización industrial.....	18
2.2.2	La robótica .....	18
2.2.3	Brazo robótico.....	19
2.2.4	Grados de libertad.....	23
2.2.5	Cinemática del brazo robótico .....	23
2.2.6	Uso de energía neumática e hidráulica en herramientas .....	24
2.2.7	Herramientas para cambio de pernos de revestimiento – molino de bolas .....	24
2.2.8	Acoples para brazo robótico .....	26
2.2.9	Diseño mecánico.....	27

2.2.10	Molino de bolas .....	29
2.2.11	Los pernos.....	31
2.3	Definiciones conceptuales .....	33
CAPÍTULO III .....		35
MARCO METODOLÓGICO .....		35
3.1	Tipo de investigación .....	35
3.2	Nivel de investigación .....	35
3.3	Diseño de la investigación .....	35
3.4	Población y muestra.....	35
3.5	Equipos y herramientas digitales .....	35
3.5.1	Equipos .....	35
3.5.2	Herramientas digitales .....	36
3.6	Procedimiento de los ensayos de simulación numérica.....	36
3.7	Técnicas de recolección de datos.....	37
3.8	Técnicas para el procesamiento de datos .....	37
CAPÍTULO IV .....		38
RESULTADOS.....		38
4.1	Descripción de los ensayos de simulación numérica.....	38
4.1.1	Pruebas mecánicas .....	38
4.1.2	Pruebas cinemáticas .....	45
4.2	Presentación y análisis de los resultados .....	53
4.2.1	Cálculo y simulación mecánica .....	53

4.2.2	Cálculo y simulación cinemática .....	73
4.2.3	Ecuación de la transformación homogénea .....	74
4.2.4	Simulación cinemática de cambio de pernos robotizado.....	92
4.2.5	Cambio de pernos por el ser humano.....	96
4.2.6	Impacto operativo .....	103
4.2.7	Impacto económico estimado .....	103
4.3	Contrastación de hipótesis .....	104
CAPÍTULO V .....		106
DISCUSIÓN.....		106
5.1	Pruebas de validación del modelo experimental.....	106
5.2	Aplicación de la tecnología encontrada .....	106
5.3	Contraste con trabajos de investigación similares .....	108
5.3.1	Factor de seguridad y validación mecánica .....	109
5.3.2	Comportamiento ante cargas dinámicas .....	109
5.3.3	Reducción de tiempos y desempeño cinemático .....	110
CONCLUSIONES .....		111
RECOMENDACIONES .....		113
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		114
ANEXOS.....		122

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de las variables .....	11
<b>Tabla 2</b> <i>Tipos de articulaciones.</i> .....	19
<b>Tabla 3</b> <i>Estructuras articuladas</i> .....	21
<b>Tabla 4</b> <i>Materiales de adaptador de herramienta y herramientas</i> .....	43
<b>Tabla 5</b> <i>Propiedades del acero AISI 4140</i> .....	43
<b>Tabla 6</b> <i>Propiedades del acero AISI 4340</i> .....	44
<b>Tabla 7</b> <i>Comparación con robot real para verificar el peso que soportará y el alcance requerido.</i> .....	46
<b>Tabla 8</b> <i>Tabla de parámetros de robot KUKA KR 500 L340-2</i> .....	48
<b>Tabla 9</b> <i>Parámetros de velocidad y aceleración de robot KUKA KR 16 a escala.</i> .....	50
<b>Tabla 10</b> <i>Tiempo de actividad específica</i> .....	52
<b>Tabla 11</b> <i>Características técnicas de martillos neumáticos Ingersoll Rand</i> .....	53
<b>Tabla 12</b> <i>Especificaciones del producto INGERSOLL RAND 2955 B2</i> .....	61
<b>Tabla 13</b> <i>Tabla técnica de especificaciones Tool Changer</i> .....	69
<b>Tabla 14</b> <i>Tabla de comparación de valores calculados y valores admisibles QC-110.</i> .	72
<b>Tabla 15</b> <i>Tabla de Denavit-Hartenberg (DH)</i> .....	73
<b>Tabla 16</b> <i>Parámetros de Denavit-Hartenberg (DH)</i> .....	83
<b>Tabla 17</b> <i>Ángulos obtenidos por cálculo</i> .....	91
<b>Tabla 18</b> <i>Tiempo de cambio de pernos considerando actividades operativas de mantenimiento</i> .....	96
<b>Tabla 19</b> <i>Tiempo de cambio de pernos en parada no programada de molino de bolas</i> .....	101
<b>Tabla 20</b> <i>Cambio de pernos de revestimiento del Shell molino de bolas</i> .....	102
<b>Tabla 21</b> <i>Resumen operativo de cambio de pernos y tiempo</i> .....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Cambiador automático de herramientas</i> .....	16
<b>Figura 2</b> <i>Sujeción de revestimiento en molinos</i> .....	17
<b>Figura 3</b> <i>Similitud de brazo robótico con extremidad superior del cuerpo humano.</i> ....	19
<b>Figura 4</b> <i>Brazo robótico KUKA KR16</i> .....	22
<b>Figura 5</b> <i>Grados de libertad del KUKA KR16</i> .....	23
<b>Figura 6</b> <i>Pistola neumática de impacto</i> .....	25
<b>Figura 7</b> <i>Martillo neumático</i> .....	25
<b>Figura 8</b> <i>Rompe tuercas hidráulico</i> .....	26
<b>Figura 9</b> <i>Acoples para el brazo mecánico KUKA</i> .....	26
<b>Figura 10</b> <i>Diagrama esfuerzo–deformación unitaria para el acero</i> .....	29
<b>Figura 11</b> <i>Partes principales del molino de bolas</i> .....	30
<b>Figura 12</b> <i>Cuerpo del molino</i> .....	30
<b>Figura 13</b> <i>Puntos de colocación de los tornillos</i> .....	31
<b>Figura 14</b> <i>Partes de sujeción de un tornillo</i> .....	32
<b>Figura 15</b> <i>Secuencia de colocación de elementos en el tornillo</i> .....	32
<b>Figura 16</b> <i>Secuencia de apriete en la instalación o mantenimiento</i> .....	33
<b>Figura 17</b> <i>Diseño CAD de molino de bolas</i> .....	38
<b>Figura 18</b> <i>Medidas reales de robot KUKA KR 16</i> .....	39
<b>Figura 19</b> <i>Dimensiones de brazo robótico KUKA-KR16 a escala 1.9</i> .....	39
<b>Figura 20</b> <i>Ejes de articulación del robot KUKA KR-16 a escala 1.9.</i> .....	40
<b>Figura 21</b> <i>Ensamble de robot KUKA KR 16 a escala en entorno del molino de bolas</i> .	40
<b>Figura 22</b> <i>Herramientas de acople al robot KUKA</i> .....	41
<b>Figura 23</b> <i>Sistema de acople – tool changer</i> .....	41
<b>Figura 24</b> <i>Sistema de acople rápido para brazo robótico KUKA KR 16</i> .....	42

<b>Figura 25</b> <i>Curva N-S de acero AISI 4140</i> .....	43
<b>Figura 26</b> <i>Curva N-S de acero AISI 4340</i> .....	44
<b>Figura 27</b> <i>Parámetros geométricos D-H de robot KUKA KR16 a escala</i> .....	45
<b>Figura 28</b> <i>Robot personalizado de 6 ejes en ROBODK</i> .....	47
<b>Figura 29</b> <i>Molino de bolas, brazo robótico y demás componentes importados en ROBODK</i> .....	47
<b>Figura 30</b> <i>Parámetros de robot KUKA KR 500 L340-2 de software ROBODK</i> .....	49
<b>Figura 31</b> <i>Parámetros de robot KUKA KR-16 a escala</i> .....	50
<b>Figura 32</b> <i>Ángulos articulares del robot KUKA KR 16 a escala.</i> .....	51
<b>Figura 33</b> <i>DCL de adaptador-martillo neumático</i> .....	54
<b>Figura 34</b> <i>DCL de adaptador de herramienta sometido a cargas estáticas.</i> .....	55
<b>Figura 35</b> <i>Simulación de adaptador de herramienta y martillo neumático</i> .....	56
<b>Figura 36</b> <i>Resultado del esfuerzo de Von-Mises</i> .....	57
<b>Figura 37</b> <i>Resultado del factor de seguridad</i> .....	58
<b>Figura 38</b> <i>Resultados de falla por fatiga</i> .....	60
<b>Figura 39</b> <i>DCL de adaptador-pistola neumática</i> .....	61
<b>Figura 40</b> <i>DCL de adaptador de herramienta sometido a cargas estáticas.</i> .....	62
<b>Figura 41</b> <i>Adaptador - pistola neumática</i> .....	63
<b>Figura 42</b> <i>Resultados esfuerzo de Von-Mises</i> .....	64
<b>Figura 43</b> <i>Resultados del factor de seguridad</i> .....	65
<b>Figura 44</b> <i>Resultados de falla por fatiga</i> .....	67
<b>Figura 45</b> <i>Tool Changer QC-110</i> .....	69
<b>Figura 46</b> <i>DCL de Tool Changer-adaptador de herramienta</i> .....	70
<b>Figura 47</b> <i>DCL de martillo neumático-Tool Changer</i> .....	71
<b>Figura 48</b> <i>Vector de la base del robot a la brida (TCP)</i> .....	76

<b>Figura 49</b> <i>Vector de la base del robot a la brida (TCP) en posición particular del robot.</i> .....	78
<b>Figura 50</b> <i>Vector base a la brida J6 y punta de pistola</i> .....	79
<b>Figura 51</b> <i>Vector de la base del robot a la brida J6 y punta del martillo.</i> .....	80
<b>Figura 52</b> <i>Vector de la base del robot a la brida J6 y punta del cortador de tuerca.</i> ....	82
<b>Figura 53</b> <i>Ángulos obtenidos en el software ROBODK</i> .....	91
<b>Figura 54</b> <i>Posición de robot al perno</i> .....	91
<b>Figura 55</b> <i>Simulación de corte de tuercas y extracción de pernos deteriorados</i> .....	93
<b>Figura 56</b> <i>Corte de tuercas con cortador de tuercas hidráulico</i> .....	93
<b>Figura 57</b> <i>Extracción de pernos con martillo neumático</i> .....	94
<b>Figura 58</b> <i>Simulación de instalación de pernos nuevos y ajuste automatizado.</i> .....	94
<b>Figura 59</b> <i>Instalación de pernos nuevos con el uso de pistola neumática</i> .....	95
<b>Figura 60</b> <i>Torque de pernos con pistola de impacto</i> .....	95
<b>Figura 61</b> <i>Bloqueo de equipo energizado</i> .....	96
<b>Figura 62</b> <i>Retiro de chute móvil</i> .....	97
<b>Figura 63</b> <i>Corte de tuerca con equipo oxicorte</i> .....	97
<b>Figura 64</b> <i>Extracción de pernos con martillo neumático</i> .....	98
<b>Figura 65</b> <i>Instalación de pernos dentro del molino</i> .....	99
<b>Figura 66</b> <i>Ajuste de pernos recién instalados</i> .....	99
<b>Figura 67</b> <i>Molino de bolas, Quellaveco-Perú</i> .....	100

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo principal optimizar un sistema robótico para automatizar el proceso de cambio de pernos de revestimiento del molino de bolas, con el propósito de reducir los tiempos de mantenimiento y aumentar la seguridad operativa en las labores de molienda. El trabajo se desarrolló en tres etapas principales. En la primera, se realizó el diseño mecánico de las herramientas, el adaptador de herramienta, el brazo robótico y el molino de bolas empleando el software SOLIDWORKS, considerando las condiciones reales de operación y las características geométricas del robot KUKA KR16 a escala. En la segunda etapa, se efectuó el análisis estructural de los componentes críticos mediante simulaciones en ANSYS, aplicando el criterio de Von Mises para el análisis estático y la Ley de Miner para la vida útil en fatiga. Finalmente, en la tercera etapa, se realizó la optimización cinemática mediante la construcción de la tabla de Denavit–Hartenberg y la simulación de trayectorias en ROBODK.

Los resultados muestran que el tiempo total por perno disminuyó de 3.3 min en el método manual a 2 min mediante la operación robótica, logrando una reducción aproximada del 40 % en la muestra simulada de tres pernos. En términos estructurales, el adaptador de herramienta obtuvo un factor de seguridad mínimo de 7.9 frente a carga estática y presentó un daño por fatiga de 10 %, lo que proyecta una vida útil superior a  $1 \times 10^6$  ciclos sin riesgo significativo de falla. Estos resultados confirman que la propuesta automatizada puede operar de manera eficiente y segura dentro del entorno simulado del molino de bolas, evidenciando su potencial para futuras aplicaciones en mantenimiento industrial minero.

Palabras clave: Molino de bolas, Brazo robótico, simulación.

## ABSTRACT

This thesis aims to optimize a robotic system to automate the process of replacing the liner bolts of a ball mill, with the purpose of reducing maintenance time and increasing operational safety during grinding operations. The work was developed in three main stages. In the first stage, the mechanical design of the tools, the tool adapter, the robotic arm, and the ball mill was carried out using SOLIDWORKS software, considering real operating conditions and the geometric characteristics of the scaled KUKA KR16 robot. In the second stage, the structural analysis of the critical components was performed through simulations in ANSYS, applying the Von Mises criterion for static analysis and Miner's Law for fatigue life estimation. Finally, in the third stage, the kinematic optimization was conducted through the construction of the Denavit–Hartenberg table and trajectory simulation in ROBODK.

The results show that the total time per bolt decreased from 10 minutes in the manual method to 6 minutes with robotic operation, achieving an approximate reduction of 40 % in the simulated sample of three bolts. Structurally, the tool adapter reached a minimum safety factor of 7.9 under static loading and exhibited a fatigue damage of 10%, projecting a service life greater than  $1 \times 10^6$  cycles without significant failure risk. These findings confirm that the automated system can operate efficiently and safely within the simulated ball mill environment, demonstrating its potential for future applications in industrial mining maintenance.

Keywords: Ball mill, Robotic arm, Simulation.

## INTRODUCCIÓN

El cambio de pernos de revestimiento en molinos de bolas es una de las tareas más cruciales en el mantenimiento minero, debido a los prolongados tiempos de inactividad que genera y a los riesgos que enfrentan los trabajadores. En la Minera Quellaveco, este trabajo aún se hace de la manera tradicional, lo que limita la productividad y la seguridad.

Frente a este problema, la automatización con brazos robóticos emerge como una opción tecnológica que puede mejorar los tiempos de mantenimiento, la exactitud de las operaciones y disminuir el riesgo para los trabajadores. No obstante, usar estos sistemas en minas requiere una optimización mecánica y cinemática adecuada, considerando las geometrías, los esfuerzos laborales y las rutas que permitan una operación segura y eficaz.

En este panorama, esta investigación busca optimizar el funcionamiento de un brazo robótico para cambiar los pernos de revestimiento en el molino de bolas de la Minera Quellaveco, con el fin de acortar los tiempos de mantenimiento.

El estudio se sustenta en la comparación entre el sistema convencional y la propuesta automatizada, el análisis estructural del adaptador de herramienta y la simulación de trayectorias de movimiento, demostrando la viabilidad de una solución robótica aplicable al mantenimiento industrial minero.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Antecedentes del problema a investigar

El molino de bolas es un equipo en operación constante, fundamental para incrementar los índices de producción y alcanzar las metas fijadas, generando beneficios económicos sostenibles para la empresa y sus socios. Por ello, este equipo es considerado crítico en la operación minera y no debe detenerse de manera recurrente ni prolongada.

En las operaciones de molienda como la minera Quellaveco, el sistema de fijación de los revestimientos mediante pernos es una de las áreas más críticas de mantenimiento. La fatiga, el desgaste, la corrosión y las cargas dinámicas durante la molienda provocan que los pernos fallen con relativa frecuencia, obligando a su reemplazo en intervalos regulares.

El proceso de cambio de pernos se realiza con personal mecánico que interactúa directamente con el equipo, realizando previamente los controles pertinentes antes de ingresar a un área de alto riesgo. El proceso actual de cambio de pernos se realiza con uso de herramientas manuales específicas para cada tarea.

Si bien es cierto, el proceso de cambio de pernos se ha llevado a cabo durante mucho tiempo de manera convencional. La automatización se ha convertido en una solución de gran aceptación y aplicable a los procesos mineros, como operación de camiones autónomos, pero también en un área poco implementada hasta ahora como el mantenimiento, ya que son equipos capaces de realizar tareas repetitivas. (Alex Raventos, 2020).

## 1.2 Descripción del problema

La minera Quellaveco que opera en Moquegua- Perú registra en su planta de molienda dos molinos de bolas, cada uno con una capacidad nominal de 8 478 Ton/h de mineral fresco. La operación tiene como meta alcanzar una producción anual de 300 000 toneladas de cobre fino. Bajo estas condiciones, cada molino aporta aproximadamente 17,1 t/h de cobre fino, lo que representa un valor económico de 157 550 USD/h.

Sin embargo, estos molinos experimentan fallas recurrentes debido a la ruptura de pernos de revestimiento, lo que provoca paradas no programadas con una frecuencia aproximada de 2 veces al mes. Cada detención del molino dura entre 3 a 5 horas, lo que implica pérdidas económicas por molino que oscilan entre 472 650 y 787 750 USD por evento lo que afecta directamente la eficiencia operativa y reduce la capacidad de producción anual.

Frente a estos desafíos, se requiere desarrollar un brazo robótico optimizado en mecánica y cinemática para agilizar el proceso de mantenimiento sin intervención directa de personas, por consiguiente, reducir el tiempo del equipo detenido, de esta manera cumplir o mejorar la meta de producción anual lo que posteriormente reflejará ganancias económicas y evitará exponer al personal a los diferentes peligros del área de trabajo.

## 1.3 Formulación del problema

### 1.3.1 *Problema general*

¿Cómo optimizar un brazo robótico para reducir el tiempo de cambio de pernos de revestimiento en el molino de bolas?

### 1.3.2 *Problemas específicos:*

- ¿Cómo mejorar el diseño del adaptador de herramientas del brazo robótico para trabajar en un área limitada en el entorno del *shell* del molino de bolas?

- ¿Cómo validar la resistencia del adaptador de herramientas frente a los esfuerzos de operación?
- ¿Cómo estimar el tiempo de cambio de pernos en una parada de emergencia del molino de bolas mediante simulación de entorno industrial?
- ¿Cuál es la diferencia en el tiempo de cambio de pernos del *shell* del molino de bolas entre el método tradicional y el uso del brazo robótico simulado?

## **1.4 Objetivos de la investigación**

### **1.4.1 Objetivo general**

Optimizar mediante simulación mecánica y cinemática un brazo robótico para reducir el tiempo de cambio de pernos de revestimiento en el molino de bolas.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Realizar el rediseño CAD del adaptador de herramientas para que el conjunto del brazo robótico pueda adaptarse al entorno del *shell* del molino de bolas.
- Validar la resistencia del adaptador de herramientas frente a esfuerzos de operación utilizando el software ANSYS.
- Obtener el tiempo estimado de cambio de pernos del *shell* del molino de bolas mediante simulación con el software ROBODK.
- Comparar el tiempo del método tradicional con el obtenido en la simulación del brazo robótico.

## **1.5 Justificación e importancia de la investigación**

La presente investigación busca aportar una solución innovadora al proceso de cambio de pernos en el molino de bolas, actividad que actualmente se realiza de manera convencional y que genera pérdidas de tiempo por la complejidad del procedimiento. A través de la simulación y optimización de un brazo robótico en sus aspectos mecánicos y cinemáticos, se propone un modelo que permitiría minimizar la exposición de los

trabajadores a condiciones de riesgo y, al mismo tiempo, reducir los tiempos asociados al cambio de pernos.

### ***1.5.1 Justificación metodológica***

La investigación adquiere relevancia al proponer mejoras específicas en el diseño del adaptador de herramientas y en la optimización de los movimientos del brazo robótico, haciéndolo eficiente en un nuevo entorno con el fin de garantizar el ahorro de tiempo.

### ***1.5.2 Justificación económica***

Al reducir el tiempo de cambio de pernos, se espera un impacto positivo en la productividad, debido a que contribuye indirectamente en la reducción del tiempo total de parada del molino, este hecho en un futuro se transforma en ganancias para la empresa.

### ***1.5.3 Justificación social***

La investigación tiene relevancia social porque propone, a nivel de simulación, un modelo de brazo robótico que en una futura implementación real permitiría minimizar la exposición de los operarios a condiciones de alto riesgo durante el cambio de pernos, tales como trabajo en altura, ruido, vibraciones y espacios confinados. De esta forma, la propuesta contribuye como referencia a la seguridad ocupacional y a la protección de la salud de los trabajadores, en coherencia con el ODS 8 orientado a promover entornos de trabajo seguros.

### **Normas de seguridad de mantenimiento de molinos y robots industriales**

Para asegurar la integridad de los trabajadores que interactúan con el robot industrial, la norma internacional ISO 10218-2 resguarda al personal durante la puesta en marcha, las pruebas operativas y el mantenimiento del robot. De igual forma, para el reemplazo de pernos del molino de bolas, la norma establece en su sección 5.10.2 que el

robot y los trabajadores no deben compartir el mismo entorno laboral, lo que acentúa la necesidad de evitar la presencia durante la operación automática.

Por otro lado, la norma OSHA 1910.147 indica que el personal encargado de la intervención identifique de forma correcta las fuentes de energía del equipo y ponga en práctica los procedimientos de bloqueo y etiquetado necesarios para asegurar un mantenimiento seguro.

En forma adicional, los lineamientos de seguridad minera fijadas por el DS-024-2016-EM exigen la supervisión estricta de las energías peligrosas, la reducción de la exposición de los trabajadores a espacios confinados y a zonas con riesgo de atrapamiento, así como la ejecución de procedimientos de mantenimiento seguros.

En resumen, estas normativas señalan que el personal que interactúe tanto con el brazo robótico como con el molino de bolas debe estar apropiadamente capacitado para llevar a cabo trabajos de alto riesgo. Asimismo, debido al nivel de peligro vinculado con el interior del molino, se hace evidente la necesidad de realizar el cambio de pernos desde la parte externa y mediante un sistema automatizado, como un brazo robótico, que evita la exposición del operario a los peligros presentes dentro del molino.

#### ***1.5.4 Justificación ambiental***

El proyecto también posee un componente ambiental, ya que los resultados obtenidos en simulación muestran la posibilidad de optimizar el proceso de cambio de pernos, reduciendo tiempos asociados y mejorando la eficiencia en el uso de recursos energéticos en una futura aplicación real. Esta perspectiva se alinea con el ODS 9, al fomentar la incorporación de nuevas tecnologías en minería, y con el ODS 12, al promover una operación más eficiente y sostenible.

## 1.6 Limitaciones

- No se desarrollará un prototipo físico.
- No se tomará en cuenta las vibraciones mecánicas existentes. ni el análisis dinámico ya que son factores que, si bien es cierto están presentes, en este caso no serán relevantes considerarlos.
- Los tiempos estimados son considerados aproximados a la realidad, debido a que en un brazo robótico real se usa cámaras y sensores para la exactitud de trayectorias con los objetos a mover o detectar.
- Únicamente se realizará la simulación cinemática en el *shell* del molino de bolas ,ya que solo ahí se genera mayor esfuerzo interno del molino que implica rupturas constantes de pernos.
- No se considerará el modelado detallado de la interacción entre el brazo robótico KUKA y el entorno industrial del molino (como el polvo, la temperatura o la presencia de partículas metálicas), ya que estos factores pueden influir en la precisión y desgaste de los componentes, pero se encuentran fuera del alcance de la presente simulación.

## 1.7 Viabilidad del estudio

El presente estudio es viable desde el punto de vista técnico, ya que se desarrollará utilizando herramientas de simulación y modelado como SOLIDWORKS, ANSYS y ROBODK, en el entorno académico del investigador. Estos recursos permiten evaluar el diseño del acople mecánico y las trayectorias cinemáticas del brazo robótico sin necesidad de realizar pruebas físicas a gran escala.

Desde el punto de vista económico, la investigación no implica costos elevados, puesto que se centra en el modelado y simulación.

## 1.8 Formulación de hipótesis

La optimización mediante simulación mecánica y cinemática de un brazo robótico reducirá el tiempo requerido del cambio de pernos de revestimiento del molino de bolas en la Minera Quellaveco.

### 1.8.1 Hipótesis específicas

- El rediseño CAD del adaptador de herramientas permitirá que el conjunto del brazo robótico se adapte al entorno del *shell* del molino de bolas.
- El adaptador de herramientas será resistente frente a los esfuerzos generados durante el proceso de cambio de pernos, según la validación estructural realizada con el software ANSYS.
- La simulación cinemática del brazo robótico en ROBODK permitirá obtener el tiempo estimado del cambio de pernos del *shell* del molino de bolas.
- El tiempo obtenido mediante la simulación del brazo robótico será menor que el tiempo del método tradicional de cambio de pernos.

## 1.9 Variables

- **Variable independiente:** optimización mecánica y cinemática de brazo robótico.
- **Variable dependiente:** reducción del tiempo de cambio de pernos de revestimiento.

### 1.10 Operacionalización de las variables

**Tabla 1**

*Operacionalización de las variables*

VARIABLE	COMPONENTES OPERATIVOS	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	UNIDAD	INSTRUMENTO /SOFTWARE
Optimización mecánica y cinemática de brazo robótico	Rediseño mecánico del adaptador	Mejora física del adaptador para aumentar la resistencia y funcionalidad.	Modelado del adaptador considerando forma geométrica y dimensiones.	Diseño CAD	mm	SOLIDWORKS
	Validación estructural y fatiga	Evaluación de la resistencia del adaptador frente a cargas y ciclos.	Simulación del adaptador para verificar esfuerzos y vida útil.	Factor de seguridad	Adimensional	ANSYS
	Optimización de trayectorias	Mejora de los movimientos del robot para mayor precisión y eficiencia.	Simulación de trayectorias considerando la reducción de tiempo y evitar colisiones.	Posiciones específicas	mm y grados (°)	ROBODK
Reducción del tiempo de cambio de pernos de revestimiento	Operación del robot durante el cambio de pernos	Disminución del tiempo de trabajo mediante una secuencia eficiente.	Medición del tiempo total del ciclo robótico programado.	Tiempo	min	Cronómetro, ROBODK

Fuente: Elaboración propia del autor.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes del trabajo de investigación

Desde las perspectivas de la industrialización y de automatización industrial la inclusión de esta ha permitido que se pueda satisfacer el aumento en las tasas de producción y mantenimiento logrando así una reducción de costos, pues estas también han permitido que se reduzca la mano del hombre, es por ello que actualmente son más requeridos en tareas como precisión, exactitud, repetitividad entre otras (Hosameldin et al., 2023). Esta investigación muestra el empleo de sistemas automatizados con el fin de reemplazar el trabajo humano en tareas de mantenimiento, lo cual evidencia mejoras importantes en la precisión y la eficiencia. Sin embargo, el autor no ahonda en una comparación directa entre el método tradicional y el mantenimiento automatizado.

Los avances en los sistemas informáticos como la detección, actuación e información que requieren estos mecanismos han logrado abrir y expandir nuevos horizontes para la aplicación de la robótica en más áreas de la ingeniería y sus subáreas, en especial se utilizan más en lo que es la industrialización y en ocasiones para dar servicios. En la industria el que más se utiliza es el brazo robótico, pues es un tipo de mecanismo que se forma por articulaciones cinemáticas que permiten que el brazo se desplace de forma rotacional o traslacional (Kluz y Trzepiecinski, 2014). Esta investigación fundamenta el uso del brazo robótico como un mecanismo adecuado para ejecutar tareas repetitivas y de precisión dentro de procesos industriales automatizados. A pesar de ello, no aborda el análisis de detección y posicionamiento de objetos distribuidos en patrones repetitivos como por ejemplo el *Shell* de un molino de bolas.

El elemento principal que influye en las plantas industriales mineras es el cambio de revestimiento, por lo tanto, cada que exista una mejora asociada con el tiempo para

realizar el cambio de revestimiento se considera como fundamental para que exista una continuidad a nivel operacional. La alternativa desarrollada por MIRS EMMR External Mill Maintenance Robot cumple con todos los criterios evaluados destacando principalmente que la propuesta de automatización permite disminuir los tiempos requeridos para el cambio de revestimiento lo que implica realizar el torque de pernos por la parte externa del molino (Raventos, 2020). Esta investigación es relevante, ya que muestra el valor de la automatización robótica en el sector minero, en particular en operaciones tanto en molinos SAG como de bolas. Sin embargo, no profundiza en la adaptación de la solución a un molino de bolas específico para el cambio de pernos del Shell.

Para mejorar la estructura de un brazo robótico desde varias perspectivas, este artículo presenta un método de optimización de seis grados de libertad que se basa en el análisis de elementos finitos. Primero, se estableció la relación de movimiento relativo entre la junta giratoria y la biela según la teoría DH. Luego, la malla de elementos de la estructura del brazo robótico se dividió en el software ANSYS y se analizó la redundancia de optimización de parámetros. Finalmente, se estableció un conjunto de ecuaciones de optimización, y mediante su resolución y verificación por elementos finitos, se obtuvieron parámetros estructurales viables. Los resultados experimentales muestran que, en diversas condiciones de carga, la carga máxima del brazo robótico aumenta a 14 kg, su masa se reduce aproximadamente en un 11 % y la tensión máxima se reduce a 13,54 MPa. A su vez, la distancia alcanzable del brazo robótico en el espacio tridimensional aumenta significativamente (Hernandez, 2016). El estudio demuestra la utilidad del análisis estructural mediante elementos finitos para validar componentes de un sistema robótico sometidos a cargas variables de trabajo. Sin embargo, el autor se enfoca en la

optimización de la estructura completa de un brazo robótico y no aborda el análisis específico de un adaptador de herramienta.

A medida que el brazo robótico lleva a cabo su labor, cada junta experimenta variaciones angulares, y la sucesión continua de estos ángulos en el tiempo se conoce como trayectoria angular articular. Esta investigación se enfoca en la optimización de la trayectoria angular articular y el desafío de regular el consumo energético de un brazo robótico con seis grados de libertad. Partiendo del modelo cinemático parametrizado con DH, se establece un esquema de optimización con múltiples objetivos, tales como minimizar el error final y optimizar el gasto energético, resolviendo la posición final a través de la matriz de transformación. Para abordar la tarea con múltiples objetivos, se recurre a la simulación de Monte Carlo para definir el espacio de trabajo, fusionando la planificación de la trayectoria base con la optimización conjunta del ángulo articular. La investigación muestra que este método disminuye de forma notable el consumo energético, garantizando al mismo tiempo la exactitud del posicionamiento final, ofreciendo una solución metódica que equilibra la precisión y la eficiencia energética para el uso eficaz de brazos robóticos en entornos industriales, y proporcionando una orientación práctica para el control óptimo de equipos inteligentes (Solano, 2018). El estudio aporta información valiosa con respecto al uso de DH para determinar posiciones finales del robot. Sin embargo, no considera el uso de software de simulación industrial para robots, aspecto relevante para validar trayectorias y movimientos en un entorno industrial.

La automatización industrial ha incorporado tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia operativa y la precisión con el fin de afrontar estos desafíos. Una de las soluciones más innovadoras es la implementación de robots industriales. En este contexto, se ha desarrollado una adaptación para el robot industrial KUKA KR 60-3. Esta

adaptación cuenta con una pinza especializada diseñada para automatizar el apriete de pernos Allen M5 y M6. Además, utiliza aire comprimido para la limpieza de las superficies de los motorreductores (Paredes & Injante, 2025). La investigación aporta información valiosa sobre la implementación de robots industriales para el apriete automatizado de pernos. Sin embargo, el estudio se desarrolla en un entorno industrial específico y no aborda la adaptación de estas soluciones al mantenimiento de otros equipos con características distintas.

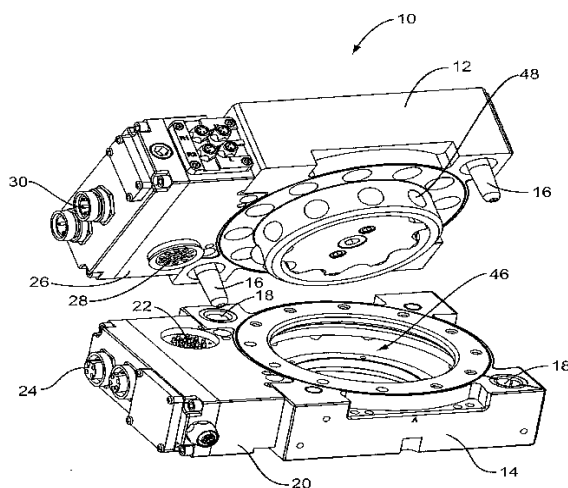
Un cambiador automático de elementos terminales robóticos conecta y desconecta un elemento terminal a un brazo robótico de manera totalmente autónoma e independiente, eliminando la necesidad de intervención humana. Un cambiador automático de herramienta aumenta la eficacia del proceso industrial al que se aplica, ofreciendo la capacidad de cambiar entre una gran cantidad de herramientas, disminuyendo el tiempo de inactividad y, en consecuencia, el tiempo total de producción. Además, proporciona mayor seguridad para los operarios. La conexión y desconexión repetitiva de un elemento terminal exige un proceso seguro y fiable. Con este fin, en este trabajo de fin de grado se ha diseñado, construido y verificado el funcionamiento de un prototipo de acoplador universal para el robot IRB140 de ABB (Biserov, 2022). La importancia de la utilización de un cambiador automático de herramientas contribuye significativamente a la reducción del tiempo operativo. Sin embargo, el estudio se limita al desarrollo de un prototipo para el robot ABB IRB140 y no aborda la adaptación de sistemas de acople automático para robots en entornos mineros.

