



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

Diseño mecánico de un robot escalador para la limpieza de silos de acero galvanizado corrugado de almacenamiento de granos de maíz de 30 metros de altura y 20 metros de diámetro para la empresa CHIMU S.A.

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Mecánico Electricista

AUTORES:

Bustamante Mendoza, Diego Ruben (orcid.org/0000-0002-7003-0956)

Grados Rebaza, Henry Williams (orcid.org/0000-0002-2774-3029)

ASESORES:

Dr. Inciso Vasquez, Jorge Antonio (orcid.org/0000-0001-8798-1283)

PhD. Prado Gardini, Sixto Ricardo (orcid.org/0000-0002-9135-2663)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Modelamiento y Simulación de Sistemas Electromecánicos

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO - PERÚ

2022

DEDICATORIA

A mis padres por el apoyo constante durante el transcurso de toda la carrera que fueron el mayor motivo para mi constancia y dedicación en la culminación de esta tesis. A mi hermano porque siempre quisimos hacer un robot similar a este.

Henry Williams Grados Rebaza

A mis padres y abuelos por estar conmigo apoyándome en todo momento y creyendo en mí, a mis amigos Cristhian y especialmente Guerra por sus consejos y por ayudarme a creer en mí, también a Yerly por haber sido parte de la inspiración e impulso que me ayudó a culminar este trabajo.

Diego Rubén Bustamante Mendoza

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento especial al ingeniero Tito Paredes por la información brindada de la empresa SOLINPA y CHIMU para el desarrollo de la tesis. A nuestros asesores metodólogo y especialista por el tiempo brindado en las asesorías para el desarrollo de la tesis.

Henry Williams Grados Rebaza

Agradecer al ingeniero Tito Paredes por confiar en mi y por el apoyo brindado durante el desarrollo de la tesis. A nuestros docentes por todos los conocimientos brindados a lo largo de la carrera y especialmente a nuestros asesores por su tiempo y apoyo durante el desarrollo de la tesis.

Diego Rubén Bustamante Mendoza

Índice de contenidos

I. Introducción	9
II. Marco teórico	12
III. Metodología	22
3.1. Diseño y tipo de investigación	22
3.2. Variables y operacionalización	22
3.3. Población, muestra y muestreo	22
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	22
3.5. Procedimientos	23
3.6. Método de análisis de datos	25
3.7. Aspectos éticos.....	25
IV. Resultados	26
V. Discusión.....	64
VI. Conclusiones.....	66
VII. Recomendaciones.....	68
Referencias.....	69
Anexos	72

Índice de tablas

Tabla 01: Comparación de rendimiento magnético	18
Tabla 02: Comparación de densidad de flujo	19
Tabla 03: Especificaciones de ingeniería	28
Tabla 04: Criterios de evaluación del diseño conceptual	37
Tabla 05: Matriz de criterios ponderados del diseño conceptual.....	38
Tabla 06: Criterios de evaluación del diseño de configuración	42
Tabla 07: Matriz de criterios ponderados del diseño de configuración.....	43
Tabla 08: Selección de rueda magnética	49

Índice de figuras

Figura 01: Robot escalador de inspección RMS2	14
Figura 02: Robot escalador RoboPipe	14
Figura 03: Robot ROMA1 y sus grados de libertad	15
Figura 04: Robot ROMA2 y sus grados de libertad	15
Figura 05: Robot y su interacción con el entorno	17
Figura 06: Articulaciones de un robot y su equivalencia en cuerpo humano ...	17
Figura 07: Ejemplos de efectores finales de un robot	18
Figura 08: Motorreductor	19
Figura 09: Imanes permanentes.....	20
Figura 10: Diagrama de flujo de procedimientos	25
Figura 11: Limpieza de silo.....	28
Figura 12: Dimensiones de la pared de chapa ondulada de los silos de almacenamiento de maíz de Molino Trujillo - Chimu.....	31
Figura 13: Conjunto de pernos para el traslape de planchas	32
Figura 14: Limitación de altura de cúpula del silo.....	33
Figura 15: Diseño conceptual A	35
Figura 16: Diseño conceptual B	37
Figura 17: Diseño conceptual C	38
Figura 18: Diseño de configuración A	41
Figura 19: Diseño de configuración B	42
Figura 20: Diseño de configuración C	43
Figura 21: División de distancias según dimensiones generales del silo	47
Figura 22: Análisis de fuerzas que actúan en el robot.....	49
Figura 23: Rueda magnética	50
Figura 24: Dimensiones de la rueda magnética	51
Figura 25: Análisis de fuerzas que actúan en las ruedas	52
Figura 26: Motorreductor para la tracción de las ruedas	54
Figura 27: DCL de eje del rodillo limpiador	55
Figura 28: Motor paso a paso NEMA 17	57
Figura 29: DCL de eje de las ruedas.....	57
Figura 30: Ubicación de motorreductores de tracción	59
Figura 31: Ubicación motor paso a paso	60
Figura 32: Cinemática de brazo de rodillo	60
Figura 33: Análisis estático del brazo del robot	62

Figura 34: Factor de seguridad del brazo del robot.....	63
Figura 35: Análisis estático del eje de las ruedas.....	63
Figura 36: Factor de seguridad del eje de las ruedas	64
Figura 37: Desplazamiento del eje de las ruedas.....	64
Figura 38: Brazo en Simulink	65
Figura 39: Desplazamiento en X	66
Figura 40: Desplazamiento en Z	66

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño de la estructura mecánica de un robot escalador para limpieza de silos de acero galvanizado de almacenamiento de maíz, esto con la finalidad de minimizar los riesgos hacia los operarios encargados de realizar la limpieza de los silos, y además de realizar un mantenimiento adecuado, evitando así el deterioro del alimento almacenado en ellos debido a las plagas. La metodología con la que se realizó este trabajo inició a partir de la recolección de información de los requerimientos para una limpieza adecuada de los silos, asimismo de las características constructivas que tienen los silos de la empresa Chimú Agropecuaria S.A., posteriormente se enlistó las especificaciones de ingeniería y se planteó los conceptos de diseño los cuales fueron evaluados para finalmente escoger una configuración adecuada, todo esto a partir de una matriz de criterios ponderados. Luego de obtener el concepto ganador se calculó los principales esfuerzos en los ejes y en la unión del brazo con el chasis del robot, también se calculó la cinemática y los desplazamientos realizados por el brazo robótico, junto con su modelamiento 3D. Finalmente, con los datos obtenidos se seleccionó los componentes más adecuados para el robot, como son las ruedas imantadas de Neodimio revestidas de acero inoxidable, además de los motores encargados de vencer el torque que se ejerce por la imantación de las llantas hacia las paredes del silo.

Palabras clave: Diseño, robótica, robot escalador, estructura mecánica.

ABSTRACT

In the present work, the design of the mechanical structure of a climbing robot for cleaning galvanized steel corn storage silos was carried out, this in order to minimize the risks to the operators in charge of cleaning the silos, and also to carry out adequate maintenance, thus avoiding the deterioration of the food stored in them due to pests. The methodology with which this work was carried out began from the collection of information on the requirements for an adequate cleaning of the silos, in addition to the constructive characteristics of the silos of the company Chimú Agropecuaria S.A., later the specifications of engineering and the design concepts were raised, which were evaluated to finally choose an adequate configuration, all this from a matrix of weighted criteria. After obtaining the winning concept, the main efforts in the axes and in the union of the arm with the robot chassis were calculated, the kinematics and the displacements made by the robotic arm were also calculated, together with its 3D modeling. Finally, with the data obtained, the most suitable components for the robot were selected, such as the Neodymium magnetized wheels covered in stainless steel, in addition to the motors in charge of overcoming the torque exerted by the magnetization of the tires towards the walls of the silo

Keywords: Design, robotics, climbing robot, mechanical structure.

I. INTRODUCCIÓN

El maíz es uno de los cereales más producidos a nivel mundial por la diversidad de sus aplicaciones como alimento para animales (Mejía, 2013). Según MINAGRI (2022) en el 2021 la producción mundial de maíz amarillo fue de 1 123 047 mil toneladas anuales, mientras que, a nivel nacional en el mismo año fue de 1 277 609 toneladas de producción nacional y 3 649 000 toneladas importadas principalmente de Estados Unidos, Argentina y Brasil. Las regiones costeras del país, como La Libertad, son los principales productores nacionales aportando ese año según MINAGRI (2022) 424 780 toneladas.

El almacenamiento de tales cantidades de maíz es necesario ya sea para guardarlo por un corto periodo de tiempo antes de ser enviado a producción o a mediano y largo plazo para un periodo de tiempo más largo (MEPROSA, 2017). La forma más común de almacenaje, son los silos que son estructuras normalmente metálicas de gran variedad de tamaño que permiten alta capacidad de almacenamiento de maíz para el uso industrial gracias a su sistema de control de temperatura (idealmente de 15°C), sistemas de ventilación para controlar la humedad (idealmente un 13% de humedad), entre otros factores (SILOS CORDOBA, 2020)

Según Solano, R., (2019) un factor que surge en el proceso de almacenaje y que afecta por lo tanto al grano de maíz, es la presencia de insectos por las malas condiciones de los silos de almacenamiento. Principalmente el gorgojo es el más común y que además su presencia propicia la invasión de otros más insectos que dañan el grano infectándolo haciendo que se caliente perjudicando así el proceso productivo.

Es así que la limpieza de los silos de almacenamiento de maíz surge como una tarea de mantenimiento esencial y que debe ser programada de forma regular a fin de garantizar la inocuidad de los mismos y también evitar la acumulación de material que no permite la fluidez de almacenaje de producción (MEPROSA, 2017)

En nuestro país centrándonos en la empresa CHIMÚ se almacena maíz en silos de acero galvanizado corrugado de hasta 30 metros de altura y 20 de diámetro los cuales necesitan de una limpieza cada cierto tiempo para el ingreso de nueva producción y almacenamiento, para ellos una de las empresas encargadas de

realizar estos trabajos es SOLINPA E.I.R.L., aquí surge el riesgo de caída al que se exponen los operarios que deben de subir hacia una gran altura para poder realizar la limpieza de las partes más altas de los silos, esto requiere de mucha precaución y control por parte de los supervisores, para evitar que los operarios puedan sufrir alguna lesión o daño, pero aun así teniendo en cuenta las normativas de seguridad nacionales como la ley 29783 o normativas internacionales como OSHA1910, ANSI Z359, UNE-EN , el usuario sigue contemplando un cierto riesgo.

Según cifras del Ministerio del Trabajo y Promoción del Empleo (MTPE, 2022) solo en enero de este año se registraron 1132 notificaciones de accidentes en el trabajo referidos a trabajos en altura de los cuales el 0.62% fue mortal, el 1.68% fueron incidentes peligrosos, el 0.27% enfermedades ocupacionales y el 97.44% en accidentes no mortales, debido a ello se busca reducir este índice de riesgo mediante controles administrativos y de ingeniería (innovación tecnológica).

Un ejemplo de control de ingeniería es el desarrollo de robots escaladores para tareas de trabajo en altura como: inspección, soldadura, limpieza, entre otros (Alonso, (2020) y Díaz, P. (2013)). Estos robots tienen diferentes morfologías desde cuerpos regulares (cubos, rectángulos, esféricos) hasta formas zoomórficas e humanoides.

En Latinoamérica se han desarrollado diferentes dispositivos de robots escaladores para limpieza como el de Molina, O. (2012) que diseñó un robot de limpieza para ventanas logrando que el robot se desplace verticalmente sobre la superficie de la ventana manteniendo el equilibrio y adherencia mediante una estrategia de distribución de fuerzas y la relación del peso del robot con las ventosas seleccionadas.

Sin embargo, a nivel nacional y local no se han encontrado antecedentes de desarrollo robots para la actividad de limpieza específicamente de silos explicada párrafos antes.

Esta investigación tiene justificación de impacto laboral netamente en la eliminación del peligro de trabajo en altura que conlleva actualmente la tarea de limpieza de los silos de almacenamiento de maíz.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, el problema de investigación planteado es:

¿Cómo el diseño mecánico de un robot escalador permite la limpieza de silos de acero galvanizado corrugado de almacenamiento de granos de maíz de 30 metros de altura y 20 metros de diámetro?

El objetivo general es diseñar la estructura mecánica de un robot escalador para limpieza de silos de acero galvanizado corrugado de almacenamiento de granos de maíz de 30m de altura y 20m de diámetro para la empresa CHIMU S.A. Siendo los objetivos específicos: Determinar los criterios de diseño de la estructura mecánica a partir de las características constructivas de los silos para un diseño mecánico efectivo; determinar el concepto de diseño que mejor se ajuste a las exigencias de limpieza de silos; obtener la cinemática y sistema actuador-sensorico del robot para obtener los rangos y tipos de movimiento permitidos del robot limpiador; parametrizar el diseño a través de análisis de elementos finitos estáticos y dinámicos para determinar los rangos seguros de operación mecánica del robot. Finalmente validar en virtual el trabajo del robot a fin de valorar su correcto desempeño ante las exigencias físicas del proceso de limpieza.

II. MARCO TEÓRICO

Aquí se describe primero los antecedentes que han servido de referencia para el desarrollo de este trabajo.

Giménez, A. (2000), en su tesis doctoral titulada “Metodología de diseño y control de robots escaladores. Aplicación a las tareas de inspección” propuso una metodología para la construcción de robots escaladores, considerando la fuerza de gravedad, tipo de movimiento y espacio de trabajo. Él analizó la morfología de diferentes animales que realizan acciones de escalamiento logrando identificar los siguientes parámetros relevantes: Bajo peso, ya que requiere de una gran energía para poder vencer la fuerza de gravedad, gran maniobrabilidad que le permitirá moverse sobre superficies de cualquier forma geométrica, además de un gran nivel de autonomía tanto en la energía como en el control.

Garcés et al. (2017) en su tesis titulada “Diseño y construcción de un prototipo de plataforma robótica zoomórfica tele operada de seis extremidades con dieciocho grados de libertad para la exploración o inspección de terrenos no estructurados” construyeron un robot capaz de desplazarse sobre superficies no estructuradas mediante un control tele operado desde un ordenador por medio de una interfaz gráfica, en la que se realizó un análisis de su cinemática y dinámica lo que le garantizó una correcta traslación y lograr escalar estructuras inclinadas de hasta 20°, además se demuestra la eficacia de un robot hexápodo sobre superficies rocosas o discontinuas.

Álvarez (2018) en su tesis “Diseño de robot de limpieza externa de oleoductos” diseñó un prototipo teledirigido mediante el software SolidWorks en el que se elaboraron y ensamblaron todas las piezas del robot, además de calcularse los esfuerzos del material ante fuerzas tensionales, desplazamientos y deformaciones obteniendo un rango de trabajo seguro.

En Otal, J. (2015), se diseñó un prototipo de robot con capacidad de aspirar y limpiar el suelo mediante una metodología de diseño en 3D. Aquí se usa un sistema de rodillos de limpieza para raspar residuos en el suelo y posteriormente ser aspirados. Usan función sensorial para obtener información precisa de su entorno de trabajo y evitar colisiones. Su autonomía de trabajo energética es de 2 horas

Moreno, D., (2019) en su proyecto de investigación “Diseño de un robot escalador de alta flexibilidad para medición de tuberías en exteriores” describe el funcionamiento de dos tipos de robots escaladores representativos para diagnóstico de tuberías: El robot “RMS2” (Figura 1), de gran velocidad, flexibilidad y detección de corrosión; y el robot “RoboPipe” (Figura 2) con capacidad de moverse verticalmente usando imanes y visión artificial.

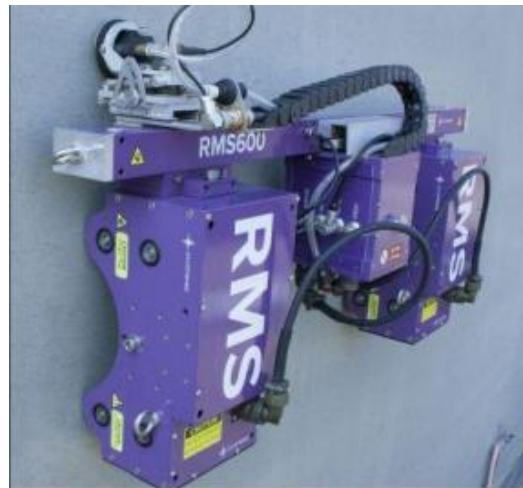


Figura1: Robot escalador de inspección RMS2

Fuente: Eddyfi (2019)



Figura 2: Robot escalador RoboPipe

Fuente: RobAid (2013)

En Alonso, M. (2020) se describe los siguientes robots escaladores: ROBIN (ROBotic Inspector) que escala estructuras obteniendo información del entorno mediante una fusión sensorial de diferentes tecnologías y se desplaza mediante la técnica llamada “pierna que anda” con accionamiento neumático que hace la función de “músculos”; ROMA es un robot multifuncional autónomo auto

soportado capaz de moverse a través de estructuras metálicas, tiene 4 grados de libertad y un mecanismo de agarre neumático (Figura 3). En la Figura 4 se muestra la versión más moderna (ROMA 2).

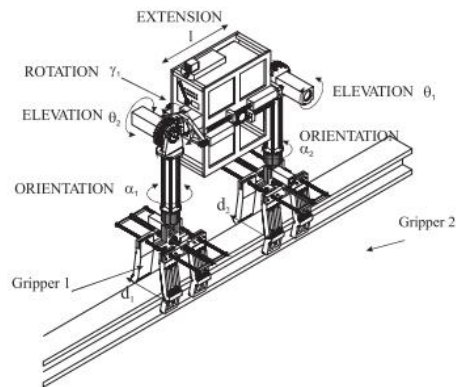


Figura 3: Robot ROMA1 y sus grados de libertad

Fuente: Alonso, M (2020)

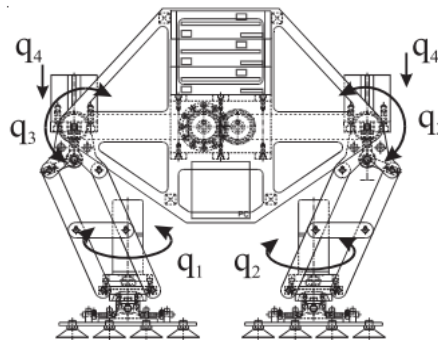


Figura 4: Robot ROMA2 y sus grados de libertad

Fuente: Alonso, M (2020)

En Cadix (2021) en su tesis de maestría “Desarrollo de la locomoción de para un robot cuadrúpedo” indica que los robots con ruedas son más eficientes en el consumo de energía y presentan un control más sencillo además de poderse aplicar de forma segura en ambientes controlados y terrenos planos. Así mismo menciona que el sistema locomotor tipo “patas” permite un mejor desplazamiento en entornos no estructurados.

Teniendo en cuenta los antecedentes mostrados anteriormente se continua el marco teórico describiendo conceptos que nos servirán como base para el desarrollo de este trabajo.

Las aplicaciones de la robótica en la humanidad se remontan desde hace ya varios años, esto con la finalidad de crear seres artificiales con la capacidad de imitar funciones y movimientos de los seres vivos, este término empezó a emplearse en el año 1921 el cual se asocia con la palabra “robota” que significa fuerza de trabajo o servidumbre, a partir de ellos los avances fueron aumentando hasta lograr obtener los prototipos con control numérico lo cual permitía controles de posición y velocidad en los procesos industriales. Ya en la actualidad la robótica abarca una amplia variedad de campos de estudio como es el ámbito industrial, de investigación, espacial, la medicina, tecnologías de tele operación, entre otros. (Hossian et al., 2020)

El término robot confluye en máquinas que pueden realizar trabajos productivos imitando los movimientos de seres vivos, los cuales poseen como sistema general un sistema mecánico, actuadores, sensores y un sistema de control como elemento base para la actuación del robot (Ollero, 2001).

La robótica involucra las funciones de control de movimientos, percepción y planificación suministrada a su vez por sensores internos que se encargan de medir el estado de la estructura mecánica, giros, desplazamientos relativos, buscando errar bucles de control de las articulaciones, estos a su vez relacionados con los grados de libertad que son definidos por Daintith y Rennie (2005) como “el número de parámetros independientes que se necesitan para especificar la configuración de un sistema”. En la Figura 5 se muestra la lógica de trabajo general del robot.

