



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Desarrollo de un sistema de limpieza autónomo para paneles solares ubicados a gran altura

Daniel Sinisterra

Juan José Solano

Programa de Ingeniería Mecánica
Departamento de Ingeniería Civil e Industrial
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana
Santiago de Cali, Colombia
2023

Desarrollo de un sistema de limpieza autónomo para paneles solares ubicados a gran altura

Daniel Sinisterra

Juan José Solano

Directora:

Ph.D. Sofía Catalina Henao Aguirre

Programa de Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Pontificia Universidad Javeriana

Santiago de Cali, Colombia

2023

Declaración de obra original

Nosotros declaramos lo siguiente:

Hemos leído el Acuerdo 535 de 2010 del Consejo Directivo de la Pontificia Universidad Javeriana. «Política de Propiedad Intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Este anteproyecto representa nuestro trabajo original, excepto donde hemos reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en este anteproyecto, hemos realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Hemos obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, hemos sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Daniel Sinisterra Vélez

Fecha 05/05/2023



Juan José Solano Amaya

Fecha 05/05/2023

Resumen

La creciente demanda de fuentes de energía renovables ha impulsado el mercado de los paneles solares, el cual genera nuevos desafíos en la industria, como lo es la limpieza automatizada y eficiente de los mismos. Para lo anterior, se diseñó una solución que permite optimizar la función de limpieza y reduce el riesgo laboral de los operarios que realizan esta labor a gran altura. El proyecto se enfoca, específicamente, en la solución para el problema de limpieza que existe en el conjunto de paneles del edificio de ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, por lo que se tuvieron en cuenta las condiciones geográficas y meteorológicas de la ciudad de Bogotá. Los 64 paneles ubicados en el sexto piso del edificio pierden entre 10% y 30% de su eficiencia debido a la presencia de polvo en su superficie. En la fase de diseño, se aplicó la metodología de Design Thinking la cual permite esquematizar el proceso y seguir un orden lógico para el desarrollo de un producto. Se parte de la definición de requerimientos, se seleccionan opciones de solución, se prototipa a partir de un sustento matemático y se evalúa la funcionalidad del sistema a partir de pruebas. Para la evaluación del funcionamiento se realizaron simulaciones con softwares de análisis numérico en SolidWorks. El producto final del trabajo es un prototipo funcional, que permite avanzar a una etapa de diseño orientada a la producción.

Palabras clave: Panel solar, robot, limpieza, celdas fotovoltaicas, autónomo

Abstract

The growing demand for renewable energy sources has driven the solar panel market, which generates new challenges in the industry, such as the automated and efficient cleaning of solar panels. For this purpose, a solution was designed to optimize the cleaning function and reduce the occupational risk of operators who perform this work at heights. The project focuses, specifically, on the solution for the cleaning problem that exists in the set of panels of the engineering building of the Pontificia Universidad Javeriana in Bogota, so the geographical and meteorological conditions of the city of Bogota were considered. The 64 panels located on the sixth floor of the building lose between 10% and 30% of their efficiency due to the presence of dust on their surface. In the design phase, the Design Thinking methodology was applied, which allows to schematize the process and follow a logical order for the development of a product. The starting point is the definition of requirements, the selection of solution options, prototyping based on mathematical support, and evaluation of the system's functionality through tests. For the evaluation of the performance, simulations were carried out with numerical analysis software in SolidWorks. The final product of the work is a functional prototype, which allows advancing to a production-oriented design stage.

Keywords: Solar panel, robot, cleaning, photovoltaic cells, autonomous

Contenido

	Pág.
Resumen	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XI
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
1. Antecedentes	3
1.1 Marco teórico.....	3
1.1.1 Limpieza manual	3
1.1.2 Normatividad y lineamientos de trabajo en alturas.....	4
1.1.3 Estructura de un panel solar y las causas de su pérdida de eficiencia	6
1.2 Estado del arte	8
1.2.1 Película cristalina hidrofóbica para limpieza pasiva.....	8
1.2.2 Película transparente electrodinámica	8
1.2.3 Sistema de limpieza por cavitación ultrasónica.....	9
1.2.4 Robot de rodillos unidireccional.....	10
1.2.5 Robot Cartesiano de limpieza	12
2. Planteamiento del problema	15
3. Justificación	19
4. Objetivos	21
4.1 Objetivo general	21
4.2 Objetivos específicos	21
5. Metodología	23
6. Restricciones	27
7. Resultados	29
7.1 Empatizar	29
7.2 Definir.....	32
7.2.1 Análisis de funcionamiento.....	32
7.2.2 Definición de requerimientos.....	34

7.2.3	Casa de la calidad	37
7.3	Idear.....	39
7.3.1	Diagrama morfológico.....	39
7.3.2	Diseño de sistemas	42
7.3.2.1	Sistema de fijación.....	42
7.3.2.2	Sistema de dispensación.....	43
7.3.2.3	Sistema de tracción	44
7.3.2.4	Sistema de remoción de partículas	44
7.3.2.5	Sistema de reposo	45
7.3.3	Ensamblaje	45
7.3.4	Validación de motores.....	46
7.3.4.1	Motores de tracción	46
7.3.4.2	Motor del cepillo	48
7.3.5	Análisis de elementos finitos	50
7.3.5.1	Eje de rotación.....	51
7.3.5.2	Tornillo transversal	51
7.3.5.3	Riel de tubería cuadrada	54
7.3.5.4	Marco del panel solar.....	57
7.3.6	Selección de componentes electrónicas.....	58
7.4	Prototipar	59
7.4.1	Ditec SAS	61
7.4.2	Plastilecor.....	63
7.4.3	Micron Energy de Colombia SAS.....	64
7.4.4	Centro de automatización de procesos PUJ	64
7.4.5	Circuito electrónico.....	64
7.4.6	Resultado final	65
7.4.7	Análisis de costos.....	66
7.5	Validación	68
7.5.1	Prueba de funcionamiento bajo los requerimientos.....	68
7.5.2	Prueba de limpieza.....	73
8.	Recomendaciones.....	77
9.	Conclusiones.....	80
	Bibliografía	83
	Anexo 1. Encuesta de especificaciones del cliente	87
	Anexo 2. Casa de la calidad.....	89
	Anexo 3. Planos de fabricación de las piezas del robot	91

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Limpieza manual de paneles [3].	4
Figura 2. Pértiga con cepillo para limpieza de difícil acceso [4].	4
Figura 3. Elementos de seguridad para trabajo en alturas [5].	5
Figura 4. Mallas y barandas de seguridad [5].	6
Figura 5. Estructura de un panel solar [6].	7
Figura 6. Funcionamiento de la película dieléctrica [8].	9
Figura 7. Pruebas de método de limpieza por cavitación ultrasónica [9].	9
Figura 8. Planos del robot de rodillos [10].	10
Figura 9. Esquema de un panel sucio con el robot en posición inicial [10].	11
Figura 10. Movimiento del robot de rodillos [10].	11
Figura 11. Modelo provisional del sistema de limpieza cartesiano [11].	13
Figura 12. Gases de invernadero y su incremento en los últimos 50 años [12].	15
Figura 13. Ubicación de paneles solares (izquierda) y ventanales (derecha) en el sexto piso del edificio de ingeniería (Imagen propia).	17
Figura 14. Gráfico de interés vs poder de los <i>stakeholders</i> .	30
Figura 15. Caja negra	32
Figura 16. Caja transparente	33
Figura 17. Diagrama morfológico	40
Figura 18. Diagrama morfológico con alternativas de solución.	41
Figura 19. Rodamiento roller comercial para ruedas guía	42
Figura 20. Vista isométrica de la prensa en "c"	43
Figura 21. Vista isométrica del tanque de jabón	44
Figura 22. Vista isométrica del ensamblaje total	45
Figura 23. Diagrama de cuerpo libre de una rueda deformable con rodadura [25].	46
Figura 24. Diagrama de cuerpo libre cepillo rotatorio	48
Figura 25. Análisis de deflexión del eje	51
Figura 26. Análisis de esfuerzos del tornillo	52
Figura 27. Análisis de deflexión del tornillo	54
Figura 28. Análisis de esfuerzos del riel	55
Figura 29. Análisis de deflexión del riel	56
Figura 30. Análisis de esfuerzos del marco del panel solar.	58
Figura 31. Piezas fabricadas en Ditec SAS ensambladas	61
Figura 32. Piezas fabricadas en Ditec ensambladas vista interior	62
Figura 33. Sistema de prensado fabricado en Ditec SAS	63
Figura 34. Cepillo fabricado en Plastilecor.	64

Figura 35. Circuito electrónico del robot	65
Figura 36. Prototipo final del robot sobre el panel de referencia.....	66
Figura 37. Balín usado para prueba de impacto.....	71
Figura 38. Robot encendido sobre la estructura.....	72
Figura 39. Robot encendido vista del cepillo	72
Figura 40. Rodamientos roller sobre el riel.....	73
Figura 41. Imagen del vidrio sucio.....	74
Figura 42. Imagen del experimento	75
Figura 43. Imagen del vidrio limpio	76

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Principales riesgos de exposición de los trabajadores [15].	18
Tabla 2. Valoración de las especificaciones por parte de los interesados	31
Tabla 3. Resultados de la casa de la calidad	38
Tabla 4. Análisis de convergencia para la malla del tornillo.	52
Tabla 5. Análisis de convergencia para la malla del riel	55
Tabla 6. Análisis de convergencia para malla del marco del panel	57
Tabla 7. Selección de componentes eléctricos según la necesidad.	59
Tabla 8. Selección de proveedor según el componente	59
Tabla 9. Análisis de costos.	66
Tabla 10. Pruebas de funcionamiento según el requerimiento	69
Tabla 11. Resultados de limpieza.	76

Introducción

En el marco de este proyecto se aborda un problema que presenta la instalación de paneles solares en edificios de gran altura en cuanto a su limpieza. Actualmente, la remoción de impurezas se realiza de forma manual, de manera que un operario de mantenimiento se ve forzado a llegar al nivel donde las celdas fotovoltaicas están ubicadas y hacer una limpieza similar a la que se usa en ventanas, con herramientas manuales y, en general, con las reglas mínimas de seguridad de trabajo en alturas, pero asumiendo todos los riesgos que esta práctica conlleva. Es por esto por lo que se diseñó un sistema capaz de limpiar paneles de difícil acceso de forma automática (con mínima intervención del operario) con el fin de salvaguardar la vida del personal de mantenimiento y reducir riesgos de accidentalidad.