Un intercambiador de herramientas robótico une de manera removible una herramienta robótica a un brazo robótico. El intercambiador incluye un módulo de herramienta que está conectado a la herramienta robótica, así como un módulo maestro que está conectado al brazo robótico. Para unir y separar la herramienta robótica, el

intercambiador acopla y separa el módulo de herramienta y el módulo maestro. Un módulo maestro de señales eléctricas (ESM) se fija al módulo maestro, y un ESM de herramienta se fija al módulo de herramienta. De acuerdo con los requisitos del diseño, el intercambiador aplica la misma fuente de alimentación tanto al ESM maestro como al ESM de herramienta. Sin embargo, el intercambiador suprime de manera selectiva la aplicación de la fuente de alimentación al ESM de herramienta, a la vez que mantiene la aplicación de la fuente de alimentación al ESM maestro, durante el acoplamiento o la separación del módulo maestro y el módulo de herramienta. De esta manera, el intercambiador permite dicho acoplamiento y dicha separación, a la vez que previene la formación de arcos eléctricos transitorios (Strotzer, 2012). Este tipo de sistema garantiza el fácil intercambio de herramientas mediante mecanismos internos que aseguran un agarre estable y permiten su funcionamiento en entornos industriales. No obstante, es necesario evaluar bajo qué condiciones de carga y en qué tipos de entornos este intercambiador puede operar de manera segura.

### Figura 1

#### *Cambiador automático de herramientas*

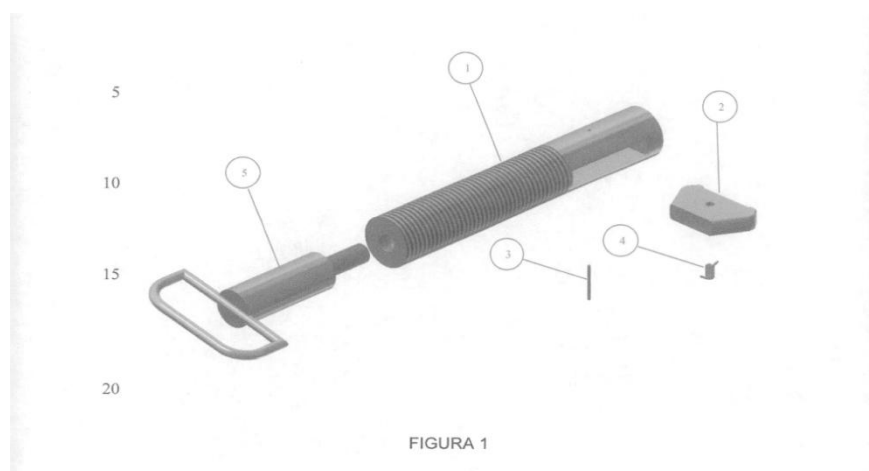


*Nota.* Proceso de apertura y cierre interno de un Tool Changer.

Un dispositivo mecánico externo para fijar revestimientos en molinos, que se distingue porque incluye: una barra con rosca (1) que tiene un canal rectangular (1.a) en un extremo, diseñado para albergar un fiador pivotante (2) que gira sobre un pasador (3); de tal manera que, al girar 180 grados, se esconde paralelo al eje de la barra roscada (1) dentro del canal rectangular (1.a), donde el fiador pivotante (2) vuelve a su posición inicial gracias a un resorte de torsión (4) que rodea el pasador de rotación (3); además, la barra roscada (1) se asegura mediante una manija (5) que se une a través de un eje roscado que se inserta en el extremo contrario al canal rectangular (1.a) de la barra roscada, en una sección roscada interna (1.d); donde el canal rectangular (1.a) tiene un tope en ángulo (1.b), dispuesto de tal forma que el fiador pivotante (2) solo puede rotar hacia un lado específico y en un ángulo de 180 grados (Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. et al., 2020). El presente dispositivo mecánico cumple una función relevante en la reducción de tiempo del proceso de cambio de pernos en molinos de bolas, ya que estos pernos se instalan desde la parte externa del *shell* del molino. No obstante, dicho diseño está desarrollado para un molino específico de la Unidad Minera Cerro Verde.a

## Figura 2

### *Sujeción de revestimiento en molinos*



**Nota.** Dispositivo mecánico de instalación exterior para sujeción de revestimientos en molinos (*Outside-In Bolt*). Fuente: Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. et al. (2020).

## 2.2 Bases teóricas

### 2.2.1 *Automatización industrial*

La automatización industrial puede definirse como la integración de máquinas, sistemas de control y tecnologías informáticas que permiten ejecutar procesos productivos con mínima intervención humana, mejorando la seguridad, la eficiencia y la calidad de las operaciones (Raventos, 2020). Este enfoque se aplica en diversas industrias, incluida la minería, donde la incorporación de robots y equipos automatizados ha transformado actividades de alto riesgo, como el transporte de materiales o el mantenimiento de grandes equipos.

Existen tres tipos principales de automatización:

- **Automatización fija:** Se caracteriza por una secuencia rígida de operaciones, adecuada para tareas repetitivas de gran volumen, pero poco adaptable a cambios.
- **Automatización programable:** Permite modificar la secuencia de trabajo mediante programación, adaptándose a las variaciones del proceso.
- **Automatización flexible:** Combina las ventajas de las dos anteriores, ya que posibilita la adaptación rápida a distintas tareas y el uso de múltiples herramientas en un mismo sistema. En este caso destacan los robots industriales, capaces de ejecutar trayectorias complejas y de intercambiar herramientas mediante acoples rápidos.

### 2.2.2 **La robótica**

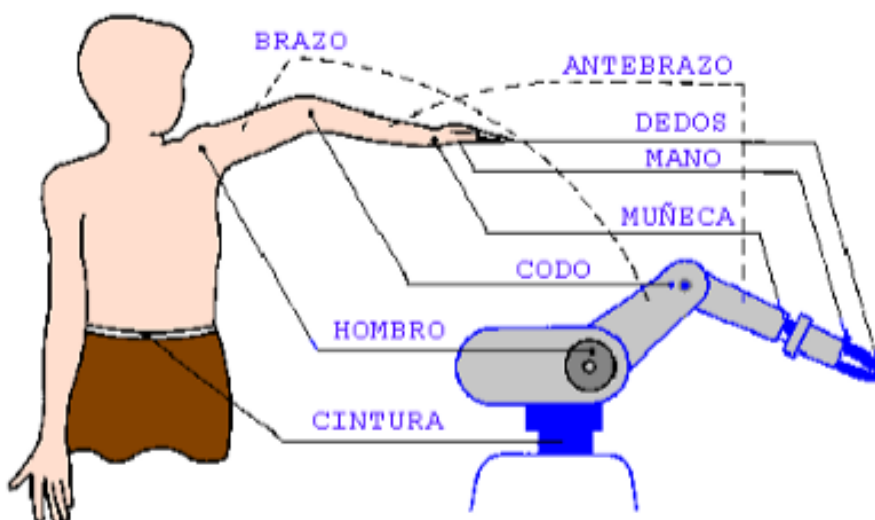
La robótica es un campo interdisciplinario que combina la ingeniería, la informática y otras ciencias para diseñar, construir, operar y programar robots. Estos dispositivos pueden realizar tareas de forma autónoma o semiautónoma, generalmente con el objetivo de facilitar o automatizar trabajos que pueden ser repetitivos, peligrosos o complejos para los humanos.

### 2.2.3 Brazo robótico

El término brazo robot hace referencia a un conjunto de elementos de tipo electromecánico que permiten un tipo de movimiento hacia un terminal. La mayoría de estos elementos físicos o de manipulación presentan cierta semejanza con el miembro superior del cuerpo humano como se evidencia en la figura 3. Por esta razón, es común emplear denominaciones anatómicas como: cintura, hombro, muñeca, entre otras para definir partes en el mecanismo (Martinez et al., 2008).

**Figura 3**

*Similitud de brazo robótico con extremidad superior del cuerpo humano.*



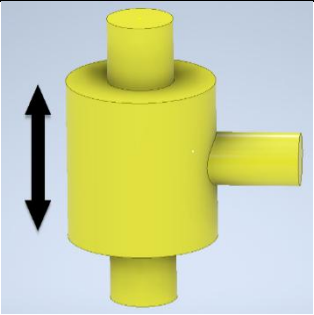
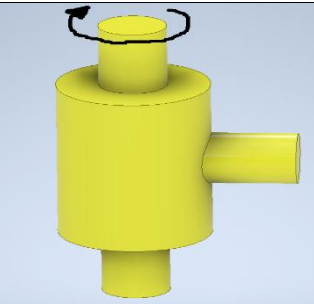
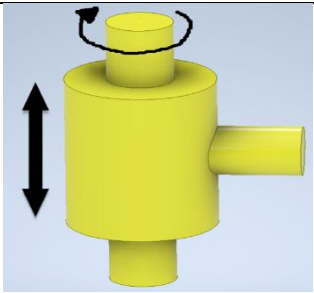
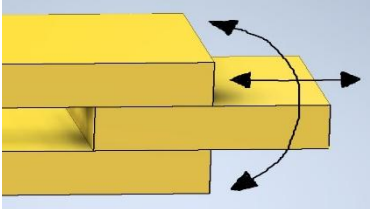
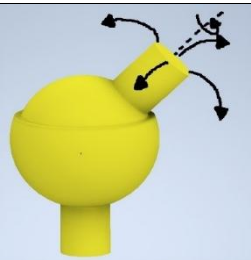
*Nota.* Tomado de ASHM, 2014.

#### 2.2.3.1 Estructura de un brazo robótico

Al momento de definir un tipo de movimiento en el brazo robótico, lo que se requiere es establecer la estructura mecánica. El mecanismo que permitirá esto son las articulaciones, las cuales dan movilidad relativa a los eslabones, permitiendo cierto grado de libertad como se indica en la tabla 2 (Griñan P. , 2021).

**Tabla 2**

*Tipos de articulaciones.*

Esquema	Articulación	Grados de libertad
	Prismática	1
	Rotacional	1
	Cilíndrica	1
	Planar	1
	Esférica	1

*Nota.* Tomado de García, 2019.

El término de grado de libertad se define por cada movimiento de forma independiente que puede realizar la articulación. El grado de libertad vendrá definido por

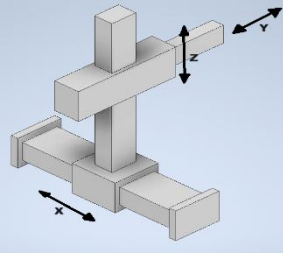
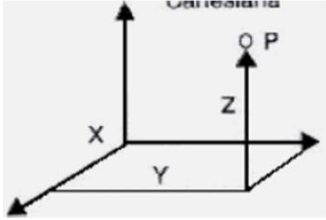
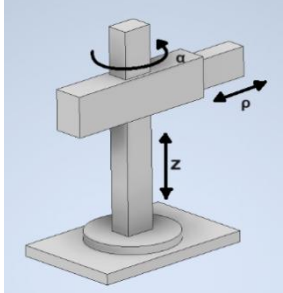
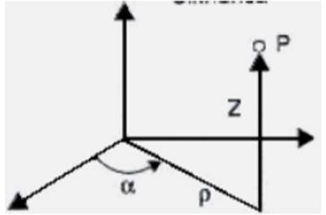
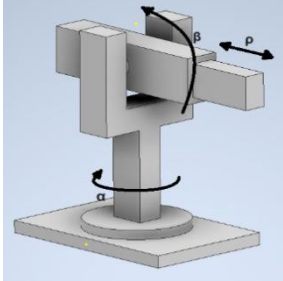
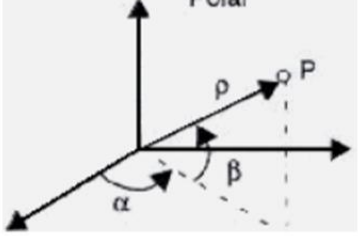
el tipo de articulación para la unión de eslabones existentes. Dentro del espacio tridimensional se puede establecer un máximo de 6 GDL: 3 de traslación y 3 rotación, además que este 6 GDL es el mínimo para alcanzar una posición en el espacio en cualquier orientación.

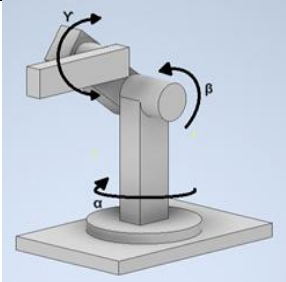
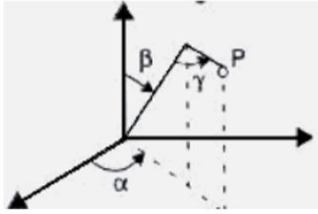
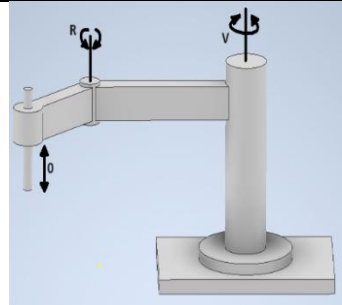
### 2.2.3.2 Tipos de configuraciones

Al combinar varios tipos de articulaciones de diferente manera se logra conformar diferentes estructuras mecánicas. Estas se condicionan por naturaleza, disposición y secuencia de articulaciones como se puede apreciar en la tabla 3 (Griñan P. , 2021).

**Tabla 3**

*Estructuras articuladas*

Esquema	Estructura	Representación en el espacio
	Cartesiana	
	Cilíndrica	
	Esférica o polar	

	Angular	
	Scara	Es un tipo de combinación entre la estructura cilíndrica y cartesiana

*Nota.* Tomado de Griñan, 2021.

### 2.2.3.3 *Brazo robótico KUKA*

Un brazo robótico KUKA es un dispositivo electromecánico diseñado para replicar los movimientos de un brazo humano, utilizado comúnmente en procesos de manufactura y minería. Estos brazos están equipados con articulaciones controladas por motores, lo que les permite moverse con distintos grados de libertad. Son esenciales para la automatización de tareas peligrosas o tediosas, como el manejo de explosivos o la carga de materiales en los molinos. Su capacidad para operar en ambientes hostiles reduce los riesgos para los trabajadores y mejora la eficiencia operativa.

#### **Figura 4**

*Brazo robótico KUKA KR16*



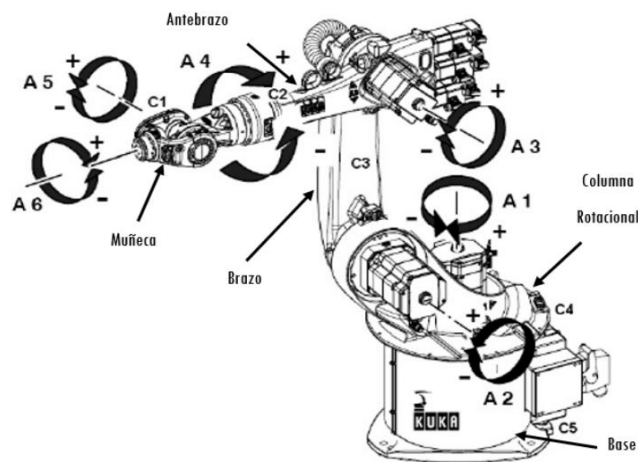
*Nota.* Brazo robótico de 6 ejes KUKA KR 16-3. Obtenido de: TurboSquid (2023).

### 2.2.4 Grados de libertad

El KUKA KR16 posee seis grados de libertad, donde los ejes principales son A1, A2 y A3, mientras que los ejes de la muñeca son A4, A5 y A6, tal como se ilustra en la figura 5.

### Figura 5

*Grados de libertad del KUKA KR16*



*Nota.* Tomado de Diseño y construcción de un efector final para empaquetado y paletizado de botellas con el uso del brazo robótico KUKA KR-16 (Encalada, Montero, 2022).

### 2.2.5 Cinemática del brazo robótico

La cinemática se refiere al estudio del movimiento de los cuerpos sin tener en cuenta las fuerzas que lo provocan. En el caso del brazo robótico, la cinemática describe cómo las articulaciones y eslabones se mueven en conjunto para lograr movimientos precisos y coordinados.

#### 2.2.5.1 Tipos de cinemática

**Cinemática directa:** Describe cómo los movimientos individuales de las articulaciones afectan la posición y orientación del extremo del brazo.

**Cinemática inversa:** Se refiere al cálculo necesario para determinar las posiciones de las articulaciones que permitirán que el brazo alcance una posición específica.

## **2.2.6 Uso de energía neumática e hidráulica en herramientas**

### **2.2.6.1 La hidráulica**

La hidráulica es una rama de la física y de la ingeniería que estudia el comportamiento de los fluidos (como el agua y el aceite) en movimiento y en reposo, y su aplicación en sistemas de ingeniería. En términos simples, se refiere a cómo se utiliza la presión de un fluido para generar movimiento o fuerza. La energía hidráulica en la minería tiene una variedad de usos, en planta concentradora se usa en los diferentes equipos que conforman. Tal es su uso y la característica de alta fuerza y precisión que esta posee que las herramientas también son fabricadas con este tipo de sistema o energía.

### **2.2.6.2 La neumática**

La neumática es una rama de la ingeniería que se basa en el uso de aire comprimido o gases inertes para generar y transmitir energía, la cual se emplea en sistemas y mecanismos que requieren fuerzas controladas. En la industria, los sistemas neumáticos se valoran por su capacidad para realizar tareas con movimientos rápidos y repetitivos, logrando eficiencia en aplicaciones como la automatización de procesos.

En la industria minera, especialmente durante el mantenimiento de molinos, la energía neumática juega un papel crucial al facilitar el uso de herramientas pesadas sin la necesidad de complejos sistemas eléctricos. Un ejemplo relevante es el cambio de pernos en los molinos, una tarea que requiere fuerza controlada y herramientas eficientes. En este proceso, las herramientas neumáticas, como las pistolas de impacto y los martillos neumáticos, permiten operaciones más rápidas y seguras.

## **2.2.7 Herramientas para cambio de pernos de revestimiento – molino de bolas**

- Pistola neumática de impacto: Utilizada principalmente para la instalación y extracción rápida de pernos mediante golpes de torsión generados por el aire comprimido.

**Figura 6***Pistola neumática de impacto*

*Nota.* Ingersoll Rand. (s. f.). 3956 Impact wrench.

- Martillo neumático: Se utiliza para aflojar o remover piezas que están fijadas de forma mecánica, aplicando vibraciones y golpes controlados que reducen el esfuerzo humano.

**Figura 7***Martillo neumático*

*Nota.* Grainger México. (s. f.). Triturador pavimento neumática, 27-1/2 plg.

- Rompe tuercas hidráulico: Esta herramienta emplea presión hidráulica para cortar de manera rápida y segura tuercas atascadas o dañadas, sin dañar el perno ni la superficie de contacto.

## Figura 8

### *Rompe tuercas hidráulico*



*Nota.* Tomado de MARCO Soluciones Integrales (s.f.).

### 2.2.8 Acoples para brazo robótico

Los acoples para brazos robóticos son dispositivos que permiten la conexión de herramientas o accesorios en el extremo del brazo, proporcionando versatilidad en su uso. Estos acoples facilitan la sujeción de diferentes instrumentos, como garras, soldadores, o herramientas de corte.

## Figura 9

### *Acoples para el brazo mecánico KUKA*



*Nota.* Tomado de: [Home - MIRS: Mining and Heavy Industry Robotics \(mirsrobotics.com\)](http://Home - MIRS: Mining and Heavy Industry Robotics (mirsrobotics.com))

Existen varios tipos de acoples, incluyendo acoples rápidos, magnéticos y mecánicos. Los acoples rápidos permiten el intercambio rápido de herramientas, mientras que los acoples magnéticos utilizan fuerzas magnéticas para sujetar herramientas sin necesidad de fijación física.

### 2.2.9 *Diseño mecánico*

El diseño mecánico es una tarea compleja que precisa de variadas aptitudes. Es necesario descomponer relaciones extensas en una variedad de tareas sencillas. La complejidad del asunto demanda un orden en el que las ideas se manifiestan y se verifican. Primero se aborda la naturaleza del diseño en términos generales, y luego el diseño en ingeniería mecánica en particular. El diseño es un procedimiento iterativo con muchas etapas iterativas. Hay muchos recursos para respaldar al diseñador, entre los que se cuentan numerosas fuentes de información y una gran abundancia de herramientas de diseño computarizado (Shigley et al., 2006).

#### 2.2.9.1 Principios básicos de diseño mecánico

- Esfuerzos:

El esfuerzo es una magnitud interna que mide la intensidad de las fuerzas que actúan dentro de un material. Cuando una carga se aplica de manera perpendicular a una sección transversal, se genera un esfuerzo normal, definido matemáticamente como:

$$\sigma = F / A$$

Donde:

- $\sigma$  = esfuerzo normal (Pa o Mpa).
- F = Fuerza normal aplicada (N).
- A= Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>).
- Factor de diseño y factor de seguridad

El análisis de componentes mecánicos puede abordarse mediante el método determinístico del factor de diseño, también denominado método clásico de diseño. Este enfoque compara un parámetro asociado a la pérdida de la función del componente con un parámetro máximo permisible de operación. El cociente entre ambos se denomina factor de diseño ( $n_d$ ), cuya ecuación general se expresa como:

$$n_d = \frac{S}{\sigma}$$

S: Resistencia del material

$\sigma$ : Esfuerzo permisible

- Fatiga

Es necesario analizar todos los posibles modos de falla, siendo el modo gobernante aquel que conduce al menor valor de  $n_d$ . Posteriormente, en la práctica de ingeniería, el factor de diseño puede variar debido a ajustes como la selección de dimensiones normalizadas o la sustitución de componentes comerciales con propiedades diferentes a las inicialmente calculadas. En estos casos, el valor adoptado se denomina factor de seguridad ( $n$ ), el cual comparte la misma definición que el factor de diseño, aunque suele diferir numéricamente (Shigley et al., 2006).

- Fatiga por cargas variables:

Goodman mod

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$\sigma_a$ : Esfuerzo alternante

$\sigma_m$ : Esfuerzo medio

$S_e$ : Limite de resistencia a la fatiga corregido

$S_{ut}$ : Resistencia ultima a tracción del material

$n$ : Factor de seguridad deseado

### 2.2.9.2 Selección de materiales para el diseño mecánico

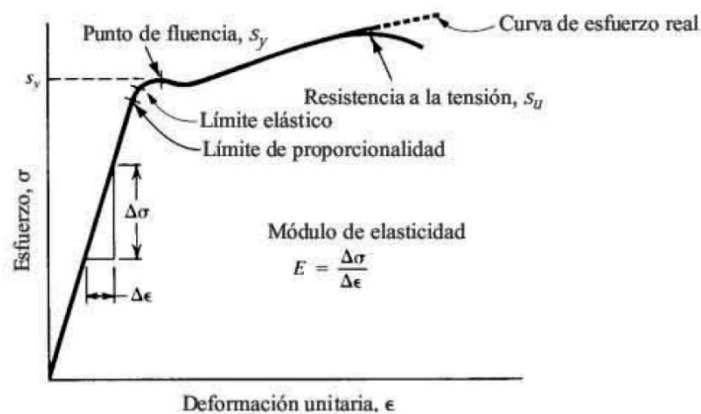
Elegir un material para construir o simular una pieza de una máquina o un elemento estructural es una de las decisiones más importantes que debe tomar un diseñador. Normalmente, la decisión se toma antes de fijar las dimensiones de la pieza. Una vez seleccionado el proceso para crear la geometría deseada y el material, el

diseñador puede dimensionar el elemento de forma que se evite la pérdida de funcionalidad, o que la probabilidad de dicha pérdida se mantenga en un nivel de riesgo aceptable (Shigley et al., 2006).

En diseño mecánico, la elección de los materiales se basa en propiedades que influyen en el rendimiento de los elementos estructurales. Entre las más importantes están la resistencia mecánica, que establece la capacidad de resistir cargas sin romperse; el módulo de elasticidad, que mide la rigidez y controla las deformaciones; la tenacidad y la resistencia a la fatiga, cruciales en componentes sujetos a impactos o esfuerzos cíclicos; y la densidad, que afecta al peso y, por ende, a la eficiencia del sistema.

### Figura 10

*Diagrama esfuerzo–deformación unitaria para el acero.*



*Nota.* Adaptado de Diseño de elementos de máquinas (Mott, 2006).

#### 2.2.10 Molino de bolas

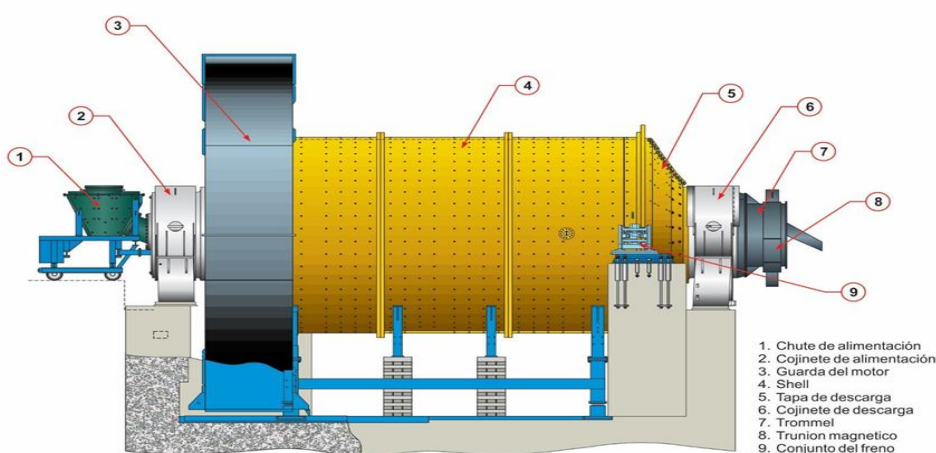
El molino de bolas es un dispositivo mecánico que permite llevar a cabo la operación de moler o reducir materiales a pequeñas partes, por medio de procesos. Su función está dada por el impacto y la fricción, mediante los cuales se produce la disminución del tamaño por medio de bolas o esferas contenidas en su interior que impactan entre ellas y generan la reducción del material (Barron, 2016).

### 2.2.10.1 Tipo de molino en minera AngloAmerican Quellaveco

En la minera Quellaveco, se utiliza un molino de bolas de gran tamaño que permite la reducción de minerales mediante el impacto de esferas de acero en su interior. Este tipo de molino es fundamental para la molienda de materiales en la minería, ya que permite la reducción del tamaño de las partículas hasta obtener un polvo fino.

**Figura 11**

*Partes principales del molino de bolas*

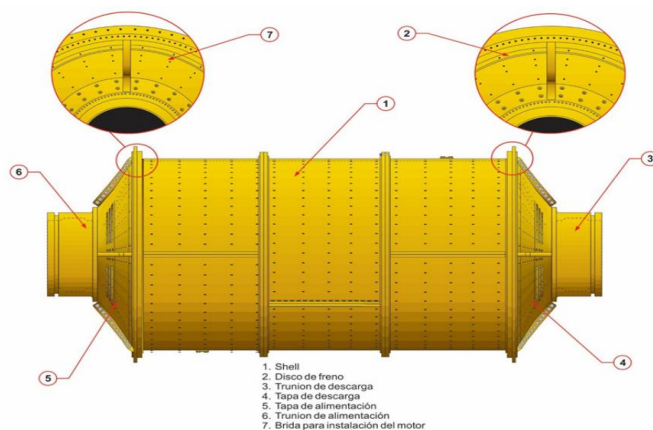


*Nota.* Tomado de: MQ13-408002-01-IOM-ME-C.003778-EN-YRK-MAN-00469\_3-D, pág. 555, 556, 559)

Los molinos de bolas en Quellaveco tienen grandes dimensiones, con una medida de 28' x 44.5'. Estos molinos son impulsados por motores eléctricos que generan grandes cantidades de energía para mover las bolas de acero en su interior. La eficiencia de la molienda depende de factores como la velocidad de rotación, la disposición de las bolas y las características del material a procesar.

**Figura 12**

*Cuerpo del molino*



*Nota.* Tomado de: MQ13-408002-01-IOM-ME-C.003778-EN-YRK-MAN-00469\_3-D, pág. 555, 556, 559)

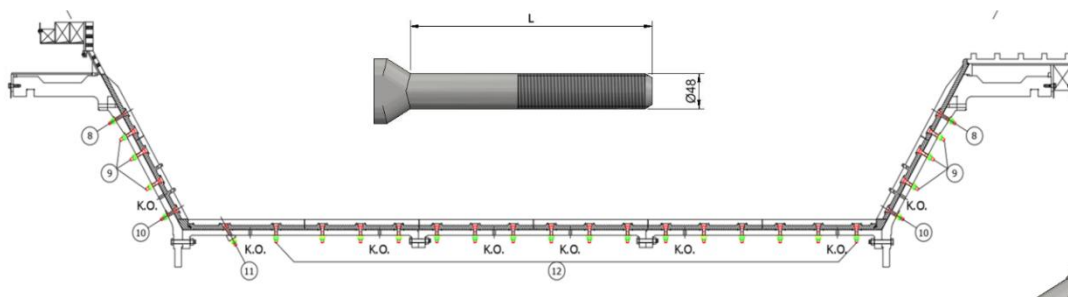
### 2.2.11 Los pernos

La distribución de pernos que se ven en el molino de bolas está basada en planos que se observa en la figura 13, en el cual se colocan para dar fijación internamente además de las características que debe tener el tornillo y sus elementos de sujeción como se observa en la figura 15 (OUTOTEC, 2021)

#### Figura 13

*Puntos de colocación de los tornillos*

**BM 28' x 44.5'**

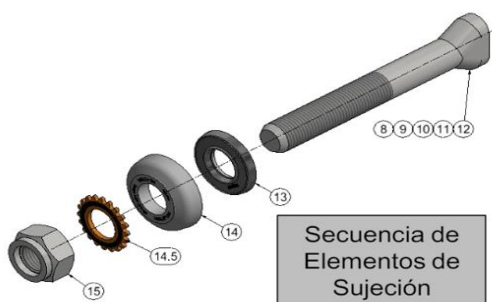


*Nota.* Tomado de OUTOTEC, 2021.

En el proceso de inserción de los tornillos se los debe colocar en los revestimientos hasta que su cabeza esté asentada sobre la cavidad correspondiente y atraviese de forma total el molino, luego se debe colocar los accesorios correspondientes afuera del molino en el mismo orden como se aprecia en la figura 14 y figura 15 (OUTOTEC, 2021).

## Figura 14

### Partes de sujeción de un tornillo



*Nota.* Tomado de OUTOTEC, 2021.

## Figura 15

### Secuencia de colocación de elementos en el tornillo



*Nota.* Tomado de OUTOTEC, 2021.

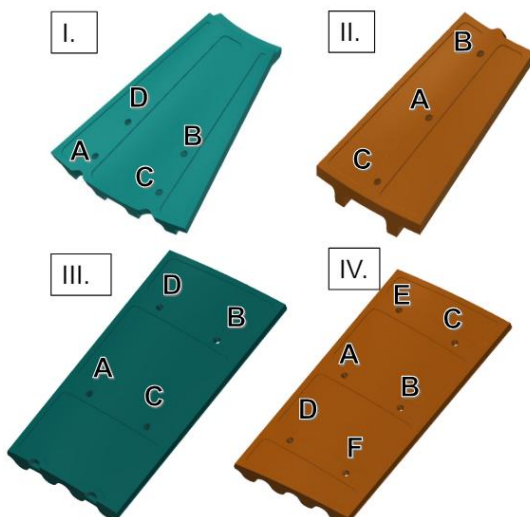
También se considera una serie de pasos adecuados para el apriete de los tornillos desde el apriete inicial que deben ser al menos 2 de estos con su respectiva llave de impacto hasta asegurar su fijación en el casco. Se tiene una secuencia que debe seguirse tanto en las instalaciones como en el mantenimiento que se realice y esto se aprecia en la figura 16:

- I. El apriete de los pernos de los *Inner Head Liner*, deben realizarse en el orden ABCD.
- II. El apriete de los pernos de los *Outer Head Liner*, deben realizarse en el orden ABC.

- III. El apriete de los pernos de los *Feed Shell Liner* y *Discharge Shell Liner* debe realizarse en el orden ABCD.
- IV. El apriete de los pernos de los *Center Shell Liner* deben realizarse en el orden ABCDEF (OUTOTEC, 2021).

**Figura 16**

*Secuencia de apriete en la instalación o mantenimiento*



*Nota.* Tomado de OUTOTEC, 2021.

El torque que se recomienda en estos pasos es de 3400 a 4080 N.n (Newton por metro).

### 2.3 Definiciones conceptuales

- **Brazo robótico:** Dispositivo electromecánico con articulaciones que replica los movimientos del brazo humano. Se desplaza en distintos grados de libertad y se utiliza para determinada tarea.
- **Acople mecánico rápido (Tool Changer):** Mecanismo de unión que permite conectar y desconectar herramientas mediante un sistema neumático y ajuste por cuñas o pines cilíndricos en poco tiempo, garantizando transmisión de esfuerzos y, en algunos casos, de energía neumática o hidráulica.
- **Molino de bolas:** Equipo de molienda usado en minería para reducir el tamaño de las partículas mediante el impacto y la fricción de bolas de acero contra el mineral.

- **Perno M48:** Elemento de sujeción de gran diámetro (48 mm) utilizado para fijar los revestimientos del *shell* en molinos de bolas, sometido a altas cargas dinámicas y cíclicas.
- **Torque de pernos:** Momento de torsión aplicado para ajustar o aflojar pernos, que asegura la correcta fijación de componentes estructurales como los revestimientos del molino.
- **Simulación estructural (ANSYS):** Análisis computacional mediante el método de elementos finitos para evaluar esfuerzos, deformaciones y factores de seguridad en componentes mecánicos.
- **Simulación cinemática (ROBODK):** Representación virtual de los movimientos de un robot para validar trayectorias, tiempos de ciclo y alcances dentro de un entorno definido.
- **Fuerza de reacción:** Fuerza opuesta generada como respuesta a la aplicación de una carga, relevante en el uso de herramientas de impacto como martillos neumáticos.
- **SOLIDWORKS:** Software CAD para el modelado 3D paramétrico de piezas y ensamblajes, ampliamente usado en ingeniería mecánica.
- **ROBODK:** Software de simulación y programación de robots industriales, que permite validar trayectorias y operaciones en entornos virtuales.
- **ANSYS:** Software de simulación por elementos finitos que permite evaluar el comportamiento estructural de piezas y ensamblajes bajo diferentes condiciones de carga.
- **Tool Changer:** Acople rápido para unir la herramienta con el brazo robótico.
- **Outside in bolt:** Mecanismo de instalación de pernos desde el exterior, diseñado para la fijación de revestimientos en molinos.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada, de enfoque cuantitativo.