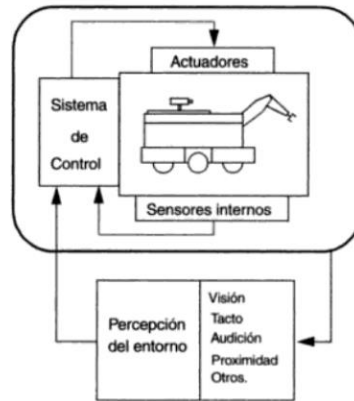


Figura 5: Robot y su interacción con el entorno

Fuente: Ollero, A (2001)

Los robots poseen más de un subsistema, sin embargo, en esta tesis delimitada al diseño mecánico del robot, únicamente se hace referencia al subsistema de movimiento, el cual se refiere a la estructura físico-mecánica del robot, la cual va a desarrollar los movimientos requeridos.

Los elementos que conforman este subsistema son:

El manipulador: el cual refiere a los eslabones y articulaciones de este. Los eslabones son normalmente hechos de aluminio o acero, mientras que, las articulaciones son generalmente de tipo traslación y rotatorios. En la Figura 6a se observa un robot denominado PUMA, en la cual se muestra sus articulaciones y eslabones, a su vez en la Figura 6b se observa la equivalencia de estos en el cuerpo humano

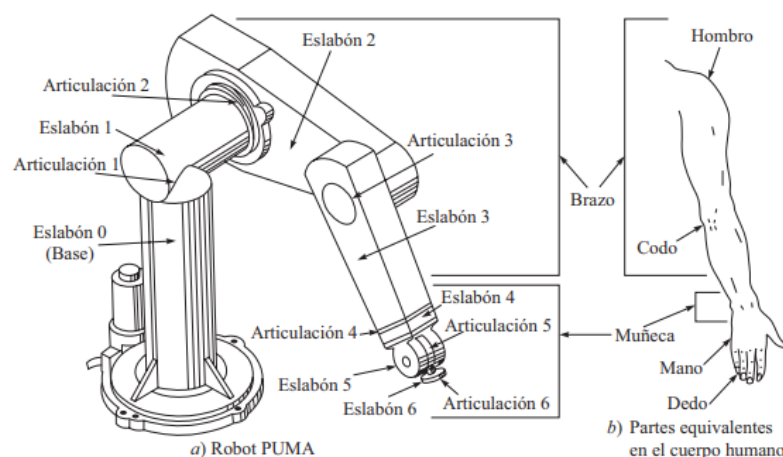


Figura 6: Articulaciones de un robot y su equivalencia en un cuerpo humano

Fuente: Kumar (2010)

Efecto final: se refiere al elemento montado en un extremo del manipulador para realizar la actividad a realizar por el robot, el equivalente en un cuerpo

humano sería la mano. Algunos ejemplos de efectores finales son: electrodos de soldadura, soplete de oxicorte, brocha de pintar o rastrillo de limpieza. En la Figura 7a se observa un ejemplo de efector simple el cual es un pistón con cremallera, mientras que en la Figura 7b se observa un tipo de efector más complejo como lo son los dedos de una mano robótica

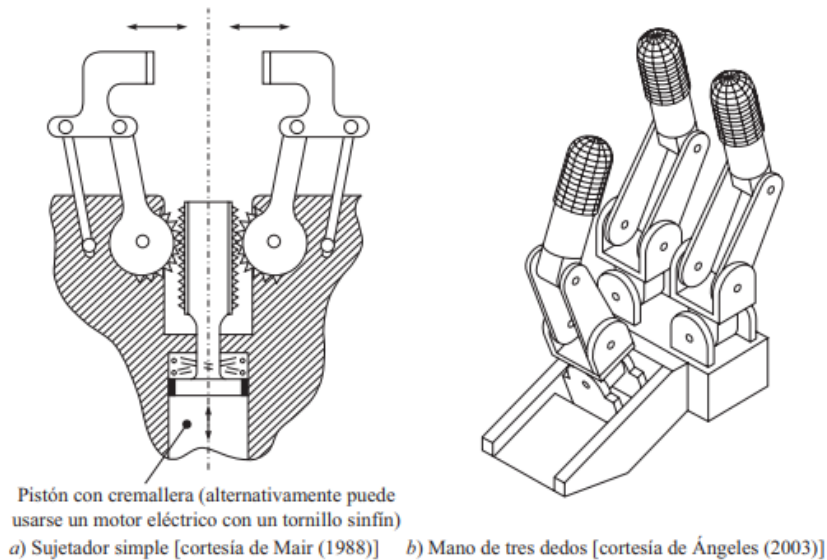


Figura 7: Ejemplos de efectores finales de un robot

Fuente: Kumar (2010)

Actuador: se refiere al elemento motriz el cual es capaz de transmitir movimiento al manipulador y, por lo tanto, al efecto final. Estos pueden ser hidráulicos, neumáticos o eléctricos.

Uno de los actuadores más usados son los motores de corriente continua (motores DC) gracias a su capacidad de fácil regulación de revoluciones y par motor. (HarmonicDrive, 2016). En especial, el uso de los motorreductores (Figura 8), que son máquinas que combinan este tipo de motores con un reductor de velocidad que ayuda a un control de revoluciones y par motor aún más preciso (ROYDISA, 2019)



Figura 8: Motorreductor

Fuente: Tesla Electronic

Acerca de los robots escaladores, el sistema que define la posibilidad del movimiento vertical que describirá es el de adherencia, una de las formas más comunes es el uso de imanes permanentes que son objetos capaces de permanecer en su estado de magnetización durante periodos muy largos de tiempo (EUROBALT, 2019). Según MAGNETSALES (2016) Los principales materiales para la fabricación de imanes permanentes son: Alnico, Ferrita, Samario Cobalto (SmCo) y Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB). Se pueden comparar el rendimiento magnético de los materiales anteriormente mencionados con el producto de energía máxima, que es el punto donde el imán tendrá la mayor cantidad de energía en un volumen mínimo, tal como se observa en la Tabla 1.

Material	MGO	KJ/m ³
Ferrita (anisotrópica)	3.3	26
Alnico (anisotrópico Alnico III)	5.2	42
Samario Cobalto (2:17)	26	208
Neodimio-Hierro-Boro (N38H)	38	306

Tabla 1: Comparación de rendimiento magnético

Fuente: MagnetSales

Otro dato importante es la densidad de flujo de cada material cuando se trabaja aproximadamente en su producto de energía máxima. Esta comparación se puede ver en la Tabla 2.

Material	Densidad de flujo
Ferrita (anisotrópica)	100 mT (1000 Gauss)
Álnico (anisotrópico Alcomax III)	130 mT (1300 Gauss)
Samario Cobalto (2:17)	350 mT (3500 Gauss)
Neodimio-Hierro-Boro (N38H)	450 mT (4500 Gauss)

Tabla 2: Comparación de densidad de flujo

Fuente: MagnetSales

La capacidad de estos imanes para ser maquinado y poder obtener cualquier forma requerida de diseño (Figura 9) lo hace perfecto candidato para su aplicación en sistemas de adherencia de robots escaladores.



Figura 9: Imanes permanentes

Fuente: IMAMAGNETS

Por otro lado, para el sistema de movimiento de los robots es necesario recurrir a la teoría de la cinemática de una partícula definiendo los siguientes conceptos según Hibbeler (2004):

Velocidad: Es la magnitud física que relaciona el tiempo con el desplazamiento de una partícula y está dada por la Ecuación (1).

$$v = \frac{d}{t} \left(\frac{m}{s} \right) \quad (1)$$

Donde:

v: Velocidad [m/s]

d: Distancia recorrida [m]

t: Tiempo [s]

Aceleración: Hace referencia a la variación de la velocidad con respecto al tiempo y está dada por la Ecuación (2).

$$a = \frac{dv}{dt} \left(\frac{m}{s^2} \right) \quad (2)$$

Velocidad en función al tiempo: La Ecuación (3) relaciona la velocidad final e inicial de una partícula con su aceleración y el tiempo.

$$vf = v0 + a * t \quad (3)$$

Donde:

vf: Velocidad final [m/s]

v0: Velocidad inicial [m/s]

Distancia recorrida en función al tiempo: La Ecuación (4) relaciona, mediante la solución de integrales, el espacio recorrido de una partícula con el tiempo que demora en recorrerlo.

$$d = v0 * t + \frac{1}{2} * a * t^2 \quad (4)$$

Velocidad en función de la distancia recorrida: Resolviendo “t” en la Ecuación (3) y sustituyéndolo en la Ecuación (4) se obtiene la siguiente Ecuación (5).

$$vf^2 = v0^2 + 2 * a * d \quad (5)$$

Además, se pueden definir las siguientes ecuaciones para el análisis del diagrama de cuerpo libre a una partícula, importante para entender el porqué de su cinemática.

Peso: Es la fuerza con la que la Tierra atrae a la masa de un cuerpo por acción de la gravedad, se puede definir con la Ecuación (6)

$$W = m * g \quad (6)$$

Donde:

W: Peso [N]

m: Masa [kg]

g: Gravedad [m/s²] (9.81 m/s²)

Ecuación de movimiento: Esta dado por la segunda ley de Newton y relaciona la masa de un cuerpo con su aceleración para obtener una fuerza. Se observa esta relación en la Ecuación (7)

$$\Sigma F = m * a \quad (7)$$

Fricción: Es la fuerza con la que una superficie no lisa se opone al movimiento de un cuerpo, se define en la Ecuación (8) como:

$$f = \mu_k * N \quad (8)$$

Donde:

f: Fuerza de fricción [N]

μ_k : Coeficiente de rozamiento cinético [adimensional]

N: Reacción normal de la superficie contra la masa [N]

Para el diseño de los ejes acoplados a los motores para el movimiento del robot es necesario tener en cuenta las siguientes ecuaciones para su diseño.

Esfuerzo de Von Mises alternante por la flexión:

$$\sigma_a = K_f * \frac{32 * M_a}{\pi * d^3} \quad (9)$$

Donde:

K_f : Factor de concentración por fatiga de la flexión

M_a : Momento flexionante alternante

d: Diámetro del eje

Esfuerzo de Von Mises medio por la Torsión:

$$\tau_m = K_{fs} * \frac{16 * T_m}{\pi * d^3} \quad (10)$$

Donde:

K_{fs} : Factor de concentración por fatiga de torsión

T_m : Momento torsor medio

Esfuerzo máximo de Von Mises:

$$\sigma_{max} = \left[\left(\frac{32 * K_f * (M_m + M_a)}{\pi * d^3} \right)^2 + 3 * \left(\frac{16 * K_{fs} * (T_m + T_a)}{\pi * d^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (11)$$

Factor de seguridad con el uso del esfuerzo máximo de Von Mises:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

Tipo de investigación:

El tipo de investigación fue aplicada debido a que se utilizan los conocimientos de metodología de diseño para el desarrollo del robot escalador.

Diseño de investigación

Fue de tipo experimental explicativo, ya que las variables se irán evaluando a través del desarrollo del proyecto y serán manipuladas con el fin de obtener los resultados necesarios.

3.2. Variables y operacionalización

Las variables de estudio con relación al robot son:

Variable Independiente

- Diseño mecánico del robot escalador

Variable dependiente

- Limpieza de silos de almacenamiento de maíz

3.3. Población muestra y muestreo

Población: Silos de almacenamiento de maíz en el Perú.

Muestra: Silos de almacenamiento de maíz de 30 metros de altura y 20 metros de diámetro.

Muestreo: Muestreo no probabilístico de tipo por conveniencia.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas e instrumentos que se utilizaron fueron la observación con la cual se registró los riesgos y peligros que existen en el entorno laboral a estudiar, para ello se analizó el tipo de trabajo que se realiza, las herramientas, los equipos y el método de trabajo, esto mediante una guía de observación.

Además, se realizó entrevistas hacia los operarios para poder recopilar información de los peligros y riesgos a los que se sienten expuestos, los trabajadores en el área de calidad de la empresa CHIMU para entender su forma de evaluación de la limpieza de los silos. Todo mediante las guías de entrevista.

3.5. Procedimientos

Se inició con el proceso de recolección de los requerimientos necesarios para diseñar el robot, a continuación se realizó la recopilación de información científica relevante acerca de diseño de robots y silos de acero galvanizado corrugado, con los cuales, se definió los parámetros que se deseaban obtener para los movimientos del robot, a partir de ello se definió conceptos de diseño y configuraciones de diseño, las cuales se seleccionaron a través de matrices de criterios ponderados, después de haber seleccionado los conceptos y configuraciones óptimas se realizó el diseño paramétrico del robot, mediante ecuaciones que garantizaron el correcto funcionamiento mecánico del robot, por último, se modeló la estructura mecánica del robot mediante el software de Inventor. En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento mencionado.

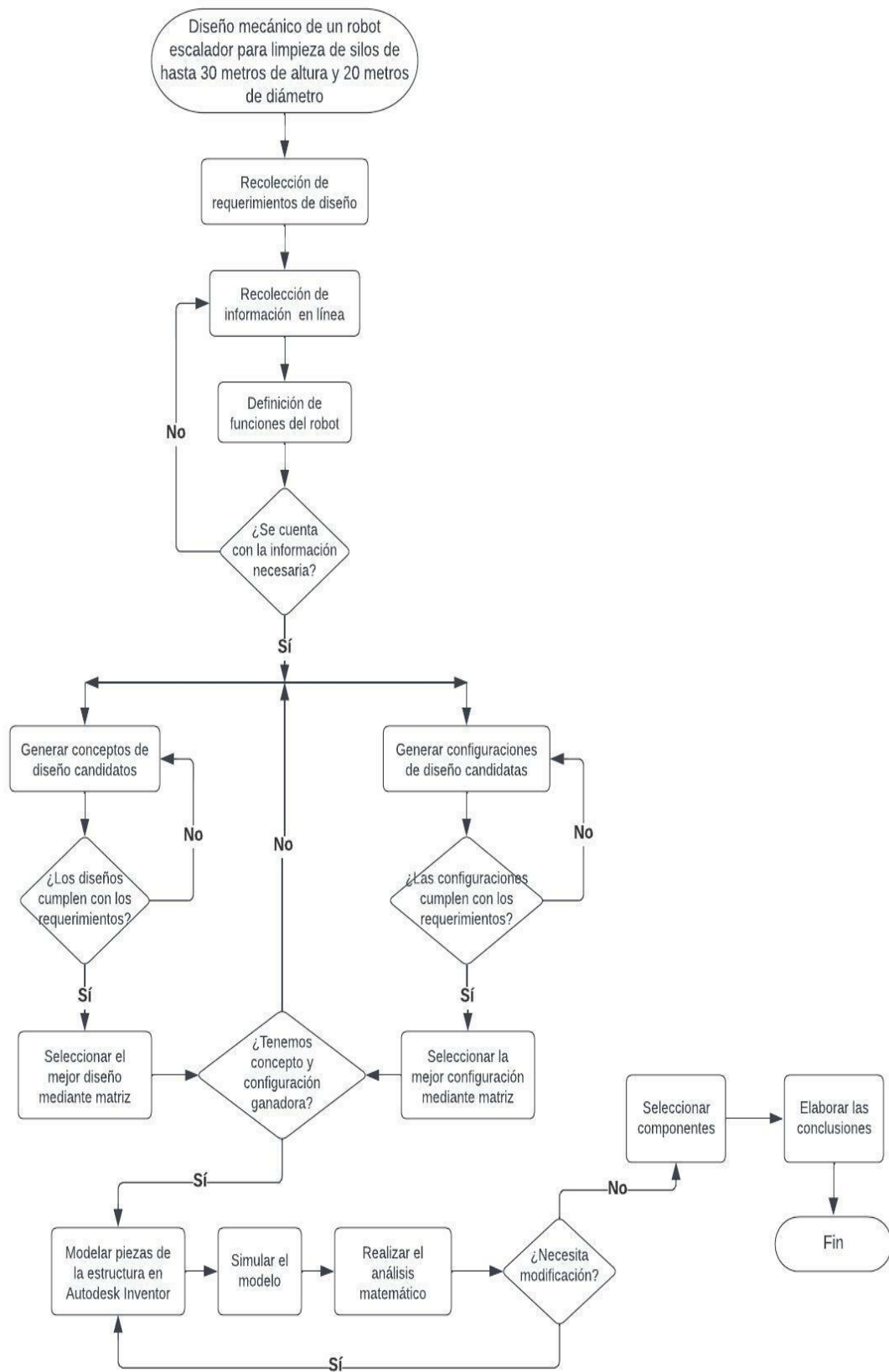


Figura 10: Diagrama de flujo de procedimientos

Fuente: Elaboración propia

3.6. Método de análisis de datos:

Se realizó la presente investigación de acuerdo a la metodología del diseño la cual puede ser visualizada a detalle en la Figura 9.

La información obtenida por las entrevistas se procesó mediante tablas las cuales tendrán como fin ordenar y resumir la información de necesidades y requerimientos del cliente. Asimismo, esta información se complementó con la información obtenida en línea.

Se validó el diseño mediante el uso de software para así simular la estructura y obtener datos acerca de su distribución de esfuerzo y factor de seguridad.

3.7. Aspectos Éticos

Los autores del presente trabajo se comprometen a cumplir con los requerimientos de validación y veracidad de la recolección y uso de datos para los autores citados a lo largo de este trabajo, asimismo, los autores se comprometen a salvaguardar la información brindada por la empresa SOLINPA E.I.R.L. y CHIMU S.A.

IV. RESULTADOS

4.1. Determinación de los criterios de diseño

Para cumplir nuestro objetivo se necesitó determinar las actividades necesarias para realizar la limpieza de silos, esto se pudo definir con las encuestas realizadas tanto al gerente de la empresa SOLINPA, encargada actualmente del servicio de limpieza de los silos de almacenamiento de maíz, como a trabajadores de CHIMU, que es la empresa dueña de los silos y que a su vez se encarga de la verificación y validación del servicio por medio de su área de calidad. A continuación, se muestra un resumen de las respuestas obtenidas

Entrevista N°01: Realizada al gerente y trabajadores de SOLINPA

Pregunta 1: Desarrollo actual del servicio de limpieza de las paredes

Actualmente para el servicio de limpieza total del silo se utiliza 5 cuerpos de andamios para lograr alcanzar la parte más alta de la pared del silo, no se realiza la limpieza de la parte cónica superior, se usa escobillones de 4 metros realizando un movimiento vertical para la remoción del exceso de polvo tal como se observa en la Figura 11.



Figura 11: Limpieza del silo

Fuente: Elaboración propia

Pregunta 2: Principales problemas del desarrollo del trabajo

El principal problema es el peligro del trabajo en altura por lo que no hay de donde enganchar una línea de vida que no sea del mismo andamio, además el hecho de ser un espacio confinado hace que el trabajo sea más cansado en época de verano, por último, el uso de escobillones con palos metálicos de casi 4 metros hace que el trabajo sea lento por lo cansado que es.

Pregunta 3: Solución al riesgo de caída

En principio controles de equipos de protección personal como el arnés de seguridad y el casco con barbiquejo, pero en un futuro la implementación de

una máquina de limpieza manejada por un solo operario que este a nivel de suelo.

Pregunta 4: Plazo de tiempo de CHIMU para el servicio de limpieza

Actualmente es de 3 días para limpieza parcial, es decir, con los jugadores a ras del suelo y 7 días para limpieza total, el cual implica el trabajo en altura con andamios.

Pregunta 5: Tiempo promedio de limpieza de paredes del silo

Actualmente se maneja según el área de supervisión un tiempo de 40 minutos aproximadamente para el avance de 2 metros de longitud de circunferencia de la pared del silo.

Pregunta 6: Criterios relevantes para la máquina de limpieza

Velocidad de trabajo, Sujeción a la pared, Mantenimiento, Peso y Precisión de movimiento

Pregunta 7: Importancia del tiempo versus calidad de limpieza

Se entiende que el área de calidad solo busca una remoción de exceso de limpieza por lo que si se tuviera que escoger uno se elegiría el tiempo.