A su vez, se desarrolló un sistema que cumpla su labor de limpieza satisfactoriamente, evitando el uso excesivo de agua e implementos de limpieza, pero con un resultado final aceptable que no afecte la eficiencia de trabajo del panel. Para lo anterior, se investigaron varias técnicas de limpieza tanto actuales como novedosas, entre las cuales se encuentran la remoción de partículas por el uso de películas electrodinámicas, la vibración ultrasónica de un fluido de capa delgada, los recubrimientos especiales con materiales nano particulados como el dióxido de titanio, la limpieza activa convencional (remoción con agua) pero con robots automatizados con diferentes modos de operación y diseños. En esta última categoría existen variaciones aplicables a los fines de este proyecto, como los robots cartesianos, rodillos lineales o cortinas de limpieza, etc.

Los objetivos de la presente investigación se basan en encontrar metodologías de limpieza pertinentes para el caso de estudio (Pontificia Universidad Javeriana) y, en general, están encaminados al proceso de diseño del sistema. Para lo anterior, se deben definir requerimientos de la necesidad específica y darle así bases fundamentales a un proceso de ideación y filtro de ideas, empleando una metodología de diseño, en este caso "Design

Thinking”, para llegar al producto final de forma metodológica y ordenada. Se realizan pruebas y simulaciones técnicas para sustentar teóricamente el funcionamiento y la seguridad del sistema, y, adicionalmente, pruebas funcionales de prototipado para estudiar el comportamiento del sistema en un entorno real.

Si bien el proyecto apunta al desarrollo completo del sistema de limpieza, hay ciertas limitaciones logísticas que reducen el alcance de este proyecto, como el presupuesto de diseño, pues un artefacto sofisticado como lo es el objeto de esta investigación requiere de la adquisición de materia prima, uso de máquinas de laboratorio especiales, pruebas de materiales y simulaciones numéricas. Otra limitación es la disposición de las universidades Javeriana de Bogotá y Cali, ya que es un trabajo aplicable a ambas instituciones y la logística de las pruebas y la información técnica proporcionada se vio condicionada por la disponibilidad de todos los actores.

Si bien ya existen sistemas de limpieza propios para paneles solares, este trabajo ofrece una ventaja competitiva para las universidades pues fue diseñado por estudiantes y terminará siendo propiedad intelectual, en cierta medida, de estas instituciones. Además, el valor de agregado de este proyecto es que se desarrolló teniendo en cuenta las condiciones climáticas y de ubicación de los paneles de la Javeriana, y que fue diseñado pensando siempre en la aplicación en zonas tropicales y con alta cantidad de luz solar. Éste, sentará un precedente para futuros diseños de sistemas similares con aplicaciones reales y acercará a la industria un paso más cerca de la completa automatización de labores de alto riesgo como la limpieza en alturas.

1. Antecedentes

1.1 Marco teórico

Para el marco conceptual se realizó una investigación de los métodos de limpieza aplicables a los paneles solares, que puedan contribuir al desarrollo de un sistema autónomo para la conservación de la eficiencia de las celdas fotovoltaicas.

Actualmente, existen algunos sistemas como robots que automatizan los procesos de limpieza. Sin embargo, la mayoría de los paneles solares se asean a partir de métodos convencionales, como el uso de un operario para la remoción de suciedad con agua.

1.1.1 Limpieza manual

En la gran mayoría de instalaciones de paneles solares, la limpieza de estos se realiza de forma manual, es decir, análoga al proceso de limpieza de una ventana. Se recomienda usar agua tibia y una pequeña cantidad de jabón para evitar que se forme espuma o se vea afectada la superficie del panel. El uso de químicos como cloro o desinfectante tiene a rayar el vidrio superior por lo que usualmente no se emplean. Una vez humedecida la superficie con agua, se emplea un cepillo de cerdas suaves o un trapo especializado para remover activamente las impurezas, como se puede observar en la Figura 1. En caso de paneles de difícil acceso el operario se ayuda de una pértiga que le da mayor alcance al cepillo (Figura 2) [1], [2].

En esta modalidad de limpieza, el operario se ve obligado a estar cerca al panel sin importar la ubicación de este, por lo que, en edificios altos, el acceso a una posición adecuada para realizar la labor es naturalmente más peligrosa.



Figura 1. Limpieza manual de paneles [3].



Figura 2. Pértiga con cepillo para limpieza de difícil acceso [4].

1.1.2 Normatividad y lineamientos de trabajo en alturas

Actualmente, la forma estándar de realizar trabajos de limpieza, construcción y mantenimiento en edificios es el trabajo manual especializado en alturas, para el cual se tiene la resolución 4272-2021 del Ministerio del Trabajo, en la cual se estipulan las normativas mínimas de seguridad. Pese a los estándares legales, el riesgo inherente del

trabajo en alturas es considerable por lo que es importante tenerlo en cuenta como factor decisivo para la solución del problema [5].

La logística necesaria para el trabajo en alturas consta de dos estructuras principales: escaleras y andamios, entre los cuales encontramos tubulares, modulares y colgantes. A cada estructura le corresponde una lista de requerimientos de seguridad, normas de uso, practicas seguras y demás elementos que complican aún más su uso correcto [5]



Figura 3. Elementos de seguridad para trabajo en alturas [5].

En adición a las estructuras, encontramos elementos indispensables para la seguridad del operario, tanto para evitar la caída como para contrarrestar sus efectos una vez la caída haya sucedido. En el primer grupo encontramos elementos como el arnés, eslinga, línea de vida vertical, dispositivos anticaídas retráctil, línea de vida horizontal y mosquetón. Algunos de estos elementos se pueden observar en la Figura 3.

En el segundo grupo encontramos elementos como sistema de restricción portátil (1), baranda (2), mallas de seguridad (3) (Figura 4) arrestador, línea de trabajo, requerimiento o espacio de claridad, etc. [5].

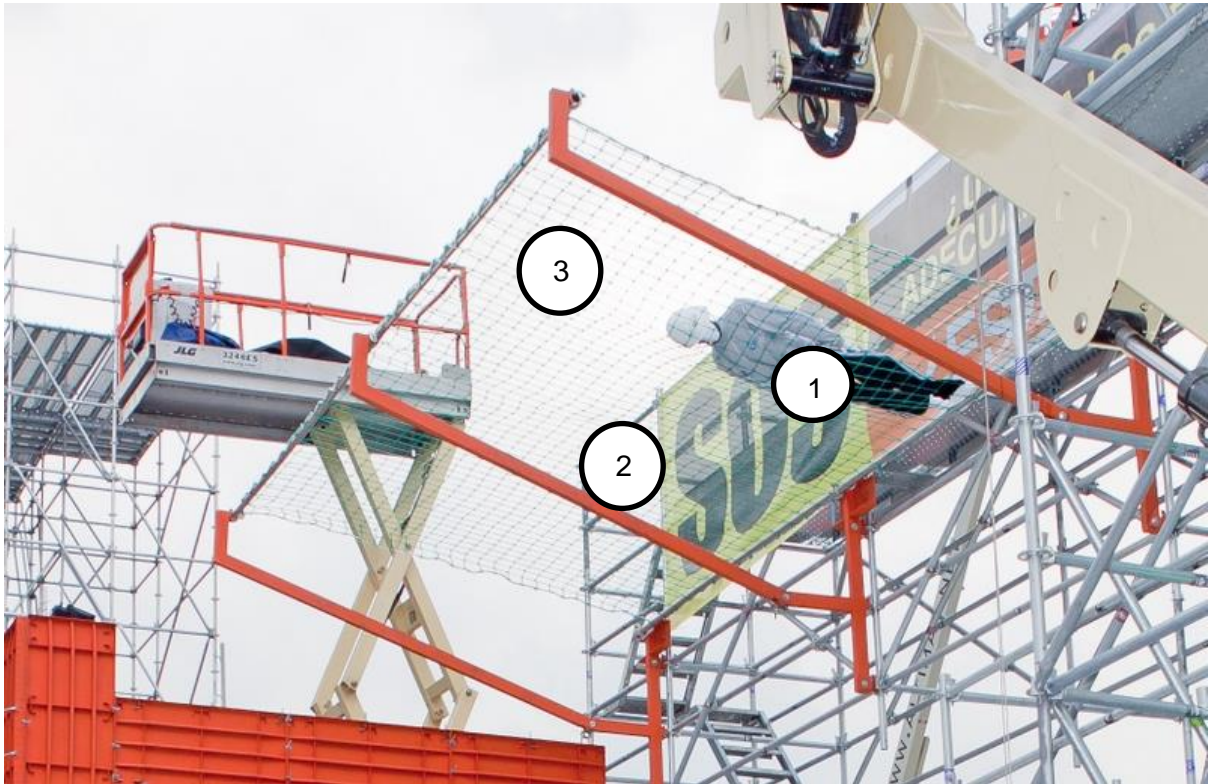


Figura 4. Mallas y barandas de seguridad [5].

1.1.3 Estructura de un panel solar y las causas de su pérdida de eficiencia

El panel solar tiene una estructura de capas que le permiten recibir la luz, transformarla, almacenarla y proteger su propia integridad. En la Figura 5 se pueden observar las diferentes partes que componen una celda fotovoltaica.

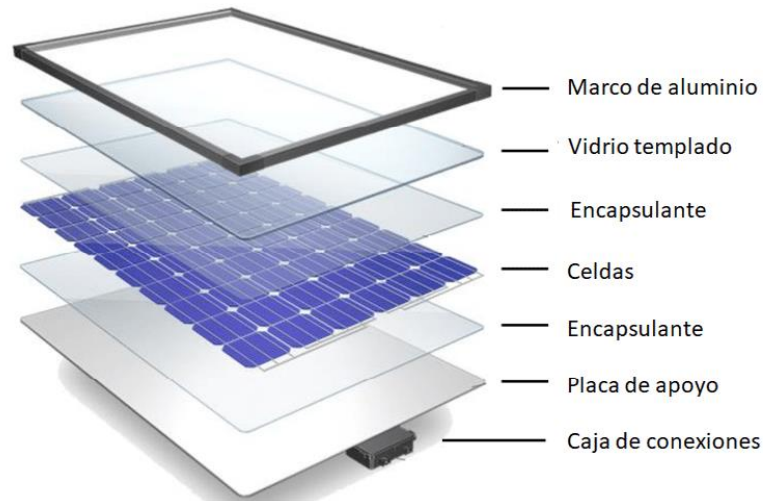


Figura 5. Estructura de un panel solar [6].