#### 3.2 Nivel de investigación

La presente investigación tiene un nivel principalmente explicativo, ya que analiza las relaciones entre las variables geométricas del molino, el alcance del robot y los tiempos operativos, justificando a la vez cómo el sistema robótico mejora el proceso de cambio de pernos.

#### 3.3 Diseño de la investigación

El diseño de investigación es no experimental, dado que no se manipulan variables de manera directa, sino que se observan y analizan los resultados de la simulación.

#### 3.4 Población y muestra

La población de estudio está conformada por los 816 pernos de los revestimientos en el *shell* del molino de bolas de la Minera Quellaveco. Dado que resulta complejo modelar y simular la totalidad del proceso se ha escogido una muestra representativa.

La muestra corresponde de 3 pernos ubicados en la sección del *shell* intermedio, sobre la cual se desarrolla la simulación de cambio de pernos que presentan deterioro. Esta muestra conserva las dimensiones reales de distribución y permite proyectar los resultados al conjunto de la población.

#### 3.5 Equipos y herramientas digitales

##### 3.5.1 Equipos

- Computadora personal con capacidad para diseño y simulación
- Acceso a bibliografía especializada.

### **3.5.2 Herramientas digitales**

- SOLIDWORKS: Modelado CAD del acople y componentes mecánicos.
- ANSYS: Simulación estructural para validar el acople bajo cargas de torque y percusión.
- ROBODK: Simulación robótica de trayectorias y tiempos de operación.
- MICROSOFT WORD: Redacción y edición del documento de tesis.
- MENDELEY: Gestión bibliográfica y referencias en formato APA 2025.

### **3.6 Procedimiento de los ensayos de simulación numérica**

En primer lugar, se realiza el diseño y modelamiento del acople mecánico, el brazo robótico, las herramientas y el molino de bolas en SOLIDWORKS, considerando sus dimensiones y condiciones de operación.

En segundo lugar, se elabora la memoria de cálculo en el aspecto mecánico. A continuación, el acople mecánico se valida estructuralmente mediante simulaciones en ANSYS.

Finalmente, se elabora la memoria de cálculo en el aspecto cinemático, el acople se integra en la plataforma ROBODK junto con los demás componentes como el robot KUKA, molino de bolas, herramientas específicas, estante ideal para herramientas y pernos de revestimiento tipo Outside in Bolt, empleados en minería, de esta manera se realiza la simulación cinemática del brazo robótico para cambio de pernos.

Es importante señalar que los resultados y validaciones obtenidos en este estudio provienen de software especializado (SOLIDWORKS, ANSYS y ROBODK). No se realizaron ensayos experimentales. En consecuencia, los resultados se basan en simulaciones y análisis virtuales propios de un entorno de prototipado digital.

### **3.7 Técnicas de recolección de datos**

La recopilación de los datos se efectuó por medio de la observación estructurada y el análisis de documentos. La fase de observación consideró la medición directa de los tiempos operativos del procedimiento de cambio de pernos en los molinos de bolas y las condiciones de seguridad en las que se realiza, esto se complementó con la revisión de videos técnicos de MIRS Robotics en los que se mostraban procesos robotizados para molinos. El análisis documental implicó la revisión de planos técnicos del molino de bolas, manuales y datos de las dimensiones del brazo robótico KUKA, catálogos de cambiadores de herramientas industriales, patentes relacionadas que se obtuvieron en *Espacenet* y *Google Patents*, sin dejar de lado las normas técnicas que fueran aplicables. Estas fuentes hicieron posible la obtención de información geométrica, funcional y sobre el funcionamiento que se necesitaba para el diseño y la simulación del sistema que se propuso.

### **3.8 Técnicas para el procesamiento de datos**

El procesamiento de datos consistió organizar y tabular la información recopilada a través de la observación y el análisis documental, con el objetivo de transformarla en datos útiles para las fases de modelado y simulación. Más tarde, estos datos se incorporaron a los programas de simulación computacional (ANSYS y ROBODK), lo que hizo posible examinar el comportamiento mecánico y cinemático del sistema sugerido. La información ya procesada se usó como base para determinar comparaciones entre los tiempos previstos en la simulación y los tiempos constatados del método tradicional mediante una tabla, lo que permitió evaluar de manera técnica la viabilidad de la propuesta robotizada.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Descripción de los ensayos de simulación numérica

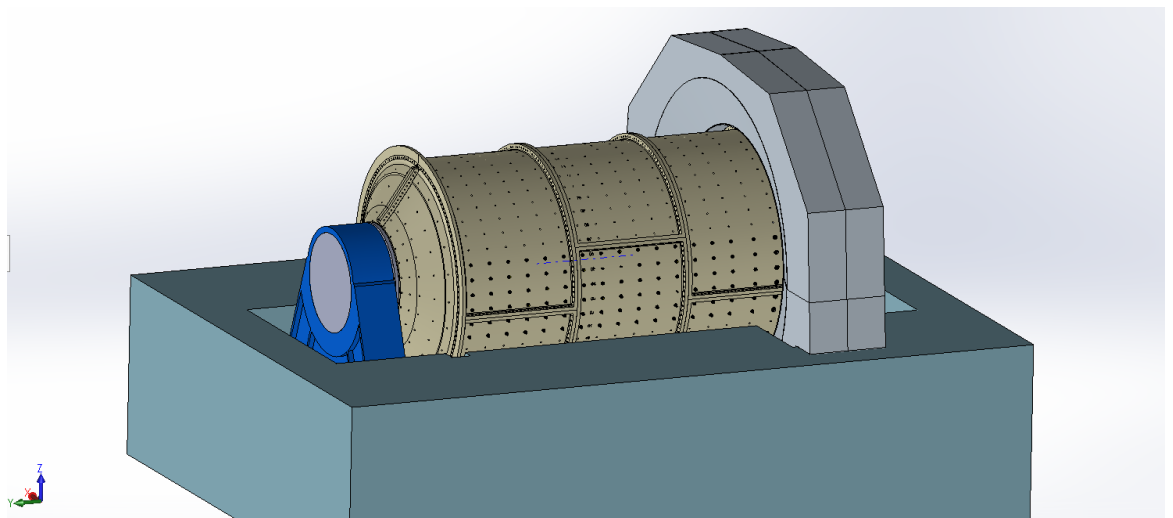
##### 4.1.1 Pruebas mecánicas

##### 4.1.1.1 Elección de brazo robótico

Para determinar las proporciones adecuadas entre el brazo robótico y el entorno de trabajo, se diseñó inicialmente el molino de bolas Metso 28' x 44.5' en el software SOLIDWORKS. Este modelo sirvió como referencia para validar el espacio disponible y establecer las escalas correctas para el robot y así pueda moverse libremente.

#### Figura 17

*Diseño CAD de molino de bolas*

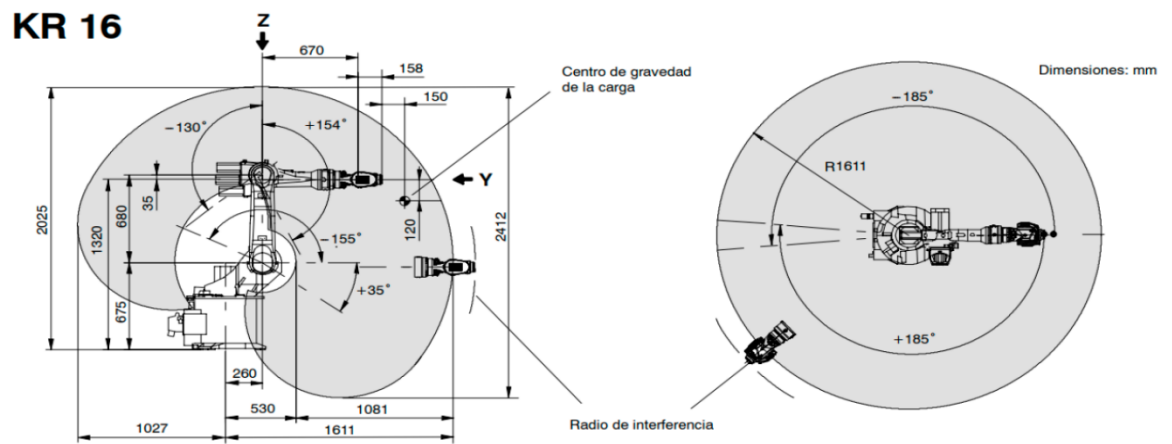


*Nota.* Elaboración propia del autor.

Para tal caso, se eligió el brazo robótico KUKA KR-16, debido a su versatilidad y precisión, el robot fue diseñado en el software SOLIDWORKS y escalado a una relación de 1.9 veces su tamaño original, con el fin de obtener una proporción adecuada respecto al molino de bolas real. Esta escala permitió validar de manera visual y funcional la interacción entre ambos modelos, asegurando que el brazo robótico pueda ejecutar las trayectorias planificadas de forma óptima en el entorno de trabajo.

**Figura 18**

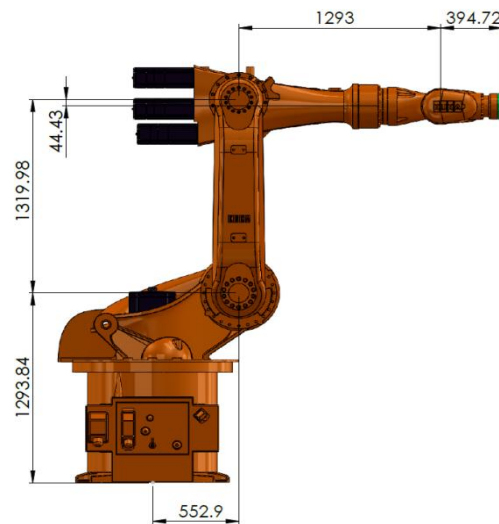
Medidas reales de robot KUKA KR 16



*Nota.* Tomado de Diseño y construcción de un efector final para empaquetado y paletizado de botellas con el uso del brazo robótico KUKA KR-16 (Encalada, Montero, 2022).

**Figura 19**

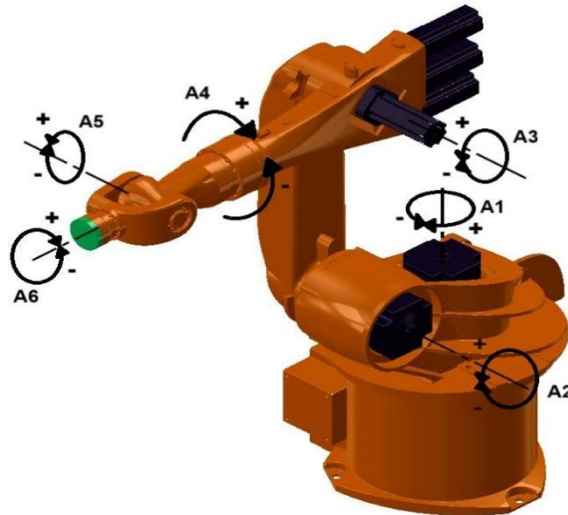
*Dimensiones de brazo robótico KUKA-KR16 a escala 1.9.*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

**Figura 20**

*Ejes de articulación del robot KUKA KR-16 a escala 1.9.*

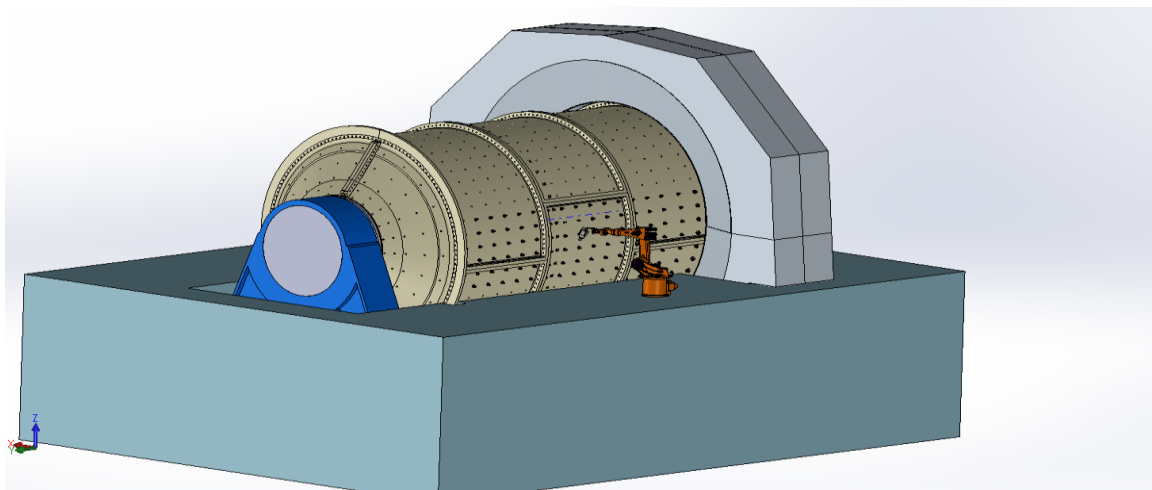


**Nota:** Cada eje A1–A6 corresponde directamente a las variables articulares del modelo Denavit–Hartenberg, representadas como  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ .

Elaboración propia del autor.

**Figura 21**

*Ensamble de robot KUKA KR 16 a escala en entorno del molino de bolas*



**Nota.** Elaboración propia del autor.

#### 4.1.1.2 *Diseño CAD de adaptador de herramientas*

Para el diseño mecánico del adaptador de herramienta se ha considerado la dimensión de la brida del brazo robótico KUKA KR-16 a escala, la medida de la herramienta y el entorno de trabajo.

Se ha considerado como diseño preliminar la propuesta de adaptadores desarrollada por la empresa chilena MIRS, dedicada a la robótica aplicada a la minería. En su catálogo técnico, se observan adaptadores diseñados de forma específica para cada herramienta, sirviendo como referencia inicial para el desarrollo del presente diseño.

**Figura 22**

*Herramientas de acople al robot KUKA*

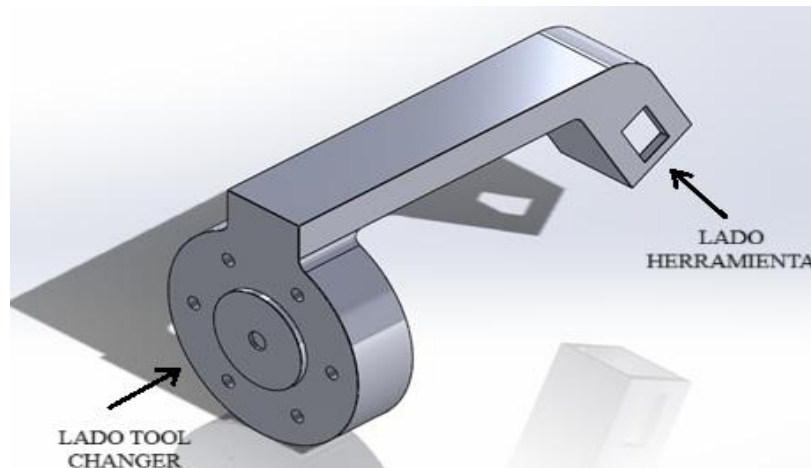


*Nota.* Tomado de: [Home - MIRS: Mining and Heavy Industry Robotics \(mirsrobotics.com\)](http://mirsrobotics.com)

Como mejora del diseño preliminar, se propone un modelo con inclinación de  $90^\circ$  a  $61^\circ$ , una brida para el montaje para el lado de *Tool Plate* y un sistema de acople a presión para el lado de la herramienta, optimizando la movilidad del brazo robótico en entorno del *shell* del molino de bolas.

**Figura 23**

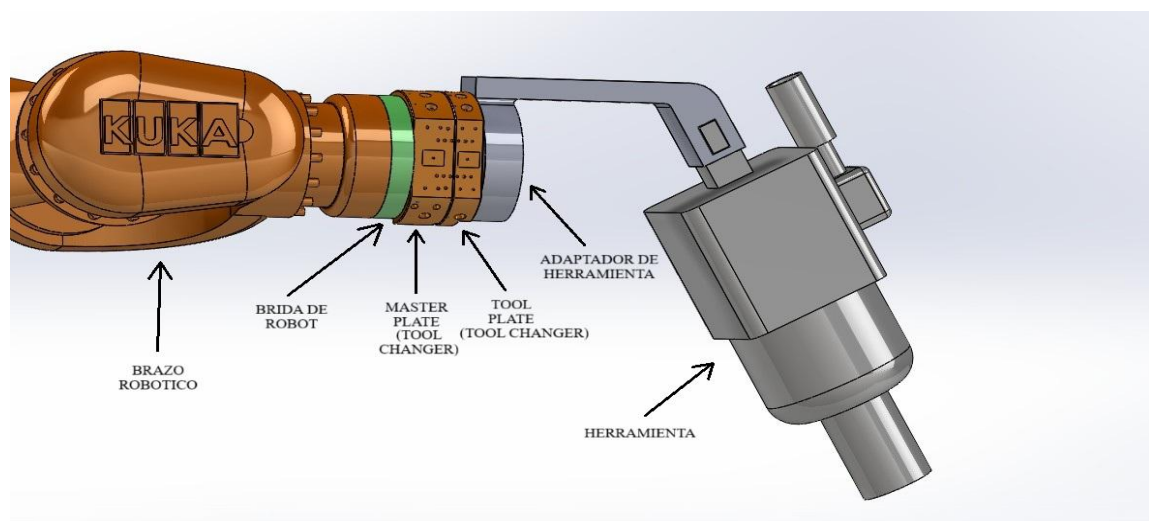
*Sistema de acople – tool changer*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Figura 24

*Sistema de acople rápido para brazo robótico KUKA KR 16*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.1.1.3 Elección de materiales de componentes del conjunto de herramienta

Para determinar la selección de materiales, tanto para las herramientas como para el adaptador de herramienta, se consideraron las recomendaciones del fabricante INGERSOLL y el criterio técnico del autor, tomando en cuenta los factores de trabajo y las condiciones ambientales a las que estarán expuestos los componentes.

De esta manera, la elección de materiales se fundamenta en la resistencia mecánica, comportamiento frente a impactos y fatiga, así como en la protección contra la corrosión por la exposición a ambientes mineros y variaciones climáticas.

**Tabla 4***Materiales de adaptador de herramienta y herramientas*

<b>Componente</b>	<b>Materiales</b>
<b>Adaptador de herramienta</b>	Acero AISI 4140
<b>Carcasa de martillo neumático</b>	Acero AISI 4140
<b>Cinzel de martillo</b>	Acero AISI 4340
<b>Carcasa de pistola neumática</b>	Acero AISI 4140
<b>Dado de 1 1/2" para pistola neumática</b>	Acero AISI 4340

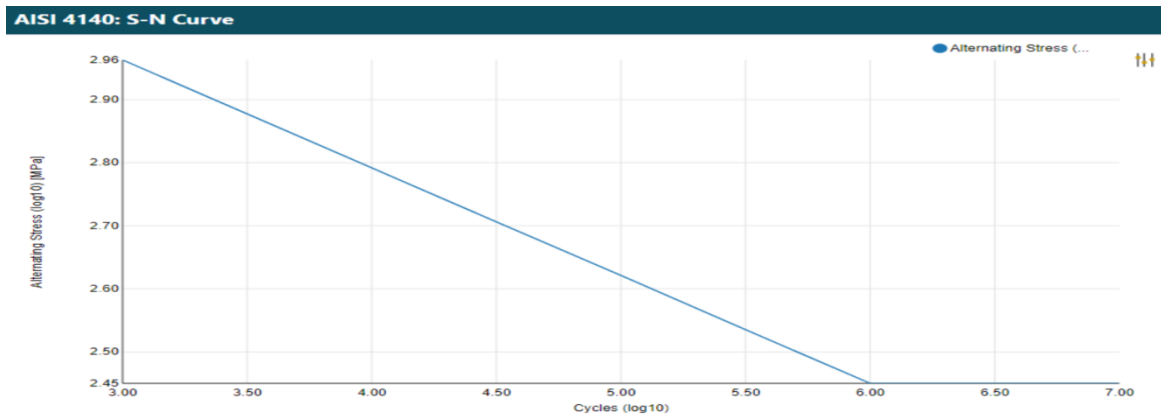
*Nota.* Elaboración propia del autor a partir de datos del ASM Internacional.

**Tabla 5***Propiedades del acero AISI 4140*

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Métrico</b>	<b>Ingles</b>
<b>Densidad</b>	7850 kg/m <sup>3</sup>	941.5 lb/ft <sup>3</sup>
<b>Propiedades mecánicas</b>	Métrico	Ingles
<b>Dureza, Brinell</b>	302	302
<b>Dureza, Rockwell C</b>	32	32
<b>Resistencia a la tracción máxima</b>	1020 MPa	148000 psi
<b>Resistencia a la tracción, limite elástico</b>	675 MPa	97900 psi
<b>Módulo de elasticidad</b>	205 GPa	29700 ksi
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.29	0.29

*Nota.* Elaboración propia del autor a partir de datos de MatWeb.

**Figura 25***Curva N-S de acero AISI 4140*



*Nota.* Obtenido de software ANSYS 2025.

**Tabla 6**

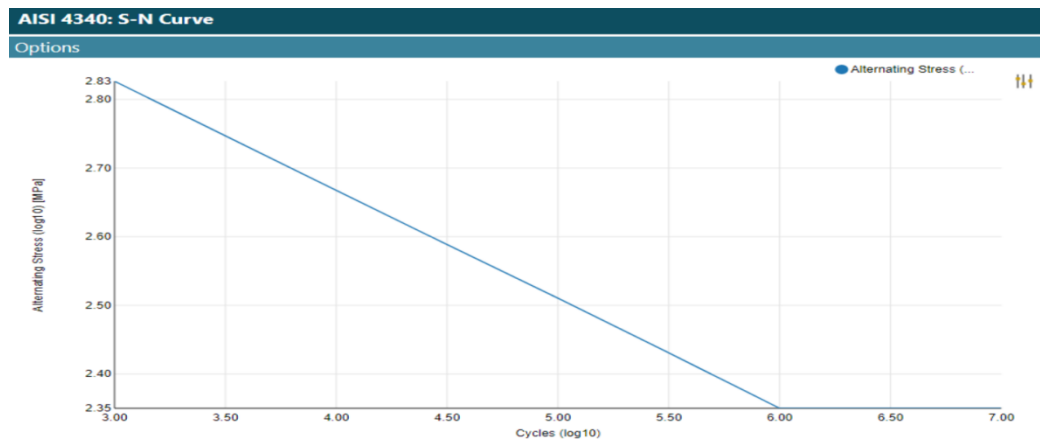
*Propiedades del acero AISI 4340*

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Métrico</b>	<b>Ingles</b>
<b>Densidad</b>	7850 kg/m <sup>3</sup>	941.5 lb/ft <sup>3</sup>
<b>Propiedades mecánicas</b>	Métrico	Ingles
<b>Dureza, Brinell</b>	217	217
<b>Resistencia a la tracción máxima</b>	745 MPa	108000 psi
<b>Resistencia a la tracción, límite elástico</b>	470 MPa	68200 psi
<b>Módulo de elasticidad</b>	192 GPa	27800 ksi
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.29	0.29

*Nota.* Elaboración propia del autor a partir de datos de MatWeb.

**Figura 26**

*Curva N-S de acero AISI 4340*



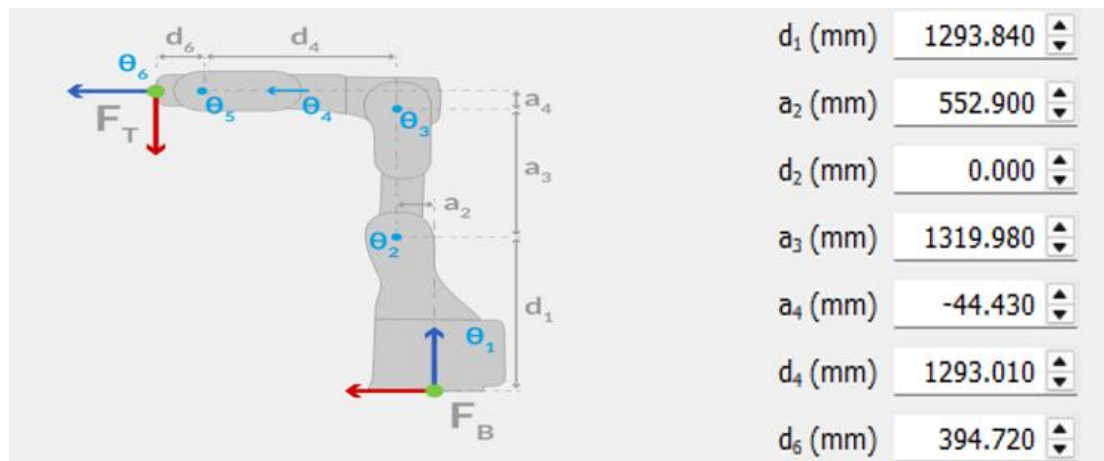
*Nota.* Tomado de software ANSYS 2025.

#### 4.1.2 Pruebas cinemáticas

Para realizar la simulación cinemática del brazo robótico se debe tener en consideración sus dimensiones, el alcance que pueda llegar a tener a los diferentes pernos en el *Shell* del molino de bolas. Para eso se tiene que tomar las medidas en cada articulación y eslabones para realizar la importación en el programa.

**Figura 27**

*Parámetros geométricos D-H de robot KUKA KR16 a escala*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

Alcance máximo: Distancia desde el eje base hasta el efector final.

Con los datos del brazo robótico obtenemos el siguiente alcance:

$$R = a_2 + a_3 + a_4 + d_4 + d_6$$

$$R = 552.90 + 1319.98 - 44.43 + 1293.01 + 394.72$$

R= 3516mm

Con este alcance el brazo robótico puede trabajar en el entorno del *Shell* del molino de bolas de acuerdo con la proporción del mismo molino.

### Tabla 7

*Comparación con robot real para verificar el peso que soportará y el alcance requerido.*

<b>Robot</b>	<b>Alcance máx. (mm)</b>	<b>Carga útil nominal (kg)</b>
<b>KUKA KR16</b>	1611	16
<b>KUKA KR16 a escala</b>	3516	300-350
<b>KUKA KR 500 L340-2</b>	3326	340

*Nota.* Elaboración propia del autor.

En la comparación de robots se observa que el modelo KUKA KR 500 L340-2 presenta un alcance similar al del KUKA KR 16 a escala, lo que permite utilizar ciertos parámetros del KR 500 L340-2 para complementar aquellos que no se encuentran disponibles en el KR 16 a escala, facilitando así la simulación completa del modelo.

#### **4.1.2.1 Utilización del brazo robótico KUKA KR16 en entorno de simulación**

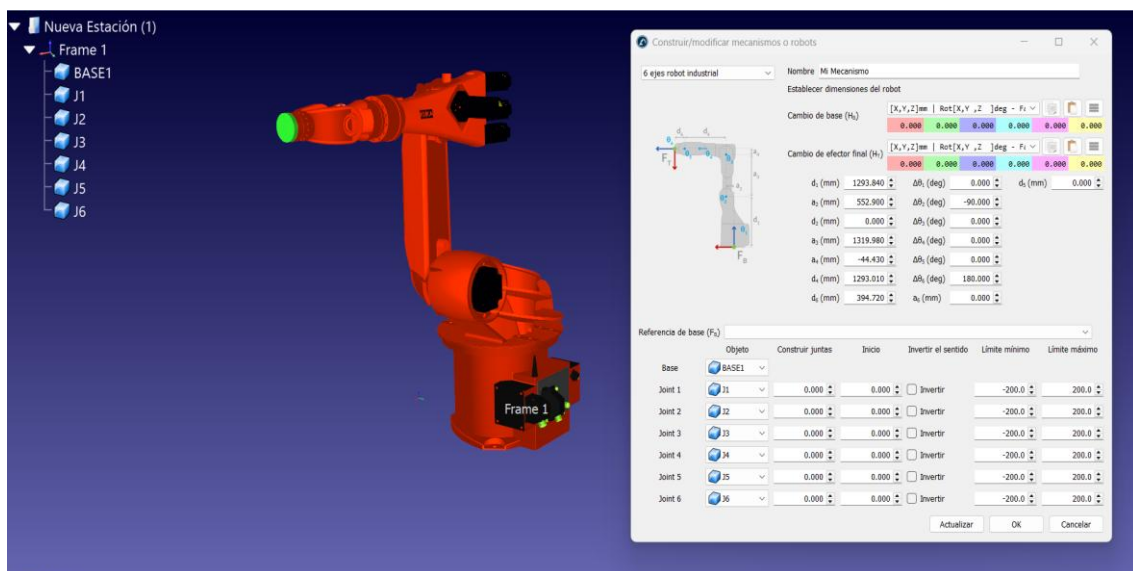
Dado que el trabajo se desarrolla en el entorno de un molino de bolas, en primer lugar, se procede a importar el modelo 3D del molino, diseñado previamente en SOLIDWORKS, hacia el software ROBODK. Este programa opera con un sistema de coordenadas centrado en el eje Z, por lo que se deben ajustar las referencias antes de la importación. De manera similar, el brazo robótico KUKA KR16 a escala en 3D se importa a ROBODK. Para ello, se cargan las piezas correspondientes a cada eslabón J1, J2, J3, J4, J5, J6 y se realiza la configuración cinemática desde la base del robot hasta el TCP.

El comando Mecanismo de ROBODK permite establecer las uniones rotacionales entre los eslabones y definir correctamente la estructura del robot industrial de seis ejes. Una vez configurado, el brazo robótico queda completamente integrado y operativo dentro del entorno de simulación, listo para la programación de trayectorias y validación de movimientos.

#### 4.1.2.2 Configuración de robot KUKA R16 a escala en ROBODK.

**Figura 28**

*Robot personalizado de 6 ejes en ROBODK*



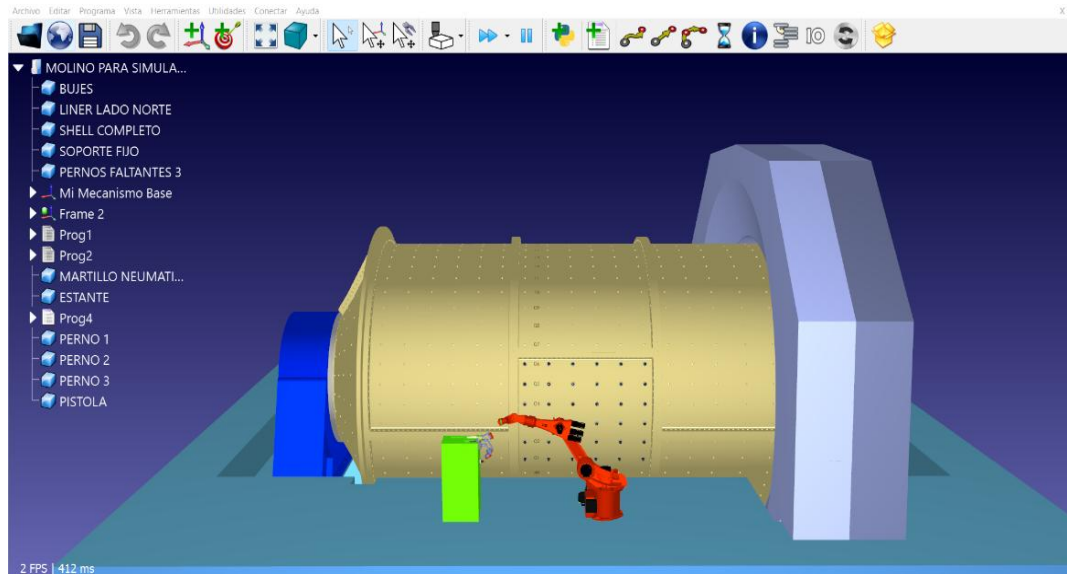
*Nota.* Elaboración propia del autor.

Finalmente, bajo un nuevo entorno de simulación se integra el molino de bolas, el robot KUKA KR16 a escala configurado y los componentes que forman parte del proceso de simulación como es el estante, las herramientas y pernos a cambiar.

#### 4.1.2.3 Equipos industriales en la plataforma de simulación ROBODK

**Figura 29**

*Molino de bolas, brazo robótico y demás componentes importados en ROBODK*



*Nota: Elaboración propia del autor.*

#### 4.1.2.4 Configuración de parámetros de velocidad y aceleración

La velocidad y aceleración empleadas en la simulación corresponden al robot KUKA KR500 L340-2, seleccionado por presentar dimensiones y alcance equivalentes al modelo KUKA KR16 escalado utilizado como referencia en el estudio.