Entrevista N°02: Realizada a trabajadores del área de calidad de CHIMU

Pregunta 1: Verificación de correcta limpieza de paredes de silo

Ya que se busca únicamente la remoción de exceso de polvo de las paredes, se hace uso de la observación.

Pregunta 2: Definición de “buena calidad de limpieza”

Se infiere que la buena calidad de limpieza hace referencia a la remoción de exceso del polvillo de maíz de las paredes de los silos de almacenamiento.

Pregunta 3: Tiempo razonable de desarrollo de limpieza

Se considera que entre uno a dos días es suficiente para una efectiva limpieza de las paredes del silo de almacenamiento.

4.1.1. Especificaciones de ingeniería del robot

Luego de analizar la información recopilada se planteó una lista de especificaciones para el diseño mecánico del robot escalador para limpieza de silos de almacenamiento de maíz. En la tabla 3 se presentan las especificaciones de ingeniería.

Subfunción de ingeniería	Características	Unidad	Rango
Escalar una altura	Distancia	Metros	$0 \leq H \leq 26$
Nivel de sujeción	Fuerza	Newton	Por determinar
Horas de trabajo	Tiempo	Horas	12
Torque requerido	Torque	N.m	Por determinar
Velocidad de los actuadores	Velocidad	cm/s	Por determinar
Peso del robot	Peso	Kilogramos	Por determinar

Tabla 3: Especificaciones de ingeniería

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar aún existen valores y rangos por determinar, estos se detallarán al finalizar el diseño de la estructura mecánica del robot.

4.1.2. Especificaciones del entorno

A continuación, en la Figura 12 se muestra las dimensiones de las paredes de los silos de almacenamiento de maíz del molino Trujillo.

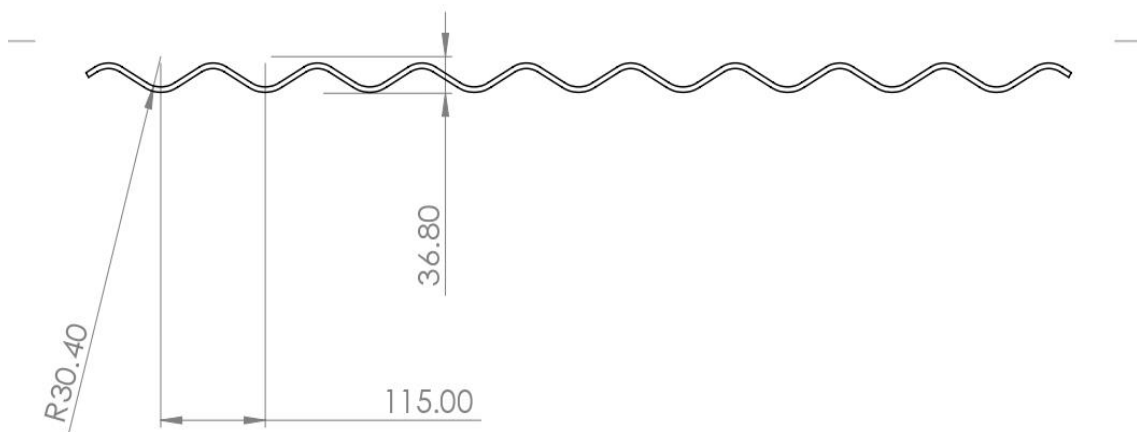
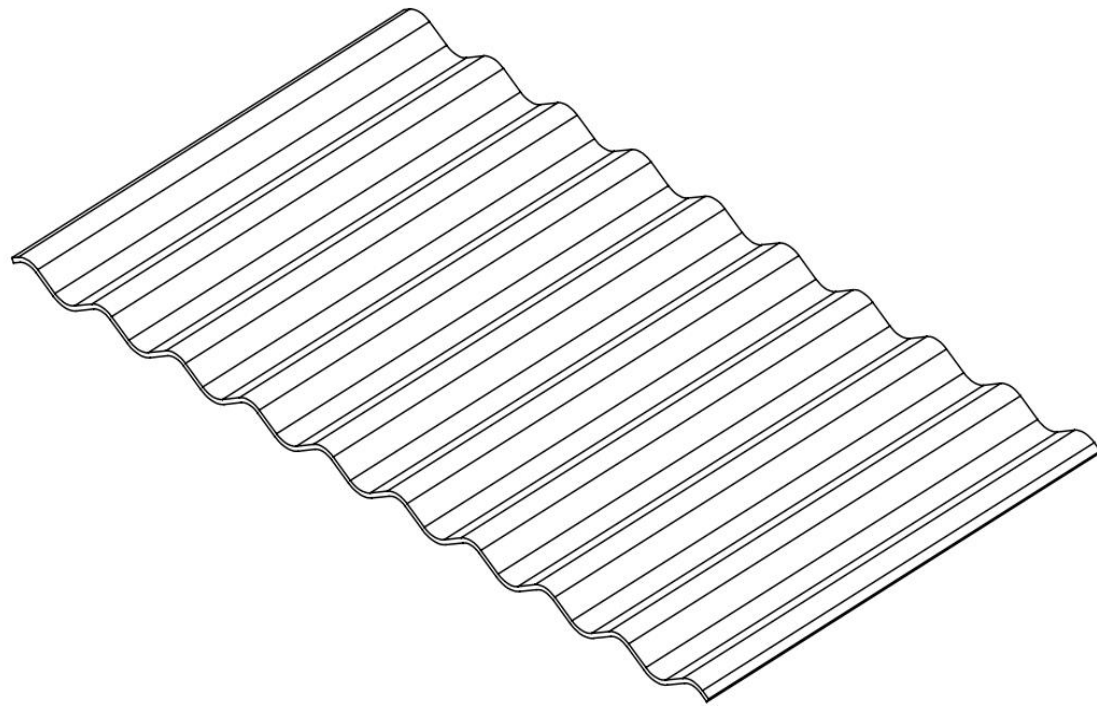


Figura 12: Dimensiones de la pared de chapa ondulada de los silos de almacenamiento de maíz de Molino Trujillo – Chimú

Fuente: Elaboración Propia

Estas dimensiones (todas en milímetros) nos servirán de orientación para las dimensiones generales del robot (ancho y largo).

Además, se debe tener en cuenta que a lo largo de la pared del silo existe la presencia de cabezales de pernos para el traslape de las planchas, tal como se ve en la Figura 12.

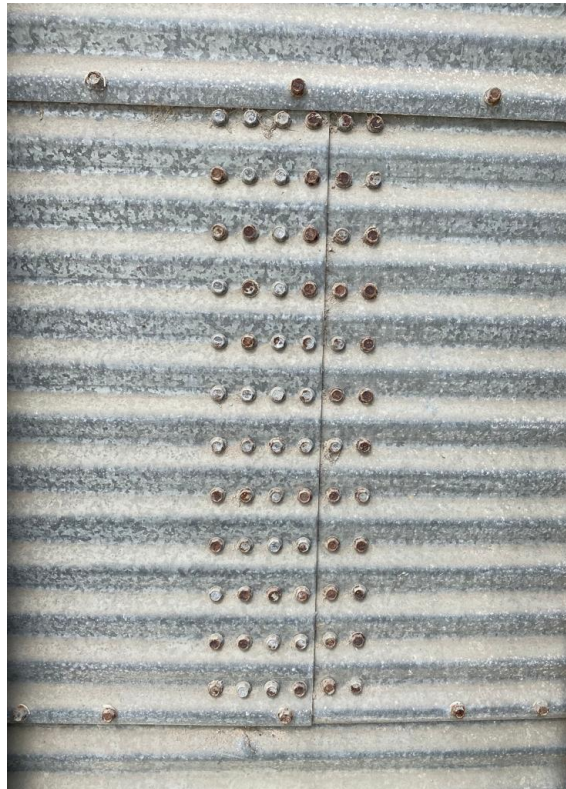


Figura 13: Conjunto de pernos para el traslape de planchas

Fuente: Elaboración Propia

Se deberá pensar en tener los menores obstáculos posibles al momento del transporte por lo que la estructura del robot deberá ser por lo menos un poco más ancha que la dimensión de ancho de este conjunto de pernos para así poder evitarlos.

Por último, se debe tener en cuenta según lo visto en las entrevistas que el servicio de limpieza no incluye a la superficie interna de la parte cónica del silo, la cual puede ser visualizada en la Figura 14.



Figura 14: Limitación de altura de cúpula del silo

Fuente: Elaboración Propia

De esta forma la altura de trabajo se limita a 26 metros de altura, lo cual servirá para los cálculos de diseño.

4.2. Diseños conceptuales

En este segmento se mostrarán los diseños conceptuales para la solución del diseño del robot basándose en dos sistemas principales: sistema de movimiento y sistema de sujeción. A continuación, se proponen tres conceptos que luego serán evaluados con una matriz de criterios ponderados.

4.2.1. Concepto A: Robot con patas y ventosas para la adherencia

Este concepto está inspirado en lo visto en los antecedentes mostrados donde se utiliza robots con sistema de patas para su movimiento el cual cuenta con una serie de eslabones y articulaciones para su correcto funcionamiento, la forma de sujeción de las patas a la pared del silo se lograría con ventosas y el uso de una bomba de vacío la cual se encontraría en la parte interna de la estructura del robot. Se contaría con 6 patas para dar mejor estabilidad al momento de escalar, ya que para ello primero moverá las dos patas delanteras hacia donde se requiera escalar, quedando cuatro patas para una buena sujeción; posteriormente, se realizaría el mismo trabajo con las dos patas centrales y por último las dos patas traseras. En total se tendría tres articulaciones por cada pata (un total de 18 articulaciones que deberán ser controladas simultáneamente), las cuales lograrían el movimiento por medio de motores planos que ocupan poco volumen de montaje y son capaces de entregar un alto par de fuerza.

Las principales ventajas del sistema de patas son: posibilidad para desplazarse por terrenos no estructurados con facilidad y buena estabilidad estática y dinámica; mientras que, las principales desventajas de este sistema son: dificultad para el análisis de estabilidad cuando se realiza la acción de levantamiento y colocación de las patas, las patas deben de contar con mínimo 2 grados de libertad cada una lo que implica mayor complejidad de diseño y mayor consumo de energía debido a la fuerza que necesitan para oponerse a la gravedad.

Por otro lado, las principales ventajas del uso de ventosas son: fácil obtención y menor tamaño; mientras que las desventajas son: los mecanismos auxiliares difíciles de obtener, constante mantenimiento, sujeción más débil.

A continuación, en la Figura 15 se muestra un boceto referencial del diseño conceptual A.

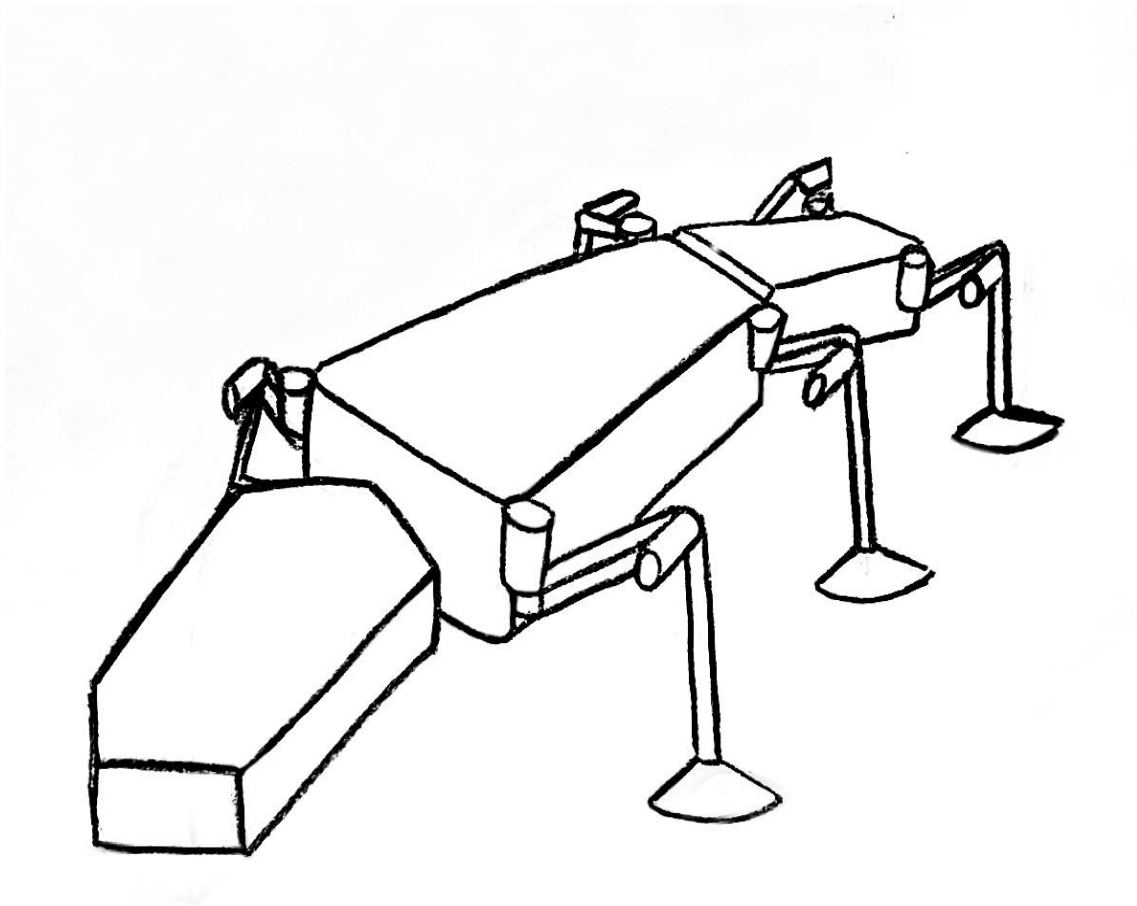


Figura 15: Diseño conceptual A

Fuente: Elaboración propia

4.2.2. Concepto B: Robot con sistema de oruga y adhesivos

Para este diseño conceptual se tiene un robot con un sistema de tipo oruga, el cual consta de ruedas unidas por una faja, para este concepto se pensó un total de 8 ruedas de igual diámetro, 4 de estas servirían para el desplazamiento simple (a nivel) del robot y las otras 4 servirían de ayuda para el escalamiento, cada faja constaría de un grupo de 2 ruedas, por lo que se tendría un total de 4 fajas, 2 en cada lado. Tal como se ve en la Figura 16, las dos fajas de un lado estarían acopladas gracias a las ruedas unidas por un eje. Además, para la estructura del robot se pensó hacerla de forma rectangular como una caja, donde se alojarían todos los componentes electrónicos para un posterior diseño de control no visto en esta investigación. Para el movimiento de las ruedas se usarían 2 motorreductores para una mejor distribución de la fuerza de tracción y torque necesario para el movimiento. Por otro lado, para el sistema de sujeción se haría uso de adhesivos termoplásticos, los cuales serían activados por un efector termoeléctrico el cual calentaría o enfriaría el adhesivo de acuerdo a si se necesita escalar o solo mantener sujeto a la pared mientras se realiza la limpieza.

Las principales ventajas del sistema de oruga son: mayor área de contacto con el terreno lo que le brinda mayor maniobrabilidad, mayor tracción y movilidad lo que previene que el robot se quede estancado, no requiere sistema de suspensión, mayor empuje, generan baja presión en el suelo en el que se desplazan; mientras que las principales desventajas son: mayor consumo de potencia por rodadura cuando realiza giros debido al rozamiento, el suelo tiende a fracturarse cuando se realizan giros muy cerrados, la plataforma tiene excesiva vibración cuando el terreno donde se desplaza no es liso.

A continuación, en la Figura 16 se presenta un bosquejo referencial del diseño conceptual B.

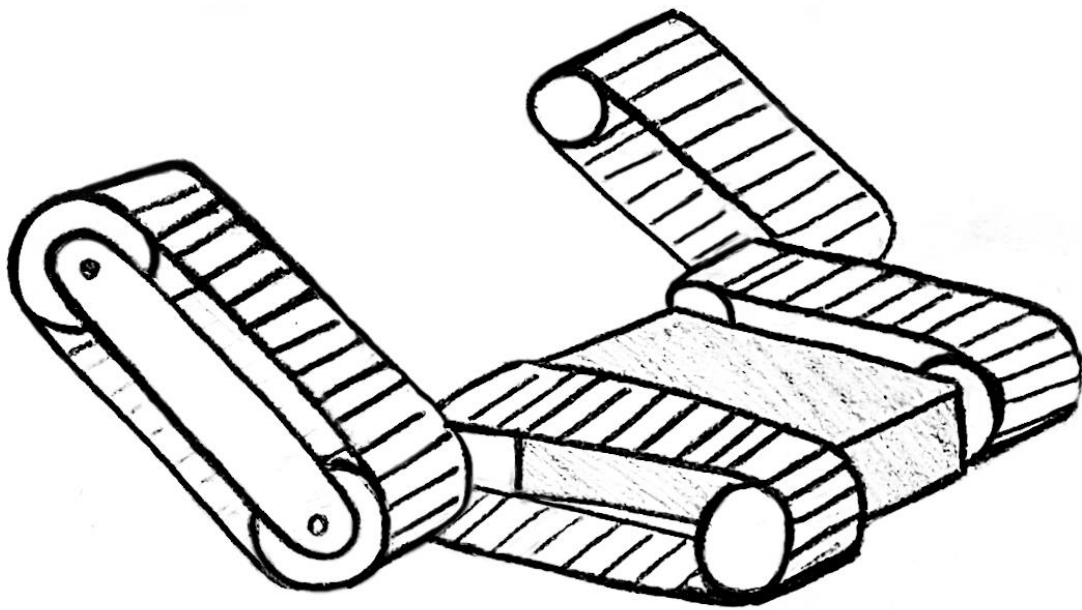


Figura 16: Diseño conceptual B

Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Concepto C: Robot con sistema de ruedas imantadas

Para este concepto se tiene una estructura similar a la de un auto de cuatro ruedas que serían de igual diámetro, además la estructura principal del robot donde se alojarían la mayoría de componentes electrónicos para el control del robot sería de PLA por ser un material ligero. Para el movimiento de las ruedas se usaría 1 motorreductor acoplado a las ruedas delanteras mientras que las traseras se moverían por inercia. A su vez, para el sistema de sujeción, las ruedas serían imantadas, principalmente serían de acero mientras que internamente se colocarían imanes de neodimio.

Las ventajas de esta forma de desplazamiento son: mayor eficiencia en superficies lisas, no desgastan la superficie de trabajo donde se desplazan, requieren un menor número de partes, tienen un desarrollo menos complejo que el sistema de oruga y patas, tienen mayor velocidad

de desplazamiento que el resto de sistemas, la carga que pueden soportar es mayor al resto de robots; mientras que las desventajas son: pérdida de tracción en superficies desniveladas angulares, mayor rigidez que el resto de sistemas lo que disminuye su versatilidad para trabajos omnidireccionales.

A continuación, en la Figura 17 se presenta el boceto referencial del diseño conceptual C.

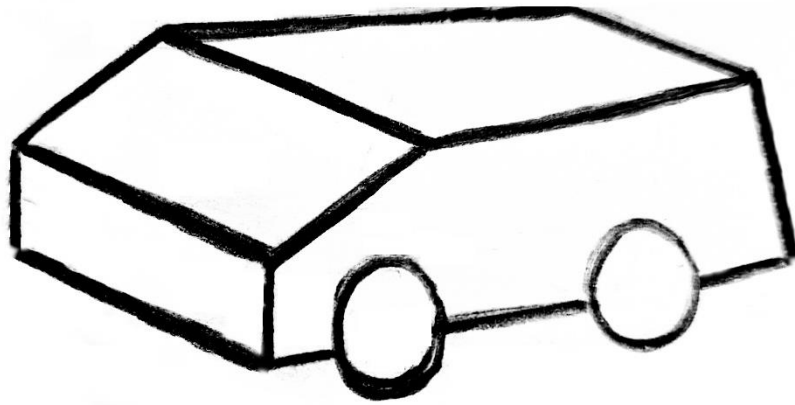


Figura 17: Diseño conceptual C

Fuente: Elaboración propia

4.2.4. Selección del diseño conceptual óptimo

Para la selección del diseño conceptual óptimo se tiene en cuenta los siguientes criterios de evaluación: Velocidad de trabajo, Sujeción a la pared, Mantenimiento, Peso y Precisión de movimiento. Se propone una matriz para calificar cada uno de los criterios mediante una escala ordinal de la siguiente forma: Muy bueno (5); Bueno (4); Regular (3); Malo (2) y Muy malo (1). Cada calificación será multiplicada por un porcentaje de relevancia de cada criterio de acuerdo a la información recolectada de las entrevistas. Finalmente se hará la sumatoria de cada calificación ponderada, escogiendo así el concepto de mayor valor.