Las celdas son el componente más importante del mecanismo, ya que estas absorben la energía solar y generalmente están hechas de silicio. Además, es el componente más vulnerable del panel, debido a que el silicio es un material frágil y su deformación o agrietamiento ocasionaría una pérdida considerable en la eficiencia del mecanismo. Los encapsulantes son películas de polímeros que ayudan a la adhesión de las celdas a los otros componentes. El vidrio tiene como única función la protección de la integridad de las celdas. La caja de conexiones almacena la energía transformada.

Los paneles se ven condicionados por distintos factores, debido a que generan una pérdida en la eficiencia de estos. El efecto de la reflexión en el encapsulante y en el vidrio genera una gran pérdida de eficiencia, debido a la diferencia en los índices de refracción, ocasionando una disminución del 8% al 9% de su eficiencia por este fenómeno. Otros factores que afectan la eficiencia son la suciedad y la sombra. La absorción de la luz que generan los dos fenómenos anteriores limita el espectro de fotones que alcanza a llegar a las celdas y, por lo tanto, la energía transformada disminuye significativamente. Existen más razones por las que el panel pierde capacidad, como la temperatura de funcionamiento de la celda fotovoltaica, sin embargo, no representan una pérdida significativa, en comparación con los factores previamente mencionados [7].

1.2 Estado del arte

1.2.1 Película cristalina hidrofóbica para limpieza pasiva

Existe un método de limpieza pasivo que actualmente se usa para ventanas por su practicidad y eficiencia, el cual es la adhesión de una película de dióxido de titanio a la superficie. Este material, al recibir exposición a los rayos ultravioleta, se vuelve altamente hidrofílico y tiene una capacidad de absorción del agua mucho mayor. Por esta razón, al tener un medio de dispersión (medio en el cual se dispersarán las partículas polvo desprendidas de la capa superior del panel, en este caso se tiene pronosticado que el aire cumpla este rol) la capa permite desprender las partículas de polvo y reduce el riesgo de rayar la superficie de la ventana. Este método es aplicable para la limpieza de paneles solares, aunque tiene algunas limitaciones como el alto índice de refracción del dióxido de titanio, que reduce la eficiencia del panel en hasta un 18%, y que requiere una intervención para la remoción de la suciedad [8].

1.2.2 Película transparente electrodinámica

Un método de limpieza activo para paneles solares es la remoción de polvo a partir de la implementación de una película dieléctrica y un electrodo, como se observa en la Figura 6. A partir de alternar el voltaje de los electrodos, las partículas de polvo encima del dieléctrico se cargan, de manera que el aire se vuelve el otro electrodo del sistema. Los átomos de la superficie de la película se cargan negativamente, y las partículas de polvo encima de ella se cargan positivamente. Este cambio en la polaridad genera una fuerza dielectroforética, la cual acelera los iones de polvo hacia arriba, que serán desplazados por las corrientes de aire que atraviesan la superficie de la película. Este método de limpieza de paneles es muy práctico, ya que no se necesita ninguna intervención para remover la suciedad y el mismo panel puede alimentar el sistema. El mecanismo puede limpiar hasta el 90% de las partículas de polvo en menos de dos minutos, usando menos del 0,1% de la energía producida en ese tiempo [8].

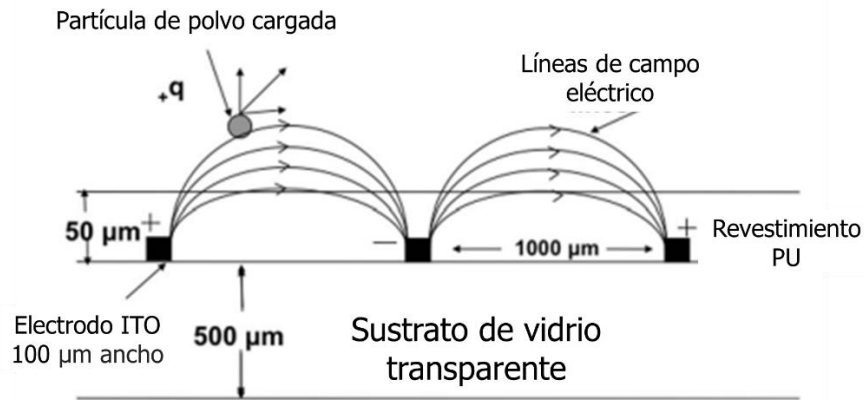


Figura 6. Funcionamiento de la película dieléctrica [8].

1.2.3 Sistema de limpieza por cavitación ultrasónica

Otra forma de limpiar los paneles es a partir de la cavitación generada por vibraciones longitudinales ultrasónicas. Dos componentes cerámicos piezoeléctricos se sitúan en ambos costados, los cuales excitan la vibración transversal de las placas de las celdas del panel, lo que produce una presión acústica entre ellas. Una delgada capa de líquido, generalmente agua, se sitúa sobre la superficie, la cual actúa como medio de propagación. La presión acústica que sufre el líquido genera cavitaciones, que servirán para desprender las partículas de polvo en la superficie del panel solar. Las burbujas producidas por la cavitación transportan las partículas de suciedad y permiten expulsarlas al ambiente. En la Figura 7 se puede observar la superficie antes y después de realizar la limpieza [9].

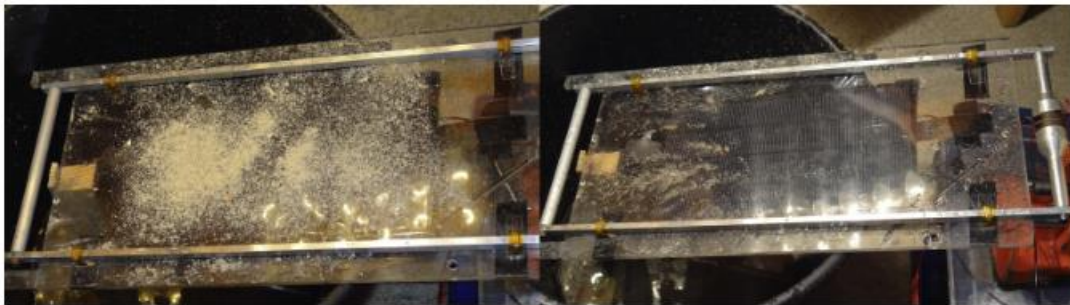


Figura 7. Pruebas de método de limpieza por cavitación ultrasónica [9].

1.2.4 Robot de rodillos unidireccional

Una alternativa para la limpieza de paneles es el uso de un robot con cepillos, que limpia de manera longitudinal por partes, el cual se mueve con correas de alta fricción, para que se sostenga en la superficie. El robot consta de dos correas de poliuretano cerradas e independientes, que movilizan el robot. Este se mueve linealmente, pero para cambiar de zona, se puede activar una sola correa para bajar o subir el robot. Tiene un cepillo a cada lado, pero solo se activa el correspondiente a la dirección de limpieza. Un plano en vista superior se adjunta en la Figura 8.

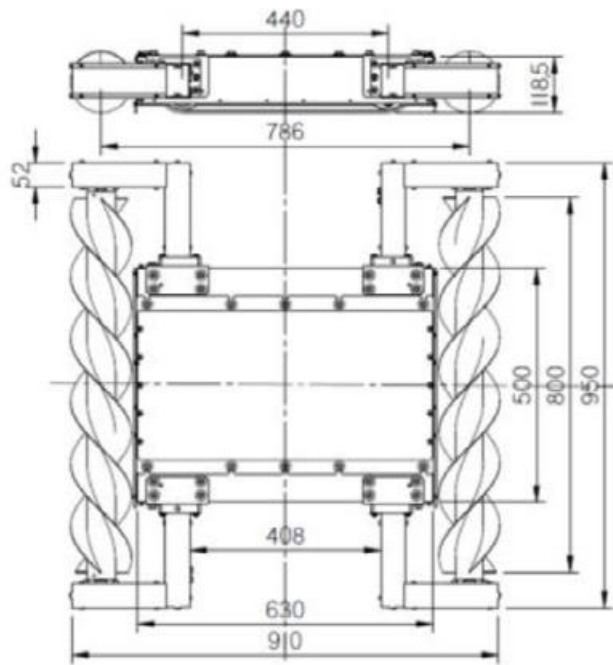


Figura 8. Planos del robot de rodillos [10].

Lo anterior, con el objetivo de no rayar la superficie del panel más de lo soportado. En la Figura 9 se puede observar una ilustración del robot antes de empezar el proceso de limpieza. En este caso, el robot empezaría a moverse a la izquierda, solo con el cepillo frontal encendido. Los problemas que tiene esta solución, es la pérdida de eficiencia del panel por posibles imperfecciones en la superficie [10].

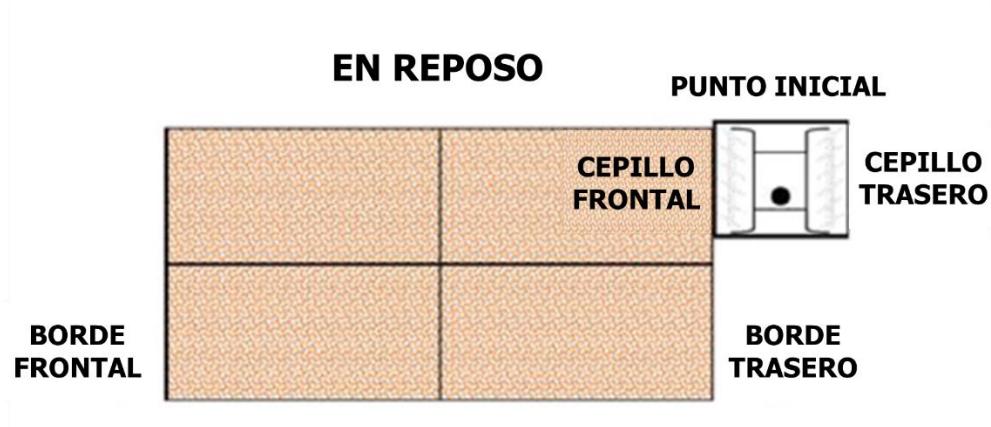


Figura 9. Esquema de un panel sucio con el robot en posición inicial [10].