**Tabla 8**

*Tabla de parámetros de robot KUKA KR 500 L340-2*

Type	KR 360-2	KR 360 L280-2	KR 360 L240-2	KR 500-2	KR 500 L420-2	KR 500 L340-2	
Maximum reach	2,826 mm	3,076 mm	3,326mm	2,826 mm	3,076 mm	3,326 mm	
Rated payload	360 kg	280 kg	240 kg	500 kg	420 kg	340 kg	
Suppl. load, arm/link arm/rotating col.	50/100*/400** kg						
Suppl. load, arm + link arm, max.	100 kg*; 50 kg**						
Maximum total load	860 kg	780 kg	740 kg	1,000 kg	920 kg	840 kg	
Number of axes	6						
Mounting position	Floor, ceiling						
Variant	Foundry	Foundry	Foundry	Cleanroom, Foundry	Foundry	Foundry	
Positioning repeatability*	±0.08 mm						
Path repeatability*							
Controller	KR C2 edition2005						
Weight (excluding controller), approx.	2,350 kg	2,375 kg	2,385 kg	2,350 kg	2,375 kg	2,385 kg	
Temperature during operation	+10 °C to +55 °C						
Protection classification	IP 65						
Robot footprint	1,240 mm x 1,240 mm						
Connection	13.5 kVA						
Noise level	< 75 dB						
<b>Axis data</b>	<b>Range (software)</b>	<b>Speed with rated payload</b>					
		<b>360 kg</b>	<b>280 kg</b>	<b>240 kg</b>	<b>500 kg</b>	<b>420 kg</b>	<b>340 kg</b>
Axis 1 (A1)	±185°	89°/s	89°/s	89°/s	69°/s	69°/s	69°/s
Axis 2 (A2)	+110°/-40°*; +50°/-40°**	89°/s	89°/s	89°/s	69°/s	69°/s	69°/s
Axis 3 (A3)	+60°/-184°	93°/s	93°/s	93°/s	69°/s	69°/s	69°/s
Axis 4 (A4)	±350°	109°/s	109°/s	109°/s	77°/s	77°/s	77°/s
Axis 5 (A5)	±118°	112°/s*	112°/s*	112°/s*	76°/s	76°/s	76°/s
Axis 6 (A6)	±350°	157°/s*	157°/s*	157°/s*	120°/s	120°/s	157°/s

*Nota.* Tomado de KR 360-2, KR 500-2. Los profesionales para cargas pesadas (KUKA, s.f.).

Para obtener la velocidad angular del brazo robótico se consideró un promedio de las velocidades de cada articulación con un peso de 340 kg obtenidos en la tabla N° 8.

$$\text{Velocidad articular} = \frac{69 + 69 + 69 + 77 + 76 + 157}{6}$$

$$\text{velocidad articula} = 86^\circ/\text{s}$$

Se obtuvo un valor promedio de  $86^\circ/\text{s}$ ; sin embargo, se adoptó un valor operativo de  $90^\circ/\text{s}$  para la simulación, debido a que la carga manipulada es inferior a la carga nominal del robot (340 kg). Esto permite operar a velocidades ligeramente superiores a las especificadas para condiciones de carga máxima. Dicho valor se empleó exclusivamente para fines de simulación cinemática y estimación de tiempos de operación.

### Figura 30

*Parámetros de robot KUKA KR 500 L340-2 de software ROBODK*

**Parámetros del Robot**

Robot: **KUKA KR 500 L340-2**  Desbloquear opciones avanzadas

Velocidad (mm/s)  Aceleración (mm/s<sup>2</sup>)  Usar modelo calibrado  Establecer posición de inicio

Velocidad Articular (grados/s)  Aceleración articular (grados/s<sup>2</sup>)  Valor de redondeado (mm or %, -1=Off)

Post-Procesador:  Comportamiento de articulación del robot:  Sentidos articulares

Seleccione Post-Procesador  Tipo de ángulo de Euler:

Posición:

**Parámetros cinemáticos:**

Sistema de base:

	Junta Min (deg)	Junta Max (deg)	a (deg)	a (mm)	θ (deg)	d (mm)
J1	-185.000	185.000	0.000	0.000	0.000	1045.000
J2	-130.000	20.000	-90.000	500.000	0.000	0.000
J3	-94.000	150.000	0.000	1300.000	-90.000	0.000
J4	-350.000	350.000	-90.000	55.000	0.000	1525.000
J5	-118.000	118.000	90.000	0.000	0.000	0.000
J6	-350.000	350.000	-90.000	0.000	180.000	290.000

Sistema de herramienta:

*Nota.* Obtenido de software ROBODK.

Los parámetros de velocidad y aceleración establecidos en ROBODK para el robot KUKA KR500 L340-2 se relaciona con las condiciones simuladas perfectas, sin considerar los efectos dinámicos reales como la inercia, la flexibilidad estructural o las variaciones de carga. Debido a esto, se decidió utilizar valores conservadores y menores que los máximos teóricos, con el fin de representar un comportamiento operativo plausible del robot. En la práctica industrial, estos parámetros se ajustan directamente durante la programación del robot, de acuerdo con las condiciones de operación reales y el criterio del operador.

### Tabla 9

*Parámetros de velocidad y aceleración de robot KUKA KR 16 a escala.*

<b>Parámetros de tiempo y aceleración del robot</b>	
<b>Velocidad lineal (mm/s)</b>	700
<b>Velocidad articular (grados/s)</b>	90
<b>Aceleración (mm/s<sup>2</sup>)</b>	1000
<b>Aceleración articular (grados/s<sup>2</sup>)</b>	100

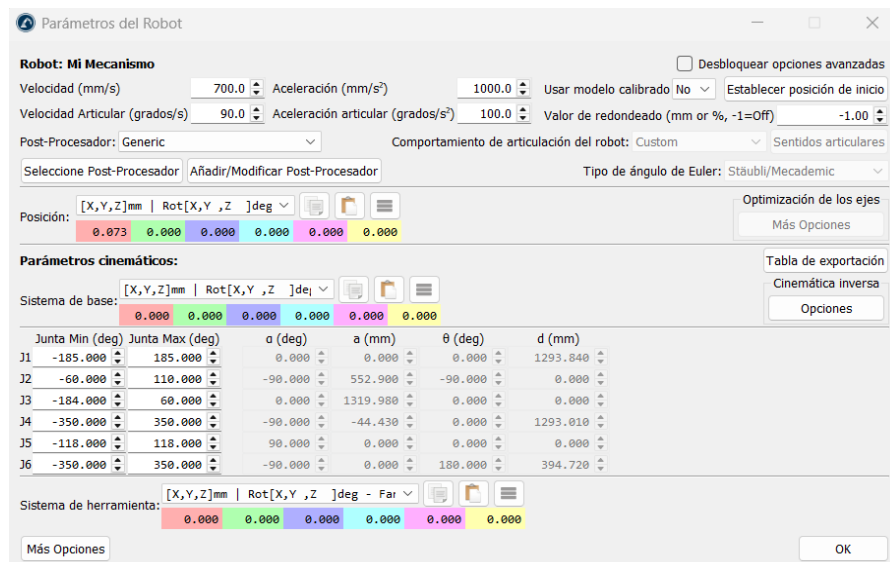
*Nota.* Elaboración propia del autor.

Finalmente se ha configurado la velocidad y aceleración lineal y articular del robot KUKA KR 16 a escala en la plataforma para que al realizar la simulación trabaje bajo parámetros reales. A la vez se ha realizado la configuración de los límites articulares del robot KUKA KR-16 a escala, estableciendo los rangos de giro permitidos para cada eje.

Este proceso permite restringir el movimiento del robot dentro de los valores físicos reales del modelo, evitando colisiones y posiciones no alcanzables durante la simulación.

### Figura 31

*Parámetros de robot KUKA KR-16 a escala*



*Nota. Elaboración propia del autor.*

#### 4.1.2.5 Parámetros de operación: límites articulares del KUKA KR-16 a escala

La obtención de los ángulos articulares que se establecen para el robot KUKA KR-16 a escala se obtienen a partir de una ficha técnica del robot industrial KUKA KR500 L340-2, la cual ha sido publicada por KUKA Roboter GmbH como se observa en la tabla N° 8, donde se puede especificar cuál es el límite máximo y mínimo de giro que se permite para cada uno de los ejes (A1 hasta A6). Los rangos están dados para definir el movimiento físico de manera real que puede tener cada articulación y garantiza que el modelo simulado pueda operar dentro de los márgenes mecánicos que brinden la seguridad del equipo y permitan las funciones para las cuales está diseñado.

Durante el proceso de simulación, dichos valores fueron incorporados al software ROBODK en el apartado de configuración cinemática (Joint Limits), lo que permitió restringir el movimiento angular del robot evitando colisiones, interferencias o posiciones no alcanzables dentro del entorno del molino de bolas.

#### Figura 32

*Ángulos articulares del robot KUKA KR 16 a escala.*

**Pilotaje Articular**

$\theta_1$ :	0.00	° -185.0	---	185.0
$\theta_2$ :	0.00	° -40.0	---	110.0
$\theta_3$ :	0.00	° -184.0	---	60.0
$\theta_4$ :	0.00	° -350.0	---	350.0
$\theta_5$ :	0.00	° -118.0	---	118.0
$\theta_6$ :	0.00	° -350.0	---	350.0

**Otras configuraciones** ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ )

(\*)-[ 0.00°, 0.00°, 0.00°, 0.00°, 0.00°, 0.00° ]

*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.1.2.6 Tiempos de cambio de pernos por brazo robótico

Para obtener los tiempos de las diferentes actividades del proceso de cambio de pernos se ha considerado la evaluación y toma de tiempos de estos procesos guiados de un robot real trabajando al realizar estas tareas en dos videos.

Según Anil producciones (2022), el sistema robótico automatizado de MIRS permite realizar el cambio de pernos en molinos de bolas de forma segura y con menor tiempo de intervención humana.

Por su parte, MIRS – Mining and Heavy Industry Robotics (2022) presenta soluciones robóticas aplicadas al mantenimiento en minería pesada, enfocadas en la eficiencia operativa y la precisión de las trayectorias de movimiento.

**Tabla 10**

*Tiempo de actividad específica*

<b>Tiempo de actividad específica</b>	
<b>Acople a la herramienta</b>	3 s
<b>Detección de perno o tuerca</b>	5 s
<b>Corte de tuerca</b>	9 s
<b>Desacople de herramienta</b>	3 s

<b>Extracción de perno</b>	10 s
<b>Sujeción magnética del perno</b>	7 s
<b>Instalación de perno</b>	3 s
<b>Ajuste de perno</b>	12 s
<b>Tiempo de movimientos lineales o angulares del brazo robótico</b>	Arbitrario

*Nota.* Elaboración propia del autor. Datos tomados de anilproducciones (2022) y MIRS – Mining and Heavy Industry Robotics (2022).

## **4.2 Presentación y análisis de los resultados**

### **4.2.1 Cálculo y simulación mecánica**

Para el cálculo y la simulación mecánica se consideró únicamente el adaptador de herramienta junto con las herramientas martillo neumático y pistola de impacto neumática, debido a que estas generan esfuerzos significativos sobre el adaptador durante su funcionamiento. En cambio, en el caso del cortador de tuerca, no se realizó ningún cálculo ni simulación, ya que dicha herramienta no transmite esfuerzos relevantes al adaptador y su acción es principalmente el corte de la tuerca.

#### **4.2.1.1 Cálculo y simulación de adaptador de herramienta y martillo neumático**

Para hallar la resistencia del adaptador a sometido a cargas repetitivas por la reacción del martillo neumático de modelo MX90B que es el que se usa en minería para extracción de pernos en molino de bolas, se ha considerado tomar en cuenta la vibración en el mango del martillo, así como a reacción que se da por cada impacto lo cual indica la fuerza con la que interactúa el adaptador de herramienta.

### **Tabla 11**

*Características técnicas de martillos neumáticos Ingersoll Rand*

Modelo (I.D.)	Diámetro del cilindro (pulg / mm)	Carrera de trabajo (pulg / mm)	Tamaño hexagonal del encastre (pulg)	Golpes por minuto	Consumo de aire a 85 psi (ft <sup>3</sup> /min)	Consumo de aire a 85 psi (m <sup>3</sup> /min)	Nivel de ruido dB(A) (ISO 15744)
MX60A	2.06 (52.3)	5.75 (146)	1-1/8 x 6	1200-1400	65-70	1.84-1.98	117 (111*)
MX60B	2.06 (52.3)	5.75 (146)	1-1/4 x 6	1200-1400	65-70	1.84-1.98	117 (111*)
MX60AF	2.06 (52.3)	5.75 (146)	1-1/8 x 6	1200-1400	65-70	1.84-1.98	117 (111*)
MX60BF	2.06 (52.3)	5.75 (146)	1-1/4 x 6	1200-1400	65-70	1.84-1.98	117 (111*)
MX90A	2.62 (66.5)	5.75 (146)	1-1/8 x 6	1200-1400	83-87	2.35-2.46	--
MX90B	2.62 (66.5)	5.75 (146)	1-1/4 x 6	1200-1400	83-87	2.35-2.46	--
MX90AF	2.62 (66.5)	5.75 (146)	1-1/8 x 6	1200-1400	83-87	2.35-2.46	--
MX90BF	2.62 (66.5)	5.75 (146)	1-1/4 x 6	1200-1400	83-87	2.35-2.46	--

*Nota.* Adaptado de Ingersoll Rand (2014), *Paving breaker: Models MX60 and MX90.*

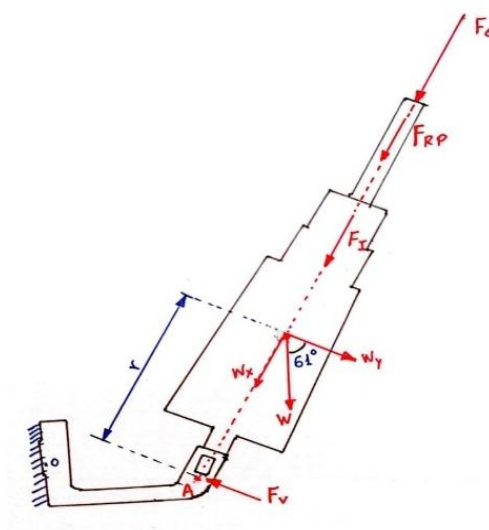
Teniendo en cuenta datos de la tabla N° 11, tenemos para el modelo MX90B:

Impactos por minutos = 1200-1400.

Para el adaptador de herramienta y la carcasa se seleccionó el acero AISI 4140 debido a su elevada resistencia a la tracción (675 MPa) y su buena tenacidad frente a la fatiga, lo que asegura un adecuado desempeño bajo cargas repetitivas sin deformaciones prematuras. En el caso del cincel se eligió el acero AISI 4340, ya que presenta una mayor resistencia al impacto. Se ha representado las cargas que actúan en en el martillo desde la punta del cincel hasta el contacto del entre el adaptador y el martillo.

### Figura 33

*DCL de adaptador-martillo neumático*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

$F_e$  = fuerza de empuje estático.

$F_{RP}$  = fuerza de reacción de perno atascado.

$F_i$  = fuerza de impacto, variable en el tiempo.

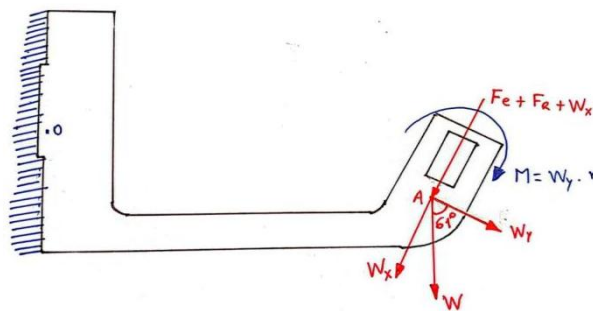
$F_v$  = fuerza de vibración, depende de los impactos por minuto.

$M$  = momento producto de la componente vertical del peso hasta el punto A.

$W$  = peso del martillo y cincel = 41.5 kg

### Figura 34

*DCL de adaptador de herramienta sometido a cargas estáticas.*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

$F_1 = F_e + F_{RP} + W_x$  Fuerza estática ejercida en el punto A.

$$F_e = 100kg \cdot 9.81m/s^2 = 981 \text{ N}$$

$$F_{RP} = 200kg \cdot 9.81m/s^2 = 1962 \text{ N}$$

$$W_x = w \cdot \text{sen}(61) \cdot 9.81$$

$$W_x = 41.5 \cdot \text{sen}(61) \cdot 9.81$$

$$W_x = 356 \text{ N}$$

$$F_1 = 981 + 1962 + 356$$

$$F_1 = 3299 \text{ N}$$

Hallamos el momento:

Para un  $r = 432 \text{ mm}$

$$W = 41.5 \text{ kg} \cdot 9.81m/s^2 = 407.1 \text{ N}$$

$$M = W \cdot \cos(61) \cdot r$$

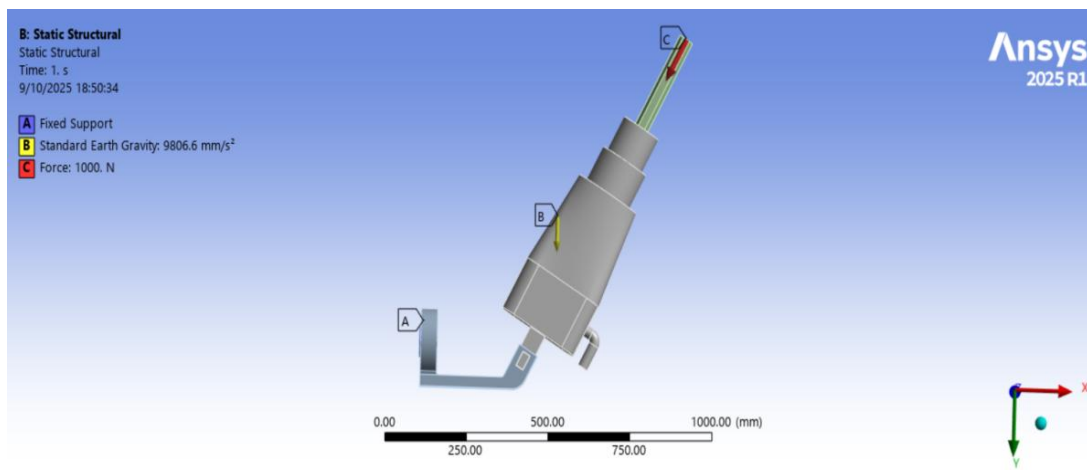
$$M = 407.1 \cdot \cos(61) \cdot 0.43$$

$$M = 84.86 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La fuerza pico de 3299 N corresponde al impacto instantáneo generado por el pistón contra el yunque; sin embargo, diversos estudios experimentales demuestran que solo una fracción de esta fuerza retorna al cuerpo del martillo debido al corto tiempo de impulso, la masa percutora interna y el desacoplamiento mecánico del sistema de impacto. Debido a que los fabricantes de martillos neumáticos no proporcionan la magnitud exacta de la fuerza de reacción transmitida al soporte durante el impacto, y considerando que se trata de un fenómeno altamente dinámico de difícil medición, se aplica el criterio recomendado por normas internacionales de seguridad mecánica, tales como ISO 12100 e ISO 13849, las cuales establecen que ante incertidumbre en la carga real se debe adoptar un valor conservador que represente el peor escenario razonable. En este sentido, se selecciona una carga de reacción del 30% de la fuerza pico en este caso se toma 1000 N como valor de diseño sobredimensionado, garantizando la integridad estructural del adaptador aun cuando la reacción real pudiera ser menor.

### Figura 35

*Simulación de adaptador de herramienta y martillo neumático*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

Para obtener el esfuerzo de Von-Mises no se presenta el cálculo manual exacto de  $\sigma_{VM}$  porque la pieza tiene contactos friccionales y concentraciones que generan un campo 3D no representable con fórmulas cerradas sin idealizaciones fuertes. Se adopta el  $\sigma_{VM}$  máximo reportado por ANSYS.

En un sólido sometido a un estado general de tensiones tridimensional, los esfuerzos normales ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) y cortantes ( $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ) se combinan para producir deformaciones elásticas y de distorsión. El criterio de Von Mises considera únicamente la energía de distorsión (no la volumétrica), y se expresa matemáticamente como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]}$$

Esta expresión permite evaluar de forma precisa la resistencia del material frente a cargas multiaxiales, siendo el criterio empleado por el software ANSYS para el análisis de esfuerzos equivalentes.

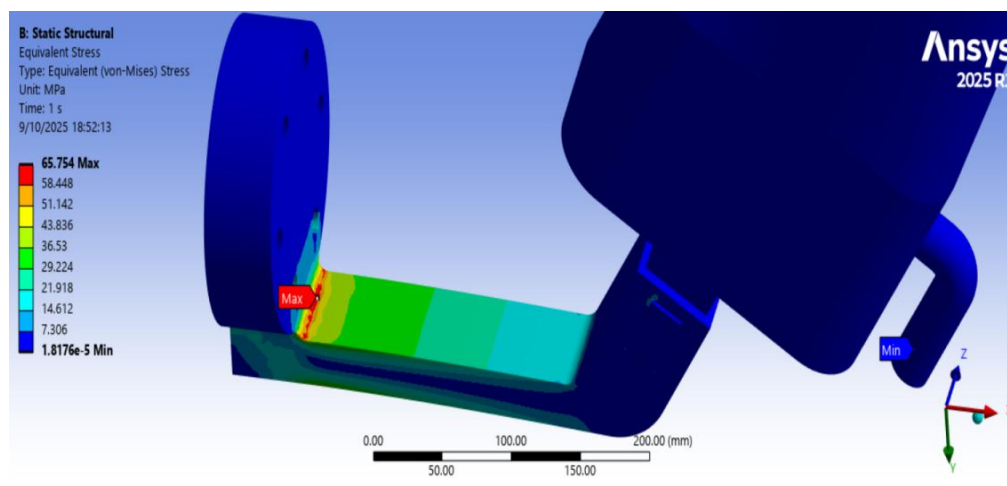
Para una fuerza de reacción en la cara normal al cincel del martillo tenemos  $F_R = 1000$  N.

A partir de la simulación estructural estática en ANSYS Workbench obtenemos:

$$\sigma_{VM} = 65.754 \text{ MPa}$$

### Figura 36

*Resultado del esfuerzo de Von-Mises*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Factor de seguridad

Límite elástico del material AISI 4140

$$\sigma_Y = 675 \text{ MPa}$$

Ahora obtenemos el factor de seguridad

$$FS = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{VM}}$$

$\sigma_Y$ : límite elástico del material

$\sigma_{VM}$ : esfuerzo equivalente de Von Mises

Para un factor de seguridad óptimo tenemos que:

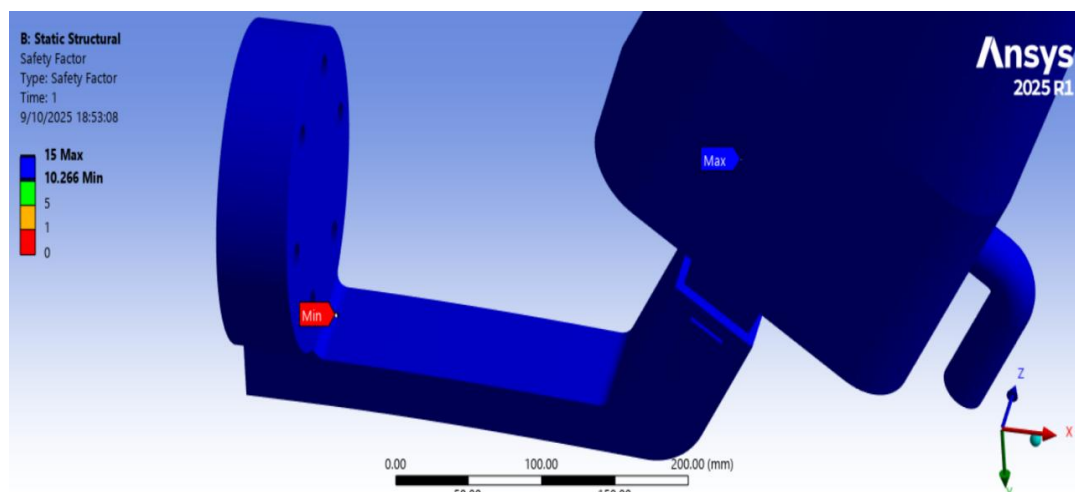
$$FS > 2.5$$

$$FS = \frac{675}{65.754} = 10.26$$

$$FS = 10.26$$

### Figura 37

*Resultado del factor de seguridad*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Fatiga por cargas repetitivas

Impactos por minutos = 1200-1400.

$1200 \text{ ipm} = 1200 \times 60 = 72\,000 \text{ impactos/hora} = 72\,000 \text{ ciclos}$

72000 ----- 1h

1000000 ----- x

X= 13.9h

Para la simulación se considera  $1 \times 10^6$  ciclos que equivale a 13.9h de tiempo de evaluación.

$N_a = 1 \times 10^6$

La evaluación del daño por fatiga se realizó por la ley de Miner, donde D se expresa como:

$$D = \frac{N_a}{N_f}$$

D: daño acumulado por fatiga.

$N_a$ : número de ciclos aplicados.

$N_f$ : número de ciclos hasta el fallo.

Si  $D < 1$  el componente no presenta falla por fatiga.

En la simulación en el software ANSYS se obtiene un valor máximo de 0.1, lo que indica que en 13.9h de operación continua solo hubo un daño de 10%.

La vida a fallo es:

$$N_f = \frac{N_a}{D} = \frac{10^6}{0.1} = 1 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

Convertimos los ciclos en horas de trabajo continuo según los ciclos por hora que general el martillo.

$1 \times 10^7$  ----- xh

72 000 ----- 1h

$$x = \frac{10\,000\,000 \text{ ciclos}}{72\,000 \text{ ciclos/h}} = 138.9 \text{ h}$$

Si consideramos que los cambios de pernos se den 3 veces al mes y la extracción por perno es de 1 min y como máximo se va a extraer 3 a 5 pernos con el uso martillo, la extracción de esos pernos en un mes sería de 15 min de trabajo continuo.

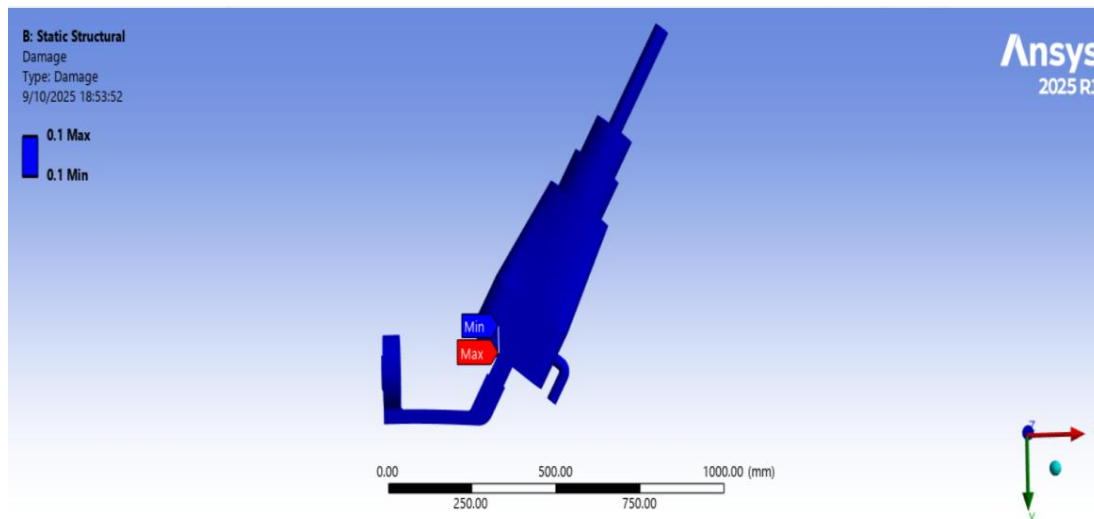
En un año sería de 3 horas de trabajo continuo y para que empiece a fallar el adaptador tiene que pasar 46 años.

En el caso de que se haga un cambio general de los pernos del *Shell* del molino de bolas de 816 pernos, tendría que pasar como mínimo 3 años de uso continuo.

La vida útil del adaptador para la herramienta martillo neumático es 46 años, una cifra considerable para el uso de paradas de emergencia. Sin embargo, para una parada programada del cambio general de los pernos del *Shell* la vida útil disminuye a 3 años, por lo cual es aceptable ya que se le da un uso considerable al adaptador.

### Figura 38

*Resultados de falla por fatiga*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### 4.2.1.2 Cálculo y simulación para adaptador y pistola de impacto

La herramienta usada para realizar el cálculo y la simulación del adaptador es la pistola de impacto modelo INGERSOLL RAND 2955 B2, por lo cual para la realización del cálculo del adaptador de herramienta se ha considerado realizar la representación de cargas por medio de diagrama de cuerpo libre (DCL), así también el uso de referencias de ensayos que se hicieron con este tipo de herramientas para tener una reacción real de lo que soportaría el adaptador.

**Tabla 12**

*Especificaciones del producto INGERSOLL RAND 2955 B2*

Modelo	Estilo	Accionamiento		Impactos por Minuto	Intervalo de par Recomendado	
		Tipo	Tamaño		Avance ft-lb (Nm)	Retroceso ft-lb (Nm)
2955B2	Gatillo Interior	Cuadrado	1.5"	700	1600-3750 [4500 Max] (2170-5100 [6100 Max])	1600-3750 [4500 Max] (2170-5100 [6100 Max])

Modelo	Nivel Sonoro dB(A) (ISO 15744)		Vibración (m/s <sup>2</sup> ) (ISO 28927)	
	† Presión (L <sub>p</sub> )	‡ Potencia (L <sub>w</sub> )	Nivel	*K
2955B2	98.2	109.2	18	4

† K<sub>PA</sub> = 3dB de error  
‡ K<sub>WA</sub> = 3dB de error

\* K = de error (Vibración)

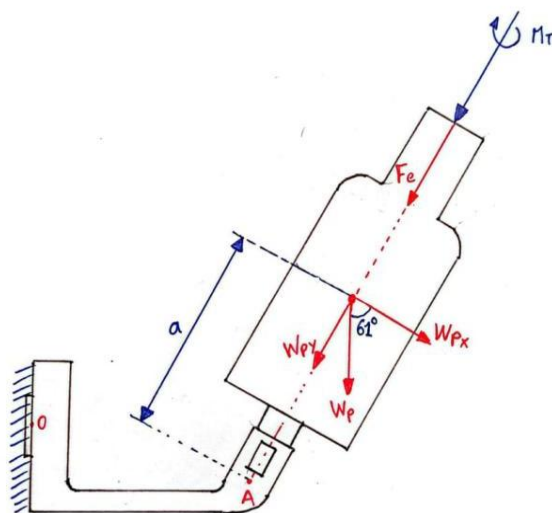
Fuente: elaboración propia del autor.

Impactos por minuto = 700

Para el adaptador de herramienta y la carcasa se seleccionó el acero AISI 4140 debido a su elevada resistencia a la tracción (675 MPa) y su buena tenacidad frente a la fatiga, lo que asegura un adecuado desempeño bajo cargas repetitivas sin deformaciones prematuras. En el caso del dado se eligió el acero AISI 4340, ya que presenta una mayor resistencia al impacto y alto torque.

**Figura 39**

*DCL de adaptador-pistola neumática*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

$F_e$  = fuerza de empuje

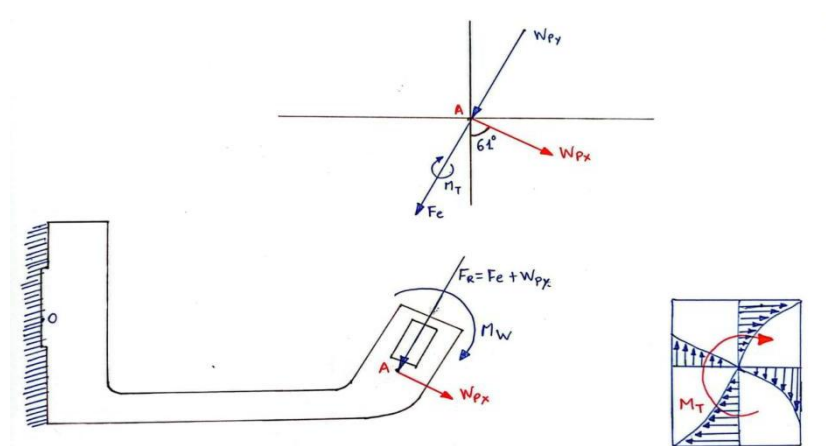
$M_T$  = momento producido por la torsión de la pistola

$W_p$  = peso de la llave de impacto = 17.85 kg

Fuerzas concurrentes en el punto A.

### Figura 40

*DCL de adaptador de herramienta sometido a cargas estáticas.*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

$$F_R = F_e + w_{py} \quad (F_e : \text{asumo una fuerza de empuje de } 20\text{kg})$$

$$F_R = 20\text{kg} \cdot 9.81\text{m/s}^2 + 17.85\text{kg} \cdot \text{sen}(61) \cdot 9.81\text{m/s}^2$$

$$F_R = 349.35 \text{ N}$$

$$w_{px} = w_p \cdot \cos(61) \cdot 9.81$$

$$w_{px} = 17.85 \cdot \cos(61) \cdot 9.81$$

$$w_{px} = 84.89 \text{ N}$$

$$\text{Para } a = 346 \text{ mm}$$

$$M_w = w_{px} \cdot a$$

$$M_w = 84.89 \cdot 0.34$$

$$M_w = 28.86 \text{ N} - \text{m}$$

Según evaluación de este tipo de herramientas el momento de reacción que se ejerce entre la pistola neumática y el adaptador es menor a la que ejerce la pistola a la tuerca al ajustar.

Diversos experimentos (Radwin 1989; Lindqvist 1993; Kihlberg 1995; Dong 2008) demuestran que la transmisión de torque en herramientas de impacto corresponde típicamente entre 1% y 8% del torque nominal, debido a la naturaleza impulsiva del mecanismo martillo-yunque.

Para la simulación del adaptador se considera la pistola de impacto modelo INGERSOLL RAND 2955 B2 y se adopta un valor conservador de 5% del torque nominal de 6100 Nm, esto equivale a 305 Nm de momento torsional que soportara el adaptador de herramienta, cabe resaltar que son picos de momentos que soportara el adaptador debido al sistema martillo-yunque.