A continuación, se presenta la Tabla 4 con los criterios de evaluación y su respectivo valor porcentual. Posteriormente se presenta en la Tabla 5, la matriz de criterios ponderados donde se escogerá el ganador.

Criterios de Evaluación		
Criterio	Descripción	Porcentaje
Velocidad de trabajo	El robot es capaz de realizar el movimiento velozmente.	25%
Sujeción a la pared	El diseño es tal que el robot es capaz de tener buena adherencia a la pared ya sea estando estático o en movimiento.	25%
Mantenimiento	El diseño tiene que ser de tal forma que sus componentes sean de fácil mantenimiento, a su vez ser de fácil desensamble.	15%
Peso	El diseño del robot deberá tener la menor cantidad de componentes y de materiales livianos.	15%
Precisión de movimiento	El diseño del robot debe ser tal que el desplazamiento sea exacto y requiera la menor cantidad de articulaciones.	20%

Tabla 4: Criterios de evaluación del diseño conceptual

Fuente: Elaboración propia

CRITERIOS		CONCEPTO DE DISEÑO					
Descripción	Peso %	CONCEPTO A		CONCEPTO B		CONCEPTO C	
		Puntuación	Peso de la puntuación	Puntuación	Peso de la puntuación	Puntuación	Peso de la puntuación
Velocidad de trabajo	25%	2	0.5	4	1.0	5	1.25
Sujeción a la pared	25%	4	1.0	3	0.75	4	0.60
Mantenimiento	15%	3	0.45	3	0.45	4	0.60
Peso	15%	3	0.45	2	0.30	4	0.60
Precisión de movimiento	20%	5	1.0	3	0.60	3	0.60
Total	100%		3.40		3.10		3.65
Posición		2°		3°		1°	

Puntuación	Valor
5	Muy Bueno
4	Bueno
3	Regular
2	Malo
1	Muy malo

Tabla 5: Matriz de criterios ponderados del diseño conceptual

Fuente: Elaboración Propia

4.3. Diseño de configuración del robot con ruedas imantadas

Se presentan las tres configuraciones de los robots con ruedas imantadas, variando el sistema de limpieza, mediante bocetos de referencia para luego ser evaluadas mediante una matriz de criterios ponderados.

4.3.1. Configuración A

En esta configuración se tienen dos brazos que salen de la estructura del robot, los cuales pueden ser levantados con el uso de servomotores (1 articulación). Al final de los brazos se acoplarían escobillas rotativas comerciales con cerdas de fibra de polipropileno. El acople de las escobillas a los brazos sería por un eje roscado pequeño. Además, el movimiento de los brazos será describiendo un pequeño ángulo de alrededor de 15° a 20° para poder acercarse a la pared del silo con forma de onda.

A continuación, en la Figura 18 se presenta el boceto de referencia del diseño de configuración A.

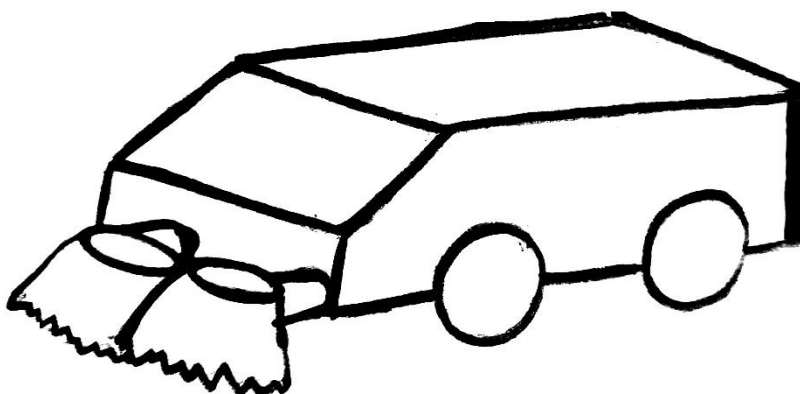


Figura 18: Diseño de configuración A

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Configuración B

Para esta segunda configuración se utilizan dos brazos al igual que la anterior configuración, estos estarían acoplados mediante un sistema de engranajes con una placa a las ruedas delanteras para ahorro de espacio. Al final de los brazos estos se unen mediante un eje al cual se acoplaría un rodillo con obleas de cepillos comerciales con cerdas de polipropileno. Además, el eje logrará el movimiento rotacional mediante el uso de un motorreductor conectado al eje de manera directa. Se nombra a este sistema como rodillo de limpieza en esta investigación.

A continuación, en la Figura 19 se presenta el boceto del diseño de configuración C.

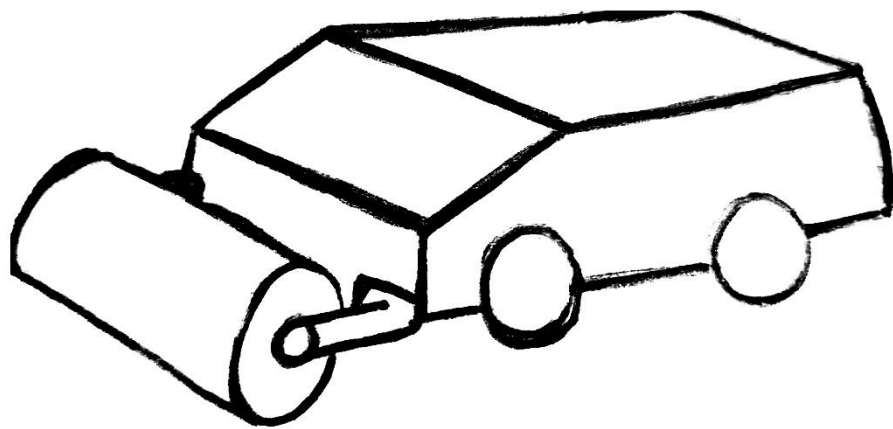


Figura 19: Diseño de configuración B

Fuente: Elaboración propia

4.3.3. Configuración C

Para esta última configuración se utilizaría escobillas rotativas comerciales al igual que la primera configuración, la diferencia estaría en la posición planteada por debajo del cuerpo del robot, similar a un vehículo barredor de calzada vistos normalmente en países europeos o norteamericanos. Este cambio de posición permitiría una mejor distribución de peso además de poder acoplar una escobilla de mayor diámetro. De igual manera que la configuración anterior se plantea el acoplamiento de la escobilla rotativa mediante un eje roscado.

A continuación, en la Figura 20 se presenta el bosquejo referencial del diseño de configuración C.

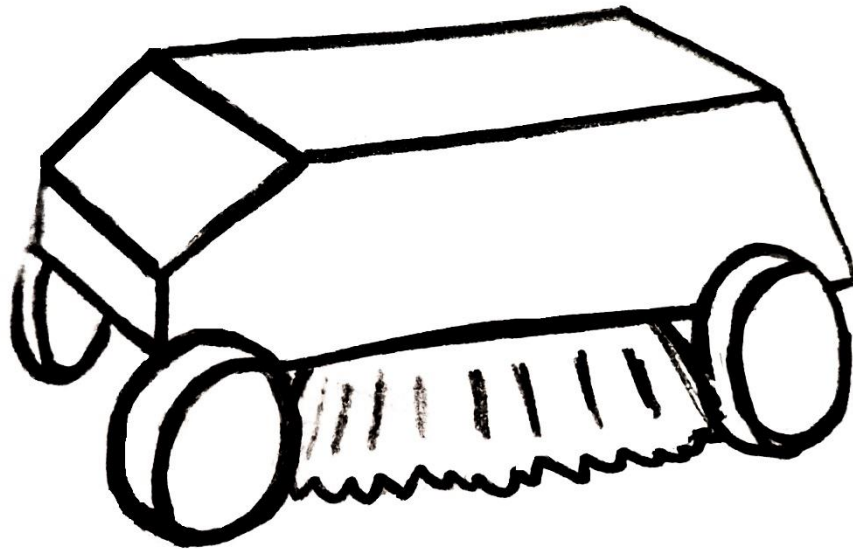


Figura 20: Diseño de configuración C

Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Selección de diseño de configuración óptimo

Para la selección del diseño de configuración óptimo se tiene en cuenta los siguientes criterios de evaluación: Velocidad de trabajo, ensamblaje, mantenimiento, distribución de peso, estética. La forma de calificación será similar a la de los diseños conceptuales.

A continuación, se presenta la Tabla 6 con los criterios de evaluación y su respectivo valor porcentual. Posteriormente se presenta en la Tabla 7, la matriz de criterios ponderados donde se escogerá el ganador.

Criterios de Evaluación		
Criterio	Descripción	Porcentaje
Velocidad de trabajo	El sistema de limpieza es capaz de remover rápidamente mayor espacio de trabajo.	30%
Ensamblaje	El diseño es tal que el elemento de limpieza es de fácil montaje y desmontaje	25%
Mantenimiento	El diseño tiene que ser de tal forma que sus componentes sean de fácil mantenimiento.	25%
Distribución de peso	La configuración es de tal forma que se logra una distribución lo más simétrica posible para evitar esfuerzos excesivos del robot.	15%
Estética	La configuración es estéticamente comercial.	5%

Tabla 6: Criterios de evaluación del diseño de configuración

Fuente: Elaboración propia

CRITERIOS		CONFIGURACIÓN DE DISEÑO					
Descripción	Peso %	CONFIGURACIÓN A		CONFIGURACIÓN B		CONFIGURACIÓN C	
		Puntuación	Peso de la puntuación	Puntuación	Peso de la puntuación	Puntuación	Peso de la puntuación
Velocidad de trabajo	30%	3	0.90	5	1.50	4	1.20
Ensamblaje	25%	4	1.00	3	0.75	4	1.00
Mantenimiento	25%	2	0.50	4	1.00	3	0.75
Distribución de peso	15%	3	0.45	4	0.60	4	0.60
Estética	5%	2	0.10	4	0.20	4	0.20
Total	100%		2.95		4.05		3.75
Posición		2°		1°		1°	

Puntuación	Valor
5	Muy Bueno
4	Bueno
3	Regular
2	Malo
1	Muy malo

Tabla 7: Matriz de criterios ponderados del diseño de configuración

Fuente: Elaboración propia

4.4. Cálculos de funcionamiento mecánico del robot

Calculo de velocidad y tiempo estimado del robot

Teniendo en cuenta las dimensiones generales del silo:

Diámetro del silo:

$$\varnothing_s = 20 \text{ m}$$

La longitud de la circunferencia es:

$$L_{cs} = 2\pi * r = 2 * 3.1416 * 10 \text{ m} = 62.83 \text{ m} \quad (13)$$

La longitud del rodillo limpiador es:

$$L_{rod} = 30 \text{ cm} = 0.3 \text{ m}$$

Se determina el número de viajes que realizará el robot para poder limpiar toda la pared del silo según:

$$N_v = \frac{L_{cs}}{L_{rd}} * 2 \quad (14)$$

$$N_v = \frac{62.83 \text{ m}}{0.3 \text{ m}} * 2 = 418 \text{ viajes}$$

La distancia total recorrida por el robot se obtiene multiplicando el número de viajes por la distancia de cada viaje, es decir, la altura de trabajo de limpieza. Se observa entonces:

$$d_t = N_v * 26 \text{ m} = 418 * 26 = 10868 \text{ m} \quad (15)$$

Idealizando una velocidad inicial y final constante

Para la velocidad de limpieza se estimará un tiempo de limpieza total de las paredes de 60 horas, tomando en cuenta las 84 horas de trabajos total que son entregadas por el contratista, en las que adicional a la limpieza

de las paredes se agrega el trabajo de limpieza a nivel de suelo y de las rastras.

Es así que usando la Ecuación (1) de velocidad lineal:

$$V_l = \frac{d}{T} = \frac{10868 \text{ m}}{60 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} * 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 5 \text{ cm/s} \quad (16)$$

Usando también la Ecuación (1) despejando el tiempo, podemos hallar el tiempo estimado para cada viaje del robot:

$$T_v = \frac{d}{v} = \frac{52 \text{ m}}{5 \frac{\text{cm}}{\text{s}}} * 100 \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 1040 \text{ s} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 17 \text{ min} \quad (17)$$

Análisis dinámico del movimiento del robot

Ya que el movimiento del robot no será constante sino más bien uniformemente variado se podrá dividir la distancia recorrida de subida tal como se observa en la Figura 21:

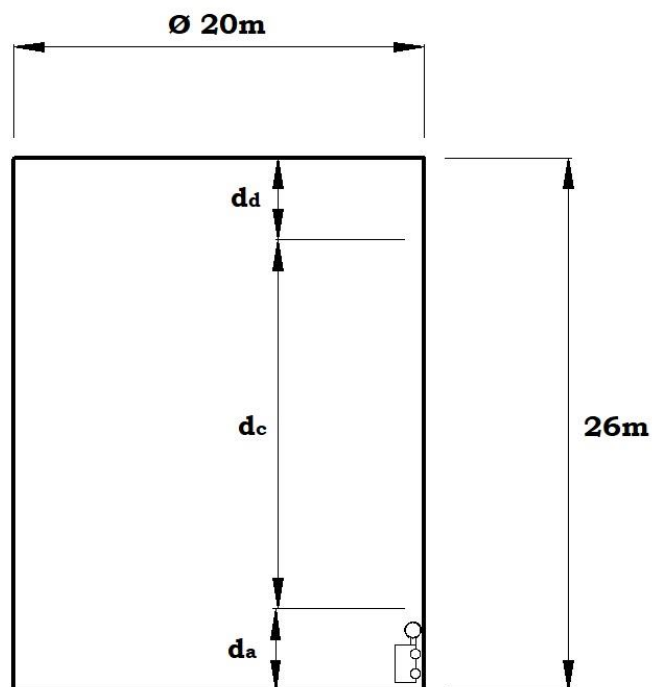


Figura 21: División de distancias según dimensiones generales del silo

Fuente: Elaboración propia

Donde:

d_a = Distancia de aceleración

d_d = Distancia de desaceleración

d_c = Distancia de velocidad constante

Asumiendo que: $d_a = d_d$

Asimismo:

$$d_a + d_c + d_d = 26 \text{ m}$$

De igual forma se podrán dividir los tiempos de la siguiente forma:

Δ_{tc} =Variación del tiempo constante

Δ_{ta} =Variación del tiempo de aceleración

Δ_{td} =Variación del tiempo de desaceleración

Del mismo modo teniendo en cuenta el tiempo obtenido anteriormente se deberá cumplir que:

$$\Delta_{tc} + \Delta_{ta} + \Delta_{td} = 17 \text{ min}$$

Por otro lado, para continuar con el cálculo se necesitará hallar la aceleración mediante la segunda ley de Newton y analizando el diagrama de cuerpo libre visualizado en la Figura 22.

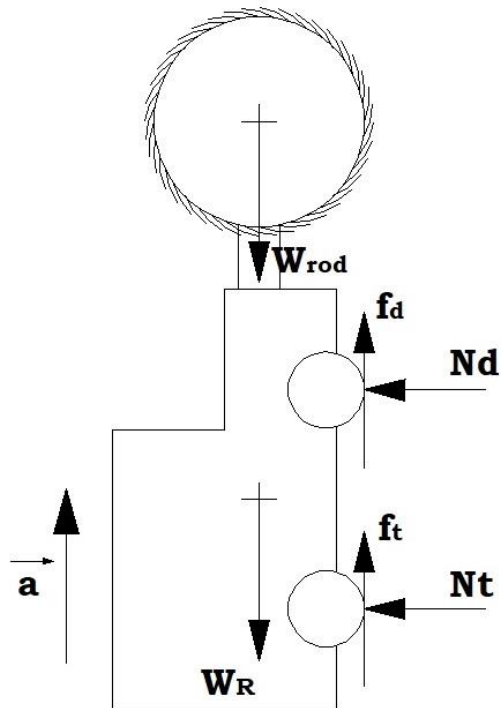


Figura 22: Análisis de Fuerzas que actúan en el robot

Fuente: Elaboración propia

Dónde:

N_d = Reacción normal de las ruedas delanteras

N_t = Reacción normal de las ruedas traseras

f_d = Fuerza de fricción de las ruedas delanteras

f_t = Fuerza de fricción de las ruedas traseras

W_R = Peso del robot

W_{Rod} = Peso del rodillo

μ_k = Coeficiente de rozamiento dinámico

Debido a la simetría del diseño, es decir, la ubicación equidistante de las ruedas y el centro de masa y las dimensiones iguales de las ruedas, se puede asumir que:

$$N_d = N_t$$

Aplicando entonces la segunda ley de Newton de la Ecuación (7):

$$\sum_{F_V} = m * a \quad (18)$$

$$-W_R - W_{Rod} + f_d + f_t = (m_R + m_{Rod}) * a$$

$$-W_R - W_{Rod} + \mu_k(N_d + N_t) = (m_R + m_{Rod}) * a \quad (19)$$

Cuando la velocidad sea constante la aceleración “a” será igual a 0, entonces de la anterior Ecuación (19):

$$\mu_k(N_d + N_t) = W_R + W_{Rod} \quad (20)$$

$$0.57(2N_d) = (9kg + 2kg) * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$2N_d = 189.32 N$$

$$N_d = 94.66 N$$

Por lo tanto 94.65 N sería la fuerza mínima requerida en las ruedas delanteras para poder soportar al robot. Teniendo en cuenta esto, se recurre al proveedor Magnetsales para la selección de las ruedas magnéticas según la Figura 23, Figura 24 y la Tabla 8 siguientes:



Figura 23: Rueda Magnética

Fuente: MagnetSales

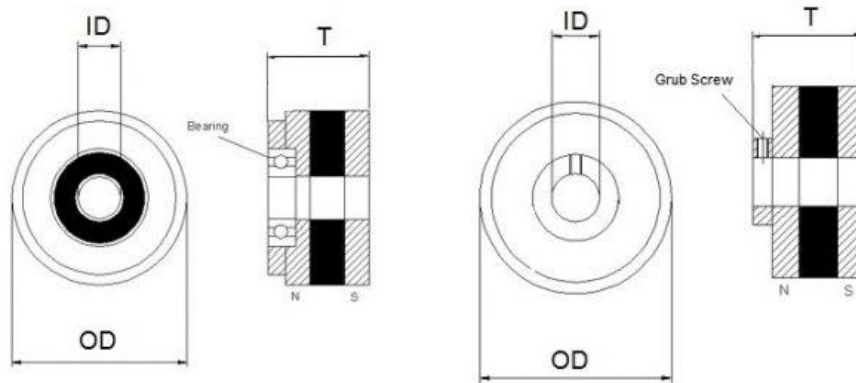


Figura 24: Dimensiones de la rueda magnética

Fuente: MagnetSales

Guía de rueda magnética					
DE (mm)	T (mm)	Eje de identificación (máx.)	Fuerza de sujeción NdFeB (kg)	Fuerza de sujeción SmCo (kg)	Peso (gramos)
30	dieciséis	10	6	4	57
30	21	10	10	7	73
40	20	10	8	5	130
40	25	10	10	9	162
50	29	12.7	20	17	281
75	45	12.7	50	40	930
100	50	12.7	60	55	2058

Tabla 08: Selección de rueda magnética

Fuente: MagnetSales

Para hallar la aceleración “a” analizamos cuando $a \neq 0$ de la Ecuación (19):

$$\begin{aligned}
 -W_R - W_{Rod} + \mu_k(N_d + N_t) &= (m_R + m_{Rod}) * a \\
 -(m_R + m_{Rod}) * 9.81 + \mu_k(N_d + N_t) &= (m_R + m_{Rod}) * a \\
 -(9kg + 2kg) * 9.81 + 0.57(2 * 94.66) &= 11 kg * a \\
 a &= \frac{0.0024}{11} = 0.000218 \frac{m}{s^2}
 \end{aligned}$$