En la Figura 10 se evidencia el movimiento del robot cuando limpia el panel en dirección horizontal y cambia de dirección para limpiar otra sección de este. El robot es independiente de coordenadas en un plano, es decir, puede tener movimiento en cualquier dirección y no está condicionado a obedecer coordenadas en los ejes horizontal y vertical. Por esta razón no se considera un robot cartesiano.

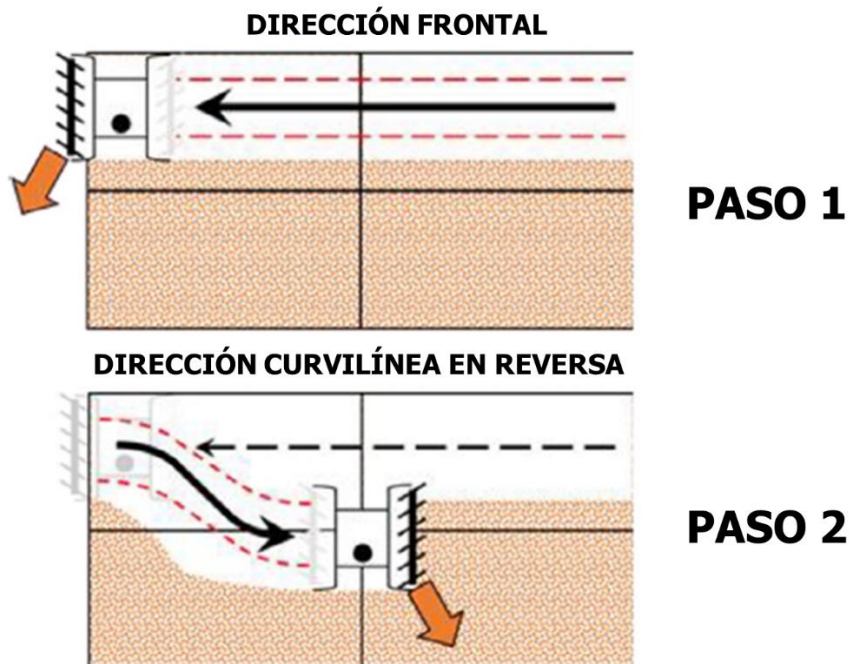


Figura 10. Movimiento del robot de rodillos [10].

1.2.5 Robot Cartesiano de limpieza

Una solución que está tomando fuerza en el campo de la limpieza actualmente, es el uso de un robot cartesiano para el aseo de ventanas, el cual es aplicable para paneles solares también. Este tipo de sistema tiene numerosas variantes incluidas en aplicaciones como la manufactura aditiva (impresión 3d), ensamblaje de piezas, herramientas de corte asistido por computadora, etc. El sistema consiste en un robot que tiene dos rangos de movimiento y limpia ventanas mediante un cepillo conectado al sistema, es decir está condicionado a moverse en coordenadas de eje horizontal y vertical. El mecanismo sube apoyado de un tornillo de potencia, el cual le brinda el movimiento vertical, como se puede observar en la Figura 11. Para el desplazamiento horizontal se usa un motor paso a paso que mueve un sistema de poleas y correa en la cual se ubica el cepillo, cuando se activan las poleas, la correa se desplaza linealmente y transporte el cepillo en contacto con la superficie. La idea principal del mecanismo es que se limpie la superficie a partir de barridos horizontales. Cuando se culmine la limpieza de una línea horizontalmente (el sistema de poleas y correa hizo que el cepillo recorriera la distancia total horizontal del panel), el sistema de tornillo de potencia se activa para dirigir el sistema horizontal a otro nivel directamente adyacente al recién limpiado, para continuar con el siguiente y así sucesivamente. Este diseño puede representar un desafío para la limpieza a gran escala de ventanas y paneles solares, ya que la estructura vertical (tornillo de potencia) es central e impide en ciertas zonas el paso de la luz al panel. Además, es necesario el uso y transporte de agua, para hacer una limpieza efectiva, por lo que en el diseño del robot se menciona la necesidad de implementar inyectores y mangueras que tengan salida en el cepillo, sin embargo, no se dan detalles de diseño al respecto. Por lo anterior, la solución se podría apoyar de algún otro método de limpieza que requiera menos implementos [11].

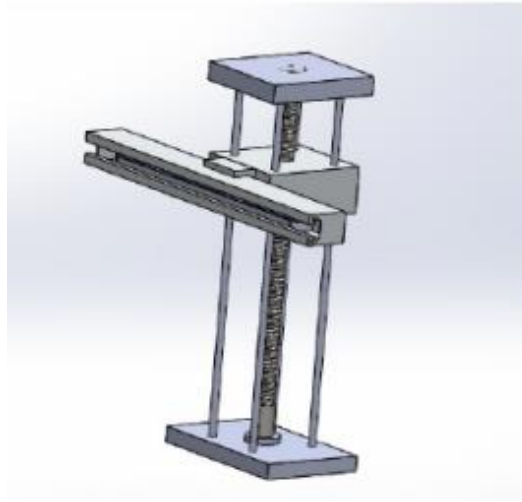


Figura 11. Modelo provisional del sistema de limpieza cartesiano [11].

2. Planteamiento del problema

“Estados Unidos de Norteamérica y la Comunidad Económica Europea producen el 49% del bióxido de carbono mundial (por uso y transformación de diferentes tipos de energía, principalmente combustibles fósiles) y los países del Tercer Mundo son responsables de la deforestación (por quema de bosques), ya que se liberan 1398 millones de toneladas anuales.” [12]. En la Figura 12 se puede observar la concentración de los gases de invernadero durante los últimos años, y se evidencia un incremento significativo a finales del siglo XX.

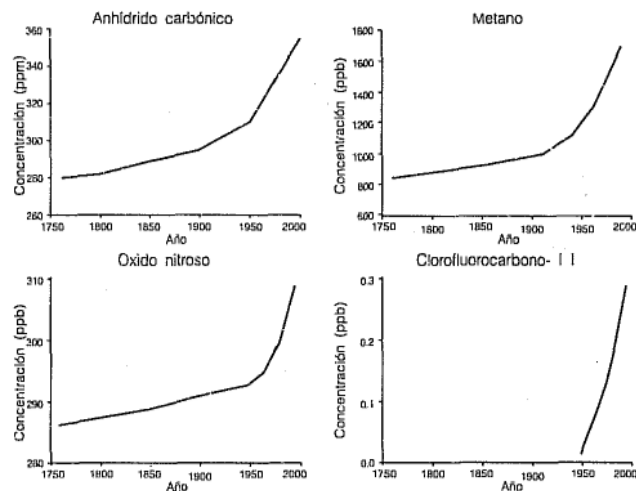


Figura 12. Gases de invernadero y su incremento en los últimos 50 años [12].

La estrategia más viable para mitigar el efecto que tiene la quema de combustibles fósiles, es la implementación y desarrollo de fuentes de energía renovables, como lo son la energía eólica, geotérmica, hidráulica, solar, entre otras.

Una de las fuentes de energía con mayor potencial en la actualidad es la energía solar, ya que la radiación es la principal fuente de energía que recibe el planeta, y aunque mucha de ella es utilizada por organismos biológicos, se puede aprovechar directamente mucha más. Una pequeña parte de la energía liberada por el Sol llega a la Tierra; de ella, aproximadamente el 60% es absorbida por la atmósfera (en forma de luz visible) y el 40% es reflejada o remitida al espacio. Del 60% que penetra a la atmósfera, 15% se queda en esta y el 45% restante llega a la superficie terrestre como radiación difusa y directa. [12]

La instalación de paneles solares en edificios altos sirve para abastecer parcialmente el sistema de alimentación energético del mismo, así como a reducir consumo de energía convencional y, en general, facilitar una transición energética sostenible. Sin embargo, las celdas fotovoltaicas son una tecnología en desarrollo que aún es susceptible a numerosas variables incontrolables para el ser humano, entre ellas las condiciones meteorológicas, del ambiente y del terreno [13].

Alineados con esta idea, la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá decidió implementar recientemente un sistema de paneles solares sobre una terraza del techo del edificio de ingeniería (como se puede observar en la imagen izquierda de la Figura 13 al lado de un solar con ventanales ubicados de forma similar a los paneles, el cual es visible en las imágenes posteriores. Los 64 paneles solares instalados solo aportan, aproximadamente, 2000 kWh al mes al edificio, lo cual representa un 0,4% del total de energía consumida de 500 000 kWh. Debido a que el aporte de energía es mínimo, es deseable que el sistema se aproveche al máximo; por lo que se busca optimizar el funcionamiento de las celdas, las cuales pierden entre 10% y 30% de su eficiencia por la presencia de partículas de polvo en su superficie.

Es importante tener en cuenta que la eficiencia de un grupo de celdas fotovoltaicas puede decrecer hasta en un 50% cuando se ve expuesto al polvo y a la suciedad resultante de su exposición al ambiente y no se le realiza una adecuada limpieza al mes por lo que, aunque la universidad reporte pérdidas de entre 10% y 30%, estas podrían llegar al 50% según lo reportado por la literatura [14].