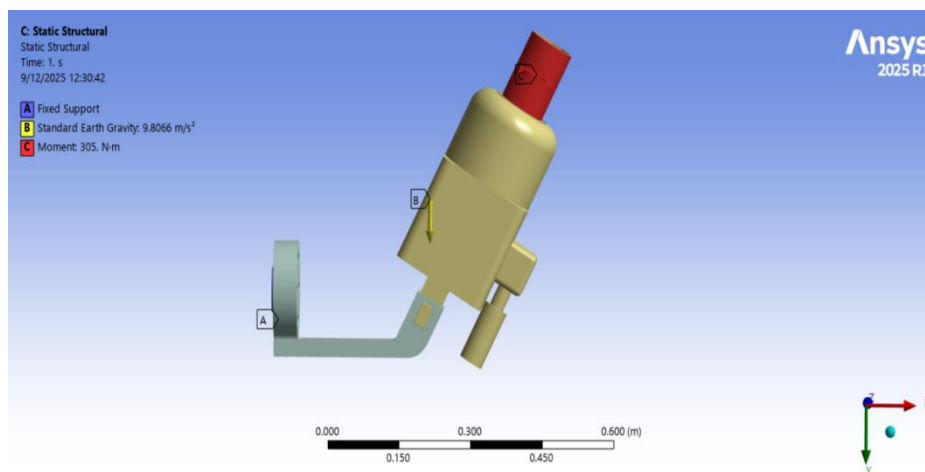
Torque de impacto máximo: 6100 Nm

Porcentaje de reducción de impacto: 5%

$$M_{reacción} = 6100 * 0.05 = 305 \text{ Nm}$$

#### **Figura 41**

*Adaptador - pistola neumática*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Esfuerzo de Von-Mises

Para evaluar el esfuerzo máximo generado en simulación, se considera un momento en la cara del dado en sentido antihorario lo cual indica que al ajustar la tuerca la pistola ejercerá una reacción, en este caso de 305 N-m.

No se presenta el cálculo manual exacto de  $\sigma_{VM}$  porque la pieza tiene contactos friccionales y concentraciones que generan un campo 3D no representable con fórmulas cerradas sin idealizaciones fuertes. Se adopta el  $\sigma_{VM}$  máximo reportado por ANSYS.

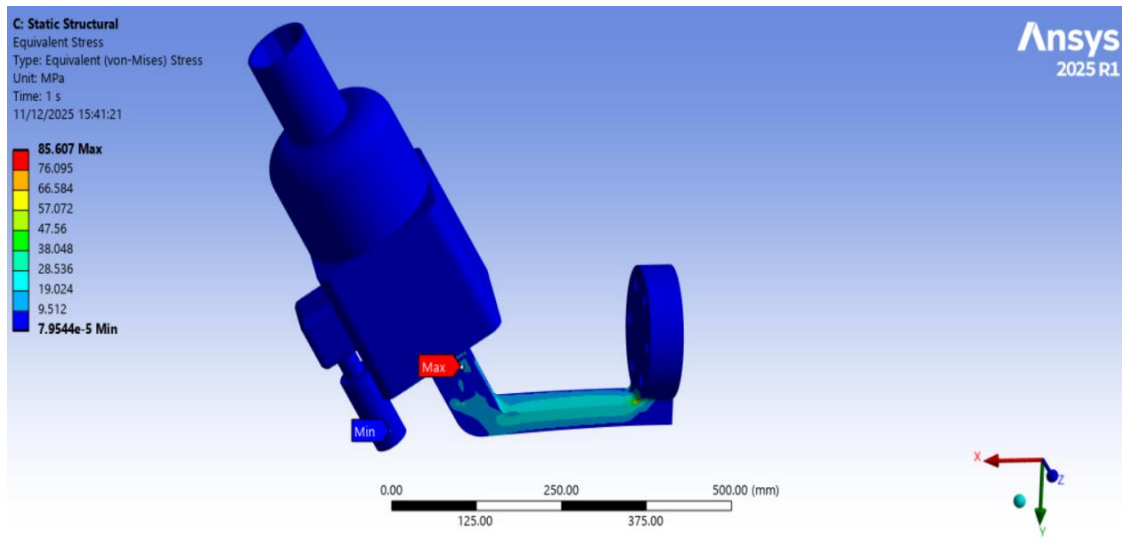
En un sólido sometido a un estado general de tensiones tridimensional, los esfuerzos normales ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) y cortantes ( $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ ) se combinan para producir deformaciones elásticas y de distorsión. El criterio de Von Mises considera únicamente la energía de distorsión, y se expresa matemáticamente como:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]}$$

$$\sigma_{VM} = 85.6 \text{ MPa}$$

### Figura 42

*Resultados esfuerzo de Von-Mises*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Factor de seguridad

Límite elástico en tracción del material AISI 4140

$$\sigma_Y = 675 \text{ MPa}$$

Ahora obtenemos el factor de seguridad:

$FS > 2.5$  Factor de seguridad para carga estática

$$FS = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{VM}}$$

$\sigma_Y$ : *límite elástico del material*

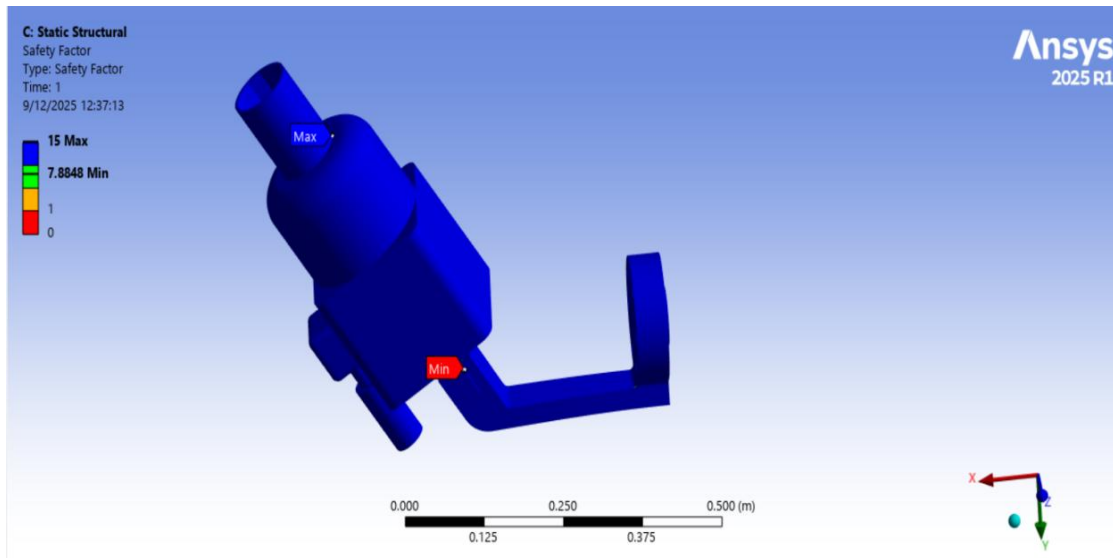
$\sigma_{VM}$ : *esfuerzo equivalente de Von Mises*

$$FS = \frac{675}{85.6} = 7.88$$

$$FS = 7.88$$

### Figura 43

*Resultados del factor de seguridad*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Fatiga por cargas repetitivas

Impactos por minuto de la pistola de impacto = 700

700 ipm = 700x60 = 42 000 impactos/ hora = 42 000 ciclos, se toma un numero de ciclos aplicados para evaluación de fatiga de  $1 \times 10^6$ .

42 000 ----- 1h

1 000000 ----- x

X= 23.8 h

La evaluación del daño por fatiga se realizó por la ley de Miner, donde D se expresa como:

$$D = \frac{N_a}{N_f}$$

Si  $D < 1$  el componente no presenta falla por fatiga.

Para la simulación tomamos un valor de  $N_a = 1 \times 10^6$  ciclos.

En la simulación en el software ANSYS se obtiene un valor máximo y mínimo de daño de 0.1, lo que indica que solo hubo un daño de 10% en  $1 \times 10^6$  ciclos.

La vida a fallo es:

$$N_f = \frac{N_a}{D} = \frac{10^6}{0.1} = 1 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

Convertimos los ciclos en horas de trabajo continuo según los ciclos por hora que general el martillo.

$$1 \times 10^7 \text{ ----- } xh$$

$$42\ 000 \text{ ----- } 1h$$

$$x = \frac{10\ 000\ 000 \text{ ciclos}}{42\ 000 \text{ ciclos/h}} = 238 \text{ h}$$

Si consideramos que los cambios de pernos se den 3 veces al mes y se considera el desapriete y el ajuste por perno es de 1 min y como máximo se va a extraer 3 a 5 pernos con el uso de la pistola de impacto, el desapriete y el ajuste de esos pernos en un mes sería de 15 min de trabajo continuo.

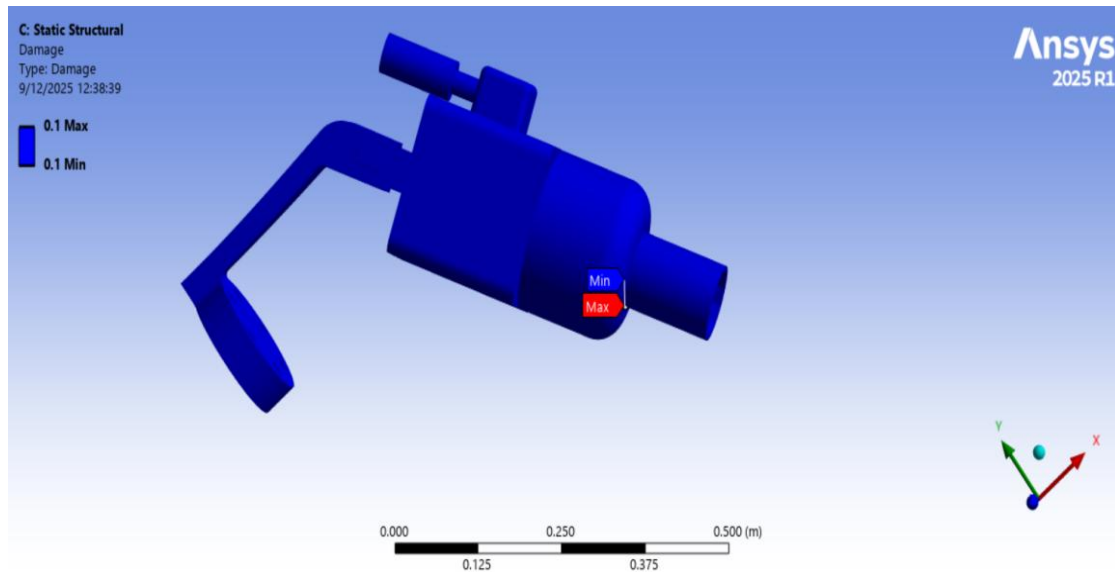
En un año sería de 3 horas de trabajo continuo y para que empiece a fallar el adaptador tiene que pasar 79 años.

En el caso de que se haga un cambio general de los pernos del *Shell* del molino de bolas de 816 pernos, tendría que pasar como mínimo 4 años de uso continuo.

La vida útil del adaptador para la herramienta pistola de impacto es de 79 años, una cifra considerable para el uso de paradas de emergencia. Sin embargo, para una parada programada del cambio general de los pernos del *Shell* la vida útil disminuye a 4 años, por lo cual es aceptable ya que se le da un uso considerable al adaptador.

#### **Figura 44**

*Resultados de falla por fatiga*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.2.1.3 Selección de Tool Changer

Dado que el brazo robótico realiza tareas repetitivas y requiere el intercambio automático de herramientas, se seleccionó un *Tool Changer* adecuado para este propósito. La elección se basó en las dimensiones de la brida del brazo robótico KUKA KR-16 a escala, las cuales son compatibles con el patrón de montaje del modelo QC-110, basado en la norma ISO 9409-1, con nomenclatura 9409-1-125-6M10.

Para la unión entre la brida del robot y el *Máster Plate*, así como de la herramienta y el *Tool Plate* se emplearon pernos de cabeza cilíndrica Allen M10×70, de grado 12.9, junto con arandelas tipo *Nord-Lock*, a fin de garantizar una sujeción segura frente a cargas de impacto, momentos de torsión y vibraciones repetitivas.

La elección de este *Tool Changer* también se basa en la capacidad que puede resistir evaluado mediante momentos, para eso se ha realizado el cálculo, a fin de determinar si cumple con la resistencia a operaciones de cambio de pernos de revestimiento en el *Shell* del molino de bolas.

**Figura 45****Tool Changer QC-110**

**Nota.** Componentes principales del Tool Changer: Máster Plate y Tool Plate. Elaboración propia basada en catálogo técnico de ATI Industrial Automation (2024).

**Tabla 13****Tabla técnica de especificaciones Tool Changer**

MODEL	Suggested Payload Limit	Static Moment Capacity (X and Y)*	Static Moment Capacity (Z)*	Pneumatic Pass-Thru Ports (Qty) Size
QC-1	3 lb (1.4 kg)	8.7 lbf-in (0.983 Nm)	10.2 lbf-in (1.15 Nm)	(4) M5 or #10-32
QC-7	35 lb (16 kg)	180 lbf-in (20.3 Nm)	110 lbf-in (12.4 Nm)	(5) M5 or #10-32
QC-11	35 lb (16 kg)	180 lbf-in (20.3 Nm)	110 lbf-in (12.4 Nm)	(6) M5 or #10-32
QC-11 Hollow-Wrist	35 lb (16 kg)	180 lbf-in (20.3 Nm)	110 lbf-in (12.4 Nm)	See drawing
QC-20	55 lb (25 kg)	500 lbf-in (56.5 Nm)	690 lbf-in (78 Nm)	(12) M5 or #10-32
QC-20 Hollow-Wrist	55 lb (25 kg)	500 lbf-in (56.5 Nm)	690 lbf-in (78 Nm)	See drawing
QC-21	55 lb (25 kg)	500 lbf-in (56.5 Nm)	690 lbf-in (78 Nm)	(8) 1/8 NPT
QC-21 Hollow-Wrist	55 lb (25 kg)	500 lbf-in (56.5 Nm)	690 lbf-in (78 Nm)	See drawing
QC-22	55 lb (25 kg)	500 lbf-in (56.5 Nm)	800 lbf-in (90.4 Nm)	(6) 3/8 NPT
QC-29	77 lb (35 kg)	500 lbf-in (56.5 Nm)	690 lbf-in (78 Nm)	(2) 1/8 NPT, (4) #10-32 OR (2) G 1/8 (BSPP), (4) M5
QC-40Q	110 lb (50 kg)	2000 lbf-in (226 Nm)	2000 lbf-in (226 Nm)	(8) 1/8 NPT
QC-41	110 lb (50 kg)	1390 lbf-in (157 Nm)	1910 lbf-in (216 Nm)	(6) 3/8 NPT; (4) 1/8 NPT
QC-46	110 lb (50 kg)	2000 lbf-in (226 Nm)	1330 lbf-in (150 Nm)	
QC-71	180 lb (79 kg)	3500 lbf-in (395 Nm)	3500 lbf-in (395 Nm)	(8) 1/4 NPT
QC-76	220 lb (100 kg)	4800 lbf-in (542 Nm)	6200 lbf-in (701 Nm)	(5) 3/8 NPT
QC-110	330 lb (150 kg)	6940 lbf-in (784 Nm)	6940 lbf-in (784 Nm)	(8) 3/8 NPT
QC-160	660 lb (300 kg)	24000 lbf-in (2710 Nm)	20000 lbf-in (2260 Nm)	(5) 3/8 NPT; (4) 1/2 NPT

**Nota.** Tool Changer basada en catálogo técnico de ATI Industrial Automation (2024).

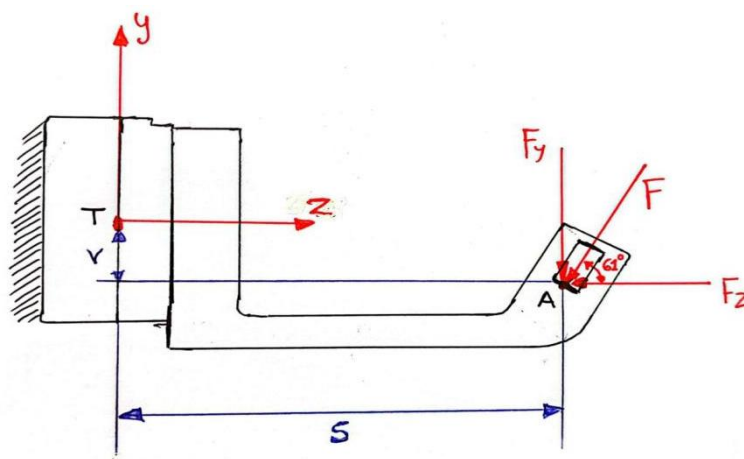
**Nota.** Tomado de software ANSYS 2025.

### Cálculo de momento flector en el eje X y Y.

Para realizar el cálculo de estos momentos tomaremos en cuenta a la herramienta martillo neumático por interactuar con una carga considerable de 1000 N, carga que se considera al momento de realizar la extracción del perno, así también se considera el peso del martillo que es de 41.5 kg, la carga se transfiere de la punta del martillo a el acople del adaptador en la superficie entre el adaptador de herramienta y el martillo.

**Figura 46**

*DCL de Tool Changer-adaptador de herramienta*



Fuente: Elaboración propia del autor.

Descomponemos las fuerzas en los ejes X y Z con un grado de inclinación de 61°.

$$F_y = \text{sen}(61) \cdot F$$

$$F_y = \text{sen}(61) \cdot 1000 = 874.6 \text{ N}$$

$$F_z = \text{cos}(61) \cdot F$$

$$F_z = \text{cos}(61) \cdot 1000 = 484.8 \text{ N}$$

Distancia del punto T al punto A medida en los distintos ejes:

$$s = 336 \text{ mm} = 0.34 \text{ m}$$

$$r = 64 \text{ mm} = 0.064 \text{ m}$$

Momentos respecto al punto T en los ejes X, Y y Z.

Momento flector:

$$M_{x1} = S \cdot F_y$$

$$M_{x1} = 0.34 \cdot 874.6$$

$$M_{x1} = 297.4 \text{ Nm}$$

$$M_{x2} = r \cdot F_z$$

$$M_{x2} = 0.064 \cdot 484.8$$

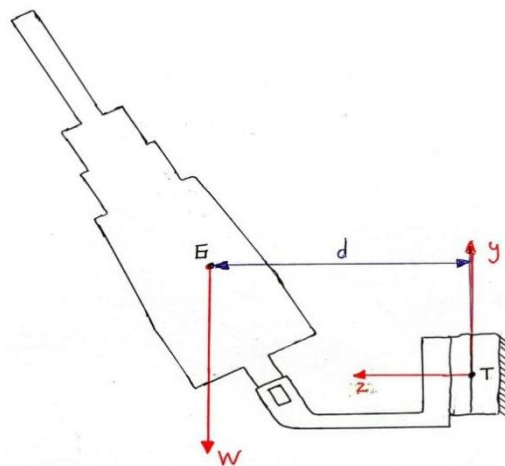
$$M_{x2} = 32 \text{ Nm}$$

**Cálculo de momento flector del centro de gravedad (G) del martillo al punto**

**T.**

**Figura 47**

*DCL de martillo neumático-Tool Changer*



**Nota:** Elaboración propia del autor.

Distancia del centro de gravedad (G) del martillo al punto T.

$$d = 454 \text{ mm} = 0.45 \text{ m}$$

Peso del martillo = 41.5 kg

$$W = 41.5 \cdot 9.81 = 407.1 \text{ N}$$

Momento del peso del martillo con respecto al punto T en el eje x.

$$M_{x3} = d \cdot W$$

$$M_{x3} = 0.45 * 407.1$$

$$M_{x3} = 183.2 Nm$$

$$M_x = M_{x1} + M_{x2} + M_{x3}$$

$$M_x = 297.4 + 32 + 183.2$$

$$M_x = 512.6 Nm$$

El momento en el eje Y es 0, debido a que el *tool changer* esta alineado al adaptador de herramientas y no existe una carga lateral para que pueda producirse un momento flector.

$$M_y = 0$$

#### **Momento torsional en el eje Z.**

El momento en el eje Z es igual al momento de reacción que genera la pistola de impacto neumática. Esta genera pulsos de reacción torsional al realizar el ajuste de la tuerca de:

$$M_z = 305 Nm$$

Finalmente, comparamos los momentos obtenidos por cálculo vs los momentos admisibles que da el fabricante para el *Tool Changer* QC-110.

**Tabla 14**

*Tabla de comparación de valores calculados y valores admisibles QC-110.*

<b>Parámetros</b>	<b>Valores calculados</b>	<b>Valores admisibles QC-110</b>	<b>Evaluación de resultados</b>
Momento flector en X	$M_x = 512.6 Nm$	$M_x = 784 Nm$	Si cumple

Momento flector en Y	$M_y = 0$	$M_y = 784 Nm$	Si cumple
Momento torsional en Z	$M_z = 305 Nm$	$M_z = 784 Nm$	Si cumple
Capacidad de carga	57 kg	150 kg	Si cumple

Fuente: Elaboración propia del autor.

En la comparación de momentos tanto del cálculo manual como de la tabla que da el fabricante se puede afirmar que el adaptador QC-110 es apropiado para el trabajo de cambio de pernos de revestimiento, de igual manera cumple con el peso que va a levantar siendo este la suma del adaptador de 15 kg más el martillo de neumático de 41.5 kg dando un total de 57 kg aproximadamente, lo cual es menor a la capacidad de carga que tiene el *Tool Changer* de 150 kg.

## 4.2.2 Cálculo y simulación cinemática

### 4.2.2.1 Cálculo mediante cinemática directa para la ubicación del TCP

Para la realización del cálculo matemático de cada articulación  $i$  se describe con cuatro parámetros:  $\alpha_i$  (ángulo entre ejes Z consecutivos),  $a_i$  (longitud del eslabón medida sobre X),  $\theta_i$  (ángulo articular) y  $d_i$  (desplazamiento a lo largo de Z). Para este robot a escala, se utilizaron los siguientes parámetros DH en la postura de referencia.

**Tabla 15**

*Tabla de Denavit-Hartenberg (DH)*

Eslabón	$\alpha_i(^{\circ})$	$a_i(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta (^{\circ})$
1	-90	552.9	1293.84	$q_1$
2	0	1319.98	0	$q_2 - 90^{\circ}$
3	-90	-44.43	0	$q_3$

4	90	0	1293.01	$q_4$
5	-90	0	0	$q_5$
6	0	0	394.72	$q_6 + 180^\circ$

*Nota.* Elaboración propia del autor.

### 4.2.3 Ecuación de la transformación homogénea

La transformación homogénea elemental  $A_i$  (usando la convención DH clásica)

es:

$$A_i = R_z(\theta_i) \cdot T_x(a_i) \cdot T_z(d_i) \cdot R_x(\alpha_i)$$

En forma matricial explícita:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i \cdot \cos\alpha_i & \sin\theta_i \cdot \sin\alpha_i & a_i \cdot \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cdot \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \cdot \sin\alpha_i & a_i \cdot \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

- $a_{i-1}$ : longitud del eslabón (mm).
- $\alpha_{i-1}$ : ángulo entre ejes Z consecutivo ( $^\circ$ ).
- $d_i$ : desplazamiento a lo largo de Z (mm).
- $\theta_i$ :  $q_i + \theta_i^{\text{off}}$ : variable angular + offset ( $^\circ$ ).

Transformadas individuales:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\text{sen}\theta_1 & 552.9 * \cos\theta_1 \\ \text{sen}\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 & 552.9 * \text{sen}\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 1293.84 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\text{sen}\theta_2 & 0 & 1319.98 * \cos\theta_2 \\ \text{sen}\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 1319.98 * \text{sen}\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\text{sen}\theta_3 & -44.43 * \cos\theta_1 \\ \text{sen}\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 & -44.43 * \text{sen}\theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & 0 & \text{sen}\theta_4 & 0 \\ \text{sen}\theta_4 & 0 & -\cos\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1293.01 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos\theta_5 & 0 & -\text{sen}\theta_5 & 0 \\ \text{sen}\theta_5 & 0 & \cos\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos\theta_6 & -\text{sen}\theta_6 & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 394.72 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tenemos para la posición de reposo:

$$q = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T, \quad q = [0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ \ 0^\circ]^T$$

$$\theta_1 = q_1 = 0^\circ, \quad \theta_2 = q_1 - 90^\circ = -90^\circ, \quad \theta_3 = q_1 = 0^\circ, \quad \theta_4 = q_1 = 0^\circ, \quad \theta_5 = q_1 = 0^\circ$$

$$\theta_6 = q_1 + 180^\circ = 180^\circ$$

La cinemática directa (pose del efector final respecto a la base) se obtiene como el producto de las seis transformaciones:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6$$

$${}^0T_6 = {}^0T_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 2240.63 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 2569.39 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta forma el TCP respecto a la base es:

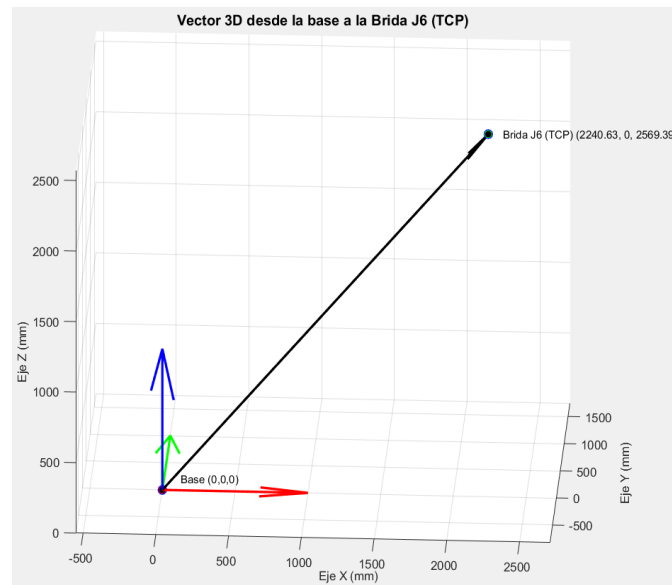
$$\text{TCP} = (x, y, z) = (2240.6 \text{ mm}, 0.0 \text{ mm}, 2569.4 \text{ mm}).$$

$$\text{Orientación} = (\alpha, \beta, \gamma) = (0^\circ, 90^\circ, 0^\circ).$$

$${}^0\xi_{TCP} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2240.63 \\ 0 \\ 2569.39 \\ 0^\circ \\ 90^\circ \\ 0^\circ \end{bmatrix}$$

**Figura 48**

*Vector de la base del robot a la brida (TCP)*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

Para tener una ubicación exacta en la posición inicial del robot, se hizo ajustes matemáticos, poniendo  $-90^\circ$  en la articulación 2 y  $180^\circ$  en la articulación 6.

Tenemos para la posición particular:

$q = [90^\circ, 45^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ]$ , reemplazando los valores en la tabla de Denavit-

Hartenberg tenemos:

$$\theta_1 = 90^\circ, \quad \theta_2 = 45^\circ - 90^\circ = -45^\circ, \quad \theta_3 = 0^\circ, \quad \theta_4 = 0^\circ, \quad \theta_5 = 0^\circ,$$

$$\theta_6 = 180^\circ$$

Transformadas individuales:

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 552.9 \\ 0 & -1 & 0 & 1293.84 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ para } \theta_1 = 90^\circ.$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.7 & 0 & 923.986 \\ -0.7 & 0.7 & 0 & -923.986 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ para } \theta_2 = -45^\circ.$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -44.43 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1293.01 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 394.72 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

el producto de las seis transformaciones:

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6$$

$${}^0T_6 = {}^0T_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -0.7 & 0 & 0.7 & 2648.26 \\ -0.7 & 0 & -0.7 & 1002.38 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De esta forma el TCP respecto a la base es:

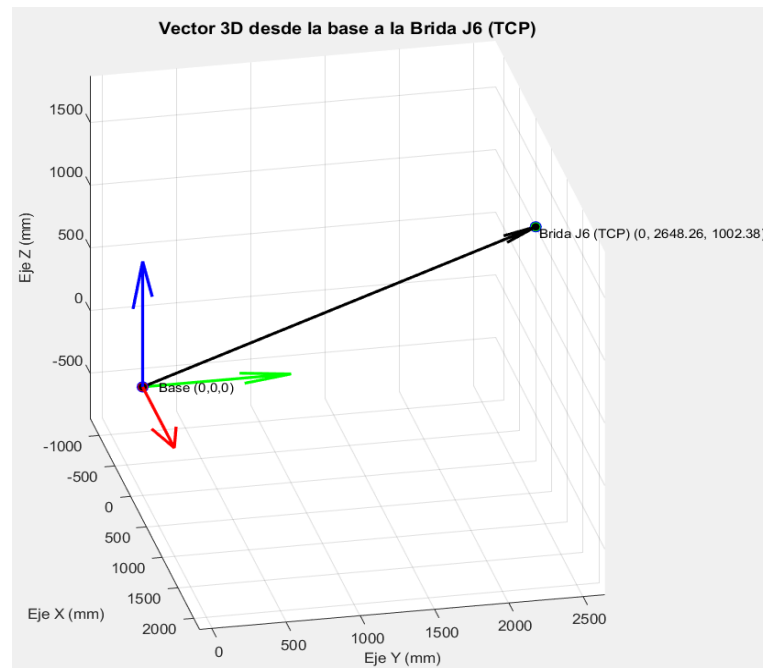
$$\text{TCP} = (x, y, z) = (0 \text{ mm}, 2648.26 \text{ mm}, 1002.38 \text{ mm}).$$

$$\text{Orientación} = (\alpha, \beta, \gamma) = (-135^\circ, 0^\circ, 90^\circ).$$

$${}^0\xi_{TCP} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2648.26 \\ 1002.38 \\ -135^\circ \\ 0^\circ \\ 90^\circ \end{bmatrix}$$

**Figura 49**

Vector de la base del robot a la brida (TCP) en posición particular del robot.



*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.2.3.1 Evaluación de TCP con el conjunto de herramienta- pistola neumática

Para determinar el TCP de la herramienta respecto a la base del robot, es necesario considerar al manipulador ubicado en su posición de reposo. Asimismo, debe incorporarse todo el conjunto de herramienta, es decir: el *tool changer*, el adaptador mecánico y la herramienta final, que en este caso corresponde a la pistola neumática. De esta manera, la localización del TCP se obtiene tomando en cuenta la configuración real y completa del sistema herramienta-robot.