Retomando el cálculo de la distancia de aceleración, se utiliza la Ecuación (5):

$$V_f^2 = 2a * d_a$$

$$\left(0.05 \frac{m}{s}\right)^2 = 2 * 0.000218 * d_a$$

$$d_a = 5.734 m$$

Y para el tiempo se utiliza la Ecuación (4) sabiendo que por partir del reposo V_0 es cero:

$$d_a = V_0^2 t + \frac{1}{2} a \Delta t_a^2$$

$$\Delta t_a^2 = \frac{d_a * 2}{a}$$

$$t_a = \sqrt{\frac{5.734}{0.000218} * 2} = 229.36 s$$

$$t_a = 3.82 min$$

Continuando el análisis dinámico del robot se examinará el DCL de la rueda como se ve en la Figura 25:

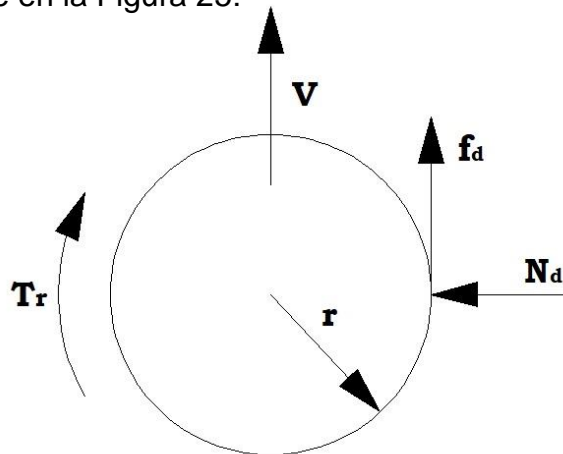


Figura 25: Análisis de Fuerzas que actúan en las ruedas

Fuente: Elaboración propia

Sabiendo que:

Diámetro de las ruedas:

$$\phi_r = 7.5 cm$$

Longitud de circunferencia de las ruedas:

$$L_{cr} = \pi * d = 7.5 * 3.1416 = 23.562 \text{ cm}$$

Ya que la relación del número de revoluciones y longitud recorrida es lineal, es decir, en una revolución se recorre la longitud de circunferencia de la rueda; en dos revoluciones, el doble; en tres, el triple y así sucesivamente; podemos hallar el número de revoluciones necesarias para recorrer los 5200 cm de pared de silo de la siguiente forma:

$$1rev = 23.562 \text{ cm}$$

$$xrev = 5200 \text{ cm}$$

$$xrev = \frac{5200 \text{ cm}}{23.562 \text{ cm}} = 195.77 \text{ rev}$$

Se calcula entonces los RPM necesarios para el tiempo estimado de 17 minutos con la Ecuación (21):

$$RPM = \frac{195.77 \text{ rev}}{17 \text{ min}} = 11.52 \text{ rpm} \quad (21)$$

Se calcula la velocidad angular aplicando un factor de conversión a los RPM hallados anteriormente con la Ecuación (22):

$$\omega = RPM * \frac{2\pi}{60} \text{ [rad/s]} \quad (22)$$

$$\omega = 11.52 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60} = 1.206 \text{ rad/s}$$

Para el cálculo de torque y potencia, se halla la fuerza de fricción f_a según la Ecuación (8):

$$f_A = \mu_k * Nd$$

$$f_A = 0.57 * 94.66 = 53.9562 \text{ N}$$

Se calcula entonces el torque con la Ecuación (23) adaptándola a la rueda:

$$T_{rr} = f_A * r \quad (23)$$

$$T_{rr} = 53.9562 \text{ N} * 0.0375 \text{ m} = 2.023 \text{ N.m}$$

Además, se calcula la potencia desarrollada con la Ecuación (24):

$$P = T_r * \omega \quad (24)$$

$$P = 2.023 \text{ N.m} * 1.206 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 2.4399 \frac{\text{N.m}}{\text{s}} [\text{Watts}]$$

Es así que, de acuerdo a los cálculos vistos se selecciona el motorreductor con caja reductora 4632-370 12v 12rpm 25kg.cm, el cual puede ser visto en la Figura 26.



Figura 26: Motorreductor para la tracción de las ruedas

Fuente: Vistronica.com

Con las siguientes características:

- Numero de modelo: 4632-370 /1019
- Tensión de Trabajo: 12V
- Corriente sin carga: 200 mA

- Velocidad Sin Carga: 12 RPM
- Relación Piñones: 1:1019
- Torque Con Carga: 25 Kg.cm
- Potencia: 10W
- Corriente con carga nominal: 2.3 A
- Corriente con Motor Bloqueado: 5.5 A

Diseño de eje del rodillo limpiador

Sabiendo como datos de entrada que:

Diámetro del eje:

$$\varnothing_{\text{eje rod}} = 8 \text{ mm}$$

Peso del eje:

$$W_{\text{eje}} = 1 \text{ kg} = 1 * 9.81 = 9.81 \text{ N}$$

Se analiza entonces al eje mediante el diagrama de cuerpo libre visualizado en la Figura 27:

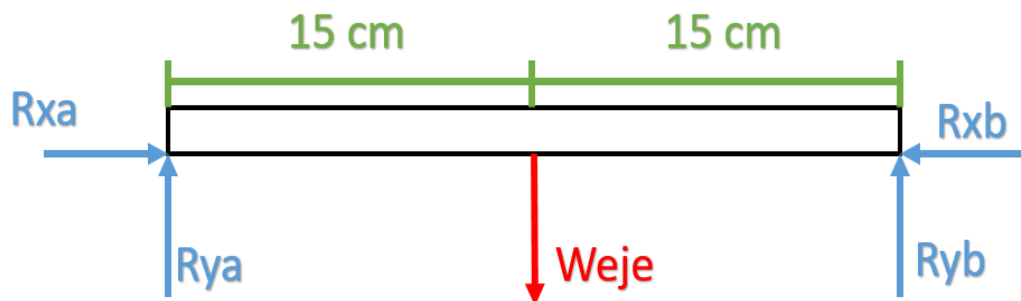


Figura 27: DCL de eje del rodillo limpiador

Fuente: Elaboración propia

Se tiene entonces que:

$$\sum F_y = R_{ya} + R_{yb} - W_{eje} = 0$$

$$\sum F_y = R_{ya} + R_{yb} = W_{eje}$$

$$R_{ya} + R_{yb} = 9.81 \text{ N}$$

Sumatoria de momentos con respecto al punto "a":

$$\sum M_a = -(W_{eje} * d_{eje-a}) + (R_{yb} * d_{rod}) = 0$$

$$\sum M_a = -(9.81 * 0.15) + (R_{yb} * 0.30) = 0$$

$$R_{y2} = 4.905 \text{ N}$$

Luego, para la determinación del factor de seguridad del eje, se calcula primero el esfuerzo alternante y momento flexionante medio con las Ecuaciones (9) y (10) respectivamente:

$$\sigma_a = Kf \frac{32M_a}{\pi d^3}$$

Sabiendo que Kf y Kfs son iguales a 1 ya que la geometría del eje no es variable:

$$\sigma_a = \frac{32 * 1.4715 \text{ N.m}}{\pi * 0.008^3} = 29.3 \text{ MPa}$$

Para el momento flexionante medio:

$$\tau_m = Kfs \frac{16T_m}{\pi d^3}$$

$$\tau_m = \frac{16 * 0.25}{\pi * 0.008^3} = 2.49 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, se halla el esfuerzo máximo de Von Mises mediante la Ecuación (11):

$$\sigma'_{max} = [(\sigma_a + \sigma_m)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2]^{1/2}$$

Puesto que: σ_m y τ_a son cero:

$$\sigma'_{max} = [\sigma_a^2 + \tau_m^2]^{1/2}$$

$$\sigma'_{max} = [29.3^2 + 2.49^2]^{1/2}$$

$$\sigma'_{max} = 29.41 \text{ MPa}$$

Usando la Ecuación (12) se calcula el factor de seguridad, teniendo en cuenta que el esfuerzo de fluencia del PLA es de 48 – 60 MPa:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'_{max}} = \frac{54 \text{ MPa}}{29.41 \text{ MPa}}$$

$$n_y = 1.84$$

Es así que para el actuador del eje se selecciona el motor paso a paso NEMA 17 visto en la Figura 28:



Figura 28: Motor paso a paso NEMA 17

Fuente: Alibaba.com

Diseño del eje de las ruedas

Analizando el DCL del eje de las ruedas en la Figura 29:

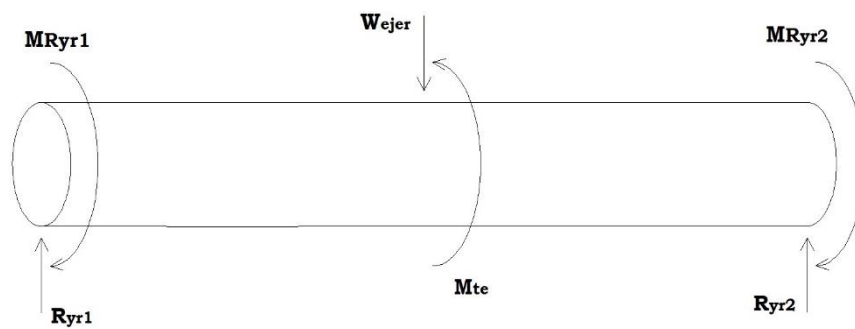


Figura 29: DCL de eje de las ruedas

Fuente: Elaboración propia

Se tiene como datos de entrada:

Largo del eje:

$$L_e = 20 \text{ cm}$$

Momento torsor en cada rueda

$$T_{rr} = 2.023 \text{ N.m}$$

Debido a que el cuerpo se encuentra en equilibrio la reacción en ambas ruedas es la misma.

Entonces tenemos:

$$R_{yr1} = R_{yr2}$$

$$\sum F_y = R_{yr1} + R_{yr2} - W_{ejer} = 0$$

$$\sum F_y = R_{yr1} + R_{yr2} = W_{ejer}$$

$$W_{ejer} = 94.65\text{N} + 94.65\text{N} = 189.3\text{N}$$

Momento flexionante:

$$M_{fr} = 189.3 * 0.1 = 18.93 \text{ N.m}$$

Momento torsor en el eje:

$$\sum M_T = M_{Ryr1} + M_{Ryr2} - M_{te} = 0$$

$$\sum M_T = M_{Ryr1} + M_{Ryr2} = M_{te}$$

$$M_{te} = 2.023 + 2.023 = 4.046 \text{ N.m}$$

Luego, para la determinación del factor de seguridad del eje, se calcula primero el esfuerzo alternante y momento flexionante medio con las ecuaciones (9) y (10) respectivamente:

$$\sigma_a = \frac{32 * 18.93 \text{ N.m}}{\pi * 0.016^3} = 47.08 \text{ MPa}$$

Para el momento flexionante medio

$$\tau_m = \frac{16 * 4.046}{\pi * 0.016^3} = 5.03 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, se halla el esfuerzo máximo de Von Mises mediante la ecuación (11):

$$\sigma'_{max} = [(\sigma_a + \sigma_m)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2]^{1/2}$$

Puesto que: σ_m y τ_a son cero:

$$\sigma'_{max} = [\sigma_a^2 + \tau_m^2]^{1/2}$$

$$\sigma'_{max} = [47.08^2 + 5.03^2]^{1/2}$$

$$\sigma'_{max} = 47.35 \text{ MPa}$$

Usando la ecuación (12) se calcula el factor de seguridad, teniendo en cuenta que el esfuerzo de fluencia del PLA es de 48 – 60 MPa:

$$n = \frac{S_y}{\sigma'_{max}} = \frac{54 \text{ MPa}}{47.35 \text{ MPa}}$$
$$n = 1.14$$

Ubicación y acople de motores seleccionados

Ubicación y acople de motorreductor de tracción: Los dos motorreductores de tracción se ubicarán en el interior del cuerpo del robot de forma simétrica de tal forma de dar movimiento al eje de las ruedas delanteras y traseras como se observa en la Figura 30. El acople será por medio de engranajes de iguales dimensiones por lo que no habrá aumento o disminución de potencia por relación de engranajes.

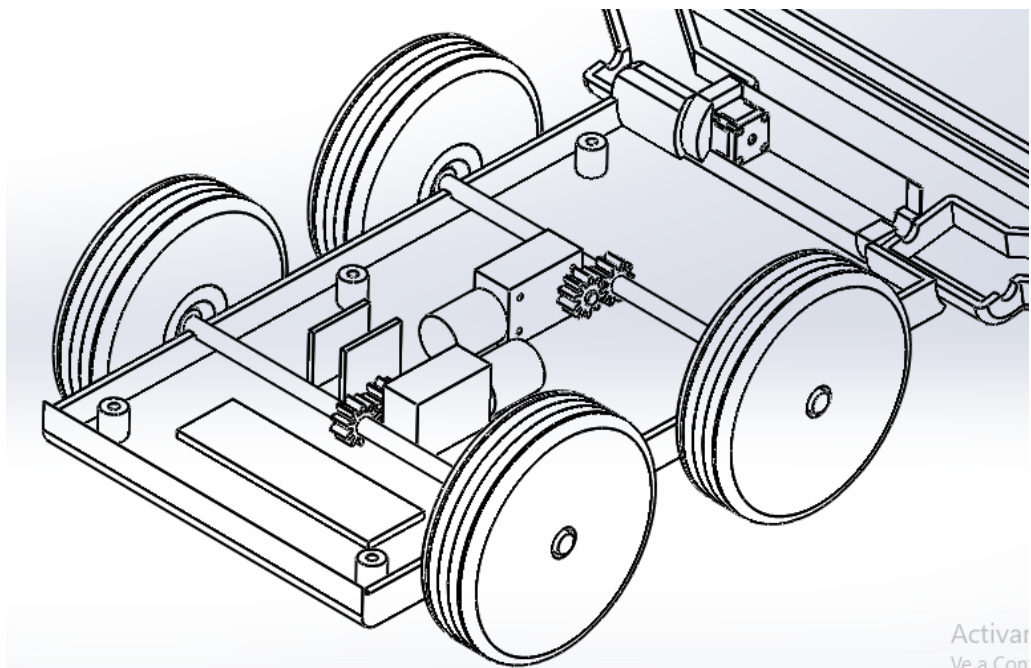


Figura 30: Ubicación de motorreductores de tracción

Fuente: Elaboración Propia

Ubicación y acople de motor paso a paso del brazo: El motor paso a paso NEMA 17 seleccionado será ubicado también en el cuerpo del robot, en la parte en donde este se conecta con el brazo tal como se observa en la Figura 31. El acople será directo con el brazo.

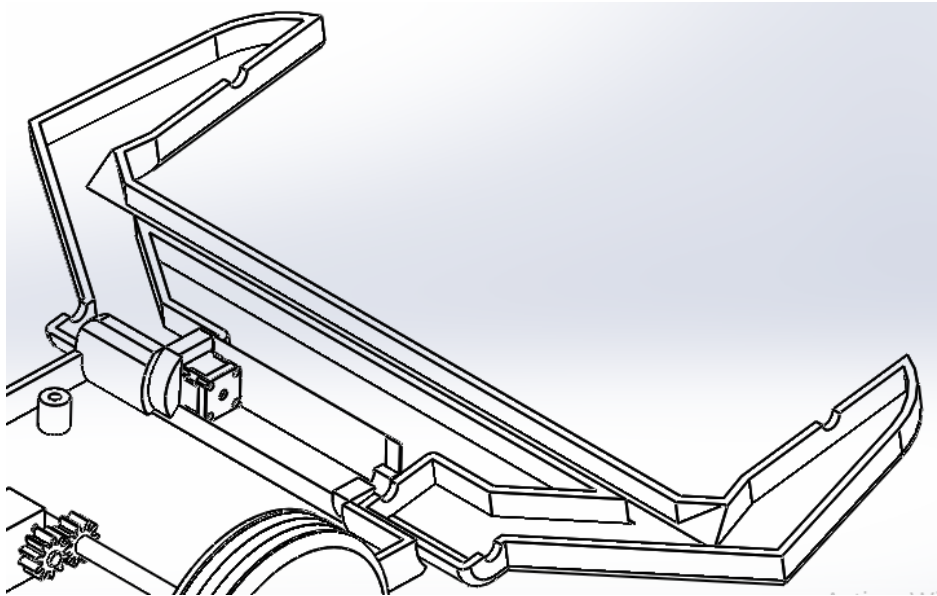


Figura 31: Ubicación motor paso a paso

Fuente: Elaboración propia

Análisis cinemático del brazo del robot.

Se analizará primero mediante el DCL de la Figura 32:

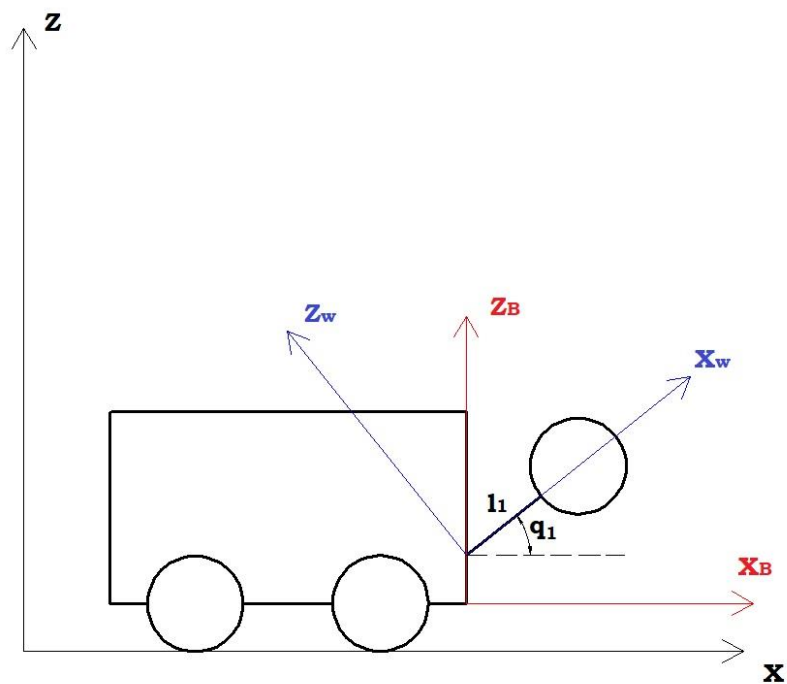


Figura 32: Cinemática de brazo de rodillo

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que Q_B es el eje fijo y Q_W el eje móvil tenemos:

$$Q_B = \{X_B, Y_B, Z_B, p, q, r\}$$

$$Q_W = \{X_W, Y_W, Z_W, \varphi, \theta, \omega\}$$

Donde "X", "Y" ,y "Z" representan las coordenadas cartesianas en el plano y p, q, r, φ, θ, ω representan la orientación.

Las variables, estarán en función del tiempo y contarán con un desplazamiento en el eje "X" y "Z" a través del eje "Y", esto se representa como:

$$h_x(t) = x_1(t)$$

$$h_y(t) = 0$$

$$h_z(t) = b + z_1(t)$$

Tomando en cuenta nuestro diagrama entonces tenemos finalmente la posición representada como:

$$h_x(t) = l_1 \cos q_1(t)$$

$$h_y(t) = 0$$

$$h_z(t) = b + l_1 \sin q_1(t)$$

A continuación, para hallar la cinemática diferencial, debemos de derivar las posiciones con respecto al ángulo q_1 :

$$\dot{h}_x = -l_1 \sin q_1(\dot{q}_1)$$

$$\dot{h}_y = 0$$

$$\dot{h}_z = l_1 \cos q_1(\dot{q}_1)$$

Que agrupados finalmente resultarían como:

$$\begin{vmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial h_x}{\partial q_1} \\ \frac{\partial h_z}{\partial q_1} \end{vmatrix} | \dot{q}_1 |$$

Finalmente, con las ecuaciones obtenidas se realizó una simulación de la cinemática del brazo del robot mediante el programa Matlab obteniendo el código visto en el Anexo 9.