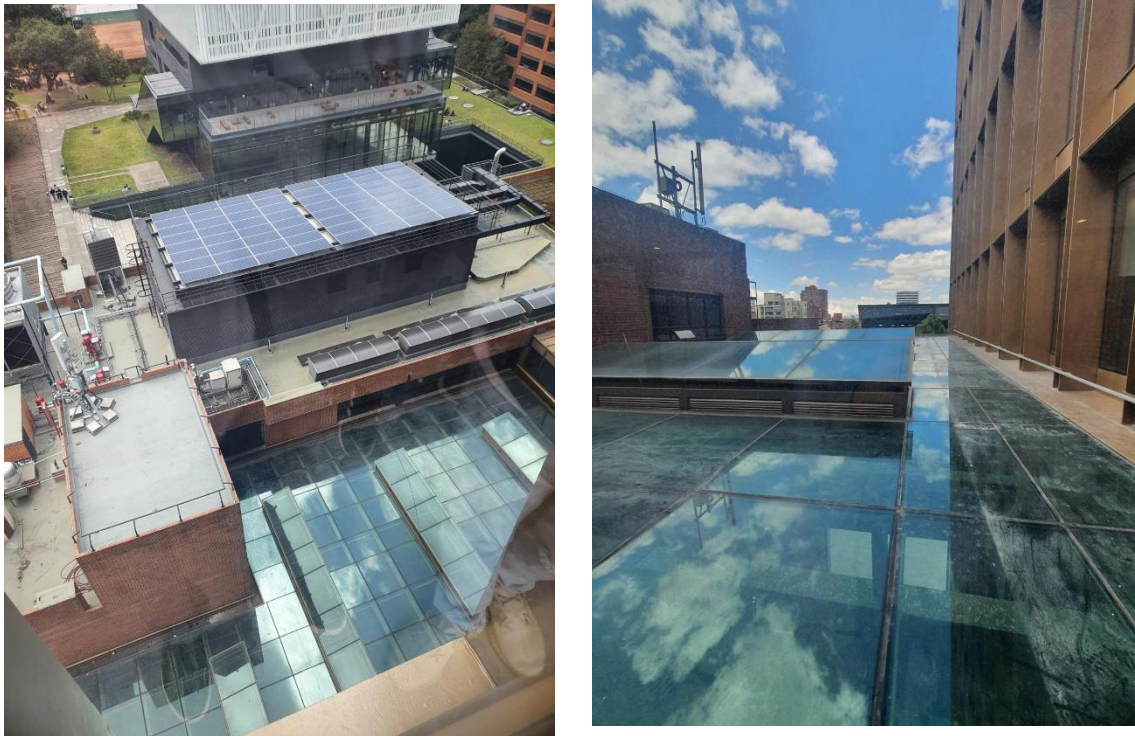


Figura 13. Ubicación de paneles solares (izquierda) y ventanales (derecha) en el sexto piso del edificio de ingeniería (Imagen propia).

Como se puede observar en la tabla siguiente (Tabla 1), el mayor porcentaje de siniestralidad laboral se relaciona con el trabajo en altura, lo cual es preocupante y a la vez pertinente para tener en cuenta al buscar una opción de limpieza a gran altura. La cantidad de eslabones que hay en la cadena de eventos para llevar a cabo un trabajo seguro a grandes alturas, implica que tienen que ejecutarse correctamente, por lo que es necesario controlarlos para reducir la probabilidad de accidentes.

Tabla 1. Principales riesgos de exposición de los trabajadores [15].

Principales riesgos de exposición de los trabajadores	Porcentaje
Trabajo en altura	30,3
Caída de materiales	15,8
Estado e instalación de los equipos	9,6
Manejo de herramientas y equipos	5,8
Falta de señalización y orden	5,6
Fallas en el desarrollo de la obra	4,9
Otros riesgos	2,7
Factores psicosociales	1,5
No usar o no disponer de elementos de protección	1,3

Muestra clara del riesgo de este tipo de trabajos está en que, en Colombia, durante 2021, se reportaron un total de 513 857 accidentes de trabajo, lo que equivale a una tasa nacional de 4,76 accidentes por cada 100 trabajadores; superior a la registrada en 2020, que se ubicó en 4,45. En promedio, durante 2021 se presentaron 1408 accidentes de trabajo por día [15].

Entonces cabe preguntarse ¿Qué estrategias podrían usarse para hacer adecuado mantenimiento de paneles en orientaciones no verticales, en edificios de gran altura, procurando una disminución significativa del riesgo laboral y los costos que la limpieza manual conlleva?

3. Justificación

La accidentalidad en trabajos a gran altura es un problema actual ya que se ha evidenciado que la probabilidad de que cualquier imprevisto ocasione la muerte o lesiones graves e incluso incapacidad es alta. Está claro que existen actividades que deben realizar los humanos, por la complejidad de estas, pero hay otras que podrían automatizarse o eliminarse. Una de las actividades que podría sustituirse es la limpieza de ventanas y paneles solares a grandes alturas, la cual hoy en día está evolucionando al uso de soluciones robóticas automáticas para reducir los riesgos de accidentalidad del operario. Por esta razón, la inversión en la sustitución de esta práctica está justificada, ya que, de todas maneras, se invierte un gran esfuerzo en resguardar la vida de las personas. Es importante destacar el dilema ético que representa sustituir una profesión. A este concepto se le conoce como destrucción creativa. Sin embargo, el avance en la tecnología para la solución de problemáticas trae consigo una nueva gama de profesiones, que pueden ser aprovechadas por el mismo personal de aseo y limpieza.

Este proyecto, entonces, buscará encontrar una solución pertinente que logre equilibrar los dos mundos de limpieza eficiente y de seguridad laboral para lograr desarrollar un sistema que limpie regularmente paneles solares y ventanales en espacios de difícil acceso, sin poner en riesgo a los operarios de mantenimiento y limpieza, y así reducir el índice de accidentalidad laboral por lo menos en lo relacionado a trabajo en alturas.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de limpieza autónomo para paneles solares ubicados a gran altura que no requiera la intervención directa de un operario.

4.2 Objetivos específicos

1. Establecer los requerimientos de diseño para un sistema de limpieza que prescindiera de la intervención directa de un operario.
2. Emplear una metodología de diseño basada en los pasos de "Design Thinking" para diseñar el sistema de limpieza automatizado que más se ajuste a los requerimientos de los paneles de la Pontificia Universidad Javeriana.
3. Realizar simulaciones numéricas que permitan garantizar el desempeño mecánico del sistema de limpieza.
4. Evaluar la funcionalidad del sistema a partir de pruebas con un prototipo, en las condiciones esperadas del ambiente de trabajo.

5. Metodología

La presente investigación se basa en el método de diseño aplicado a la robótica con el fin de lograr el objetivo de limpiar paneles solares.

Objetivo 1. Establecer los requerimientos de diseño para un sistema de limpieza que prescindiera de la intervención directa de un operario.

En el proceso de recolección de información se incluyeron características de los enfoques cuantitativos y cualitativos. Lo anterior se refiere a las estrategias utilizadas para recoger datos que muestren los puntos de dolor o las necesidades específicas y que peso tienen en la solución. Lo anterior se refiere a los problemas actuales más importantes en el contexto de la Universidad Javeriana y en general relacionados con la limpieza de paneles solares a gran altura empleando diferentes métodos para encaminar el diseño hacia una solución que cumpla estos requerimientos. En cuanto a lo cualitativo, el diseño del artefacto deberá tener en cuenta la percepción de expertos sobre el nivel de limpieza y la integridad del panel. Con respecto a lo cuantitativo, la búsqueda de las especificaciones mecánicas típicas de los paneles solares y la medición de cualidades específicas de los paneles de la Pontificia Universidad Javeriana son los principales modos de determinar las especificaciones del sistema de limpieza a diseñar y sirven como punto de partida para una etapa de ideación y prototipado.

A partir de una etapa de estudio de necesidades en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, se determinaron los requerimientos para la limpieza de los paneles solares y ventanales del edificio de ingeniería. Se tienen en cuenta variables como las dimensiones, los grados de inclinación del panel, la altura y las condiciones meteorológicas de funcionamiento, el peso del sistema, el tiempo y la calidad de operación, el consumo de agua, el nivel de autonomía, entre otros.

Como técnicas de recolección de datos se tuvo a disposición el personal de la universidad que brindó los datos respectivos para la determinación de los parámetros anteriormente mencionados. A su vez, un aspecto importante es la revisión de especificaciones de los paneles. Se recibió información de la persona encargada del mantenimiento y de la adquisición para encontrar las especificaciones necesarias. También se realizó una revisión del historial meteorológico de la zona en la que se encuentra el edificio por medio de bases de datos de institutos especializados como el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) [16] y la Organización Meteorológica Mundial para determinar las condiciones de trabajo esperadas y diseñar el artefacto acorde a estas. [17]

Objetivo 2. Emplear una metodología de diseño basada en los pasos de “Design Thinking” para diseñar el sistema de limpieza automatizado que más se ajuste a los requerimientos de los paneles de la Pontificia Universidad Javeriana.

Los requerimientos anteriores, obtenidos a partir de los datos suministrados por las consultas y mediciones (cuantitativas) y las encuestas realizadas a personal de limpieza y mantenimiento para determinar factores como la percepción de seguridad laboral en cuanto al proceso de limpieza, así como la satisfacción en cuanto a la operación de los paneles (en general, si están cumpliendo su propósito y el estado en el que se encuentran), son la base para esta etapa de diseño. El análisis de los datos se hace en la etapa de ideación, ya que a partir de los requerimientos se deben filtrar las ideas obtenidas en una lluvia de ideas que se realizará con el propósito de tener varias opciones de solución al problema. En esta etapa, el grupo de diseñadores tuvo una discusión creativa teniendo en cuenta los requerimientos de la necesidad con el objetivo de tener insumos para filtrar las opciones y determinar la más viable y pertinente. Las metodologías de Cross [18] se aplicaron al análisis de requerimientos, con el objetivo de realizar un esquema que permita generar alternativas, y que estas puedan ser evaluadas según la importancia que cada una tiene con respecto a lo que el robot necesita y lo que el cliente quiere

En adición, debido a que se trata de un proyecto de diseño en mecánica, se debe separar el robot en sistemas más pequeños. Para esto, se realizó un diseño en SolidWorks para cada uno de los sistemas, los cuales se fueron modificando, conforme se iban diseñando

los otros, para que en el momento del ensamblaje, el robot sea completamente óptimo y funcional.

Objetivo 3. Realizar simulaciones numéricas que permitan garantizar el desempeño mecánico del sistema de limpieza.