En SOLIDWORKS se puede verificar las coordenadas que son necesarias para el TCP de la herramienta. Se tiene el TCP de la herramienta con las siguientes coordenadas:

$${}^{TCP}_{\xi_{Pistola}} = \begin{bmatrix} 439.084 \\ 0 \\ 673.372 \\ 0^\circ \\ 61^\circ \\ 0^\circ \end{bmatrix}$$

En forma matricial sería:

$${}^{TCP}T_{Pistola} = \begin{bmatrix} 0.4848 & 0 & 0.8746 & 439.084 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.8746 & 0 & 0.4848 & 673.372 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El TCP del conjunto de herramienta con respecto a la base del robot viene a ser:

$${}^0T_{Pistola} = {}^0T_{TCP} \cdot {}^{TCP}T_{Pistola}$$

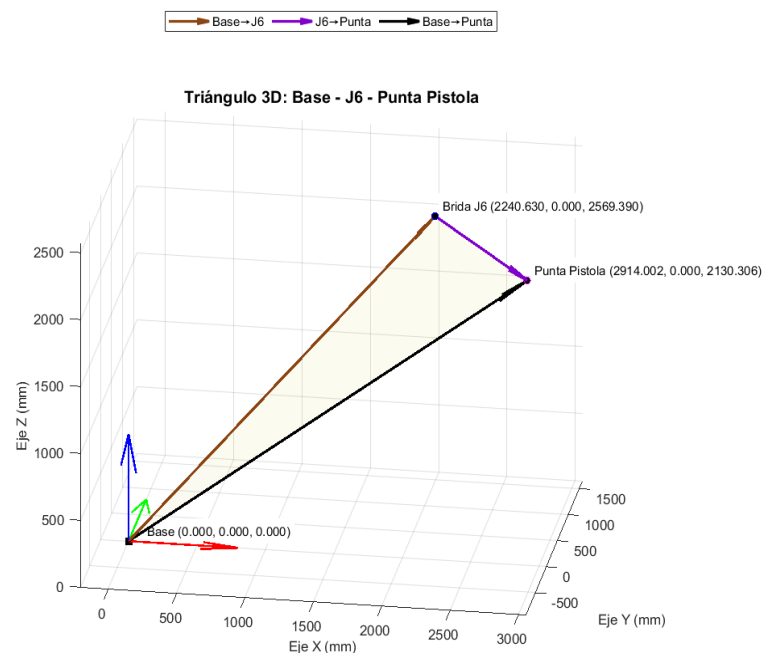
Reemplazando en la formula y multiplicando tenemos:

$${}^0T_{Pistola} = \begin{bmatrix} -0.8746 & 0 & 0.4848 & 2914.002 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.4848 & 0 & -0.8746 & 2130.306 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\xi_{Pistola} = \begin{bmatrix} 2914.002 \\ 0 \\ 2130.306 \\ 180^\circ \\ 29^\circ \\ 180^\circ \end{bmatrix}$$

**Figura 50**

*Vector base a la brida J6 y punta de pistola*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.2.3.2 Evaluación de TCP con el conjunto de herramienta- martillo neumático

Mediante el Software SOLIDWORKS se puede obtener las siguientes coordenadas del TCP del conjunto de herramienta:

$${}^{TCP}\xi_{Martillo} = \begin{bmatrix} 814.296 \\ 0 \\ 881.335 \\ 0^\circ \\ 61^\circ \\ 0^\circ \end{bmatrix}$$

En forma matricial seria:

$${}^{TCP}T_{Martillo} = \begin{bmatrix} 0.4848 & 0 & 0.8746 & 814.296 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.8746 & 0 & 0.4848 & 881.335 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El TCP del conjunto de herramienta con respecto a la base del robot viene a ser:

$${}^0T_{Martillo} = {}^0T_{TCP} \cdot {}^{TCP}T_{Martillo}$$

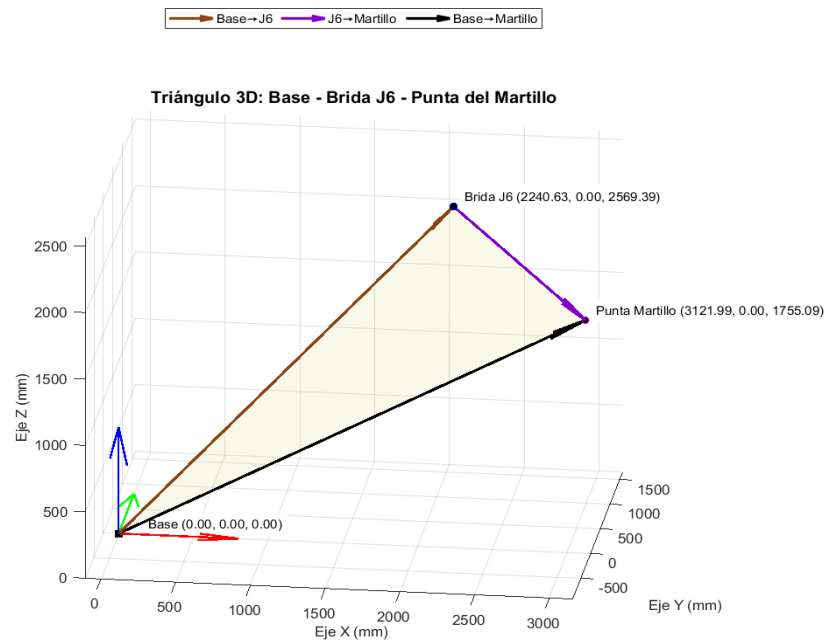
Reemplazando en la formula y multiplicando tenemos:

$${}^0T_{Martillo} = \begin{bmatrix} -0.8746 & 0 & 0.4848 & 3121.97 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.4848 & 0 & -0.8746 & 1755.09 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0\xi_{Martillo} = \begin{bmatrix} 3121.97 \\ 0 \\ 1755.09 \\ 180^\circ \\ 29^\circ \\ 180^\circ \end{bmatrix}$$

**Figura 51**

*Vector de la base del robot a la brida J6 y punta del martillo.*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.2.3.3 Evaluación de TCP con el conjunto de herramienta- cortador de tuercas

Tenemos el TCP del conjunto de herramienta con las siguientes coordenadas obtenidas del software SOLIDWORKS:

$${}^{TCP}\xi_{Cortador} = \begin{bmatrix} 34.354 \\ 0 \\ 692.647 \\ 0^\circ \\ 61^\circ \\ 0^\circ \end{bmatrix}$$

En forma matricial sería:

$${}^{TCP}T_{Cortador} = \begin{bmatrix} 0.4848 & 0 & 0.8746 & 34.354 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.8746 & 0 & 0.4848 & 692.647 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El TCP del conjunto de herramienta con respecto a la base del robot viene a ser:

$${}^0T_{Cortador} = {}^0T_{TCP} \cdot {}^{TCP}T_{Cortador}$$

Reemplazando en la formula y multiplicando tenemos:

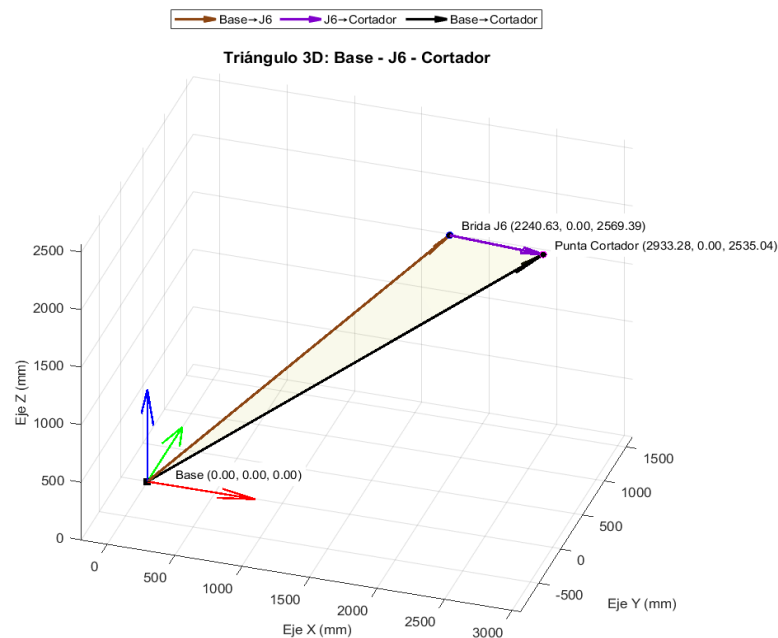
$${}^0T_{Cortador} = \begin{bmatrix} -0.8746 & 0 & 0.4848 & 2933.277 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -0.4848 & 0 & -0.8746 & 2535.036 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se ha usado la convención de ángulos de Euler Z-Y'-X''.

$${}^0\xi_{Cortador} = \begin{bmatrix} 2933.277 \\ 0 \\ 2535.036 \\ 180^\circ \\ 29^\circ \\ 180^\circ \end{bmatrix}$$

**Figura 52**

*Vector de la base del robot a la brida J6 y punta del cortador de tuerca.*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.2.3.4 *Cálculo mediante cinemática inversa para la ubicación de un perno del molino*

El cálculo de los ángulos articulares mediante cinemática inversa para diferentes posiciones del brazo robótico resulta un proceso complejo y extenso. Por este motivo, se ha optado por determinar los ángulos de las seis articulaciones únicamente para una posición específica: desde la posición inicial (base, posición 0) hasta la posición de un

perno del molino. De esta manera, se busca comprobar, mediante el cálculo analítico, la correspondencia con los valores obtenidos en la simulación para esa misma posición y comparar los ángulos obtenidos por ambos métodos.

**Tabla 16**

*Parámetros de Denavit-Hartenberg (DH)*

Eslabón	$\alpha_i(^{\circ})$	$a_i(\text{mm})$	$d_i(\text{mm})$	$\theta (^{\circ})$
1	-90	552.9	1293.84	$q_1$
2	0	1319.98	0	$q_2 - 90$
3	-90	-44.43	0	$q_3$
4	90	0	1293.01	$q_4$
5	-90	0	0	$q_5$
6	0	0	394.72	$q_6 + 180$

*Nota.* Elaboración propia del autor.

### Posición de reposo

Con los ángulos articulares  $q = [0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ , la matriz de transformación del TCP en reposo es:

$${}^0T_{TCP} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 2240.63 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 2569.39 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Se tiene la posición en superficie del perno:

$${}^0\xi_{perno} = \begin{bmatrix} 2604.900 \\ 78.602 \\ 2839.239 \\ 180^{\circ} \\ 79^{\circ} \\ -180^{\circ} \end{bmatrix}$$

En forma matricial se tiene:

$${}^0T_{perno} = \begin{bmatrix} -0.1908 & 0 & 0.9816 & 2604.900 \\ 0 & 1 & 0 & 78.602 \\ -0.9816 & 0 & -0.1908 & 2839.239 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Calcular ubicación del centro de la muñeca (wrist center):**

El centro de la muñeca se calcula retrocediendo desde el TCP una distancia  $d_6$  en dirección del eje z del efector final:

$$p_w = p - d_6 \cdot R \cdot \hat{z}$$

Donde  $\hat{z} = [0, 0, 0, 1]^T$

Extracción de datos

Vector posición TCP:

$$p_{TCP} = \begin{bmatrix} 2604.900 \\ 78.602 \\ 2839.239 \end{bmatrix}$$

El eje z del TCP es:

$$z_{TCP} = \begin{bmatrix} 0.9816 \\ 0 \\ -0.1908 \end{bmatrix}$$

En la tabla DH tenemos para  $d_6 = 394.72\text{mm}$

Cálculo de  $p_w$  centro de la muñeca.

$$p_w = p - d_6 \cdot R \cdot \hat{z}$$

$$p_w = \begin{bmatrix} 2604.900 \\ 78.602 \\ 2839.239 \end{bmatrix} - 394.72 \cdot \begin{bmatrix} 0.9816 \\ 0 \\ -0.1908 \end{bmatrix}$$

$$p_w = \begin{bmatrix} 2217.44 \\ 78.60 \\ 2914.55 \end{bmatrix}$$

**Cálculo de  $\theta_1$ :**

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_{w,x}, p_{w,y})$$

$$\theta_1 = \text{arctang}\left(\frac{p_{w,y}}{p_{w,x}}\right)$$

$$\theta_1 = \text{arctang}\left(\frac{78.60}{2217.44}\right)$$

$$\theta_1 = 2.03^\circ$$

**Calculo para  $\theta_3$ :**

**Cálculo de la distancia efectiva del codo a la muñeca**

Componentes de offset:

Desplazamiento de J3 al centro de la muñeca se tiene:

Componente horizontal:  $a_3 = 1319.98\text{mm}$

Componente perpendicular al plano del brazo:  $a_4 = -44.43\text{mm}$

Componente vertical:  $1293.01\text{mm}$

Para hallar  $\theta_3$  tenemos por dato:

$$p_{w,z} = 2914.556 \text{ mm}$$

$$a_3 = 1319.98 \text{ mm}$$

$$a_4 = -44.43 \text{ mm}$$

$$d_4 = 1293.01 \text{ mm}$$

Distancia de J3 al centro de la muñeca es:

$$L_{3,w} = \sqrt{a_3^2 + a_4^2 + d_4^2}$$

$$L_{3,w} = \sqrt{(1319.98)^2 + (-44.43)^2 + (1293.01)^2}$$

$$L_{3,w} = 1848.566\text{mm}$$

Rotar el centro de la muñeca al plano del brazo

$$p'_{w,x} = p_{w,x}\cos\theta_1 + p_{w,y}\sin\theta_1$$

$$p'_{w,x} = 2217.444 \cdot \cos(2.03) + 78.602 \cdot \sin(2.03)$$

$$p'_{w,x} = 2218.832\text{mm}$$

$$p'_{w,y} = -p_{w,x}\sin\theta_1 + p_{w,y}\cos\theta_1$$

$$p'_{w,y} = -2217.444 \cdot \sin(2.03) + 78.602 \cdot \cos(2.03)$$

$$p'_{w,y} = 0 \text{ mm}$$

Ajuste por offset perpendicular

$$a_4 = -44.43 \text{ mm}$$

Distancia efectiva al plano:

$$a_{3,eff} = \sqrt{a_3^2 + d_4^2} = a_{3,eff} = \sqrt{1319.98^2 + 1293.01^2}$$

$$a_{3,eff} = 1848.03 \text{ mm}$$

Distancia en el plano del brazo:

$$r = p'_{w,x} = 2218.832 \text{ mm}$$

$$s = p_{w,z} - d_1 = 2914.556 - 1293.84 = 1620.716 \text{ mm}$$

Distancia de J2 al centro de la muñeca:

$$L = \sqrt{r^2 + s^2}$$

$$L = \sqrt{2218.832^2 + 1620.716^2}$$

$$L = 2747.14 \text{ mm}$$

Ley de cosenos para distancia efectiva:

$$\cos(\theta_3) = \frac{a_2^2 + a_{3,eff}^2 - L^2}{2a_2a_{3,eff}}$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{552.9^2 + 1848.03^2 - 2747.714^2}{2 \cdot 552.9 \cdot 1848.03}$$

$$\cos(\theta_3) = -1.8737^\circ$$

El valor  $-1.8737^\circ$  para  $\cos(\theta_3)$  es un valor invalido, se necesita un modelo aún más refinado.

Consideración del ángulo offset.

$$\emptyset = \arctang\left(\frac{d_4}{a_3}\right) = \arctang\left(\frac{1293.01}{1319.98}\right)$$

$$\emptyset = 44.39^\circ$$

**Para calcular  $\theta_3$  aplicamos el modo iterativo o verificación inversa.**

Por el simulador ROBODK obtenemos un ángulo  $\theta_3 = -37.52^\circ$

Verificamos con cinemática directa:

$$\sin(-37.52) = -0.6088$$

$$\cos(-37.52) = 0.7934$$

El ángulo total de la configuración es:

$$\theta_3 + \emptyset = -37.52 + 44.39 = 6.87^\circ$$

Componente horizontal efectiva del eslabón 3 a muñeca:

$$a_{3,h} = a_3 \cos \theta_3 + d_4 \sin \theta_3$$

$$a_{3,h} = 1319.98 \cdot 0.7934 + 1293.01 \cdot (-0.6088)$$

$$a_{3,h} = 260.01 \text{ mm}$$

Componente vertical efectiva:

$$a_{3,v} = a_3 \sin \theta_3 + d_4 \cos \theta_3$$

$$a_{3,v} = 1319.98 \times (-0.6088) + 1293.01 \times 0.7934$$

$$a_{3,v} = 222.41 \text{ mm}$$

Con este resultado se puede comprobar que  $\theta_3 = -37.52^\circ$

**Para  $\theta_2$  tenemos:**

$$r = p_{w,x}^2 + p_{w,y}^2, \quad s = p_{w,z} - d_1$$

Tenemos el ángulo  $\theta_3 = -37.52^\circ$  conocido, calculamos  $\theta_2$ :

$$\theta_2 = \text{atan2}(s, r) - \text{atan2}(a_{3,v}, a_2 + a_3 \cos \theta_{3h})$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(1620.716, 2218.832) - \text{atan2}(222.41, 552.9 + 260.01)$$

$$\theta_2 = 20.85^\circ$$

**Cálculo de la matriz de rotación**

Con  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  ya conocidos encontramos la matriz de rotación desde la base a J3:

Rotación de la muñeca

$$R_0^3 = Rot_z(\theta_1) Rot_x(\alpha_1) Rot_z(\theta_2) Rot_x(\alpha_2) Rot_z(\theta_3) Rot_x(\alpha_3)$$

Matrices de rotación básica:

Rotación alrededor del eje Z:

$$Rot_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotación alrededor del eje X:

$$Rot_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

De la tabla DH:

$$J1: \alpha_1 = 0^\circ$$

$$J2: \alpha_2 = -90^\circ$$

$$J3: \alpha_3 = 0^\circ$$

Cálculo de rotaciones individuales:

$$\theta_1 = 2.03^\circ = 0.03544 \text{ rad}$$

$$Rot_z(2.03) = \begin{bmatrix} 0.99937 & -0.03544 & 0 \\ 0.03544 & 0.99937 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_z(0) = I_{3 \times 3}$$

$$\text{Para } \theta_2 = 18.86^\circ = 0.3292 \text{ rad.}$$

$$Rot_z(18.86) = \begin{bmatrix} 0.9451 & -0.3267 & 0 \\ 0.3267 & 0.9451 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_x(-90) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Para } \theta_3 = -37.52^\circ = -0.6548 \text{ rad.}$$

$$Rot_z(-37.52) = \begin{bmatrix} 0.7934 & -0.6088 & 0 \\ 0.6088 & 0.7934 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Rot_x(0) = I_{3 \times 3}$$

Para  $I_{3 \times 3} = 1$ , y reemplazando valores se tiene para:

$$R_0^3 = Rot_z(\theta_1)Rot_x(\alpha_1)Rot_z(\theta_2)Rot_x(\alpha_2)Rot_z(\theta_3)Rot_x(\alpha_3)$$

$$= \begin{bmatrix} 0.99937 & -0.03544 & 0 \\ 0.03544 & 0.99937 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.9451 & -0.3267 & 0 \\ 0.3267 & 0.9451 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.7934 & -0.6088 & 0 \\ 0.6088 & 0.7934 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_0^3 = \begin{bmatrix} 0.7404 & 0.5681 & -0.3600 \\ 0.2856 & 0.2191 & 0.9332 \\ 0.6088 & -0.7934 & 0 \end{bmatrix}$$

Cálculo de la matriz rotación:

$$R_3^6 = (R_0^3)^T \cdot R_0^6$$

Transpuesta de  $R_0^3$

$$(R_0^3)^T = \begin{bmatrix} 0.7404 & 0.2856 & 0.6088 \\ 0.5681 & 0.2191 & -0.7934 \\ -0.3600 & 0.9332 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de rotación objetivo:

$$R_0^6 = \begin{bmatrix} -0.1908 & 0 & 0.9816 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.9816 & 0 & -0.1908 \end{bmatrix}$$

$$R_3^6 = (R_0^3)^T \cdot R_0^6$$

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} 0.7404 & 0.2856 & 0.6088 \\ 0.5681 & 0.2191 & -0.7934 \\ -0.3600 & 0.9332 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -0.1908 & 0 & 0.9816 \\ 0 & 1 & 0 \\ -0.9816 & 0 & -0.1908 \end{bmatrix}$$

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} -0.7389 & 0.2856 & 0.6106 \\ 0.6704 & 0.2191 & 0.7090 \\ 0.0687 & 0.9332 & -0.3534 \end{bmatrix}$$

De la matriz  $R_3^6$  obtenemos datos para halla  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  y  $\theta_6$ .

Para  $\theta_4$  tenemos:

$$\theta_4 = \text{atan2}(R_{3,2}^6, R_{3,1}^6)$$

$$\theta_4 = \text{atan2}(0.9332, 0.0687)$$

$$\theta_4 = 1.4967 \text{ rad.}$$

$$\theta_4 = 85,76^\circ$$

Para  $\theta_5$  tenemos:

$$\theta_5 = \text{atan2}\left(\sqrt{(R_{3,1}^6)^2 + (R_{3,2}^6)^2}, R_{3,3}^6\right)$$

$$\sqrt{(R_{3,1}^6)^2 + (R_{3,2}^6)^2} = \sqrt{(0.0687)^2 + (0.9332)^2} = 0.9357$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(0.9357, -0.3534)$$

$$\theta_5 = 1.9287 \text{ rad.}$$

$$\theta_5 = 110.50^\circ$$

Para  $\theta_6$  tenemos:

$$\theta_6 = \text{atan2}(R_{2,3}^6, R_{1,3}^6)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(0.7090, 0.6106)$$

$$\theta_6 = 0.8614 \text{ rad.}$$

$$\theta_6 = 49.36^\circ$$

Terna calculada

$$(\theta_4, \theta_5, \theta_6) = (85.76^\circ, 110.50^\circ, 49.36^\circ)$$

Para muñeca esférica existen soluciones EULER equivalentes:

$$(\theta'_4, \theta'_5, \theta'_6) = (\theta_4 - 180^\circ, 180^\circ - \theta_5, \theta_6 - 180^\circ) = (-94.24^\circ, 69.50^\circ, -130.64^\circ)$$

ROBODK usa cero de ejes, signos y rangos distintos. Por tanto, defino *offsets* constantes

$\delta_4, \delta_5, \delta_6$  tales que:

$$\theta_{4,RDK} = \theta'_4 + \delta_4, \quad \theta_{5,RDK} = \theta'_5 + \delta_5, \quad \theta_{6,RDK} = \theta'_6 + \delta_6$$

$$\delta_4 = -4.02 - (-94.24) = 90.22^\circ$$

$$\delta_5 = 29.73 - 69.50 = -39.77^\circ$$

$$\delta_6 = 3.88 - (-130.64) = 134.52^\circ$$

Entonces tenemos para los ángulos con *offset* constante:

$$\theta_{4,RDK} = -94.24 + 90.22 = -4.02^\circ$$

$$\theta_{5,RDK} = 69.50 - 39.77 = 29.73^\circ$$

$$\theta_{6,RDK} = -130.64 + 134.52 = 3.88^\circ$$

**Tabla 17***Ángulos obtenidos por cálculo*

$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
2.04	20.85°	-37.52	-4.02°	29.73°	3.88°

Fuente: elaboración propia del autor.

**Figura 53***Ángulos obtenidos en el software ROBODK*

PERNO 05-08: Configuraciones del Robot (Mi Mecanismo)

Frente/Posterior  
 Frente  
 Posterior  
 Ambos

Codo arriba/abajo  
 Codo Arriba  
 Codo Abajo  
 Ambos

Invertir muñeca  
 No Invertida  
 Invertida  
 Ambos

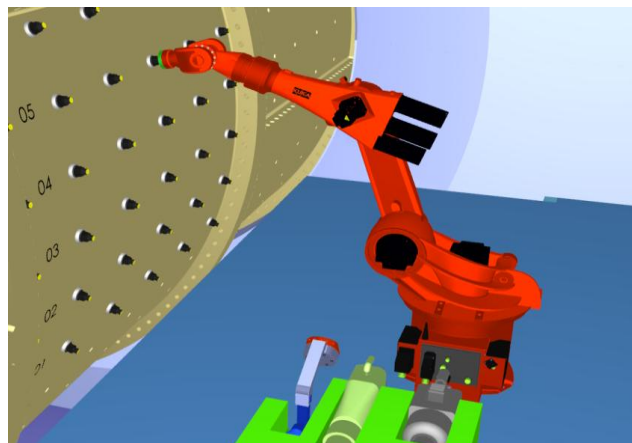
Mostrar todo

Recomendado

Config. id: 0,1,2,3,4,5,6,7

Mostrando: 10 / 10 configurations

	id	F/R	U/D	F/N	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	0	●	●	●	2.0	18.9	-37.5	-4.0	29.7	3.9
2	3	●	○	○	2.0	72.7	-146.4	178.0	-84.7	-179.4
3	2	●	○	●	2.0	72.7	-146.4	-2.0	84.7	0.6
4	1	●	●	○	2.0	18.9	-37.5	176.0	-29.7	-176.1
5	3	●	○	○	2.0	72.7	-146.4	-182.0	-84.7	-179.4
6	1	●	●	○	2.0	18.9	-37.5	-184.0	-29.7	-176.1
7	3	●	○	○	2.0	72.7	-146.4	178.0	-84.7	180.6
8	1	●	●	○	2.0	18.9	-37.5	176.0	-29.7	183.9
9	3	●	○	○	2.0	72.7	-146.4	-182.0	-84.7	180.6
10	1	●	●	○	2.0	18.9	-37.5	-184.0	-29.7	183.9

*Nota.* Elaboración propia del autor. Tomado de Software ROBODK**Figura 54***Posición de robot al perno*

*Nota.* Elaboración propia del autor.

Tras ejecutar el *wrist-flip* y aplicar los *offsets* de referencia de la muñeca, los ángulos calculados concuerdan con los obtenidos en ROBODK. Los valores de  $\theta_4$ ,  $\theta_5$  y  $\theta_6$  se mantienen iguales, mientras que  $\theta_2$  presenta una ligera diferencia de aproximadamente  $2^\circ$ , atribuible al redondeo numérico y a la distinta definición del cero articular en el simulador. La pose del TCP no se ve afectada, por lo que la solución se considera válida y verificada.

Esta verificación de la posición por cálculo, mediante cinemática inversa, es para comprobar que los ángulos que deben mover cada articulación son aproximados a los ángulos del robot KUKA KR 16 a escala, lo cual nos facilita entender que para cualquier posición puede ser comprobado por cálculo numérico, como el robot genera muchos movimientos el cálculo matemático se haría extenso, es por eso que mediante el software ROBODK se puede generar una gran cantidad de movimientos para cualquier posición que se requiera, en el caso de muestra para la simulación de cambio de pernos en el *Shell* del molino de bolas se ha considerado solo 3 pernos de forma aleatoria, este proceso de simulación cinemática se detalla a continuación.

#### **4.2.4 Simulación cinemática de cambio de pernos robotizado**

Se ha realizado la simulación del cambio de 3 pernos ubicados a diferentes distancias del *Shell* intermedio del molino de bolas lado norte, el primer perno está ubicado en la fila 05 y columna 10, el segundo perno en la fila 05 y columna 9 y por último el tercer perno en la fila 3 columna 6. Para la simulación se ubicó al molino en una posición de giro de  $7.5^\circ$  en sentido antihorario respecto de la línea central vertical del molino, para que el brazo robótico pueda interactuar libremente en el *Shell* del molino de bolas. Por consiguiente, esto beneficia en ambos lados del *Shell* del molino, tanto el lado sur como el lado norte para que puedan intervenir un brazo robótico independiente en

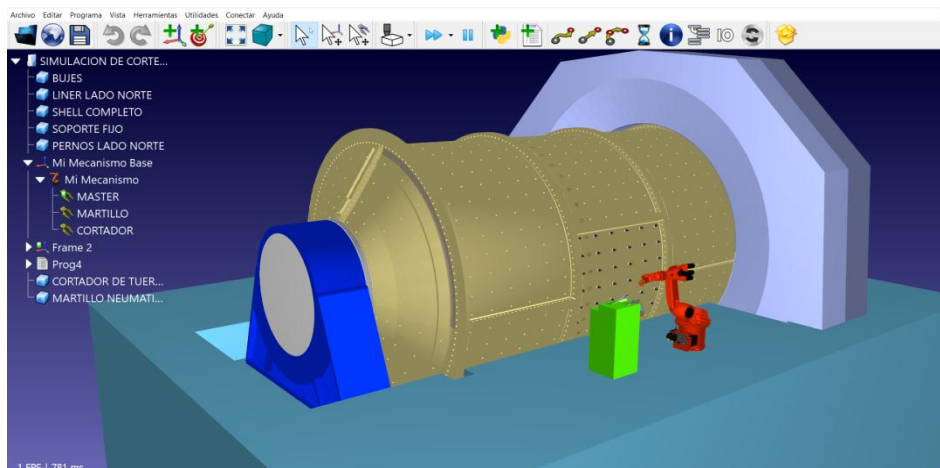
cada lado. Sin embargo, para este caso solo se hizo el uso de un brazo robótico en el lado norte.

La simulación se realizó en dos etapas, la primera etapa comprende el corte de tuercas y la extracción de pernos deteriorados. La segunda etapa comprende la instalación de pernos nuevos y el ajuste de estos. Para esta simulación se han usado pernos *Outside in bolt* para facilitar la simulación y sea 100% automático.

#### 4.2.4.1 Simulación de corte de tuercas y extracción de pernos deteriorados

**Figura 55**

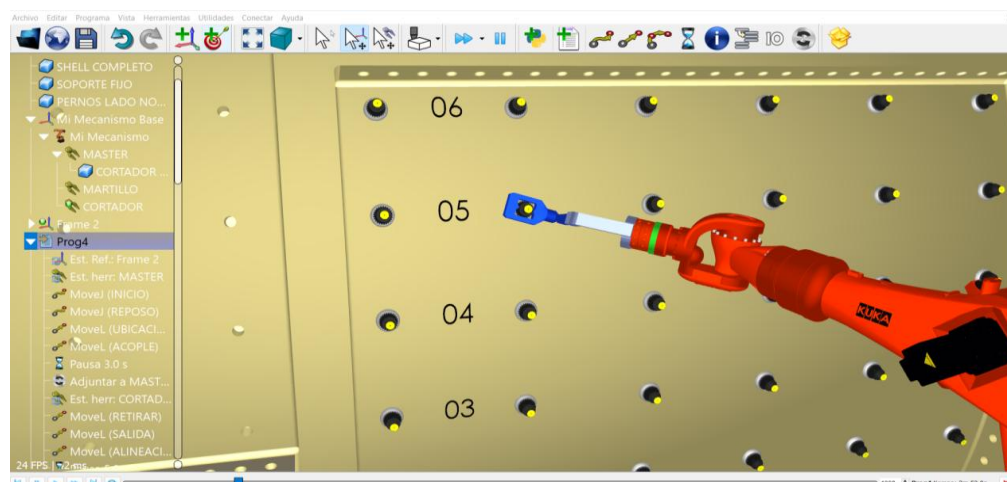
*Simulación de corte de tuercas y extracción de pernos deteriorados*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

**Figura 56**

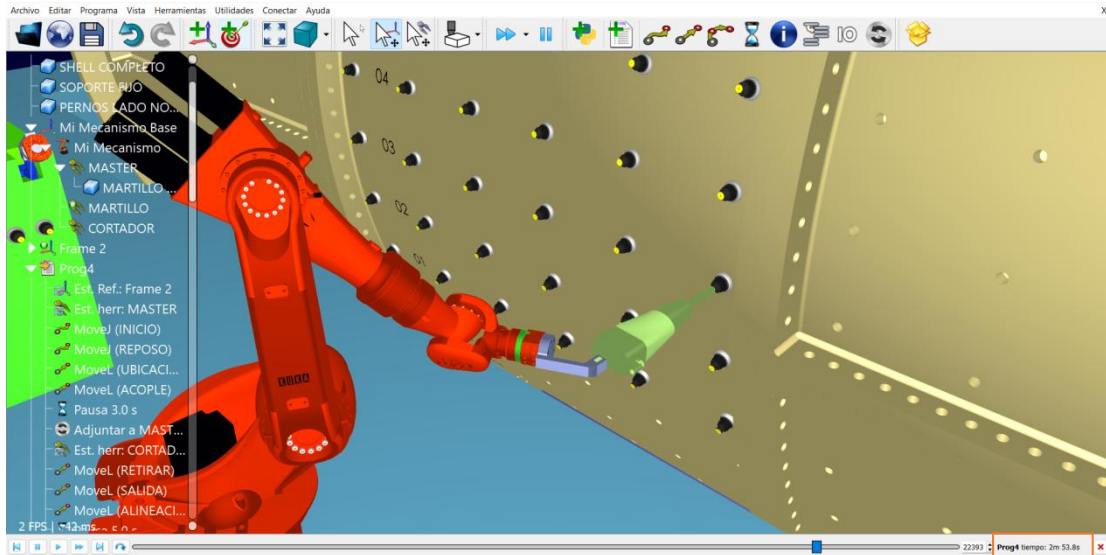
*Corte de tuercas con cortador de tuercas hidráulico*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

**Figura 57**

*Extracción de pernos con martillo neumático*



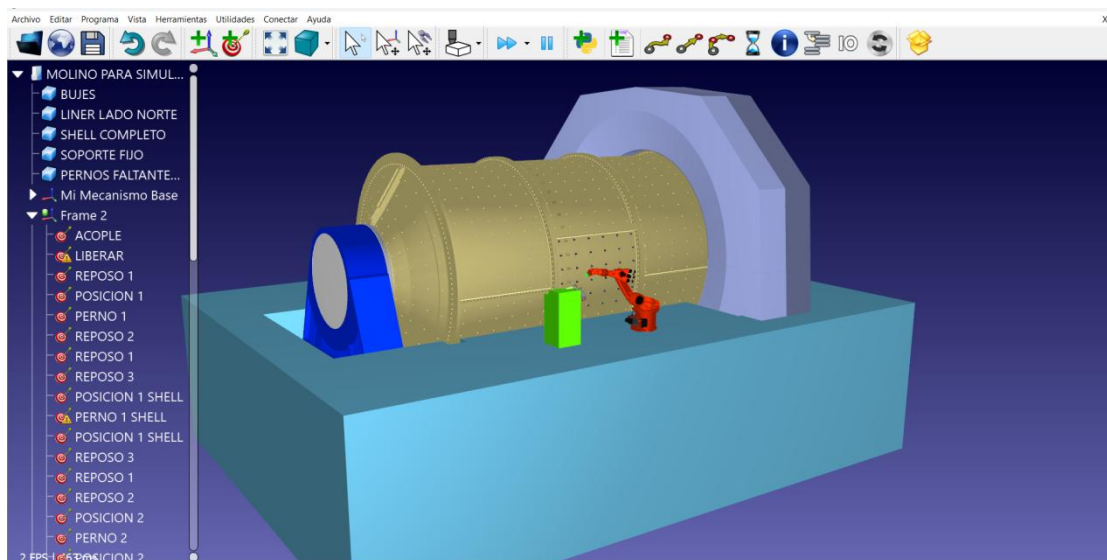
*Nota.* Elaboración propia del autor.

El tiempo de corte y extracción de perno es de 2 min 54 seg.

#### 4.2.4.2 Simulación de instalación y ajuste de pernos nuevos

**Figura 58**

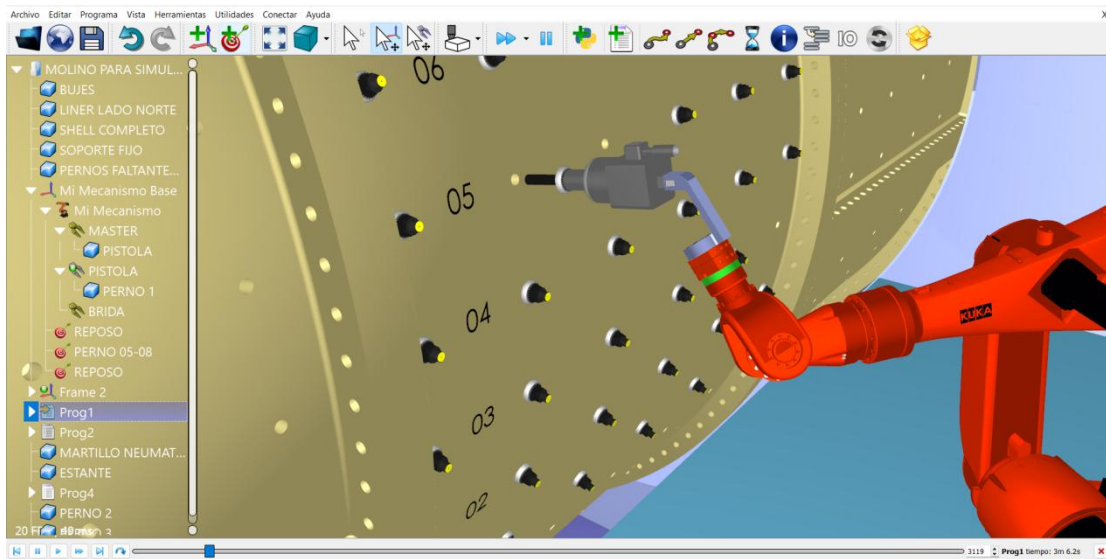
*Simulación de instalación de pernos nuevos y ajuste automatizado.*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

**Figura 59**

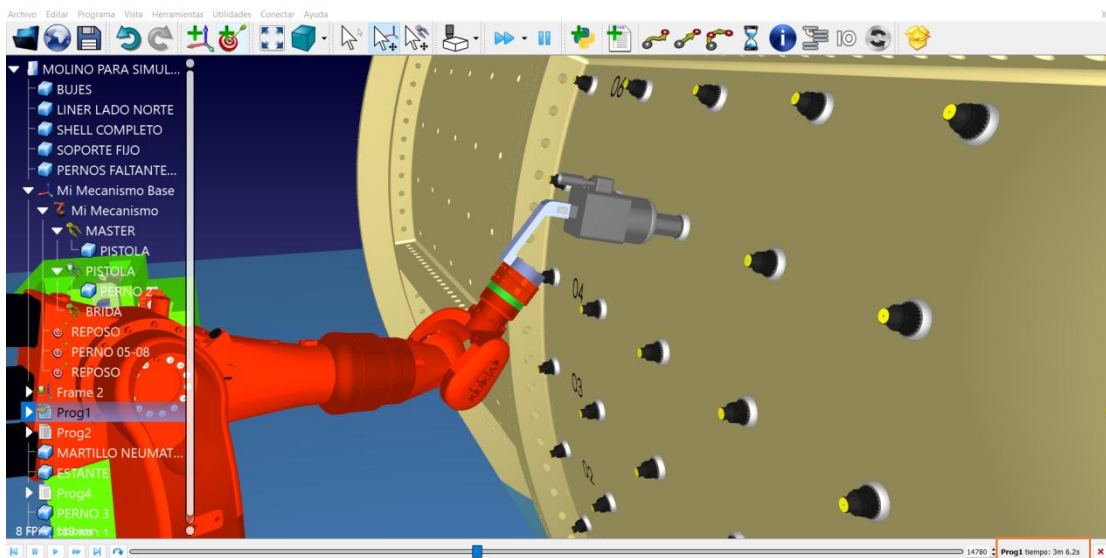
*Instalación de pernos nuevos con el uso de pistola neumática*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

**Figura 60**

*Torque de pernos con pistola de impacto*



*Nota.* Elaboración propia del autor.