Simulaciones en software INVENTOR

En la Figura 33 se muestra el análisis estático del brazo con una articulación.

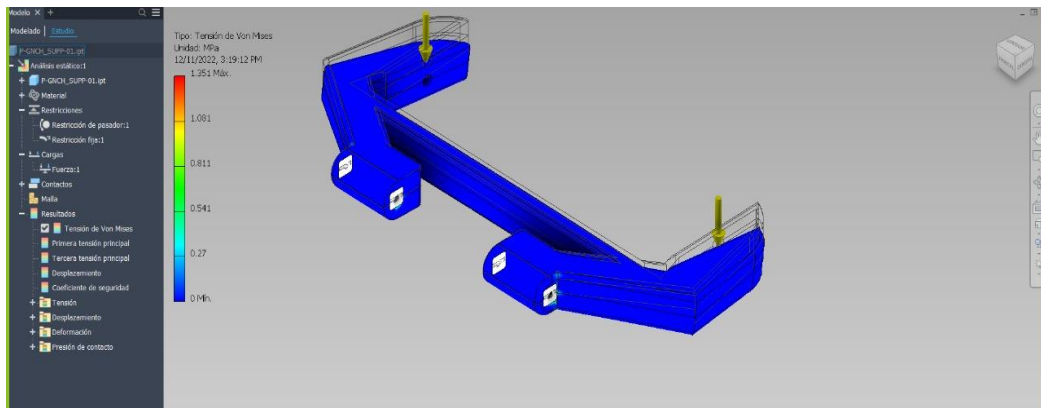


Figura 33: Análisis estático del brazo del robot

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, la mayor concentración de esfuerzos será dada en la unión entre el brazo del robot y la estructura mecánica, aquí actúa la fuerza que ejerce el rodillo contra el brazo, teniendo como un máximo 1.351 Mpa.

En la Figura 34 se observa el factor de seguridad calculado por el software.

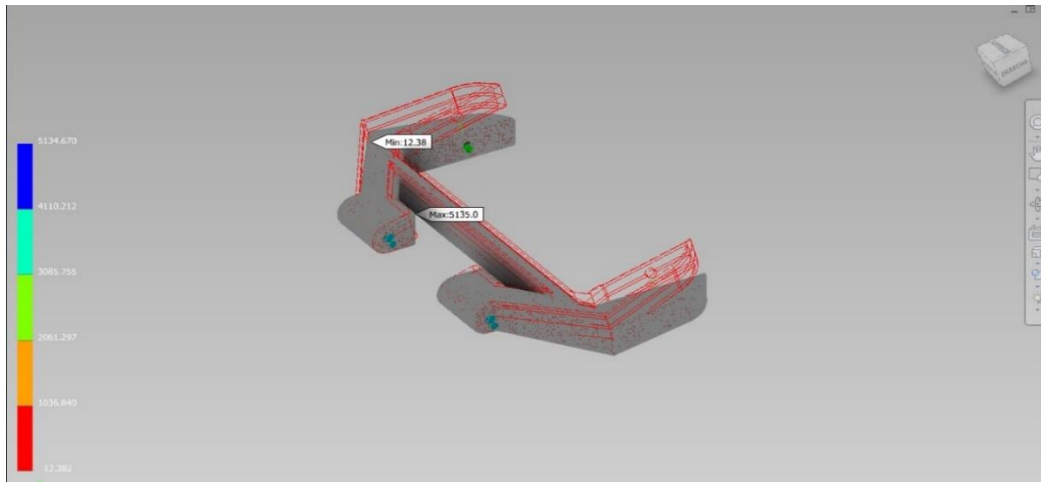


Figura 34: Factor de seguridad del brazo del robot

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo la mayor el factor de seguridad es elevado, debido a que las cargas son mínimas comparadas a la resistencia a la fluencia dada por el material.

Se continuo con el análisis estático del eje de las ruedas, del cual el resultado brindado por el software se observa en la Figura 35.

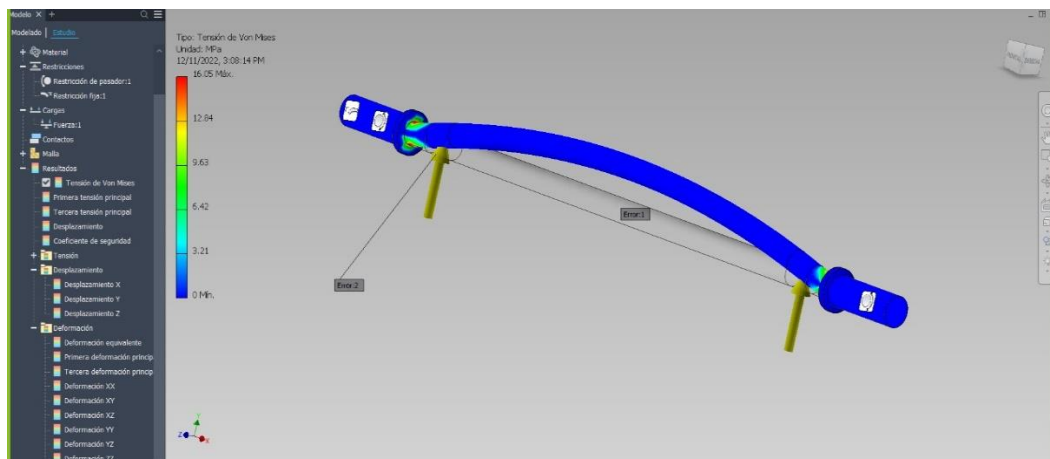


Figura 35: Análisis estático del eje de las ruedas

Fuente: Elaboración propia

En este caso del eje de las ruedas la mayor concentración de esfuerzos estará dada en los costados, que es donde soporta el mayor peso debido a las llantas que son de neodimio revestidas de acero inoxidable, teniendo una tensión máxima de 16.05 Mpa, además la parte central es la que sufre la mayor deformación debido a que allí se concentrarán las fuerzas del peso del robot, torsión y además el par de engranajes del robot. Estos cálculos resultan aproximados al diseño inicial que se calculó de manera

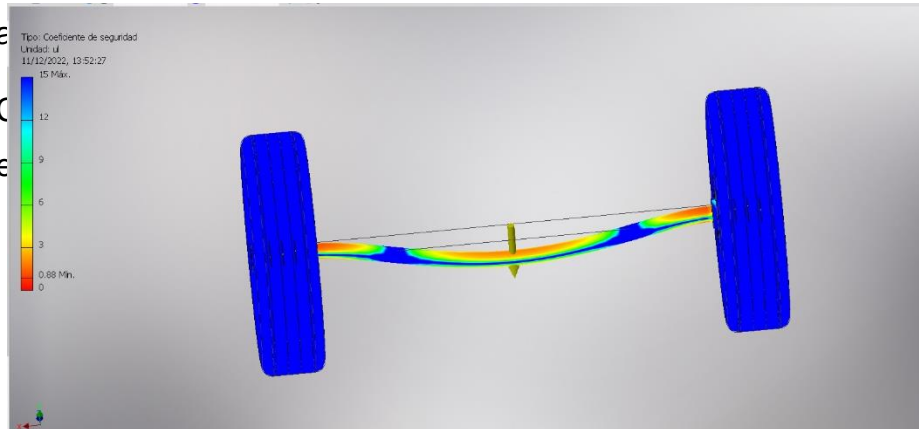


Figura 36: Factor de seguridad del eje de las ruedas

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo en la Figura 37 se puede apreciar que el desplazamiento máximo que tendrá el eje será de 1mm, localizada principalmente en la parte media del eje.

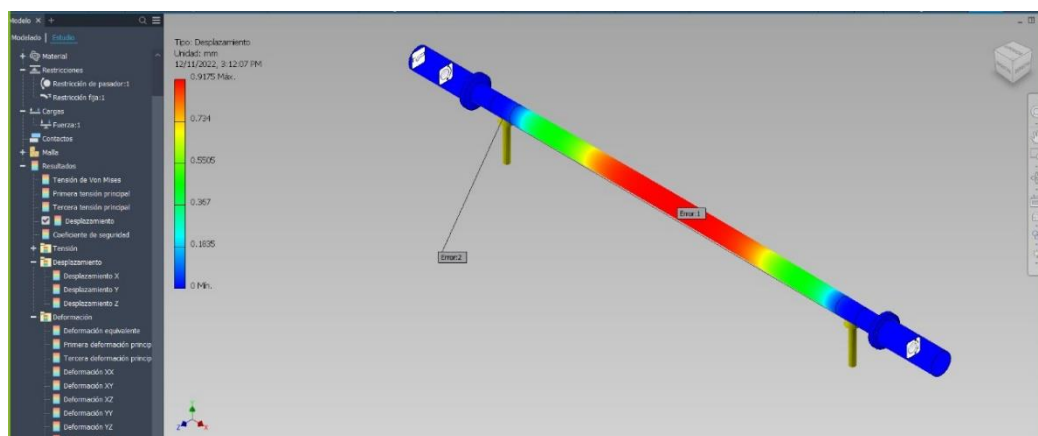


Figura 37: Desplazamiento del eje de las ruedas

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con las ecuaciones obtenidas se realizó una simulación de la cinemática del brazo del robot, para ello se introdujo el modelo en simulink de Matlab, donde se incluyó únicamente el brazo articulado del robot con el chasis del auto tal como se observa en la Figura 38.

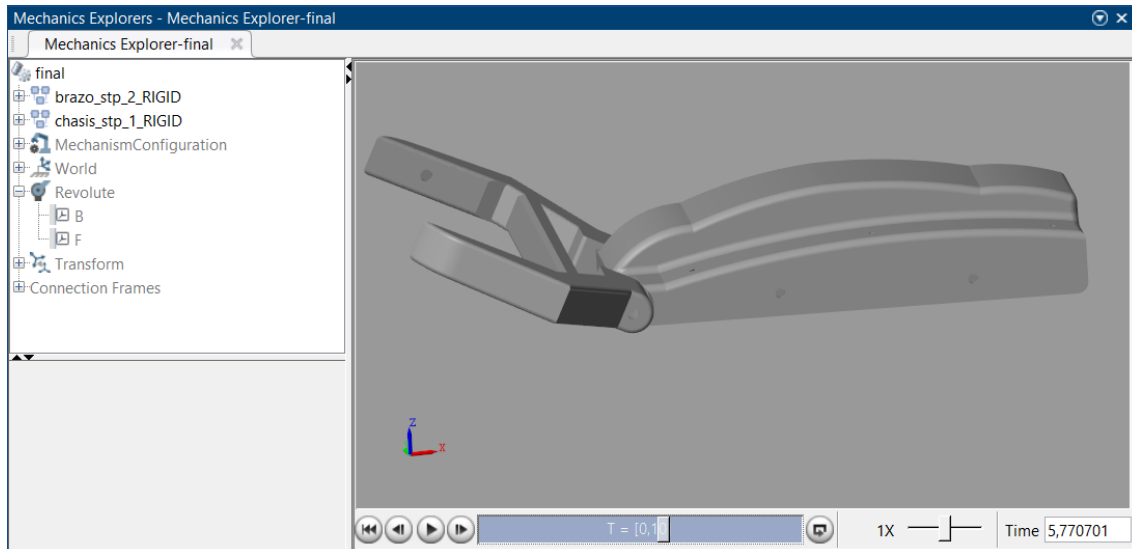


Figura 38: Brazo en Simulink

Fuente: Simulink

A partir de la simulación se obtuvo los desplazamientos que realizará el brazo del robot en los ejes "X" y "Z" respectivamente (Figura 39 y Figura 40)

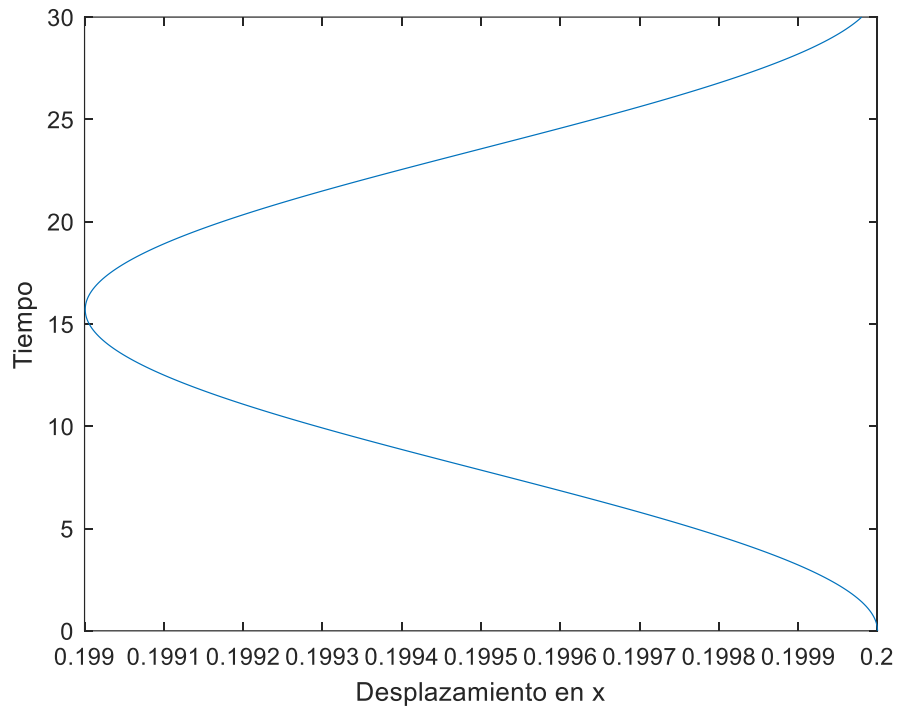


Figura 39: Desplazamiento en X

Fuente: Simulink

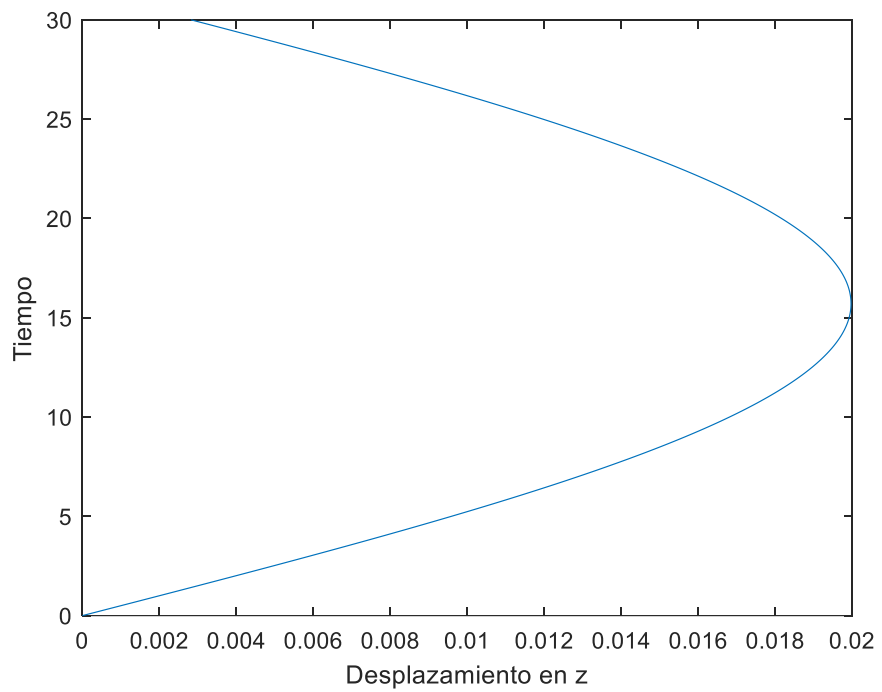


Figura 40: Desplazamiento en Z

Fuente: Simulink

V. DISCUSIÓN

- Al igual que Giménez, A, (2000) se separó el diseño en tres sistemas: sistema de movimiento, sistema de adherencia y sistema efector (el cual para esta tesis fue llamado sistema de limpieza)
- Uno de los criterios más relevantes para el diseño del robot fueron las características constructivas de los silos, en donde se encontró con un terrero ondulado, pero de onda corta, además de ser planchas estandarizadas, donde el único obstáculo son los cabezales de los pernos para el traslape de las mismas, a diferencia de Garcés et. al. (2017) donde los terrenos que debía recorrer su robot eran superficies rocosas o discontinuas, lo cual influyo en la selección del sistema de movimiento del robot.
- Para la selección del concepto y configuración óptimo se hizo a través de un matriz de criterios ponderados (Tabla 5 y Tabla 7), lo cual no se realizó en los antecedentes investigados, sin embargo, se coincidió con Moreno, D. (2019) en el uso de imanes permanentes como sistema de adherencia, escogiéndose al neodimio, con una densidad de flujo de 4500 Gauss, como parte del material de las ruedas elegidas como mejor sistema de movimiento basándose en la teoría vista en la investigación de Cadix (2021). Además, se coincidió en la selección de un sistema de rodillo limpiador con Otal, J. (2015) con una longitud de 30 cm y diámetro de eje de 8mm.
- Para un diseño óptimo de la estructura principal del robot se tuvo en cuenta la distribución de peso, al igual que Giménez, A. (2000), según la ubicación del centro de masa de la misma estructura y del rodillo limpiador, de tal forma en lograr una simetría que simplifique los cálculos de diseño y a su vez estandarice el modelado de elaboración propia. Para ello, se tuvo en cuenta que el centro de masa de la estructura debió ser equidistante del par de ruedas traseras y delanteras, también que el centro de masa del rodillo sea co-lineal al de la estructura de tal forma que este no genere un momento que ocasione que el robot se caiga o pierda adherencia.

- Los cálculos cinemáticos para encontrar la velocidad de 5 cm/s, aceleración de 0.000218 m/s, y torque de 2.023 N.m, fueron hallados gracias al análisis dinámico y cinemático basado en la teoría del libro de Dinámica de Hibbeler (2004). El análisis se comenzó con la determinación de las fuerzas que interactuaban durante el movimiento de escalamiento del robot, para luego ser aplicada la segunda ley de Newton vista en el libro, la cual ayudó a determinar la aceleración, tiempo y velocidad tomando como inicio la suposición de velocidad constante en parte del recorrido del robot.

- Además, para el análisis cinemático de la única articulación del robot se coincidió con la metodología vista en la investigación de Garcés et. al. (2017) para el hallazgo de la cinemática diferencial según las posiciones que tendría el brazo del rodillo limpiador.

- Por último, al igual que en Álvarez (2018) se realizaron simulaciones de análisis estático a las piezas del ensamble del robot para comprobar su comportamiento frente a las pocas cargas a las que están expuestas teniendo en cuenta el material principalmente de PLA seleccionado; la principal del autor anteriormente mencionado es el uso del software INVENTOR mientras que él usó SOLIDWORKS.

VI. CONCLUSIONES

- 1)** Se determinaron los criterios de diseño en base a: las entrevistas, donde se identificó la necesidad de resolver el peligro de trabajo en altura que implicaba actualmente la tarea de limpieza del silo, teniendo en cuenta también el plazo de entrega del servicio de 7 días brindado por la empresa CHIMU, además con la entrevista realizada a personal del área de calidad de la empresa ayudo a determinar el sistema de limpieza del robot teniendo en cuenta que lo que se busca es la remoción de exceso de partículas de polvillo de maíz de las paredes; también a partir de las características constructivas de los silo se determinó el dimensionamiento general del robot de tal forma de evitar el único obstáculo del terreno que son los cabezales de los pernos para el traslape de las chapas.

- 2)** Se logró determinar el concepto y configuración de diseño mediante las matrices de criterios ponderados (Tabla 5 y Tabla 7). Los criterios se determinaron de acuerdo a los antecedentes y a la entrevista realizada al gerente de la empresa SOLINPA E.I.R.L. En conclusión, el robot tendrá forma de un pequeño auto con un sistema de ruedas imantadas para su desplazamiento y adherencia; y un sistema de rodillo limpiador de 30 cm para la limpieza directa de la pared del silo.