En esta etapa se evaluó los componentes más críticos por medio de simulaciones numéricas. Entre estos se puede encontrar el esfuerzo al que estará sometido el panel y el sistema de limpieza, el factor de seguridad estático, la deformación de los materiales usados y el movimiento de las piezas. Dichas simulaciones se harán por medio de análisis de Elementos Finitos usando el software SolidWorks para la determinación de esfuerzos, deformaciones, factores de seguridad. Este paso se realizará con el objetivo de complementar teóricamente los resultados de las pruebas de prototipado y otorgar un sustento en cuanto a la viabilidad de la propuesta de solución.

Objetivo 4. Evaluar la funcionalidad del sistema a partir de pruebas con un prototipo, en las condiciones esperadas del ambiente de trabajo.

En la última etapa del proyecto se realizó una evaluación del rendimiento del producto terminado, a partir de pruebas de funcionamiento del sistema en el entorno real y simulado que determinan la utilidad y pertinencia de este. Para esto, se analizó el comportamiento de variables como la velocidad de trabajo, eficiencia del panel según su nivel de limpieza, respecto al producto expuesto a las condiciones de trabajo que se definieron en los parámetros de diseño en el primer objetivo. Idealmente las pruebas de funcionamiento se realizarían en las condiciones reales en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, sin embargo, la viabilidad de esta operación dependía de factores externos a los desarrolladores de este proyecto como la disposición de las universidades, el préstamo de equipos, el presupuesto para la logística del viaje y las pruebas, etc. Debido a que no fue posible, se realizaron pruebas en entornos simulados similares a las condiciones reales de trabajo.

6. Restricciones

En cuanto a las restricciones, en primera instancia, el sistema debe ser autónomo, es decir que no debe tener más intervenciones que para encenderlo y apagarlo, y esta acción se debe ejecutar de manera remota, para que el operario no se arriesgue a tener lesiones debido a trabajo en alturas. Otra delimitación en la construcción del robot es que el peso que debe tener no supere las especificaciones de carga comúnmente usadas en la industria para para no arriesgar la integridad del panel o de su soporte [19]. Además, el sistema a diseñar no debe rayar la superficie del panel, por lo que el método de limpieza debe tener el mínimo contacto con la celda. Por otro lado, la solución debe tener un consumo de agua reducido e incluso nulo, si es posible, ya que para que el sistema sea competitivo como opción de limpieza, debe solucionar el problema del consumo de agua. Otra restricción del diseño es el tiempo de limpieza, ya que debe ser menor que el tiempo que le toma a un operario realizar el aseo completo de los paneles. Finalmente, debido al alcance y las limitaciones del trabajo, la solución no debe superar los 2 millones de pesos colombianos en su construcción a una escala no industrial.

7. Resultados

7.1 Empatizar

Para iniciar el proceso de Design Thinking, la primera etapa es la parte de la empatía con el cliente. Para esto hay que hacer un análisis de *stakeholders* para determinar el nicho de clientes potenciales y recibir información pertinente.

1. Detector de la necesidad o problema.

El profesor Hernando Efraín León Rodríguez, fue la persona que impulsó el proyecto y propuso construir un sistema autónomo que tuviera la capacidad de limpiar los paneles solares que se encuentran en el techo del edificio de ingeniería de la Universidad Javeriana de Bogotá.

2. Gerentes o administradores de empresas cliente potenciales

Estos actores cumplen un rol crucial dentro del proyecto, pues ellos decidirán y aprobarán si es viable implementar la solución en sus instalaciones.

3. Clientes particulares potenciales.

Aunque la solución del proyecto resulta tener características de diseño y construcción relativamente avanzadas como para ser implementadas en instalaciones pequeñas, se espera llegar a mercados particulares. Estos clientes potenciales cumplen un papel importante en la definición del robot, ya que debe ajustarse a todos los posibles usuarios.

4. Operario de mantenimiento y/o limpieza

El impacto que tiene la solución a los operarios de limpieza genera un debate ético en el que se debe preguntarse en qué medida sustituir un trabajo por salvaguardar la vida beneficia o perjudicar a estas personas.

5. Comité de decisiones financieras de empresas cliente potenciales.

Los comités de decisiones financieras estarán atentos a la viabilidad de hacer la compra e instalación del sistema de limpieza.

6. Ente gubernamental regulador.

Existen algunas limitaciones legislativas que deben tomarse en cuenta para que el robot pueda ser aprobado para uso en cubierta. El ente regulador cumple una función determinante en la definición de los requerimientos.

7. Comunidad del edificio o empresa cliente

Las comunidades de las empresas o edificios que sean usuarios del sistema de limpieza pueden verse cautivados por la novedad de un proyecto como este.

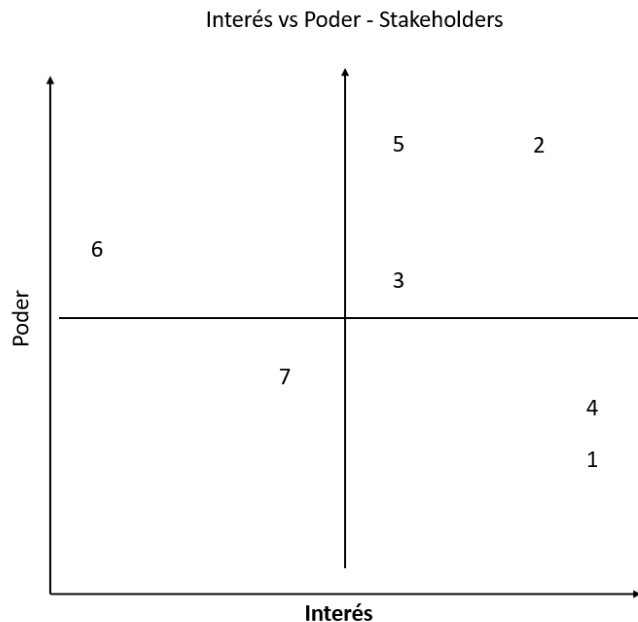


Figura 14. Gráfico de interés vs poder de los *stakeholders*

En la Figura 14 se puede observar qué tanto interés y qué tanto poder tienen los actores directos del problema con respecto a la solución. Cada número que se indica en la tabla corresponde al número asignado en la lista de la sección anterior (actores directos al problema). Las ubicaciones de los actores dentro de la gráfica se basaron en un análisis grupal, en el cual se definió qué tan fuerte es el impacto de las decisiones de cada actor a

la hora de impulsar el proyecto y, por otro lado, qué tanto le conviene a cada uno la solución a esta problemática.

Se entrevistaron a algunos de los *stakeholders*, con el objetivo de tener información pertinente sobre las especificaciones del cliente y los requerimientos de diseño. Se entrevistó a Juan Felipe Rivera Rojas, que es el encargado de los proyectos de innovación energética en la Universidad Javeriana de Cali. También se habló con la encargada de la oficina de seguridad y salud en el trabajo de la Universidad Javeriana y con uno de los operarios de limpieza. Otro entrevistado fue Hugo Aguirre, ingeniero electrónico, que es dueño y gerente de una empresa interesada en el proyecto.

A partir de las entrevistas surgió una lista con las especificaciones del cliente, a las cuales se les debe dar una calificación para medir la importancia que tienen en el diseño del prototipo. Por esta razón, se realizó una encuesta en Microsoft Forms, para calificar de 0 a 10 la importancia de cada uno de los aspectos. La encuesta se encuentra disponible en el anexo 1. Las calificaciones se evidencian en la Tabla 2.

Tabla 2. Valoración de las especificaciones por parte de los interesados

Especificación del cliente	Promedio de valoración
Peso del equipo	8,8
Costo del equipo	8,6
Eficiencia de limpieza del equipo	8
Impermeabilidad del equipo (Protección de las componentes eléctricas)	8
Tiempo de vida	7,4
Cantidad de agua suministrada	6,8
Frecuencia de mantenimiento	6,2
Controlable remotamente	6
Autonomía del sistema (Número de intervenciones del operario)	4,8

Estética	4,2
Frecuencia de limpieza (Número de veces que limpie en un periodo)	3

7.2 Definir

7.2.1 Análisis de funcionamiento

Esta parte tiene como objetivo definir qué se va a lograr con el proyecto, en lugar del cómo se va a lograr. Inicialmente, se realiza la caja negra, que es un diagrama muy sencillo en el que se definen las entradas y salidas del sistema, las cuales pueden ser materiales, energía o información [18]. En la Figura 15 se pueden observar las entradas y salidas que se definieron para el diseño.

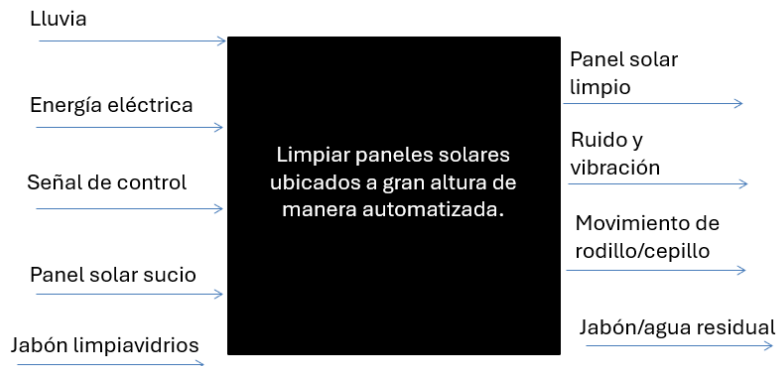


Figura 15. Caja negra

Para lograr que las entradas se conviertan en las salidas, tienen que suceder varios procesos dentro de la caja. Se deben asignar subfunciones que permitan convertir alguna de las entradas en una de las salidas. En el diagrama de bloques o caja transparente se muestra el proceso de esta transformación [18].