El tiempo de instalación y ajuste de pernos es de 3 min con 6 seg.

Tiempo total de simulación para cambio de 3 pernos:

$$2 \text{ min} + 54 \text{ s} + 3 \text{ min} + 6 \text{ s} = \mathbf{6 \text{ min}}$$

Para obtener el tiempo total de parada del molino de bolas al realizar el cambio de 3 pernos se debe considerar tiempos de actividades operativas que forman parte del proceso.

**Tabla 18**

*Tiempo de cambio de pernos considerando actividades operativas de mantenimiento*

Tiempo de detención del molino	
Posicionamiento de molino	10 min
Bloqueo de molino de bolas (energía 0)	15 min
Actividades previas a cambio de pernos robotizado	10 min
Cambio de 3 pernos robotizado	6 min
Actividades post cambio de pernos robotizado	10 min
Desbloqueo del molino de bolas	15 min
<b>Tiempo total</b>	<b>66 min</b>

*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### **4.2.5 Cambio de pernos por el ser humano**

El mantenimiento de cambio de entre 3 a 5 pernos por lado en el *shell* de molino de bolas es realizado por 7 mecánicos y 2 soldadores, el tiempo para realizar dicho mantenimiento es tomado de datos de la minera Quellaveco, estos datos son de mantenimiento real de manera convencional usando pernos tradicionales, para realizar dicho cambio de pernos se ejecuta siguiendo un procedimiento.

##### **1. Bloqueo de equipo energizado**

###### **Figura 61**

*Bloqueo de equipo energizado*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

## **2. Retiro de chute móvil de alimentación**

### **Figura 62**

*Retiro de chute móvil*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

## **3. Corte de tuerca con equipo oxicorte**

### **Figura 63**

*Corte de tuerca con equipo oxicorte*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

#### **4. Extracción de perno con uso de martillo neumático**

##### **Figura 64**

*Extracción de pernos con martillo neumático*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

## 5. Instalación de pernos dentro del molino

**Figura 65**

*Instalación de pernos dentro del molino*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

## 6. Ajuste de pernos nuevos

**Figura 66**

*Ajuste de pernos recién instalados*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

**Figura 67**

*Molino de bolas, Quellaveco-Perú*



*Nota.* Fotografía propia del autor.

**Tabla 19**

*Tiempo de cambio de pernos en parada no programada de molino de bolas*

Orden	Campo de clasificación	Denominación de la ubicación técnica	Texto breve	Fecha de inicio de ejecución real	Fecha de fin de ejecución real	Hora de inicio de ejecución real	Hora de fin de ejecución real
4007566027	3210-MI-004	Molino Bolas 2 3210-MI-004	CAMBIO DE PERNOS MOLINO BOLAS 2	14/02/2024	14/02/2024	10:30	13:00
4009338305	3210-MI-004	Molino Bolas 2 3210-MI-004	CAMBIO DE PERNOS E INSPECCION DE FISURA	26/04/2024	26/04/2024	11:00	14:00
4007991742	3210-MI-004	Molino Bolas 2 3210-MI-004	RETORQUEAR PERNOS LINERS BOL2 3210MI004	27/05/2024	27/05/2024	15:00	17:20
4009315626	3210-MI-003	Molino Bolas 1 3210-MI-003	INSPECCIÓN Y CAMBIO DE PERNOS SHELL MB01	03/10/2024	03/10/2024	11:30	16:30
4009534773	3210-MI-004	Molino Bolas 2 3210-MI-004	CAMBIO DE PERNOS ROTOS EN SHELL MBOLA 2	27/10/2024	27/10/2024	09:00	12:00
4009626918	3210-MI-003	Molino Bolas 1 3210-MI-003	INSP/CAMBIO DE PERNOS FRACTURADOS MB001	29/10/2024	29/10/2024	14:00	16:30
4009622574	3210-MI-003	Molino Bolas 1 3210-MI-003	CAMBIO DE PERNOS SHELL Y SANDWHEEL MB01	21/11/2024	21/11/2024	11:00	16:00
4010192071	3210-MI-003	Molino Bolas 1 3210-MI-003	PL1_CAMBIO DE PERNOS ROTOS M.BOLAS 1	03/12/2024	03/12/2024	11:30	14:00
4010997454	3210-MI-003	Molino Bolas 1 3210-MI-003	CAMBIO PERNOS / INSTALACIÓN TAPONES MB1	05/12/2024	05/12/2024	09:00	12:00

*Nota: Tomado de datos de datos reales de mantenimiento de molino de bolas, Quellaveco.*

Por la tabla 19 se observa que el tiempo promedio para cambio de pernos de entre 3 a 5 pernos por lado del *shell* del molino, tanto lado norte como lado sur es de 2 a 5h. Durante alguna de estas actividades se ha tenido demoras por temas operativos de mantenimiento, así como desfase de revestimiento del *Shell* por pernos rotos, lo cual incremento el tiempo de parada del molino.

Según las observaciones de campo, el tiempo promedio que los mecánicos emplean para cambiar tres pernos por lado ubicados en el *shell* del molino de bolas es de aproximadamente 10 minutos. Además, cuando los pernos se encuentran en zonas de difícil acceso, el tiempo operativo aumenta, ya que es necesario realizar dos giros del molino para alcanzar dichas posiciones. Cada giro implica un nuevo bloqueo y desbloqueo del molino, lo que incrementa el tiempo total de intervención.

**Tabla 20**

*Cambio de pernos de revestimiento del Shell molino de bolas*

<b>Actividad para el cambio de tres pernos</b>	<b>Tiempo</b>
Giro de molino en dos posiciones	20 min
Bloqueo de molino y sistema de alimentación	30 min
Controles de seguridad	15 min
Retiro de chute móvil	15 min
Cambio de 3 pernos (contempla ingreso a espacio confinado)	10 min
Orden y limpieza del área de trabajo	10 min
Instalación de chute móvil	15 min
Desbloqueo del molino y sistema de alimentación	25 min
Tiempo total considerando actividades operativas	140 min

*Nota.* Elaboración propia del autor.

#### 4.2.6 *Impacto operativo*

La reducción del tiempo por perno y por ciclo operativo generado:

- Mayor disponibilidad del molino: Una reducción del 50 al 60 % en el tiempo total de mantenimiento implica recuperar entre 1 a 2 horas de operación en cada parada por cambio de pernos.
- Mejora de la seguridad: Se elimina la presencia continua del operario en el interior del molino, disminuyendo riesgos asociados a atrapamientos, ruido, vibración y espacios confinados.
- Estandarización del proceso: Las tareas ya no dependen de la variabilidad de la destreza humana; las trayectorias del robot son repetibles y controladas.

#### 4.2.7 *Impacto económico estimado*

- Recuperar horas de operación evitadas por paradas no programadas implica un aumento directo en la producción anual.
- Disminución del uso de herramientas manuales y menor desgaste humano reduce costos de mantenimiento y horas-hombre.
- Menor tiempo de exposición laboral reduce costos asociados a incidentes, seguros y sistemas de vigilancia operativa.

**Tabla 21**

*Resumen operativo de cambio de pernos y tiempo*

<b>Indicador</b>	<b>Método tradicional</b>	<b>Sistema robótico</b>	<b>Reducción lograda</b>
Tiempo total por perno	3.3 min	2 min	≈ 40 % menor
Tiempo medido por actividad crítica			
corte	--	9 s	

Extracción	--	10 s	
Sujeción magnética		7 s	
Instalación	--	3 s	
Ajuste	--	12 s	
Tiempo total estimado para cambio simultáneo de 3 pernos	10 min	6 min	Ahorro ≈ 40 %
Tiempo de parada del molino	2.3 h	1.1 h	Reducción ≈ 52.2 %

**Nota:** Elaboración propia del autor.

### 4.3 Contrastación de hipótesis

La hipótesis general planteó que la optimización mecánica y cinemática de un brazo robótico reduciría el tiempo requerido en el cambio de pernos de revestimiento del molino de bolas de la Minera Quellaveco. Para su verificación, se compararon los tiempos obtenidos en la simulación robótica con los tiempos reales registrados en el método tradicional de cambio de pernos, bajo condiciones equivalentes de trabajo.

De acuerdo con los resultados de las simulaciones desarrolladas en el software ROBODK, el tiempo total requerido para realizar las operaciones de corte, extracción, instalación y ajuste de tres pernos en el *shell* del molino fue significativamente menor en el sistema robótico respecto al proceso manual. En la simulación, el robot KUKA KR-16 a escala realizó el ciclo completo de cambio de tres pernos en un tiempo promedio de 6 min, con todo el procedimiento el tiempo de parada del molino es de 66 min, mientras que el proceso convencional requiere aproximadamente 10 min y un tiempo de parada del molino de 140 min, de acuerdo con los registros operativos de mantenimiento de planta y observaciones de campo.

Esta reducción de aproximadamente 52.2 % en el tiempo total evidencia una mejora sustancial en la eficiencia del proceso. La diferencia se explica por:

- La optimización cinemática del brazo, que permitió trayectorias más directas y sin interferencias.
- La integración del sistema de acople rápido (Tool Changer), que redujo el tiempo de intercambio de herramientas.
- La validación estructural del adaptador de herramientas mediante análisis de esfuerzos de Von Mises en ANSYS, que garantizó la resistencia del conjunto bajo cargas de impacto y torsión, sin deformaciones permanentes.

Asimismo, se observó que el robot mantiene una repetibilidad de trayectorias constante y no requiere pausas de seguridad o fatiga humana, factores que contribuyen a su ventaja temporal y a la seguridad operativa del entorno de trabajo. Por tanto, los resultados obtenidos confirman la hipótesis de investigación, demostrando que la optimización mecánica y cinemática del brazo robótico reduce de manera efectiva el tiempo de cambio de pernos de revestimiento en el molino de bolas. Este hallazgo valida la pertinencia del diseño propuesto y respalda la implementación futura de sistemas robóticos automatizados en operaciones de mantenimiento minero, con beneficios directos en productividad, seguridad y continuidad operacional.

## CAPÍTULO V

### DISCUSIÓN

#### 5.1 Pruebas de validación del modelo experimental

Debido a que el presente estudio se basó en modelado y simulación computacional, no se realizó una validación experimental física del modelo propuesto. La verificación de los resultados se efectuó mediante el análisis estructural en ANSYS y la validación cinemática en ROBODK, los cuales reproducen el comportamiento real de las trayectorias y esfuerzos. Por tanto, se considera que el modelo cumple con los parámetros teóricos y de simulación requeridos, pero su validación práctica quedará sujeta a una implementación futura en entorno industrial.

#### 5.2 Aplicación de la tecnología encontrada

La aplicación tecnológica del presente proyecto se fundamenta en la integración de herramientas digitales de simulación avanzada y en la implementación de tecnologías industriales de última generación, orientadas a optimizar el proceso de mantenimiento de los molinos de bolas en entornos mineros.

El uso de estas herramientas permitió validar virtualmente la factibilidad técnica del sistema robótico propuesto, reducir los tiempos de operación y minimizar la exposición del personal a riesgos de trabajo en espacios confinados o con alta carga térmica y de impacto. En primer lugar, se empleó el software ROBODK como plataforma central para el desarrollo de la simulación cinemática del brazo robótico KUKA KR-16 a escala, configurado con seis grados de libertad. Esta herramienta permitió modelar el entorno operativo del molino de bolas, asignar las coordenadas de trabajo, definir las trayectorias de movimiento y optimizar los ángulos articulares de cada eje.

Gracias a la precisión del simulador, fue posible predecir colisiones, zonas muertas y limitaciones de alcance, garantizando un desempeño cinemático fluido y seguro

durante las operaciones de cambio de pernos. De manera complementaria, se incorporó la tecnología de pernos tipo *Outside in Bolt*, la cual representa una innovación industrial orientada a disminuir los tiempos de desmontaje y montaje en el interior del molino. Esta tecnología permite realizar la fijación y liberación de los pernos desde el exterior del equipo, eliminando la necesidad de que el operario ingrese al molino, lo que reduce significativamente los riesgos de accidente y exposición prolongada.

Al combinar este sistema con el brazo robótico, se logró automatizar una tarea históricamente dependiente de la fuerza humana y altamente repetitiva, mejorando la ergonomía del proceso y la continuidad operacional. Otro componente clave de la tecnología aplicada fue el uso de un sistema de acople rápido o *Tool Changer*, que permite intercambiar de forma automática las herramientas requeridas para cada etapa: corte, extracción e instalación de pernos. Este sistema, controlado directamente por el software de simulación, permitió acortar los tiempos improductivos entre operaciones y mantener la continuidad de la secuencia automatizada. De esta forma, el robot pudo ejecutar un ciclo completo sin intervención humana directa, demostrando la viabilidad de un proceso completamente automatizado y repetible.

La combinación de estas tecnologías —RoboDK, *Outside in Bolt* y *Tool Changer*— representa un avance hacia la minería inteligente, enmarcada dentro de los principios de la Industria 4.0, donde la automatización, la digitalización y la inteligencia operacional permiten aumentar la productividad, reducir los costos de mantenimiento y mejorar la seguridad del personal. Además, la adopción de esta tecnología genera un impacto positivo en la sostenibilidad operativa, al minimizar el tiempo de parada de los equipos y prolongar la vida útil de los componentes mecánicos del molino. Finalmente, los resultados obtenidos en la simulación demuestran que la aplicación de la robótica industrial en operaciones mineras es técnicamente factible y operativamente ventajosa.

La precisión del modelo, la reducción del tiempo de operación y la disminución de la exposición humana a riesgos laborales validan la pertinencia de continuar con el desarrollo físico del prototipo.

Este sistema robótico optimizado puede convertirse en un referente para futuras implementaciones de mantenimiento automatizado en plantas mineras, contribuyendo a la transformación tecnológica del sector y al fortalecimiento de sus estándares de seguridad y eficiencia.

### **5.3 Contraste con trabajos de investigación similares**

En el estudio desarrollado por Raventos (2020), menciona la automatización en el cambio de revestimiento de molinos en la Minería Escondida y propone un enfoque que hace énfasis en la gestión de riesgos, la operatividad dentro de una minería y la aplicación de una metodología multicriterio, la cual propone seleccionar tecnologías que reduzcan la exposición del personal y los tiempos que lleva realizar el mantenimiento en este tipo de maquinaria. Uno de los principales logros que menciona en su investigación es que la incorporación de sistemas robóticos externos puede llegar a disminuir hasta un 63% la dotación humana y, en comparación con las horas de ejecución, las reduce hasta en un 25%, lo cual destaca el impacto sobre la seguridad y la productividad del proceso.

En contraste, el desarrollo de la presente investigación aborda el problema ya desde un nivel técnico y aplicado, ya que el enfoque principal es la optimización y automatización de procesos a través de un brazo robótico, utilizado en el reemplazo de pernos en el molino de bolas de la Minera Quellaveco. Una de las principales diferencias es el enfoque estratégico de cada investigación, ya que este estudio profundiza la validación estructural a través de simulaciones en ANSYS y la optimización de la cinemática con software como ROBODK, lo cual demuestra que el proceso resulta viable a partir de la ingeniería de diseño. Los resultados confirman una reducción significativa del tiempo de

mantenimiento y un factor de seguridad superior a 2.5, lo cual respalda la aplicabilidad técnica del sistema propuesto.

Ambas investigaciones coinciden en el factor de que la automatización es una vía que resulta efectiva para los procesos de mantenimiento minero, ya que aumentan la seguridad y aseguran que exista una mayor productividad en cada proceso. En conjunto, estos trabajos evidencian la complementariedad entre la planificación estratégica de la automatización y su desarrollo técnico, conformando un marco integral para la modernización de los procesos mineros hacia modelos más seguros, precisos y eficientes.

### **5.3.1 Factor de seguridad y validación mecánica**

El adaptador de herramienta presentó un factor de seguridad superior a 2.5, comportamiento que coincide con lo señalado por Hernández (2016), quien demostró que la optimización estructural en brazos robóticos mejora la resistencia frente a cargas cíclicas. Asimismo, la evaluación de fatiga obtenida mediante ANSYS concuerda con los estudios de Shigley y Mott sobre la importancia de verificar esfuerzos alternantes en componentes sometidos a vibraciones constantes.

En comparación con las soluciones industriales como MIRS, que emplean acoples reforzados para soportar percusión, la propuesta de esta tesis muestra resultados equivalentes en cuanto a resistencia estructural, validando su factibilidad física para un entorno minero hostil.

### **5.3.2 Comportamiento ante cargas dinámicas**

Los resultados del análisis de fatiga revelaron una vida útil adecuada para los regímenes de operación esperados. Esto es coherente con el trabajo de Solano (2018), quien sostiene que los componentes de brazos robotizados, al ser sometidos a trayectorias repetitivas, requieren optimización para reducir esfuerzos. El adaptador diseñado mantiene valores dentro del límite permisible, lo que representa un

aporte frente a diseños previos que no contemplaban cargas de impacto propias del martillo neumático y pistola de torque.

### **5.3.3 Reducción de tiempos y desempeño cinemático**

La mayor contribución práctica del estudio es la reducción del tiempo total del cambio de pernos, alineándose con los reportes de MIRS EMMR y Raventos (2020), quienes demuestran que la automatización disminuye drásticamente los tiempos de intervención en molinos SAG y de bolas. Sin embargo, a diferencia de estas soluciones propietarias, la presente tesis aporta:

- Un modelo cinemático completo basado en Denavit–Hartenberg,
- Una configuración geométrica adaptada específicamente al molino Metso 28” x 44.5”,
- Una simulación integral del proceso de corte–extracción–instalación,
- Y la validación explícita de que un brazo KUKA KR16 escalado (o equivalente KR500 L340-2) puede ejecutar trayectorias con precisión sin colisionar con el *shell*.

Este nivel de detalle técnico no aparece documentado en los trabajos previos, lo que constituye una contribución original a la ingeniería de mantenimiento minero.

## CONCLUSIONES

1. El rediseño CAD del adaptador de herramientas permitió obtener una geometría optimizada para operar dentro del entorno restringido del shell del molino de bolas. La incorporación de ángulos de trabajo adecuados, un sistema de acople rápido compatible con la brida del robot y la selección de materiales de alta resistencia garantizan su funcionalidad y capacidad de transmitir cargas de impacto y torque en condiciones mineras reales.

2. La validación estructural del adaptador, realizada mediante análisis de elementos finitos en ANSYS, demostró que los esfuerzos de Von Mises, el factor de seguridad ( $>2.5$ ) y la vida a fatiga se encuentran dentro de límites aceptables para operaciones repetitivas. Esto confirma que el diseño es mecánicamente viable para soportar las solicitaciones generadas por el martillo neumático y la pistola de impacto, reduciendo riesgos de falla durante la operación.

3. La simulación en ROBODK evidenció que el brazo robótico puede ejecutar trayectorias eficientes para corte, extracción e instalación de pernos, manteniéndose dentro de sus límites articulares y alcanzando todas las posiciones del *shell*. El tiempo total por perno se redujo en aproximadamente 40 % respecto al método tradicional, confirmando la superioridad operativa del sistema automatizado.

4. La comparación temporal mostró una reducción aproximada del 52.2 % en el tiempo total de operación con respecto al método manual. El proceso robótico, con un tiempo promedio de 6 min para tres pernos con un tiempo de parada de molino de 66 min, superó al método tradicional 10 min con un tiempo de parada del molino de 140 min, lo que confirma la validez de la hipótesis planteada y evidencia la eficacia del sistema propuesto para optimizar los tiempos de mantenimiento y aumentar la productividad en las operaciones mineras.

5. La optimización del brazo robótico, usando simulación mecánica y cinemática, hizo posible la mejora del desempeño del sistema en el proceso de cambio de pernos de revestimiento, alcanzando una reducción importante del tiempo operativo en comparación con el método tradicional. Los resultados logrados muestran el cumplimiento del objetivo general, probando que el uso de simulaciones sofisticadas es una herramienta eficaz para diseñar y validar una solución robótica que aumenta la eficiencia y la seguridad del mantenimiento del molino de bolas.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda llevar a cabo el prototipado físico del adaptador de herramientas, a fin de validar experimentalmente los resultados de las simulaciones estructurales y confirmar la resistencia real del sistema bajo condiciones de trabajo en campo.
2. Incorporar en futuras investigaciones el análisis dinámico del brazo robótico, incluyendo las vibraciones inducidas por el uso de herramientas neumáticas y los efectos del impacto, con el fin de optimizar aún más la durabilidad y precisión del conjunto.
3. Ampliar la simulación cinemática considerando sensores de visión y cámaras 3D que permitan el ajuste automático de trayectorias, lo que mejoraría la autonomía y precisión del robot en entornos reales con variabilidad geométrica.
4. Evaluar la implementación industrial del sistema robótico en una línea piloto dentro de Minera Quellaveco o una planta similar, con el objetivo de cuantificar los beneficios económicos y de seguridad obtenidos en una operación real.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anggraini, L., Lim, K., Rachmat, R., & Zhang, Z. (2023). Predictive maintenance on ball mill liner using 3D scanner and its analysis in the mining industry of Papua Indonesia. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101568>
- anilproducciones. (2022, Julio 18). *YouTube*. Sistema robótico automatizado para mantenimiento de molinos MIRS: <https://youtube.com/shorts/FmzUVYtErI?si=CYxNLLT86dUeLoKM>
- ASHM. (2014, 08 13). *Partes de los Cilindros Hidráulicos*. <https://www.ashm.mx/blog/partes-de-los-cilindros-hidraulicos/>
- ASHM. (2018, 04 09). *Partes del depósito*. <https://www.ashm.mx/blog/partes-del-deposito/>
- ATI Industrial Automation. (s.f.). *Robotic/Automatic Tool Changer: Quick-Change Standard and Heavy Automation Series*. ATI Industrial Automation. [https://www.ati-ia.com/Library/documents/ati\\_qc\\_cat.pdf](https://www.ati-ia.com/Library/documents/ati_qc_cat.pdf)
- AutoDesk. (2023). *AutoDesk*. Retrieved abril 2024, from AutoDesk: <https://www.autodesk.es/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- Barrientos, V. (2007). Robots Móviles; Evolución y Estado del Arte. *Redalyc.org*(35), 12 - 17. Retrieved abril 2024, from <https://www.redalyc.org/pdf/4026/402640448003.pdf>
- Barron, D. (2016, diciembre). *ipicyt.repositorioinstitucional.mx*. Retrieved abril 2024, from [ipicyt.repositorioinstitucional.mx: https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/2404/1/VigilanciaTecnologicaMolinos%282016%29.pdf](https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/2404/1/VigilanciaTecnologicaMolinos%282016%29.pdf)

- Batz, C. (2005, julio). *biblioteca.usac.edu.gt*. Retrieved abril 2024, from biblioteca.usac.edu.gt: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0286\\_CS.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0286_CS.pdf)
- Bermudez, g. (2022). *core.ac.uk*. Retrieved abril 2022, from core.ac.uk: <https://core.ac.uk/download/pdf/229164924.pdf>
- Biserov, I. (2022). *Diseño de elementos terminales multifunción para un robot manipulador industrial*. UAL. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/14807>
- Blanco, A. (2018). *ocw.unican.es*. Retrieved abril 2024, from ocw.unican.es: [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8.\\_molienda.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf)
- Cavanillas, G. S. (2020). *Modificación Novedosa para el Sistema de Cadenas del Vehículo de Combate de Infantería Pizarro*. Centro Universitario de la Defensa-Academia General Militar. <https://zagan.unizar.es/record/101021/files/TAZ-TFG-2020-4542.pdf>
- Centro de Formaciòn Técnica para la Industria. (2023). *Qué es un Sistema Hidráulico y cómo funciona*. <https://www.cursosaula21.com/que-es-un-sistema-hidraulico/>
- COSMOS. (2023). *Bombas Hidráulicas*. <https://bombas-hidraulicas.com/>
- Daniel, A. D. (2009, octubre). *riunet.upv.es*. Retrieved marzo 2024, from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14397/Tesis.pdf>
- Darling, P. (. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. <https://www.smenet.org/store/detail/1162>
- Delbergue, A. (2016, junio). *oa.upm.es*. Retrieved abril 2024, from oa.upm.es: [https://oa.upm.es/42941/1/TFG\\_GUILLERMO\\_ALVARO\\_DELBERGUE\\_CHICO.pdf](https://oa.upm.es/42941/1/TFG_GUILLERMO_ALVARO_DELBERGUE_CHICO.pdf)
- Durango, H., & Vallejo, A. (2015). *Creación y automatización de un plan de mantenimiento para los tanques de guerra AMX-13 modelo VCI*. ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/4422>

- Durango, H., & Vallejo, A. (2015). *Creación y automatización de un plan de mantenimiento para los tanques de guerra AMX-13 modelo VCI*. ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/8ca5aea6-da3a-4fbf-a472-3017e555b670>
- Encalada, J., & Montero, B. (2023). *Diseño y construcción de un efector final para empaquetado y paletizado de botellas con el uso del brazo robótico KUKA KR-16*. UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26420>
- FONDEAR. (2019). *¿Cómo funciona la dirección hidráulica?* [http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Diseno\\_Construccion/Direccion-Hidraulica/Direcciones\\_Hidraulicas.asp](http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Diseno_Construccion/Direccion-Hidraulica/Direcciones_Hidraulicas.asp)
- García, F. (2019). *Diseño y fabricación de un brazo robótico de 6 GDL de bajo coste basado en Arduino*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Golden, M., Odham, L., & Bordeaux, M. (2009). *Robot tool changer (U.S. Patent No. US8005570B2)*. US. <https://patents.google.com/patent/US8005570B2/en>
- Griñan, F. (2021). *riunet.upv.es*. Retrieved abril 2024, from [riunet.upv.es: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174666/Pascual%20%20Diseno%20y%20construccion%20de%20un%20brazo%20robotico%20controlado%20mediante%20Arduino.pdf;jsessionid=9686949094D454909AD00DE18FBE017E?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/174666/Pascual%20%20Diseno%20y%20construccion%20de%20un%20brazo%20robotico%20controlado%20mediante%20Arduino.pdf;jsessionid=9686949094D454909AD00DE18FBE017E?sequence=1)
- Griñan, P. (2021). *premisrecerca.uvic.cat*. Retrieved abril 2024, from [premisrecerca.uvic.cat: https://riunet.upv.es/bitstream/10251/174666/1/Pascual%20%20y%20construccion%20de%20un%20brazo%20robotico%20controlado%20mediante%20Arduino.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/10251/174666/1/Pascual%20%20y%20construccion%20de%20un%20brazo%20robotico%20controlado%20mediante%20Arduino.pdf)
- Guilcaso, A. (2011, enero). *repositorio.uta.edu.ec*. Retrieved marzo 2024, from <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/78>

- Hernandez, F. (2016). *automata.cps.unizar.es*. Retrieved abril 2024, from automata.cps.unizar.es: <http://automata.cps.unizar.es/robotica/manual.pdf>
- Ingersoll Rand. (2014). *Paving breaker: Models MX60 and MX90. Product Information*. Ingersoll Rand. <https://azure-na-assets.contentstack.com/v3/assets/bltd89674ca5491ef9a/blt96ac939883db8548/677fd23e8c9feb67a45de488/51955631ed5e.pdf>
- Ingersoll Rand. (s.f.). *Martillos rompedores neumáticos MX Series MX60B/MX90B*. Ingersoll Rand. <https://powertools.ingersollrand.com/es-es/construction-tools/pavement-breakers/mx/>
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 8373:2012 – Robots and robotic devices — Vocabulary*. ISO. ISO. <https://www.iso.org/standard/55890.html>
- Jaramillo, A. (2017). *ocw.bib.upct.es*. Retrieved abril 2024, from ocw.bib.upct.es: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/[https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/14831/mod\\_resource/content/1/Tema%205%20-%20Parte%20I\\_Molinos\\_PPT.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/14831/mod_resource/content/1/Tema%205%20-%20Parte%20I_Molinos_PPT.pdf)
- Kihlberg, S., Kjellberg, A., & Lindbeck, L. (1993). Pneumatic tool torque reaction: Reaction forces, displacement, muscle activity and discomfort in the hand-arm-system. *Applied Ergonomics*, 24(3), 165-173. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90004-S](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90004-S)
- Kluz, R., & Trzepiecinski, T. (2014). El análisis de posicionamiento de repetibilidad del brazo robótico industrial. *Automatización de ensamblaje*, 285 - 289. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/AA-07-2013-070>

- Kumar, H., Singh, G., & Singh, H. (2024). Computation of charging media for a double compartment cement ball mill. *Materials Today: Proceedings*, +. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.01.026>.
- Loaiza, J. (2009). *Repositorio Institucional Universidad EAFIT*. Retrieved MAYO 2024, from Repositorio Institucional Universidad EAFIT: <https://core.ac.uk/reader/47244960>
- Mazor Robotics Ltd. (2025). *Sistemas y métodos para probar la fijación de un efector final a un cambiador de herramientas*. World Intellectual Property Organization. <https://patents.google.com/patent/WO2025154065A1>
- Mejía, L., & Rivas, S. (2023). El AMX-13 en el Ejército Peruano y sus actualizaciones con misiles. *Pucará Defensa*. <https://pucara.org/post/el-amx-13-en-el-ejercito-peruano>
- Mejía, L., & Rivas, S. (2023). *El AMX-13 en el Ejército Peruano y sus actualizaciones con misiles*. Pucará Defensa.
- Mendez, A. (2023, septiembre 22). *3Dnatives*. Retrieved abril 2024, from 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/es/tinkercad-software-200420202/>
- MIRS – Mining and Heavy Industry Robotics. (2022). *Youtube*. MIRS robotic solutions for heavy industry maintenance: <https://www.youtube.com/watch?v=KUD8EYx3Ke0>
- Multotec. (2022). *Multotec*. Retrieved mayo 2024, from Multotec: [https://www.multotec.com/public/uploads/files/media\\_files/file\\_884cde1596e25b82fcbbe3e10c30bb94.pdf](https://www.multotec.com/public/uploads/files/media_files/file_884cde1596e25b82fcbbe3e10c30bb94.pdf)
- OUTOTEC. (2021). *OUTOTEC*. OUTOTEC: <https://www.metso.com/es/portafolio/molinos-de-bolas/>

- Pablo, P. (2017). *Repositorio Universidad Politecnica de Cartagena*. Retrieved mayo 2024, from Repositorio Universidad Politecnica de Cartagena: [/https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/14070/mod\\_resource/content/2/Molienda %20%28Parte%20II%292.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/14070/mod_resource/content/2/Molienda%20%28Parte%20II%292.pdf)
- Paredes, J., & Infante, S. (2025). *Diseño e implementación de un efector final empleado en el robot industrial KUKA KR 60-3, permitiendo el atornillado de pernos Allen y limpieza con aire comprimido en motorreductores*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/685689>
- Patiño, I., & Pincay, J. (2009). *DISEÑO DE BRAZO ROBÓTICO PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE MATERIALES SOL GEL*. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- Peng, Y., Ni, X., & Zhu, Z. (2017). Fricción y desgaste del revestimiento y la bola de molienda en un molino de bolas de mineral de hierro. *Tribología Internacional*, 115, 506 - 517. <https://doi.org/0.1016/j.triboint.2017.06.017>
- Raventos, A. (2020). *Estudio de automatización del cambio de revestimiento de molinos*. Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/179634>
- Raza, K., Tauseef, A., & Abbas, N. (2018). Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial robotic arm. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 30, 218 - 223. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.03.005>.
- Repositorio UNAC*. (2022). Retrieved mayo 2024, from Repositorio UNAC: [https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7165/GUSTAVO %20Y%20RAFAEL%20MALLQUI%20ANTIALON.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/7165/GUSTAVO%20Y%20RAFAEL%20MALLQUI%20ANTIALON.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Ruales, A. (2021). *Introducción a los Sistemas Hidráulicos*. Quito: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. .
- Sanz, G. (2020). *Modificación Novedosa para el Sistema de Cadenas*. Universidad Zaragoza. <https://zaguan.unizar.es/record/101021/files/TAZ-TFG-2020-4542.pdf%3B>
- Servicio Hidráulico Industrial. (2023). *Sistema hidráulico*. <https://www.bombas-hidraulicas.com.mx/sistema-hidraulico/>
- Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A. (2020). *Dispositivo mecánico de instalación exterior para sujeción de revestimientos en molinos*. Pearson Educación. <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/070725257/publication/P E20200350A1?q=pn%3DPE20200350A1>
- Solano, J. (2018, 05 26). *Brazo de excavadora hidraulica*. <https://es.slideshare.net/jairosolano7/proyecto-de-excavadora-hidraulica>
- Song, X., Wang, Y., Liu, C., Erjan, H., Meng, Y., & Ran, J. (2020). *Investigación sobre la planificación de trayectorias multiobjetivo para un brazo robótico de seis grados de Libertad*. Conferencia Internacional de Tecnología. <https://doi.org/10.1109/ICMTIM65484.2025.11041656>. <https://doi.org/10.1109/ICMTIM65484.2025.11041656>
- Strotzer, A. (2012). *Power control of robotic tool changer (U.S. Patent No. US20120277080A1)*. US. <https://patents.google.com/patent/US20120277080A1/en>
- Tarkian, M., Persson,, J., O' lvander, J., & Feng, X. (2011, JANUARY). Multidisciplinary design optimization of modular industrial robots. *nternational Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 867 - 876. Retrieved marzo 2024, from