- 3)** Se obtuvo la cinemática del manipulador (brazo sostenedor del rodillo limpiador) mediante el uso del software MATLAB. El actuador del motor paso a paso seleccionado fue de acuerdo a los cálculos realizados y los antecedentes revisados. En conclusión, el manipulador tendrá un movimiento limitado de tal forma que se acerque a la pared del silo para que el rodillo se encargue de la limpieza, y se aleje de la pared cuando se necesite bajar la pared.

- 4)** Se realizaron los cálculos de diseño necesarios para asegurar el correcto funcionamiento del robot, además se parametrizó el diseño a través del análisis de elementos finitos mediante el software INVENTOR teniendo

como un máximo de esfuerzo en el brazo 1.351 MPa y una tensión máxima de 16.05 MPa en el eje de las ruedas.

- 5)** En conclusión, se realizó la validación necesarios para garantizar el óptimo funcionamiento mecánico del robot mediante el software INVENTOR y MATLAB.

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar el diseño del control electrónico del robot a favor de posiblemente rediseñar la estructura mecánica para el alojamiento de los componentes electrónicos seleccionados.
- Considerar el recubrimiento con caucho de las ruedas para mejorar la adherencia.
- Se recomienda hacer pruebas de adherencia del material hacia las paredes del silo, para tener un cálculo más exacto del torque necesario del rodillo para vencer la resistencia del material.

Referencias

1. Alonso Alonso, Mercedes (2020). Sistema de control orgánico para el robot escalador Romerín. Tesis (Master), E.T.S.I. Industriales (UPM)
2. Álvarez, C. A. (2018). Diseño de robot de limpieza externa de oleoductos. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12749/1612>.
3. Blanco Castro, Rocío (2020). Interfaz avanzada Android para el control del robot escalador Romerín sobre ROS. Tesis (Master), E.T.S.I. Industriales (UPM) <<https://oa.upm.es/view/institution/Industriales/>>.
4. Cadix Martín, V. (2021). *Desarrollo de la locomoción para un robot cuadrúpedo* (Doctoral dissertation, Industriales).
5. Calle, E., Ávila, I., & Zambrano, J. (2008). REMLED I. Robot escalador para mantenimiento y limpieza de edificios. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (2), 37-46.
6. Díaz Juárez, P. (2013). Robot escalador de superficies verticales
7. Factory, P. (2016, junio 9). *Application guide*. Magnet Sales. <https://magnetsales.co.uk/home/application-guide/>
8. GARCÉS MONTAÑO, A. G., & VALLEJO ARÁUZ, D. A. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA.
9. Giménez Fernández, A. (2000). Metodología de diseño y control de robots escaladores. Aplicación a las tareas de inspección.
10. Gobierno Regional del Perú (2022). Notificaciones de accidentes de trabajo, incidentes peligrosos y enfermedades ocupacionales.
11. Grando, M. T., Maletz, E. R., Martins, D., Simas, H., & Simoni, R. (2019). Robots para la limpieza de paneles fotovoltaicos: Estado del arte y perspectivas de futuro. *Revista Tecnología Y Ciencia*, (35), 137–150. <https://doi.org/10.33414/rtyc.35.137-150.2019>
12. Hibbeler, R. C., & de la Cera Alonso, J. (2004). *Mecánica vectorial para ingenieros: dinámica* (No. TA352. H53 2004.). Pearson Educación.
13. Hossian, A., Merlino, H. y Alveal, E. (2020). Desarrollo e impacto del campo de la robótica en América Latina: hacia una propuesta superadora en el contexto de la IV revolución industrial. En I Simposio Argentino de Historia, Tecnologías e Informática (SAHTI 2020)-JAIIO 49 (Modalidad virtual).

14. *Imán permanente: sus características, aplicación.* (2019, abril 16). Eurobalt Engineering. <https://eurobalt.net/es/blog/2019/04/16/permanent-magnet/>
15. Jaimes Carvajal, D. A., & Muñoz Zabaleta, R. J. Diseño de un sistema mecatrónico para limpieza de vidrios para edificios.
16. Maiquiza Toapanta, N.(2020) Diseño y construcción de dos robots escaladores utilizando micromotores.
17. Martínez Campos, Pablo (2019). Simulación cinemática y dinámica del robot hexápodo escalador ROMERIN. Proyecto Fin de Carrera / Trabajo Fin de Grado, E.T.S.I. Diseño Industrial (UPM) <<https://oa.upm.es/view/institution/ETSI=5FDiseno/>>, Madrid.
18. Mejía, D. (15 de 05 de 2003). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de Información sobre operaciones de poscosecha: <http://www.fao.org/in-action/inpho/crop-compendium/cerealsgrains/es/>
19. MINAGRI. (2022). Observatorio de Commodities Maíz Amarillo Duro. Lima: Ministerio de Agricultura y Riego.
20. Molina Rivera, O. L. (2012). *Diseño, construcción e implementación de un robot escalador para la limpieza de ventanas interiores utilizando visión artificial y comunicación inalámbrica, para la empresa Soft Teratronic* (Bachelor's thesis).
21. Moreno Orduña, D.(2019) Diseño de un robot escalador de alta flexibilidad para medición de tuberías en exteriores <http://cidesi.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1024/426>
22. Nabulsi, Samir & Montes, Hector & Armada, M. (2005). ROBOCLIMBER: Un robot cuadrúpedo de grandes dimensiones para la consolidación de laderas de montañas.
23. Ollero A. (2001). Robótica: Manipuladores y Robots Móviles.
24. Otal Fernández, J., & Remacha Andrés, M.(2015) Diseño de un prototipo de robot friegasuelos automático (Cleanerbot).
25. Pozueco, L.; Sánchez, JA.; G. Tuero, A.; Melendi, D.; García Fernández, R.; G. Pañeda, X.; Asenjo, N.... (2018). Desarrollo de un laboratorio abierto de enjambres de robots autónomos de limpieza. En XIII Jornadas de Ingeniería telemática (JITEL 2017). Libro de actas. Editorial Universitat

26. Puglesi, Alfredo & Abrahamsohn, Martín & Bernasconi, Maria. (2018). ROBOT ESCALADOR: TRES ESTRATEGIAS DE CONTROL.
27. Ramos Gutiérrez, S. (2018). Diseño de un prototipo de un robot aspiradora con componentes open source (Bachelor's thesis).
28. Riobo, J., Espelosín, J., Montano, L., Mené, J., Diez, D., & Lalana, J. (2018). Nuevos sistemas robóticos de inspección e intervención en rehabilitación de fachadas = New robotic systems of inspection and intervention in façade rehabilitation. *Anales de Edificación*, 4(2), 69-74. doi:<https://dx.doi.org/10.20868/ade.2018.3781>
29. Siloscordoba.com. Recuperado el 8 de diciembre de 2022, de <https://siloscordoba.com/wp-content/uploads/2020/11/almacenaje-de-maiz-en-un-silo-metalico.pdf>
30. Solano Muñoz, R. J. (2019). Insectos primarios que atacan al grano de maíz (*Zea mays* L.) en silos de almacenamiento (Bachelor's thesis, BABAHOYO; UTB, 2019).
31. Toca, L., & Maiquiza, N. (2018). Diseño y construcción de dos robots escaladores con normativas técnicas del Concurso Ecuatoriano de Robótica. *NEXOS CIENTÍFICOS* - ISSN 2773-7489, 2(2), 28–37. Recuperado a partir de <https://nexoscientificos.vidanueva.edu.ec/index.php/ojs/article/view/6>
32. SOTELO, Víctor Ricardo Barrientos; SÁNCHEZ, José Rafael García; ORTIGOZA, Ramón Silva. Robots móviles: Evolución y estado del arte. *Polibits*, 2007, no 35, p. 12-17.
33. GONZÁLEZ, Ramón; RODRÍGUEZ, Francisco; GUZMÁN, José Luis. Robots móviles con orugas historia, modelado, localización y control. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 2015, vol. 12, no 1, p. 3-12.
34. Sorin, M. O., & Nițulescu, M. (2012). Hexapod robot leg dynamic simulation and experimental control using matlab. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6), 895-899.
35. Delcomyn, F., & Nelson, M. E. (2000). Architectures for a biomimetic hexapod robot. *Robotics and Autonomous Systems*, 30(1-2), 5-15.

ANEXOS

Anexo N°01: Evidencias del trabajo de limpieza de silo (Proceso de armado de andamios)



Anexo N°02: Evidencias del trabajo de limpieza de silo (Proceso de limpieza de zonas superiores del silo)



Anexo N°03: Variables de estudio

VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
DISEÑO MECÁNICO DE ROBOT ESCALADOR	Un buen diseño mecánico está relacionado con la adecuada planeación de la construcción del robot, la cual debe de estar orientada al problema que se desea resolver.	Sistema de desplazamiento	Velocidad Torque RPM	Razón
		Sistema de adherencia	Material	Nominal
		Sistema de limpieza	Dimensiones del efector RPM	Razón
LIMPIEZA DE SILOS DE ACERO GALVANIZADO CORRUGADO DE ALMACENAMIENTO DE GRANOS DE MAÍZ DE 30 METROS DE ALTURA Y 25 METROS DE DIÁMETRO	La limpieza de los silos de acero galvanizado para almacenamiento de granos de maíz consiste en eliminar los restos de polvo y granos de maíz que quedan adheridos a las paredes del silo, ya que estos atraen la presencia de gorgojos los cuales dañan la producción y el almacenamiento del maíz.	Remoción de partículas de las paredes del silo de almacenamiento de maíz	Eficiencia del trabajo de limpieza	Nominal
			Área total limpiada	Razón

Anexo N°04: Entrevista N°01

Entrevista N°01

Entrevistadores: Bustamante Mendoza Diego, Grados Rebaza Williams

Entrevistado:

Cargo:

Objetivo: Recolectar información sobre los requerimientos de limpieza de los silos cilíndricos desde 1.40m hasta 30m de altura para plantear las propuestas de diseño de la empresa SOLINPA.

I. Aspectos de desarrollo del trabajo

1. ¿Cómo se desarrolla actualmente el servicio de limpieza de los silos de almacenamiento de maíz?

.....
.....
.....

2. ¿Cuáles son los principales problemas que encuentra al realizar los trabajos de limpieza de silos?

.....
.....
.....

3. ¿Cuáles son los accidentes más frecuentes en el trabajo de limpieza?

.....
.....
.....

4. ¿Cuál cree que sería la solución al riesgo de caída en los trabajos de limpieza de silos?

.....

5. ¿Cuál es actualmente el tiempo máximo para realizar el servicio de limpieza de silos de la empresa CHIMU?

.....

6. ¿Cuál es el tiempo promedio de los trabajadores en realizar el servicio de limpieza en los silos de CHIMU?

.....

II. Aspectos de diseño

7. ¿Qué criterios considera relevantes para una máquina capaz de realizar el trabajo de limpieza de silos?

.....
.....
.....

8. ¿Cómo ordenaría de mayor a menor según su importancia los criterios anteriormente mencionados?

.....

Anexo N°05: Entrevista N°05

Entrevista N°02

Entrevistador: Bustamante Mendoza Diego, Grados Rebaza Williams

Entrevistado:

Cargo:

Objetivo: Recolectar información de la validación del servicio de limpieza de los silos de almacenamiento de maíz.

1. ¿A qué considera una “buena calidad de limpieza” respecto a las paredes internas de los silos de almacenamiento de maíz?

.....
.....
.....
.....

2. ¿Cómo verifica la correcta limpieza de las paredes internas de los silos de almacenamiento de maíz?

.....
.....
.....

Anexo N°06: Validación de instrumentos de recolección de datos

VALORACION DEL INSTRUMENTO DE RECOLECCION DE DATOS

Por favor, marque con una X la respuesta escogida de entre las opciones que se presentan:

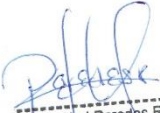
	sí	no
El instrumento contiene instrucciones claras y precisas para su respuesta adecuadamente (ver Anexo 1)	X	
El número de preguntas es el adecuado.	X	
Las preguntas están bien formuladas, responde a los objetivos de la investigación (en el supuesto de contestar NO, por favor, indique inmediatamente abajo cuáles)	X	

Preguntas que el experto considera no cumplen con las exigencias de la investigación	
N.º de la(s) pregunta(s)	
Propuestas de mejora (modificación, sustitución o supresión)	

	Evaluación general del Instrumento			
	Excelente	Buena	Regular	Deficiente
Validez de contenido del Instrumento	X			

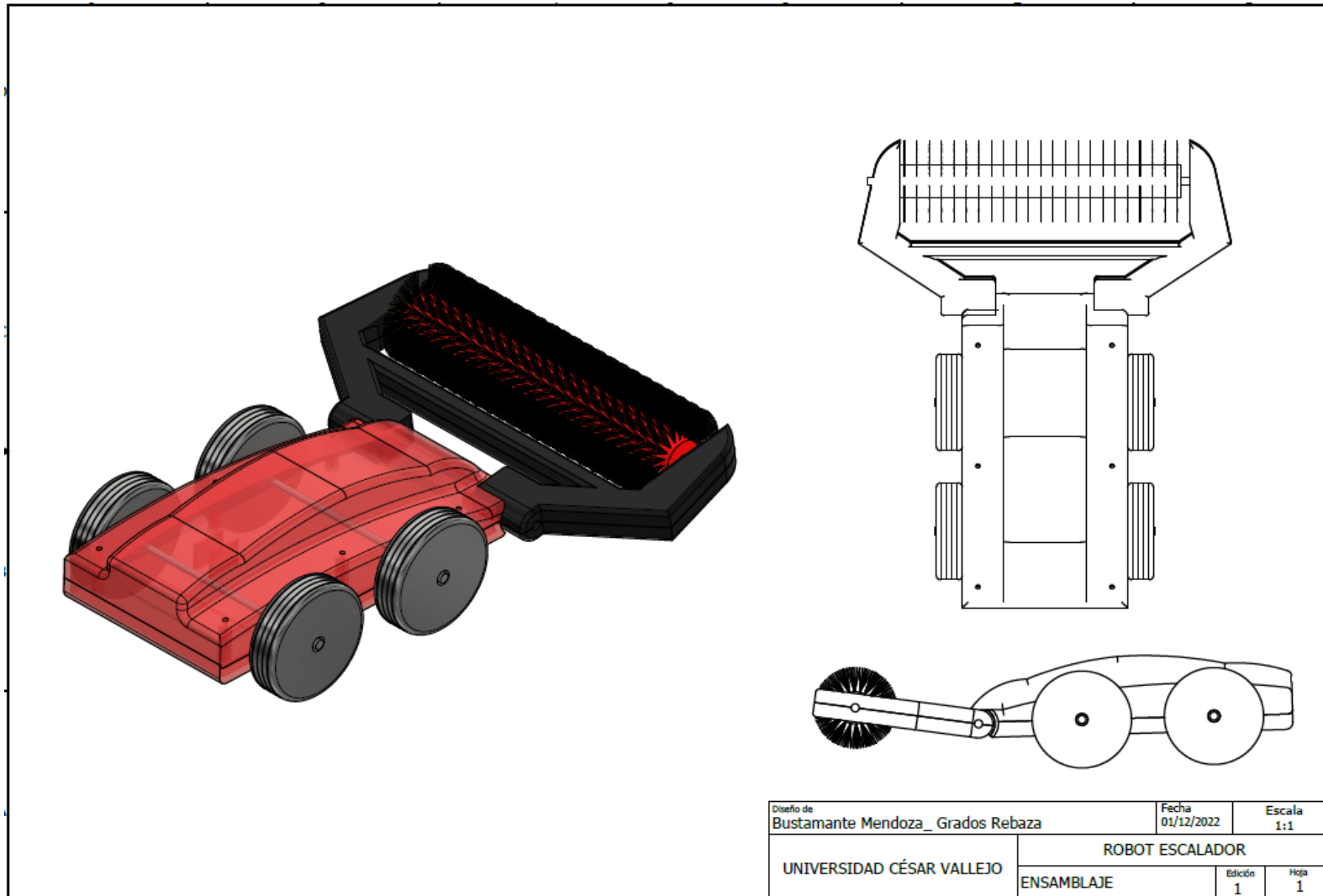
Observaciones y recomendaciones en general del cuestionario:	
Motivos por los que se considera no adecuada	
Motivos por los que se considera no pertinente	
Propuestas de mejora (modificación, sustitución o supresión)	

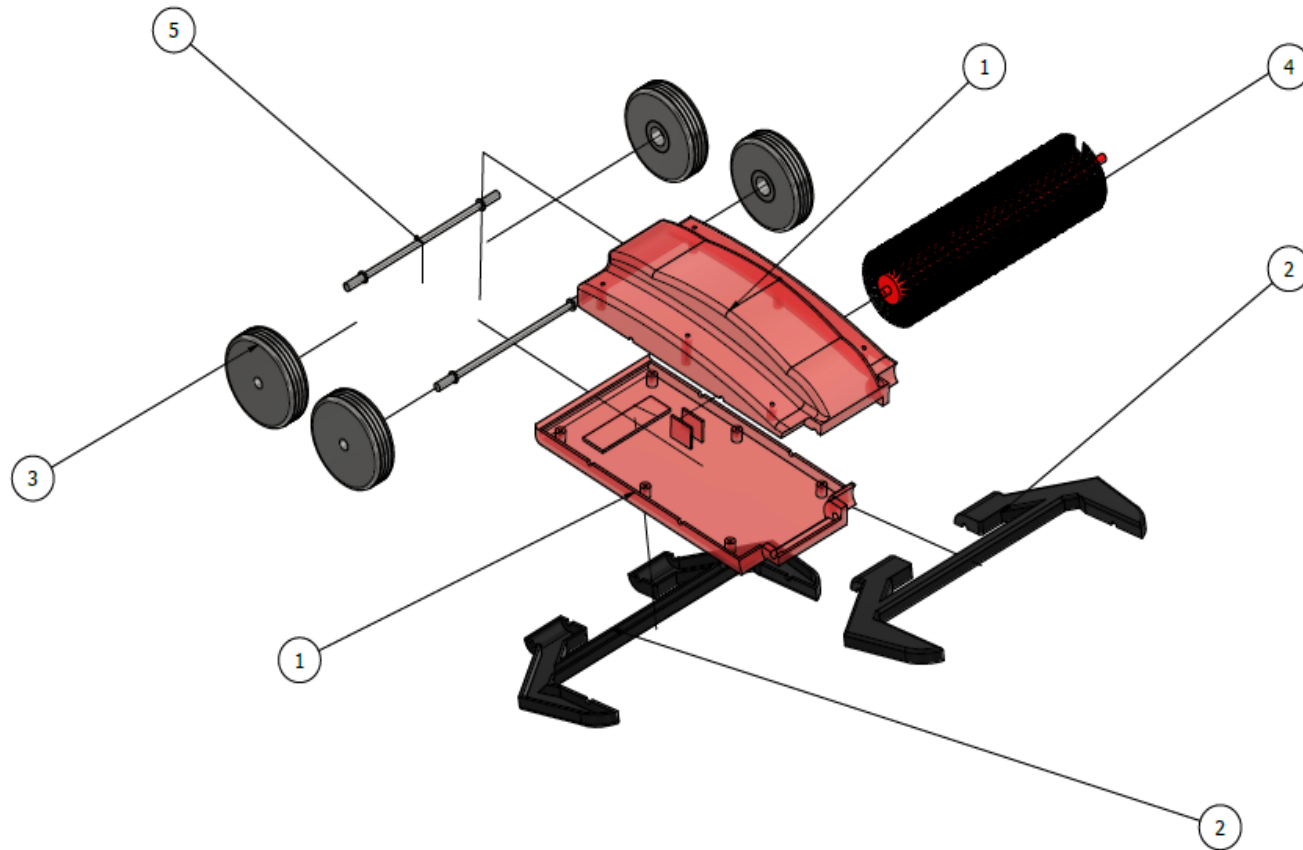
Identificación del experto

Nombre y apellidos	Fitto Abel Paredes Ruiz
Filiación (ocupación, grado académico y lugar de trabajo):	Ing. Mecánico Gerente de SOLINPA E.I.R.L.
e-mail	solinpaeir@gmail.com
Teléfono o celular	945934077
Fecha de la validación (día, mes y año):	12 / 11 / 2022
Firma	 Fitto Abel Paredes Ruiz ING. MECANICO R. CIP. N° 182570

Muchas gracias por su valiosa contribución a la validación de este instrumento.