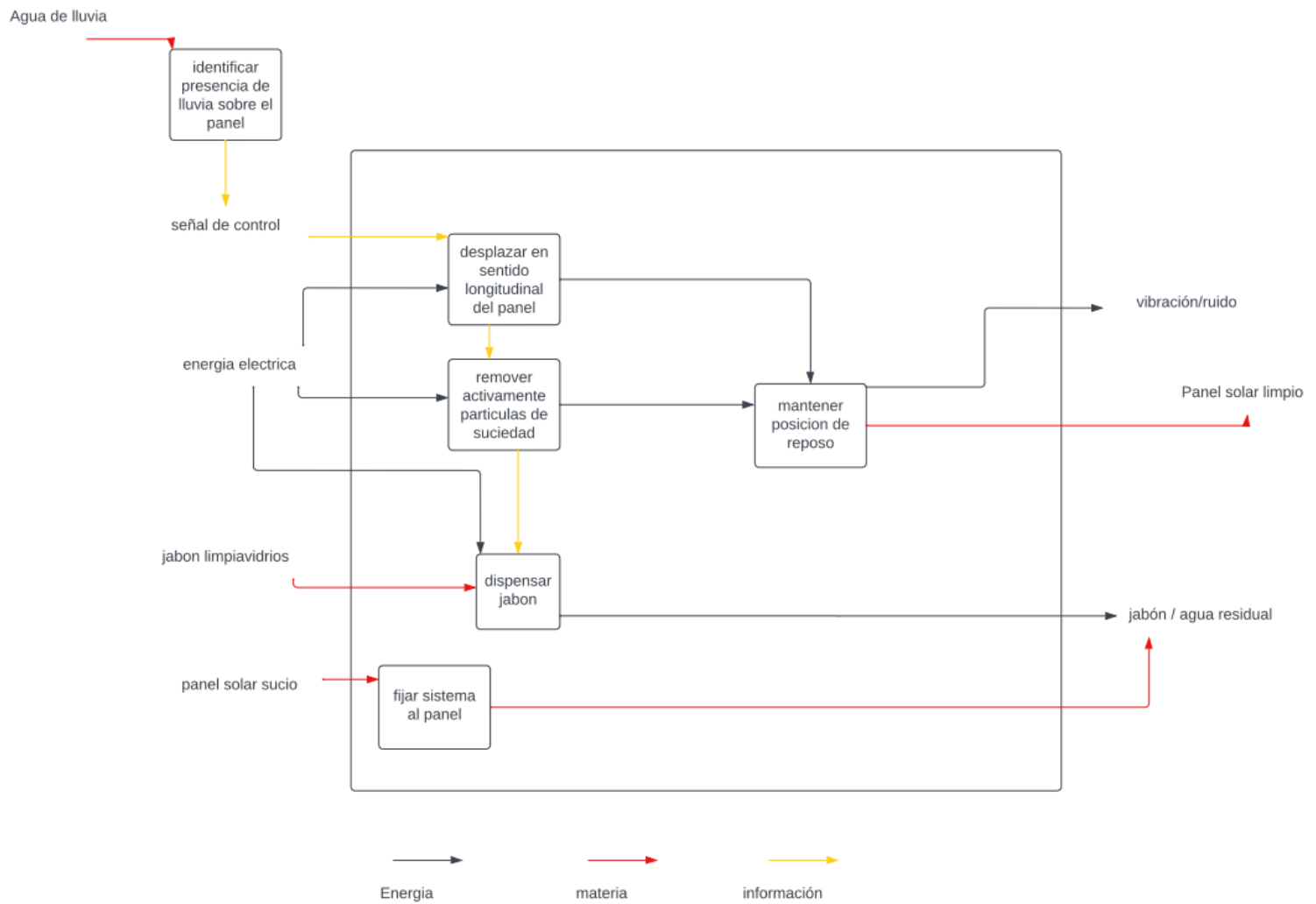


Figura 16. Caja transparente

Se dividió la función principal del dispositivo en funciones o procesos unitarios independientes. El conjunto de dichos procesos en un orden lógico genera el correcto funcionamiento y dicho orden lógico está dictaminado por conexiones. Las conexiones entre procesos se basan en tres tipos: transferencia de energía, transferencia de materia, y transferencia de información. Cada tipo de conexión está representado por líneas de flujo de diferentes colores, la convención usada en el diagrama asigna el color negro para la energía, rojo para la materia y amarillo para la información. Los parámetros de entrada al proceso son el agua de lluvia, jabón limpiavidrios y panel solar sucio en términos de materia. La corriente eléctrica generada por de una fuente de voltaje y la señal de control son entradas en términos de energía e información, respectivamente. El primer proceso identificado es la detección de presencia de lluvia sobre el área a limpiar, el cual arroja una señal de control como entrada a los procesos de desplazamiento en sentido longitudinal del panel, la remoción activa de partículas de suciedad, y la dispensación de jabón. Simultáneamente, la presencia de un panel solar sucio implica el proceso de sujeción mecánica del sistema a este, para poner en marcha los procesos relacionados con la limpieza. Luego de la ejecución de los procesos anteriores, se inicia el proceso de reposo del sistema, que básicamente es el punto de partida y fin de la carrera del sistema. La ejecución de todos los anteriores procesos da como resultado las salidas del sistema en forma de vibración, ruido, jabón y agua residuales, y el panel solar limpio.

7.2.2 Definición de requerimientos

Después de haber determinado las especificaciones del cliente, se realizó la definición de los requerimientos, que serán los cimientos del proceso de diseño y construcción del producto. Por esta razón, se hizo un análisis adecuado con la ayuda de los expertos entrevistados. Las apreciaciones de los expertos abarcan distintas áreas, como la robótica, la electrónica, la mecánica, la legislativa, entre otras.

- El robot no debe superar un peso específico debido a las sobrecargas permitidas en cubierta. La sobrecarga concentrada máxima que se permite en la cubierta de zonas residenciales es de 2 kN/m^2 [20].
- El robot debe mantenerse sujeto a la estructura a una inclinación de 10° . Aunque existen distintas configuraciones de paneles solares que llegan a inclinaciones de

hasta 63°, el primer prototipo presentado en este trabajo está enfocado en unos paneles específicos por motivos de disponibilidad de materiales, presupuesto y manufactura.

- Debe tener una mínima resistencia al impacto y a la corrosión. Al estar a la intemperie, se espera que el sistema esté preparado para las condiciones climáticas más críticas, ya que no se debería hacer mantenimiento al robot antes de un año de su instalación. En relación con la integridad de la estructura, la situación más crítica que puede sufrir el robot es una lluvia de granizo.
- El robot también debe soportar la velocidad del viento. La velocidad del viento puede afectar la sujeción del robot al panel. La más alta en la historia registrada en la ciudad de Bogotá, lugar donde se harán las pruebas del robot, es de 80 m/s o 288 km/h [21].
- Debe tener una eficiencia de limpieza superior al 95%. El concepto de eficiencia de limpieza se relaciona directamente con el porcentaje de suciedad que existe en el panel después de ser limpiado. Más específicamente, a la relación que existe entre la suciedad que hay en el panel, que es la superficie obstruida por partículas de polvo, y la superficie completa que se está limpiando, la cual sería el área superficial de las celdas fotovoltaicas [22].
- El sistema debe utilizar para la limpieza productos que no sean abrasivos con la superficie del panel, como agua o jabón. Además, la herramienta de limpieza debe ser de un material polimérico suave, para que no se raye la lámina de vidrio templado que cubre las celdas. Cualquier cambio en la refracción del vidrio, debido a grietas, puede afectar considerablemente la eficiencia del panel.
- El robot debe ser completamente autónomo. Este diseño espera resolver el problema del trabajo en alturas para la limpieza de los paneles, por lo que es imperativo que no exista ninguna intervención directa por parte del operario.
- El robot debe poder enviar señales a larga distancia. El objetivo inicial es que el robot no requiera mantenimiento correctivo, pero se debe estar preparado para cualquier adversidad, por lo que el sistema debe ser capaz de notificar a los encargados sobre cualquier falla en el funcionamiento.

- La frecuencia de mantenimiento del robot debe ser baja. Al ser completamente autónomo, el robot debe tener una baja frecuencia de mantenimiento, ya que el objetivo es evitar la presencia de un trabajador en alturas. Se espera realizar una revisión anual de mantenimiento preventivo para que el robot tenga una vida útil considerable, por lo que ninguna de las componentes debe fallar antes del año de uso. Es muy importante que todo el mantenimiento sea preventivo, ya que el mantenimiento correctivo tiene unas consecuencias bastante negativas para la misión del producto.
- El robot debe tener protección IP 54 para las componentes eléctricas y electrónicas del robot. Se escogió nivel 5 para objetos sólidos ("Protegido contra el polvo") debido a que estará expuesto a constante movimiento de partículas sólidas y en caso de que, entre polvo, éste no debe acumularse lo suficiente para alterar el funcionamiento de las componentes eléctricas. Para agua se escogió nivel 4 ("Protegido de chorros de agua") porque se espera que pueda recibir torrentes de agua, pero no deben ser desde corta distancia [23].
- El robot debe contar con una estructura para el reposo. Al consultarle a algunos expertos, se concluyó que la sobrecarga constante de la estructura y la sombra generada por el mismo robot eran lo suficientemente perjudiciales para que el diseño deba tomar en cuenta la construcción de una estructura. Por lo tanto, la estructura no debe generarles sombra a los paneles ni esfuerzos significativos al marco de aluminio del panel.
- La velocidad de trabajo del robot debe superar la eficiencia de trabajo de un operario de limpieza. A partir de las entrevistas, se determinó que el tiempo promedio que tarda una persona en limpiar un panel de 1 m x 1,65 m es de 4 minutos. Para mejorar esto, el robot debería moverse a una velocidad de 0,0042 m/s. Sin embargo, esta velocidad es muy reducida y con miras a efectuar un proceso de limpieza más eficaz, se decide que el robot se mueva a una velocidad de entre 0,05 m/s y 0,2 m/s. Los valores asignados son estimados a partir de la observación de la limpieza manual para tratar de cumplir los valores de eficiencia presentados en requerimientos anteriores.

- El robot, también, debe poder ajustarse a la medida del panel que va a ser limpiado. Los paneles de la universidad en los que se realizarán las pruebas miden 1,00 metro de ancho por 1,65 metros de largo.
- El robot debe poder alimentarse por celdas solares. Este requerimiento no es obligatorio para el funcionamiento. Puede ser de las mismas celdas que se limpian o de unas celdas pequeñas en la superficie del robot. Se desea que el robot no tenga una batería desechable y mucho menos que deba intervenir para cargar una batería recargable.
- El agua utilizada para la limpieza con jabón y para el posterior enjuague del panel deberá ser de lluvia completamente. No se consideraría un tanque auxiliar ni un sistema de bombeo de agua.
- El sistema deberá ser activado en presencia de lluvia para limpiar la suciedad acumulada sin utilizar agua suministrada por el propio sistema, es decir, la activación del robot estará condicionada a la presencia de lluvia.
- El robot tendrá que lavar una vez por cada sesión de lluvia y retornar a su posición de inicio así haya cesado la lluvia e iniciar el ciclo de lavado cuando vuelva a llover, evitando así quedarse atascado en el proceso.