<https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2011/867/353947>

Tarkian, M., Lunde' n, B., & O' lvander, J. (2008). Integration of parametric CAD and dynamic models for industrial robot design and optimization. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 43277, 761 - 769. Retrieved 2024 2024, from <https://asmedigitalcollection.asme.org/IDETC-CIE/proceedings-abstract/IDETC-CIE2008/761/332420>

TurboSquid. (2023). *Brazo robot de 6 ejes KUKA KR 16-3 modelo 3D*. KUKA. <https://www.turbosquid.com/es/3d-models/6axis-robot-arm-KUKA-kr-16-3-model-2188903>

Valiente, I. (2018, Julio 18). El AMX-13 argentino, la decepción que casi da a luz al Patagón. *infodefensa*. <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/3074229/amx-13-argentino-decepcion-casi-da-luz-patagon>

VemaTrack. (2025). *VemaTrack*. ¿Cuál es la tensión correcta en las orugas?: <https://www.vematrack.com/es/blog-es/cual-es-la-tension-correcta-en-las-orugas/>

Villanueva, E. (2018). *El Brazo Hidraulico*. <https://es.scribd.com/document/619415945/EL-BRAZO-HIDRAULICO>

Žlajpah, L. (2008, Diciembre 15). Simulación en robótica. *Matemáticas y Computadoras en Simulación*, 79, 879 - 897. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2008.02.017>

## ANEXOS

**Programa de simulación con ROBODK : cambio de pernos del molino de bolas**

```

def Prog1():
    # Global parameters:
    global speed_ms    = 0.250
    global speed_rads  = 0.750
    global accel_mss   = 1.200
    global accel_radss = 1.200
    global blend_radius_m = 0.001
    global ref_frame = p[0,0,0,0,0,0]
    #
    # Main program:
    # Program generated by RoboDK v5.9.1 for Mi Mecanismo on 17/10/2025 16:04:51
    # Using nominal kinematics.
    ref_frame = p[0.000000, 4.050000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, -1.570796]
    set_tcp(p[0.000000, 0.000000, 0.079960, 0.000000, 0.000000, 0.000000])
    movej([1.668903, 1.297020, -1.039616, 0.048985, -1.324382, -
0.097828], accel_radss, speed_rads, 0, 0.001)
    # Adjuntar a MASTER
    set_tcp(p[0.439084, 0.000000, 0.673372, 0.000000, 1.064651, 0.000000])
    movel(pose_trans(ref_frame, p[0.100056, -0.300000, 2.604090, -2.221441, 0.000000,
2.221441]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame, p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    movej([1.452423, 0.961802, 0.097840, -0.872956, -1.855041, -
0.736885], accel_radss, speed_rads, 0, 0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame, p[0.534400, -0.300000, 1.350000, -1.686383, -0.810612,
1.686383]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    sleep(20.000)
    # Adjuntar a PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame, p[1.034400, -0.300000, 1.350000, -1.686388, -0.810607,
1.686388]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    movej([1.781929, 0.485819, 0.050610, 0.186040, -1.748035, -
0.283328], accel_radss, speed_rads, 0, 0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame, p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame, p[2.491390, 2.400280, 2.880830, -1.361735, 1.338146,
1.098192]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame, p[2.491390, 2.688240, 2.823550, -1.361735, 1.338146,
1.098192]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)
    sleep(35.000)
    # Separar de PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame, p[2.491390, 2.400280, 2.880830, -1.361735, 1.338146,
1.098192]), accel_mss, speed_ms, 0, 0.001)

```

```

    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.446878, 0.928882, 0.193997, -0.892769, -1.897190, -
0.786402],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, -0.100000, 1.350000, -1.716685, -0.777820,
1.716685]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.534400, -0.100000, 1.350000, -1.716685, -0.777820,
1.716685]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(20.000)
    # Adjuntar a PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, -0.100000, 1.350000, -1.716685, -0.777820,
1.716685]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.034400, -0.300000, 1.350000, -1.686388, -0.810607,
1.686388]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.781929, 0.485819, 0.050610, 0.186040, -1.748035, -
0.283328],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.231390, 2.394010, 2.882080, -1.361735, 1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.231390, 2.688240, 2.823550, -1.361735, 1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(35.000)
    # Separar de PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.231390, 2.394010, 2.882080, -1.361735, 1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.446878, 0.928882, 0.193997, -0.892769, -1.897190, -
0.786402],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, 0.100000, 1.350000, -1.644545, -0.854145,
1.644545]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.534400, 0.100000, 1.350000, -1.644545, -0.854145,
1.644545]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(20.000)
    # Adjuntar a PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, 0.100000, 1.350000, -1.644545, -0.854145,
1.644545]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.034400, -0.300000, 1.350000, -1.686388, -0.810607,
1.686388]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.781929, 0.485819, 0.050610, 0.186040, -1.748035, -
0.283328],accel_radss,speed_rads,0,0.001)

```

```

    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.781410, 2.163180, 2.696250, -1.206343, 1.670229,
1.067368]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[5.451560, 2.263950, 1.651680, -0.162906, -2.066085, -
2.205936]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[5.451560, 2.612600, 1.674530, -0.162906, -2.066085, -
2.205936]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(35.000)
    # Separar de PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame,p[5.451560, 2.263950, 1.651680, -0.162906, -2.066085, -
2.205936]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.781410, 2.163180, 2.696250, -1.206343, 1.670229,
1.067368]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.100056, -0.300000, 2.604090, -2.221441, 0.000000,
2.221441]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.100056, -0.300000, 1.999890, -2.221441, 0.000000,
2.221441]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(8.000)
    set_tcp(p[0.000000, 0.000000, 0.079960, 0.000000, 0.000000, 0.000000])
    # Separar de MASTER
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.807942, -0.300000, 1.628520, -0.786592, 0.000000,
3.041526]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.031000, -0.300000, 1.662500, -2.216439, -0.011058,
2.216439]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.556415, 0.586495, -0.796193, 0.222570, 0.475529, -
0.191962],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    movej([0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, -
0.000000],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    # End of main program
end

```

```
Prog1()
```

```
# Main program:
```

```
# Program generated by RoboDK v5.9.1 for Mi Mecanismo on 13/12/2025 15:49:39
```

```
# Using nominal kinematics.
```

```
ref_frame = p[0.000000, 4.050000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, -1.570796]
```

```
set_tcp(p[0.000000, 0.000000, 0.079960, 0.000000, 0.000000, 0.000000])
```

```

movej([1.668903,      1.297020,      -1.039616,      0.048985,      -1.324382,      -
0.097828],accel_radss,speed_rads,0,0.001)

# Adjuntar a MASTER

set_tcp(p[0.439084, 0.000000, 0.673372, 0.000000, 1.064651, 0.000000])

movel(pose_trans(ref_frame,p[0.100056,      -0.300000,      2.604090,      -2.221441,      0.000000,
2.221441]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320,      -0.308544,      2.577600,      -2.035111,      0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

movej([1.452423,      0.961802,      0.097840,      -0.872956,      -1.855041,      -
0.736885],accel_radss,speed_rads,0,0.001)

sleep(5.000)

movel(pose_trans(ref_frame,p[0.534400,      -0.300000,      1.350000,      -1.686383,      -0.810612,
1.686383]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

sleep(7.000)

# Adjuntar a PISTOLA

movel(pose_trans(ref_frame,p[1.034400,      -0.300000,      1.350000,      -1.686388,      -0.810607,
1.686388]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

movej([1.781929, 0.485819, 0.050610, 0.186040, -1.748035, -0.283328],accel_radss,speed_rads,0,0.001)

movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128,      0.215905,      2.572880,      -2.035111,      0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

movel(pose_trans(ref_frame,p[2.491390,      2.400280,      2.880830,      -1.361735,      1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

sleep(8.000)

movel(pose_trans(ref_frame,p[2.491390,      2.688240,      2.823550,      -1.361735,      1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

sleep(12.000)

# Separar de PISTOLA

movel(pose_trans(ref_frame,p[2.491390,      2.400280,      2.880830,      -1.361735,      1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

```

```

    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.446878, 0.928882, 0.193997, -0.892769, -1.897190, -
0.786402],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, -0.100000, 1.350000, -1.716685, -0.777820,
1.716685]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(5.000)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.534400, -0.100000, 1.350000, -1.716685, -0.777820,
1.716685]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(7.000)
    # Adjuntar a PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, -0.100000, 1.350000, -1.716685, -0.777820,
1.716685]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[1.034400, -0.300000, 1.350000, -1.686388, -0.810607,
1.686388]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movej([1.781929, 0.485819, 0.050610, 0.186040, -1.748035, -0.283328],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.231390, 2.394010, 2.882080, -1.361735, 1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(8.000)
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.231390, 2.688240, 2.823550, -1.361735, 1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
    sleep(12.000)
    # Separar de PISTOLA
    movel(pose_trans(ref_frame,p[3.231390, 2.394010, 2.882080, -1.361735, 1.338146,
1.098192]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)

```

```

movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movej([1.446878, 0.928882, 0.193997, -0.892769, -1.897190, -
0.786402],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, 0.100000, 1.350000, -1.644545, -0.854145,
1.644545]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
sleep(5.000)
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.534400, 0.100000, 1.350000, -1.644545, -0.854145,
1.644545]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
sleep(7.000)
# Adjuntar a PISTOLA
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.934400, 0.100000, 1.350000, -1.644545, -0.854145,
1.644545]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[1.034400, -0.300000, 1.350000, -1.686388, -0.810607,
1.686388]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movej([1.781929, 0.485819, 0.050610, 0.186040, -1.748035, -0.283328],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[3.781410, 2.163180, 2.696250, -1.206343, 1.670229,
1.067368]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[5.451560, 2.263950, 1.651680, -0.162906, -2.066085, -
2.205936]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
sleep(8.000)
movel(pose_trans(ref_frame,p[5.451560, 2.612600, 1.674530, -0.162906, -2.066085, -
2.205936]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
sleep(12.000)
# Separar de PISTOLA

```

```

movel(pose_trans(ref_frame,p[5.451560, 2.263950, 1.651680, -0.162906, -2.066085, -
2.205936]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[3.781410, 2.163180, 2.696250, -1.206343, 1.670229,
1.067368]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.919128, 0.215905, 2.572880, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[1.041320, -0.308544, 2.577600, -2.035111, 0.213579,
2.283560]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.100056, -0.300000, 2.604090, -2.221441, 0.000000,
2.221441]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.100056, -0.300000, 1.999890, -2.221441, 0.000000,
2.221441]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
sleep(3.000)
set_tcp(p[0.000000, 0.000000, 0.079960, 0.000000, 0.000000, 0.000000])
# Separar de MASTER
movel(pose_trans(ref_frame,p[0.807942, -0.300000, 1.628520, -0.786592, 0.000000,
3.041526]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movel(pose_trans(ref_frame,p[1.031000, -0.300000, 1.662500, -2.216439, -0.011058,
2.216439]),accel_mss,speed_ms,0,0.001)
movej([1.556415, 0.586495, -0.796193, 0.222570, 0.475529, -0.191962],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
movej([0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, 0.000000, -0.000000],accel_radss,speed_rads,0,0.001)
# End of main program
end

```

- <https://web.robodk.com/lnk/3131303533233132>
- <https://web.robodk.com/lnk/3131303535233938>

## Código de Matlab para posición de reposo y posición arbitraria del robot

```

% CINEMÁTICA DIRECTA - DH CLÁSICO
% CONFIGURACIÓN ARTICULAR
q = [0 0 0 0 0 0];

% CÁLCULO
T = fkine_DH(q);
disp('Matriz homogénea T0_6:');
disp(T);

%% FUNCIONES LOCALES
function T06 = fkine_DH(q)
    a = [552.9 1319.98 -44.43 0 0 0];
    d = [1293.84 0 0 1293.01 0 394.72];
    alpha = deg2rad([-90 0 -90 90 -90 0]);

    theta = deg2rad([ ...
        q(1), ...
        q(2)-90, ...
        q(3), ...
        q(4), ...
        q(5), ...
        q(6)+180 ]]);

    T06 = eye(4);
    for i = 1:6
        T06 = T06 * dh_classic(a(i),alpha(i),d(i),theta(i));
    end
end

function T = dh_classic(a,alpha,d,theta)
    T = [ cos(theta) -sin(theta)*cos(alpha) sin(theta)*sin(alpha)
a*cos(theta);
        sin(theta) cos(theta)*cos(alpha) -cos(theta)*sin(alpha)
a*sin(theta);
        0 sin(alpha) cos(alpha) d;
        0 0 0 1 ];
end

% CINEMÁTICA DIRECTA - DH CLÁSICO
% CONFIGURACIÓN ARTICULAR
q = [90 45 0 0 0 0];

% CÁLCULO
T = fkine_DH(q);
disp('Matriz homogénea T0_6:');
disp(T);

%% FUNCIONES LOCALES
function T06 = fkine_DH(q)
    a = [552.9 1319.98 -44.43 0 0 0];
    d = [1293.84 0 0 1293.01 0 394.72];
    alpha = deg2rad([-90 0 -90 90 -90 0]);

    theta = deg2rad([ ...

```

```

    q(1), ...
    q(2)-90, ...
    q(3), ...
    q(4), ...
    q(5), ...
    q(6)+180 ]]);

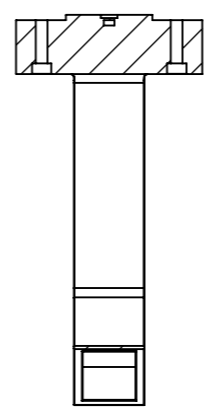
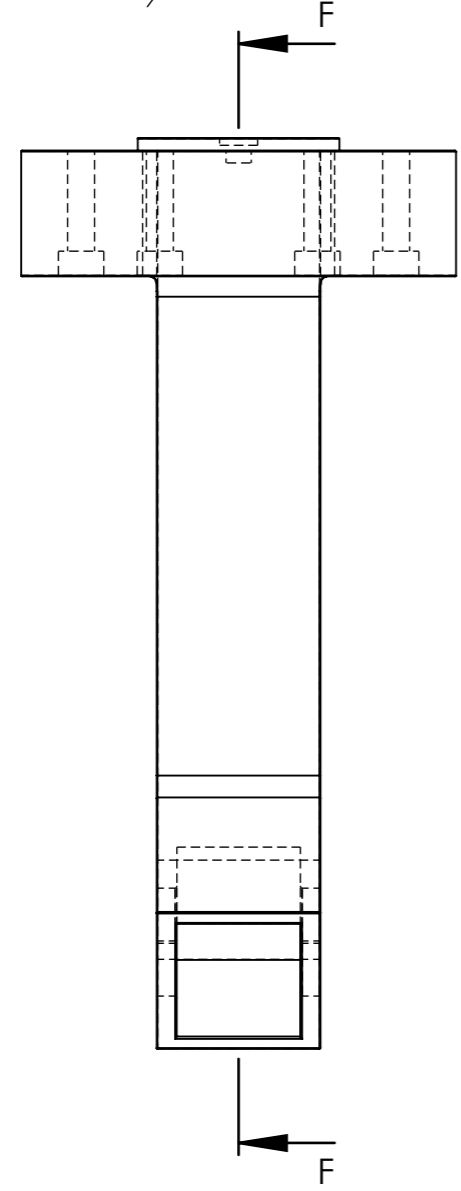
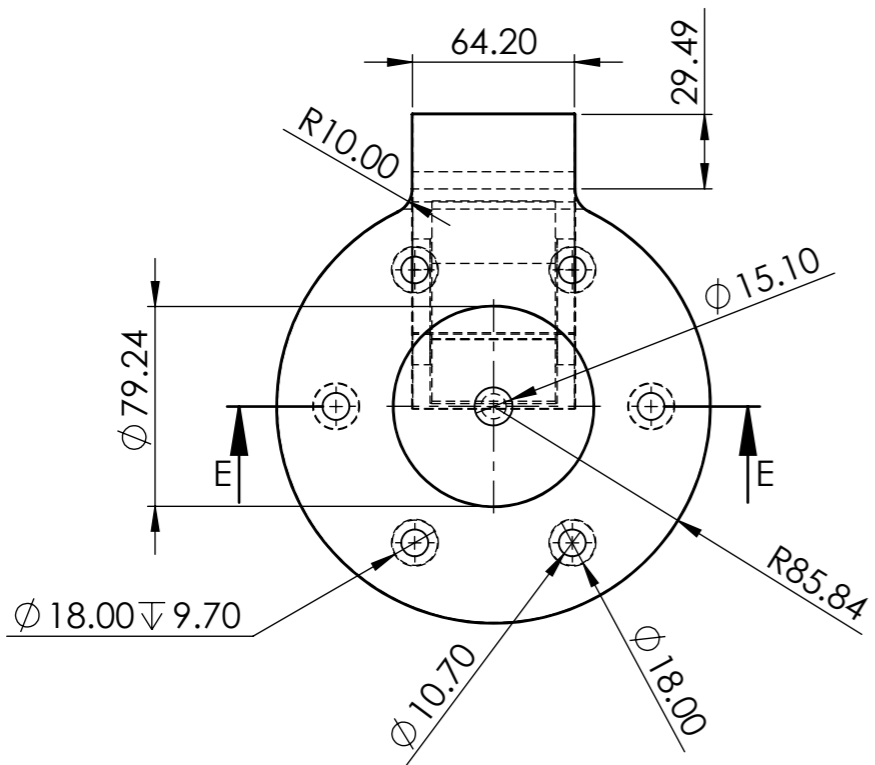
T06 = eye(4);
for i = 1:6
    T06 = T06 * dh_classic(a(i),alpha(i),d(i),theta(i));
end
end

function T = dh_classic(a,alpha,d,theta)
    T = [ cos(theta) -sin(theta)*cos(alpha) sin(theta)*sin(alpha)
          a*cos(theta)
          sin(theta) cos(theta)*cos(alpha) -cos(theta)*sin(alpha)
          a*sin(theta);
          0 sin(alpha) cos(alpha) d;
          0 0 0 1 ];
end

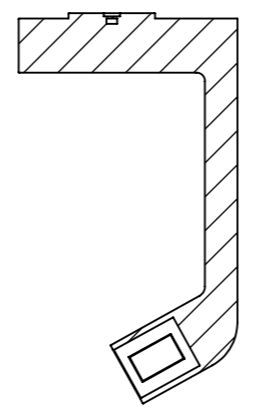
```

8 7 6 5 4 3 2 1

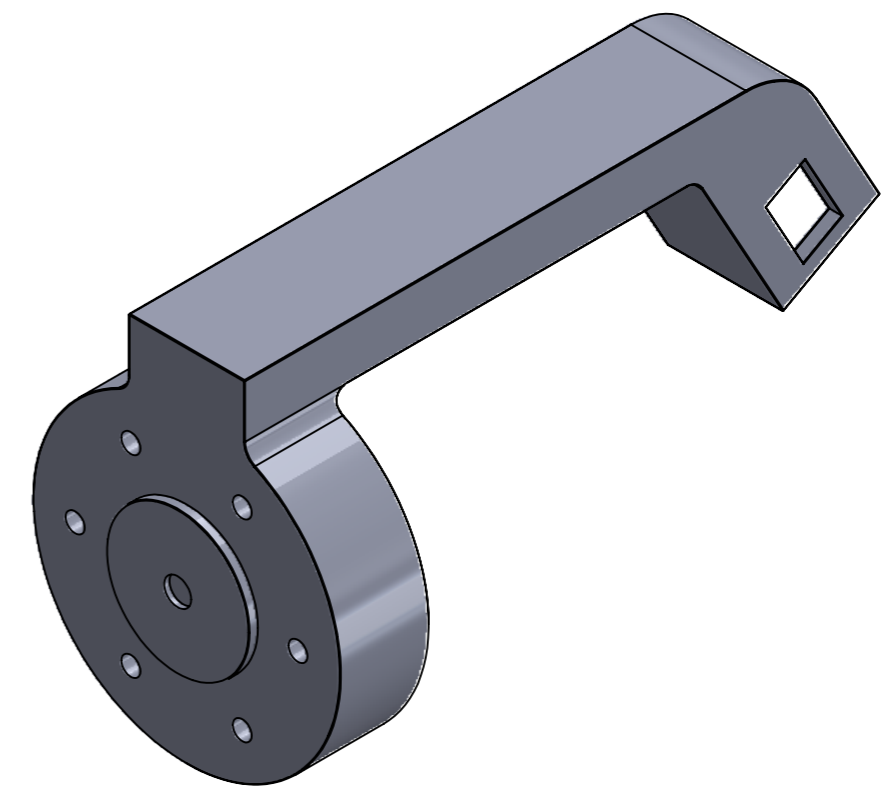
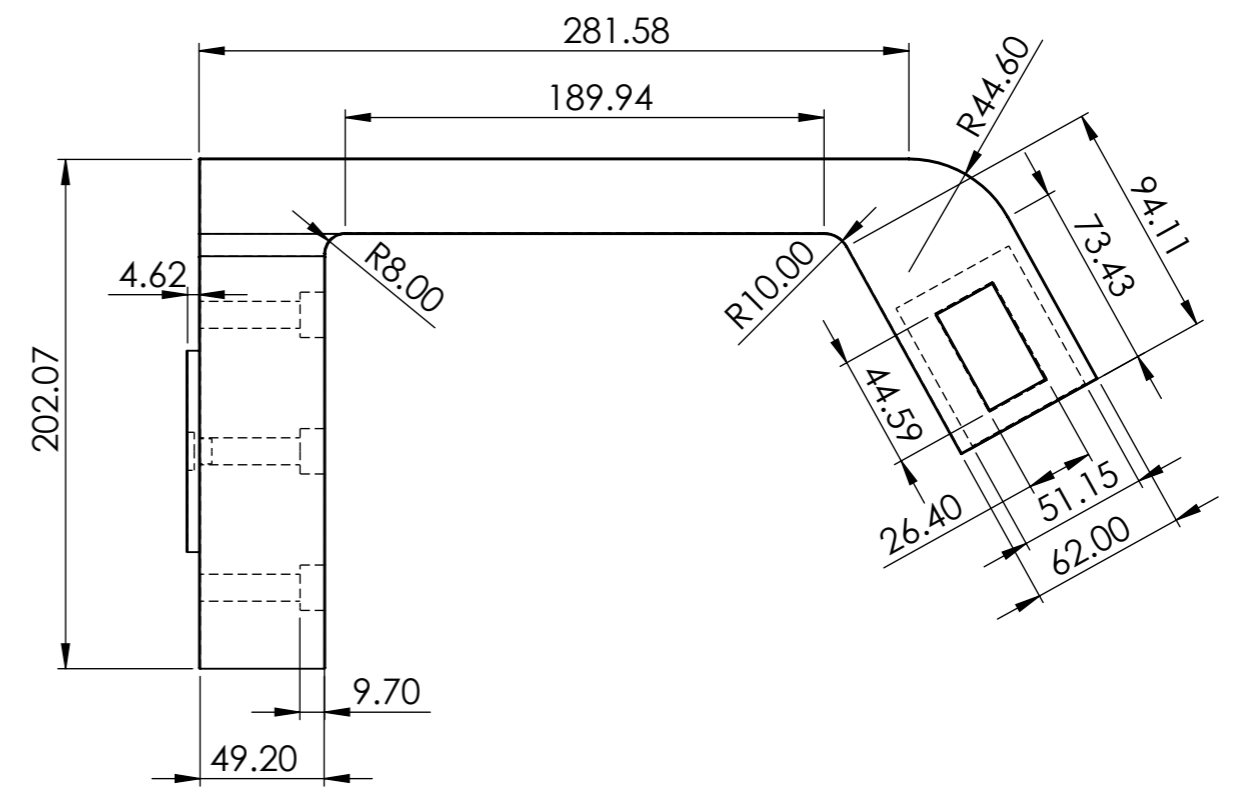
F  
E  
D  
C  
B  
A



SECCIÓN E-E  
ESCALA 1 : 7



SECCIÓN F-F  
ESCALA 1 : 7

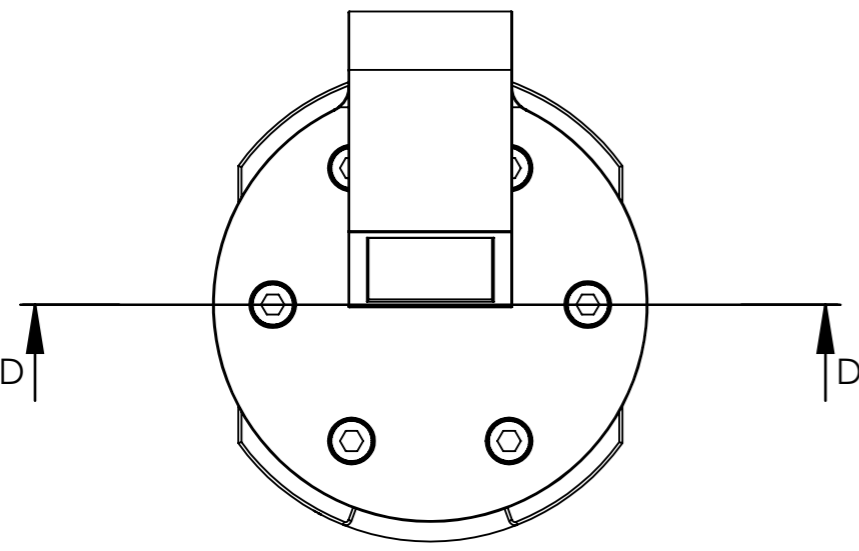


ESCALA	1:3	NOMBRE	FECHA	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN	
AUTOR	ALVARO JOSE QUISPE QUENTA	17-10-2025			
ADAPTADOR DE HERRAMIENTAS			MATERIAL	LAMINA	
			AISI 4140	1 de 2	

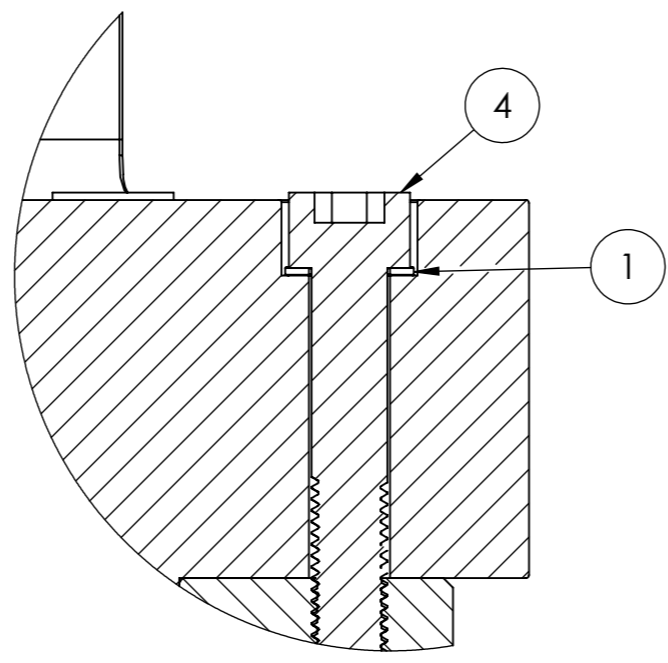
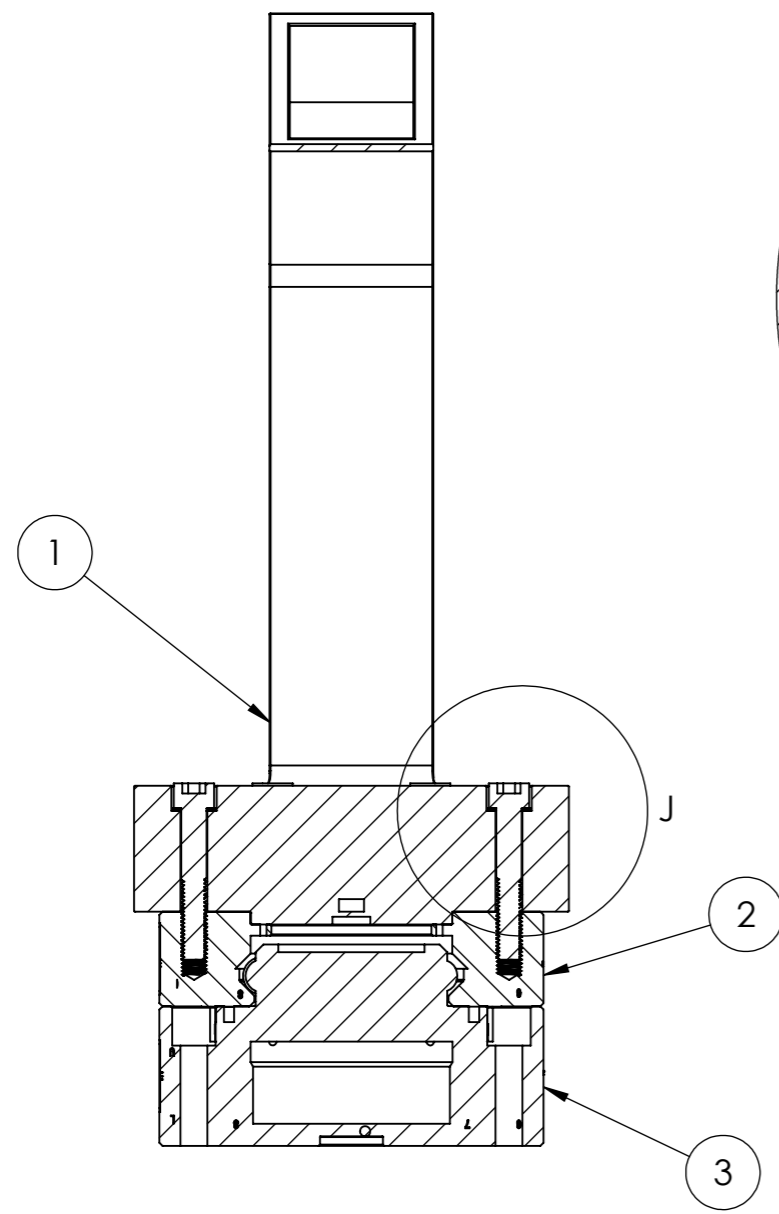
8 7 6 5 4 3 2 1

8 7 6 5 4 3 2 1

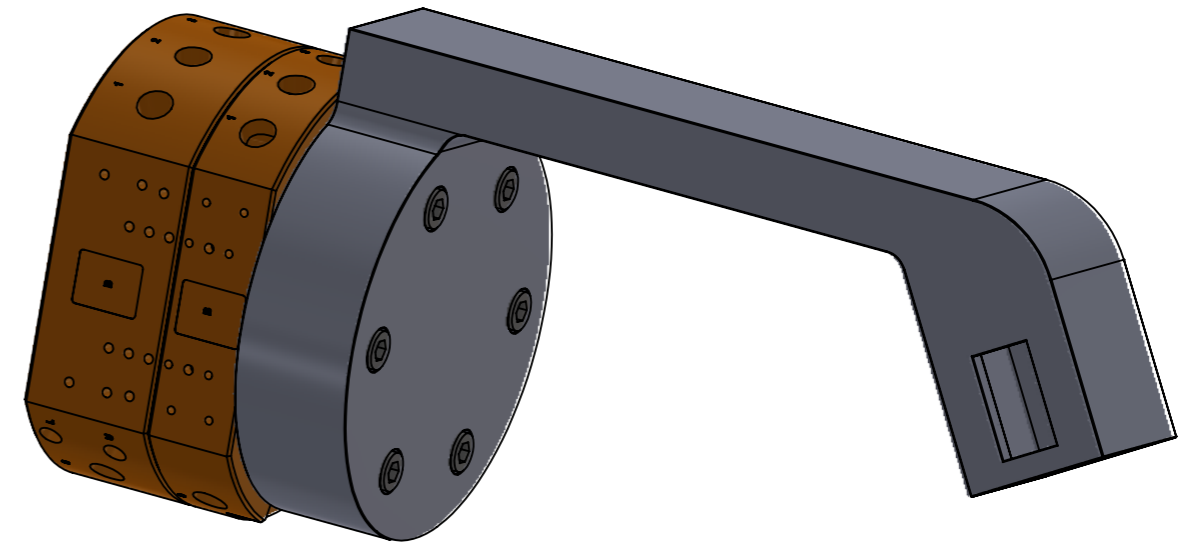
F  
E  
D  
C  
B  
A



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
2	Tool plate	AISI 4140	1
3	Master plate	AISI 4140	1
4	Perno Allen	M-10 x40 -grado 12.5 AISI 4340	6
1	Adaptador de herramienta	AISI 4140	1
5	Arandela Nort-Lock	M-10 AISI 4140	6



DETALLE J  
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN D-D  
ESCALA 1 : 3

ESCALA	1:3	NOMBRE	FECHA	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN	
AUTOR	ALVARO JOSE QUISPE QUENTA	17-10-2025			
ENSAMBLE TOOL CHANGER-ADAPTADOR			MATERIAL	LAMINA	
			AISI 4140	2 de 2	

8 7 6 5 4 3 2 1