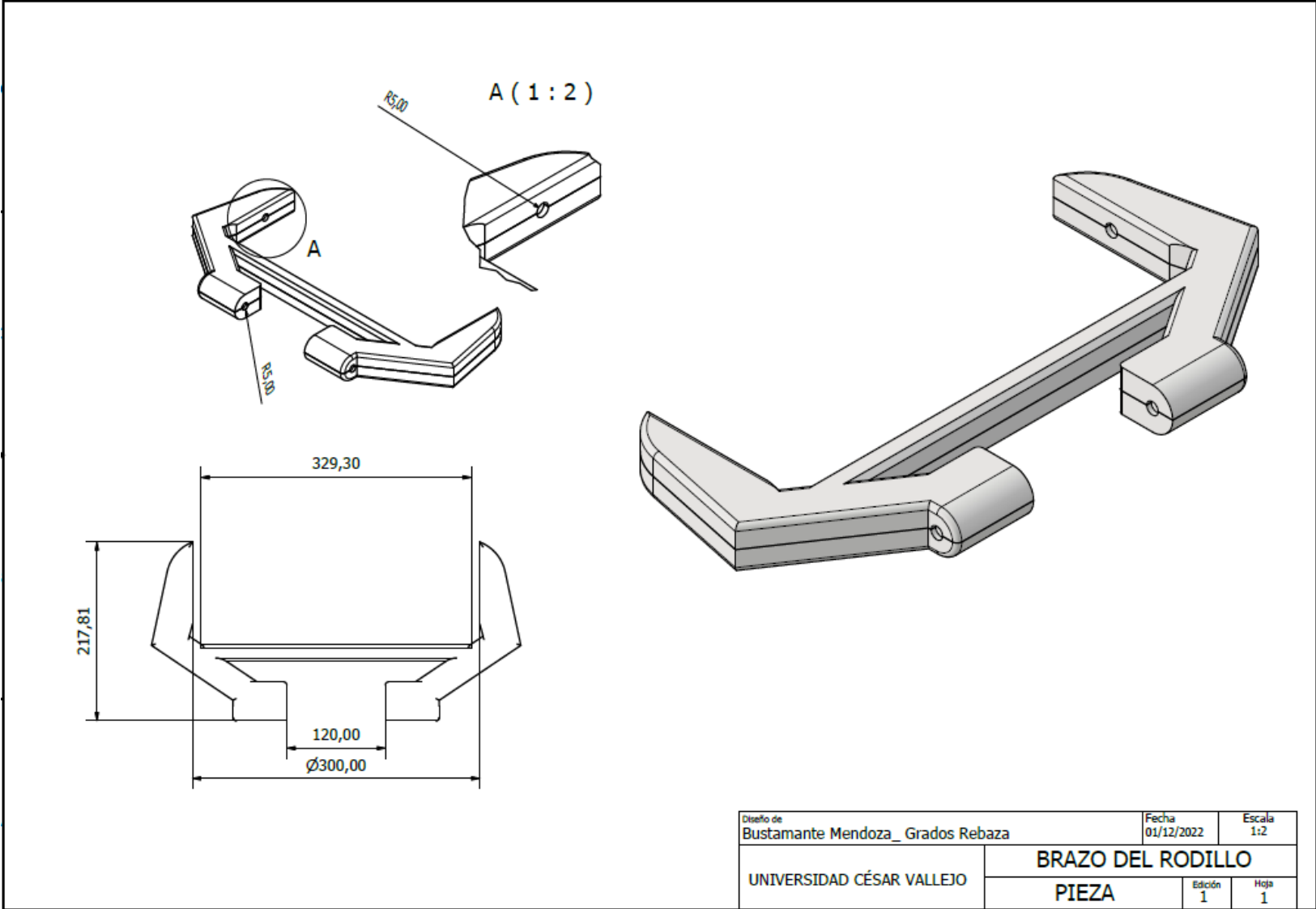
Anexo N°07: Planos de detalle

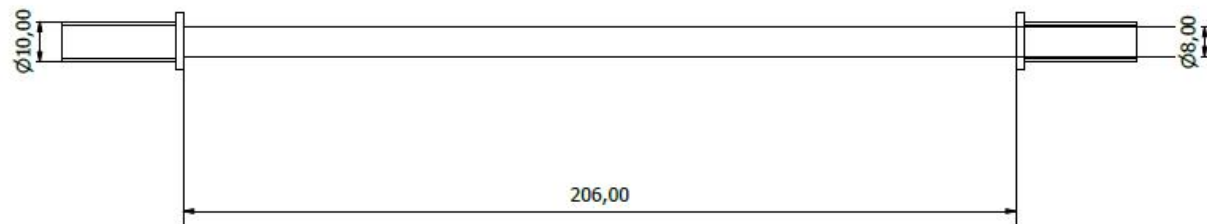
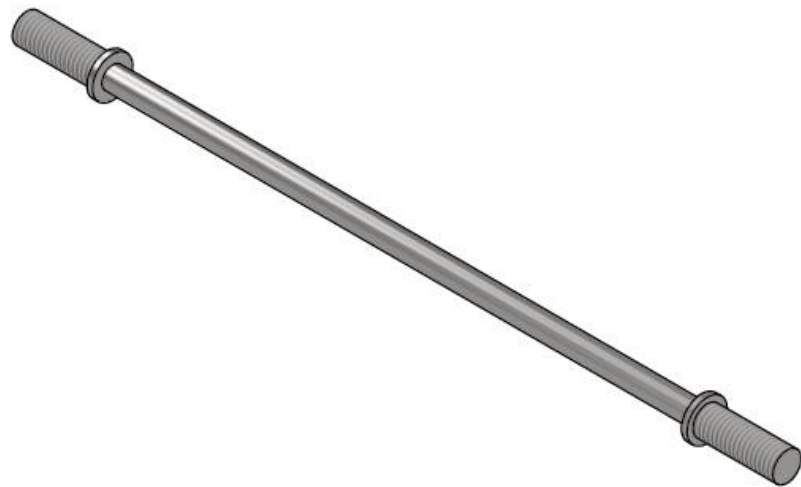




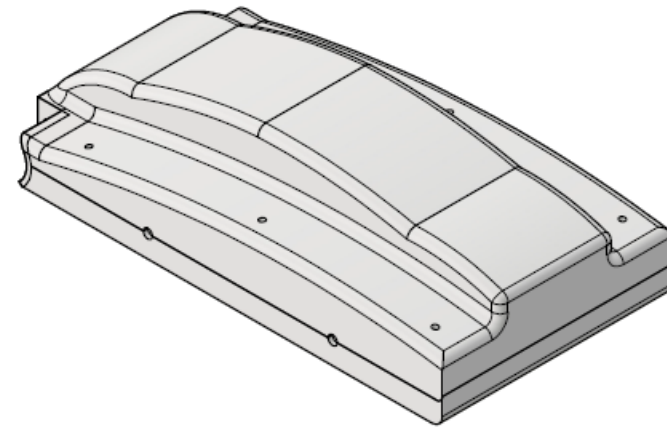
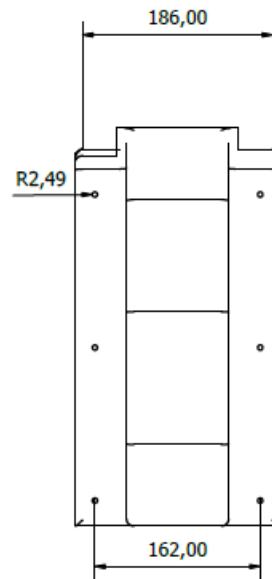
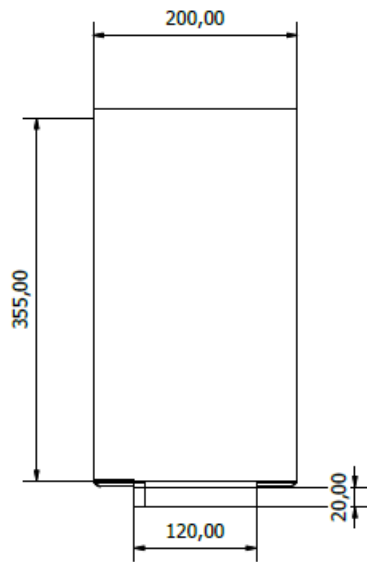
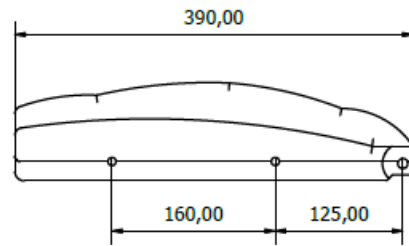
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	ESM-CHSS-01	Material PLA
2	1	ESM-GNCH_SUPP-01	Material PLA
3	4	P_CARROCERIA_001_1	Material Neodimio-Acero
4	1	P_RODILLO_004	Material PLA
5	2	P-EJE-03	MATERIAL PLA

Diseño de Bustamante Mendoza_Grados Rebaza	Fecha 01/12/2022	Escala 1:5
Universidad César Vallejo	ROBOT ESCALADOR	
	Vista explosionada	Edición 1 Hoja 1

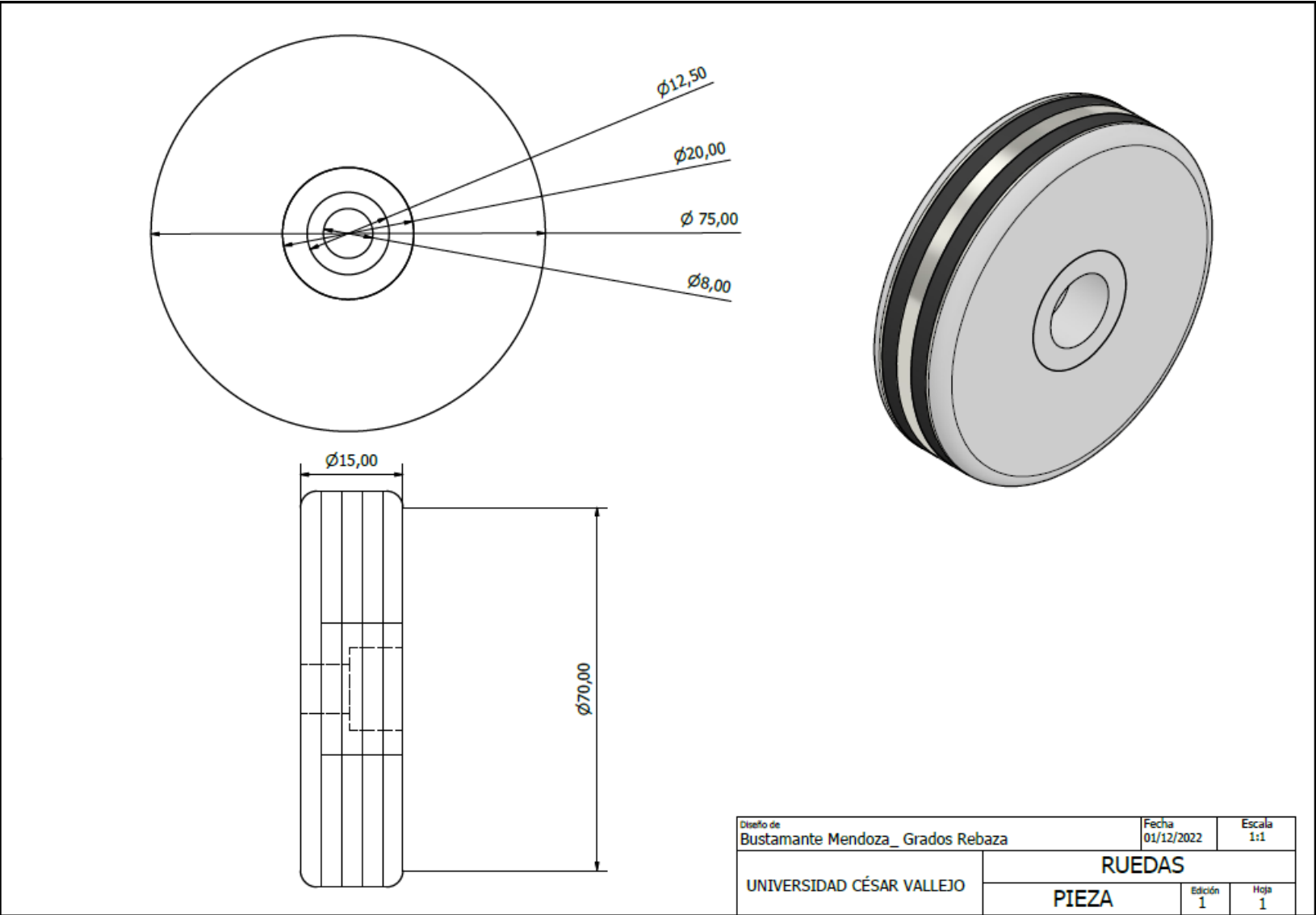




Diseño de Bustamante Mendoza_ Grados Rebaza		Fecha 01/12/2022	Escala 1:2
UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	EJE		
	PIEZA	Edición 1	Hoja 1



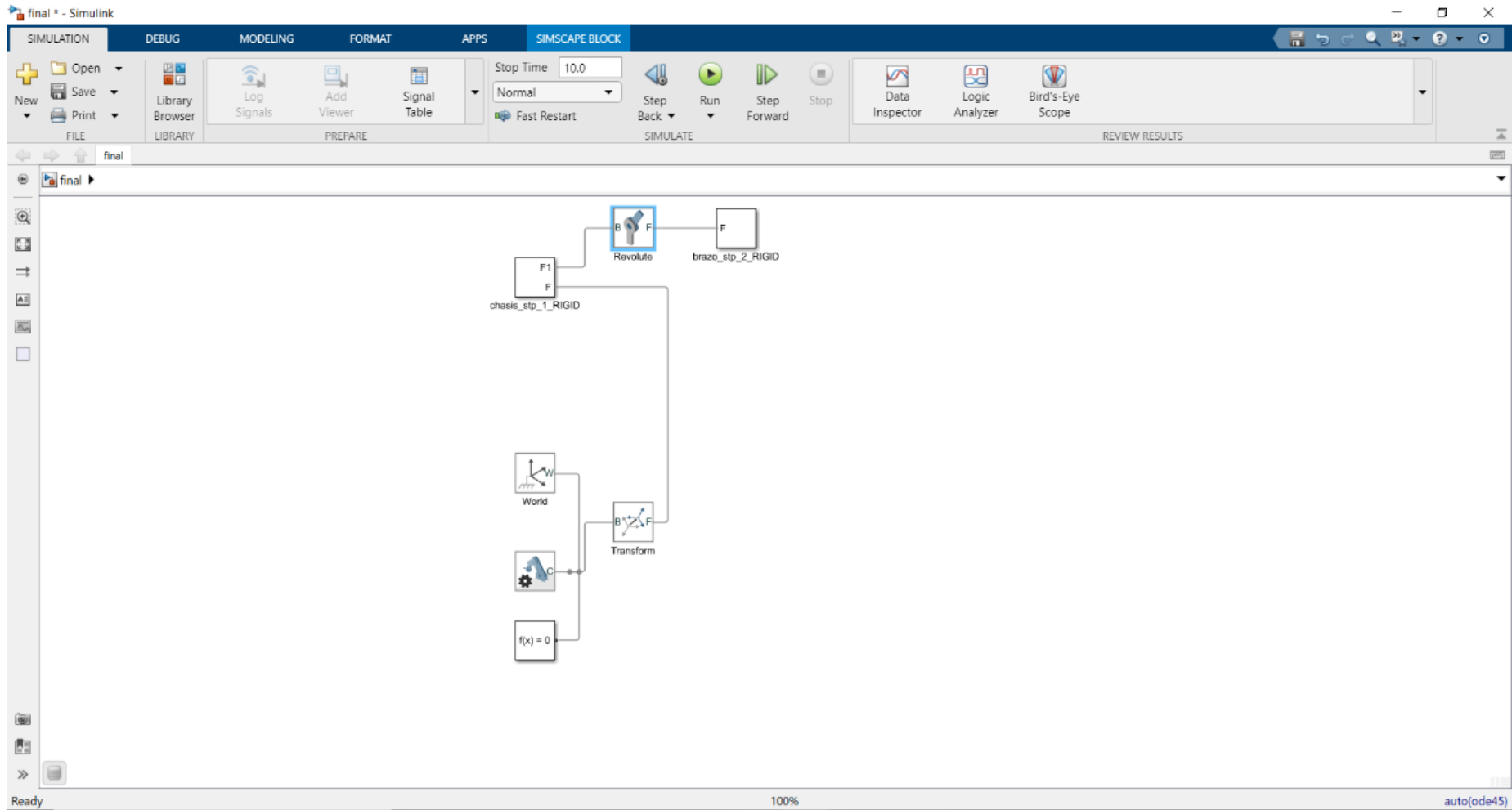
Diseño de Bustamante Mendoza_ Grados Rebaza	Fecha 01/12/2022	Escala 1:4	
UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	CHASIS		
	VISTA EXPLOSIONADA	Edición 1	Hoja 1



Anexo N°08: Matriz IPERC de tarea de limpieza de silos.

Trabajo a Realizar: Limpieza de silo		Fecha: _____	Lugar de trabajo: Molino-Chimú		
N°	ACTIVIDADES (Pasos del trabajo de inicio a fin)	PELIGROS / RIESGOS (que es lo que me podría hacer daño / como me podría dañar)	NIVEL DE RIESGO (A / B / C)	CONTROLES / MEDIDAS DE PREVENCIÓN (evitan el accidente o minimizan el riesgo)	NIVEL DE RIESGO RESIDUAL (A / B / C)
1		Caída a nivel, golpes, cortes			
2	Traslado de Herramientas	lesiones, fracturas	C	Uso de zapatos de seguridad, casco, guantes.	C
3		sobrecarga, lumbalgia, dorsalgia.			
4		Caída, aplastamiento, golpes		Uso de zapatos de seguridad, casco, guantes,	
5	Armado de andamios	fracturas, caída de objetos	B	Amés, línea de vida, vigía perenne en el área	B
6		lesiones, sobrecarga.		trabajo en equipo para izar cargas	
7		Tarea repetitiva, fatiga, inhalación de polvo,		Uso de zapatos de seguridad, casco, guantes,	
8	Limpieza de paredes del silo	ingreso de polvo a la vista, caída, caída de objetos	A	Respirador, lentes de seguridad, tapones, tyvek	B
9		sofocación, mareos, aplastamiento.		Supervisor vigía mediante el trabajo, amés, línea de vida.	
10				Uso de zapatos de seguridad, casco, guantes,	
11	Limpieza de la zona inferior	Inhalación de polvo, Ingreso de polvo a la vista, caída a nivel.	B	Respirador, lentes de seguridad, tapones, tyvek	C
12					
13		Caída, aplastamiento, golpes		Uso de zapatos de seguridad, casco, guantes,	
14	Desarmado de andamios	fracturas, caída de objetos	B	Amés, línea de vida, vigía perenne en el área	B
15		lesiones, sobrecarga.		trabajo en equipo para izar cargas	

Anexo N°09: Entorno de Simulink para definición de la cinemática del robot





UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, SIXTO RICARDO PRADO GARDINI, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Tesis titulada: "Diseño mecánico de un Robot Escalador para la Limpieza de Silos de Acero Galvanizado Corrugado de Almacenamiento de Granos de Maíz de 30 Metros de Altura y 20 Metros de Diámetro para la Empresa CHIMU S.A.", cuyos autores son BUSTAMANTE MENDOZA DIEGO RUBEN, GRADOS REBAZA HENRY WILLIAMS, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 10.00%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 25 de Noviembre del 2022

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
SIXTO RICARDO PRADO GARDINI DNI: 18099692 ORCID: 0000-0002-9135-2663	Firmado electrónicamente por: PGARDINI el 31-01- 2023 11:57:35

Código documento Trilce: TRI - 0454437