7.2.3 Casa de la calidad

La casa de la calidad es una metodología que permite relacionar los requerimientos de diseño con las especificaciones del cliente, encontrar interacciones entre los distintos requerimientos y evaluar el estado de la competencia [18]. En el sector de la limpieza de paneles solares los productos son muy reducidos y muchos están en desarrollo. Por esta razón, no se hará un estudio de comparación con la competencia, ya que no se encuentran datos significativos. Se puede observar la casa de la calidad en el anexo 2. Los resultados del análisis se pueden evidenciar en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la casa de la calidad

Requerimiento	Importancia técnica	Peso relativo
Debe mantenerse sujeto a la estructura a 10° de inclinación	125,1	5,2%
Resistencia al impacto de mínimo 10 J	90,0	3,8%
Sujeción resistente a vientos de 288 km/h	136,8	5,7%
No debe superar un peso 2 kN/m ² de sobrecarga permitidos en cubierta	204,9	8,6%
Debe cumplir con una eficiencia de la limpieza del 95%	204,9	8,6%
Debe limpiarse con agua y con una herramienta suave para no rayar la superficie	174,1	7,3%
Protección mínima IP 54 para las componentes eléctricas del sistema	423,8	17,8%
El robot debe ser completamente autónomo	138,1	5,8%
Debe poder enviar señales de emergencia a largas distancias	182,4	7,7%
Debe tener una estructura para el reposo	94,3	4,0%
Velocidad mínima de 0,05 m/s y máxima de 0,2 m/s	66,0	2,8%
Sistema de alimentación a partir de celdas solares	95,1	4,0%
La longitud del robot debe ajustarse a los paneles de 1 m x 1,65 m de la universidad	53,0	2,2%
Las componentes eléctricas y de desgaste deben tener un mínimo tiempo de un año de vida	358,4	15,0%
El movimiento del robot debe ser únicamente lineal	37,0	1,5%

En los resultados de la casa de la calidad se puede definir qué requerimientos representan más importancia para el cliente. Según lo evidenciado, los dos requerimientos que más peso tuvieron fueron aquellos que están relacionados directamente con el mantenimiento de la máquina. Esto tiene una gran relación con la justificación inicial del proyecto, ya que la base del diseño es evitar el trabajo en alturas y automatizar completamente la solución, lo cual no se logra si se debe realizar un mantenimiento constante.

7.3 Idear

En la etapa de ideación, se deben generar alternativas de solución a partir de los análisis anteriores. Con esta información se realizará un diseño preliminar, que debe ser validado para llevarlo a la etapa de construcción.

7.3.1 Diagrama morfológico

El objetivo del diagrama morfológico es intentar establecer aquellos aspectos esenciales que debe incorporar el producto, o que debe ser capaz de hacer [18]. Luego de definir los procesos individuales a satisfacer, se plantearon varias opciones de solución a cada uno de ellos. Dichas opciones de solución surgieron de la mezcla entre la búsqueda de información sobre los componentes y mecanismos usados comúnmente, y la experiencia en la industria de expertos en diseño y mecánica.

Para la función específica de fijar el sistema al panel solar se propuso utilizar prensas en "c", guías lineales con balineras, corredera telescópica, abrazadera para ventana y ruedas de soporte sobre rieles. Para la dispensación de jabón se propuso utilizar una válvula solenoide o una bomba de dosificación. Para el desplazamiento lineal se sugirió utilizar un motor paso a paso con tornillo de potencia, un actuador lineal neumático, un motor DC unido a llanta de tracción, motor con salida a orugas, o sistema de piñón-cremallera. Para el proceso de remoción de partículas se propuso un cepillo giratorio, un limpiavidrios fijo, y plumillas mecánicas. Para mantener el sistema en posición de reposo se propuso únicamente una zona de parqueo exterior al marco del panel. Para la siguiente etapa de decisión, se asigna una convención de colores, en la cual cada color representa una combinación de soluciones posibles por función específica. Cabe resaltar que una posibilidad de solución puede estar contemplada en varias alternativas de solución como conjunto, por lo que se le asigna más de un color. El esquema del diagrama morfológico se puede observar en la Figura 17.






FUNCIONES	SOLUCIÓN 1	SOLUCIÓN 2	SOLUCIÓN 3	SOLUCIÓN 4	SOLUCIÓN 5
Fijar sistema al panel	 	 	 		 
Dispensar jabon	 	 			
Desplazar en sentido longitudinal del panel	 	 	 		
Remover activamente particulas de suciedad	 	 			
Mantener posicion de reposo	 				

Figura 17. Diagrama morfológico

Luego de evaluar las soluciones teniendo en cuenta factores objetivos como factibilidad técnica, facilidad de control y mantenimiento, costos y disponibilidad de recursos; se determinó la combinación de soluciones adecuadas para satisfacer todos los procesos individuales y articularlos para resolver la función mayor conjunta. La combinación azul incluye prensa en "c" para fijación, electroválvula solenoide, actuar lineal, limpiavidrios fijo y estructura de reposo. La combinación verde incluye guías lineales, bomba de dosificación, tornillo de potencia con motor paso a paso, cepillo giratorio y estructura fija. La combinación amarilla incluye correderas telescópicas, bomba de dosificación, tornillo de potencia con motor paso a paso, cepillo giratorio y limpiavidrios fijo, y estructura fija. Las alternativas por colores se ven representadas en la Figura 18. La combinación elegida (roja) incluye usar ruedas sobre rieles para fijación, la electroválvula solenoide para dispensación de jabón, las llantas unidas a motores DC para tracción lineal, el cepillo giratorio para la remoción de partículas, y la plataforma externa para el reposo del sistema.







ALTERNATIVA DE SOLUCION	1	2	3	4
				
				
				
			 	 
				

Figura 18. Diagrama morfológico con alternativas de solución

7.3.2 Diseño de sistemas

7.3.2.1 Sistema de fijación

Después de haber definido el sistema de fijación como una combinación entre el sistema de ruedas con soporte con la prensa en "c", se decidió usar tubería cuadrada de acero comercial para los rieles. Esto permite que la superficie de apoyo de las llantas sea mucho mayor que la de un riel circular. Además, se decidió usar cuatro rodamientos roller para limitar el movimiento. Uno de ellos acompaña a la llanta motriz, dos de ellos se apoyan sobre la parte externa de la tubería, y una de ellas está en la parte inferior. Se diseñó a partir de unos rodamientos comerciales que se pueden observar en la Figura 19.



Figura 19. Rodamiento roller comercial para ruedas guía

Para fijar las tuberías al panel, se diseñaron unas prensas en "c" de 62 mm de espacio, para que pueda insertarse en los paneles de 40 mm y quede espacio para ajustar el tornillo prensador. Por motivos de desempeño de la máquina dobladora de lámina, y teniendo en cuenta que se requería un espesor mínimo para que la rosca hembra para el tornillo prensador fuera efectiva se diseñó la prensa en dos partes: interior y exterior, ambas de un espesor de 3mm, que es el límite de espesor que la maquina dobladora admite.

Posteriormente se soldarían por las aristas laterales para resultar con una prensa de 6mm de espesor, ideal para que la rosca sea efectiva. Se puede observar el diseño en la Figura 20.

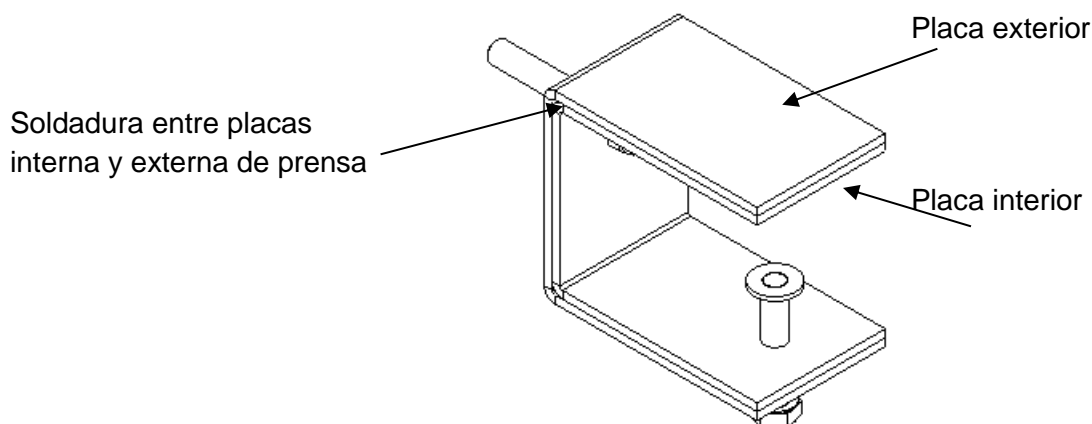


Figura 20. Vista isométrica de la prensa en "c"

7.3.2.2 Sistema de dispensación

Para el sistema de limpieza se optó por un tanque con una electroválvula para darle paso al agua jabonosa. El primer prototipo del tanque se diseñó a partir de las necesidades de espacio para albergar el jabón en forma sólida que se disuelve a medida que el agua lluvia llena el interior de este. A su vez, se considera una estructura para albergar un sensor de flotación que reconozca que el tanque se está llenando (lluvia presente) y active el ciclo de lavado. Las medidas de espacio se ven restringidas por varios factores de manufactura y disponibilidad de recursos, se eligió imprimir en 3d en PLA, lo cual limita las dimensiones de la pieza a las especificaciones de la impresora. A su vez, otros procesos de manufactura como la inyección de plásticos junto con soplado de preforma fueron considerados, sin embargo, el costo de la fabricación de moldes y la logística para llevar a cabo la manufactura de la pieza obligaron a limitar el proceso a impresión 3d con todas las restricciones que conlleva. La organización del tanque y el espacio para la electroválvula en la estructura se pueden ver en la Figura 21.

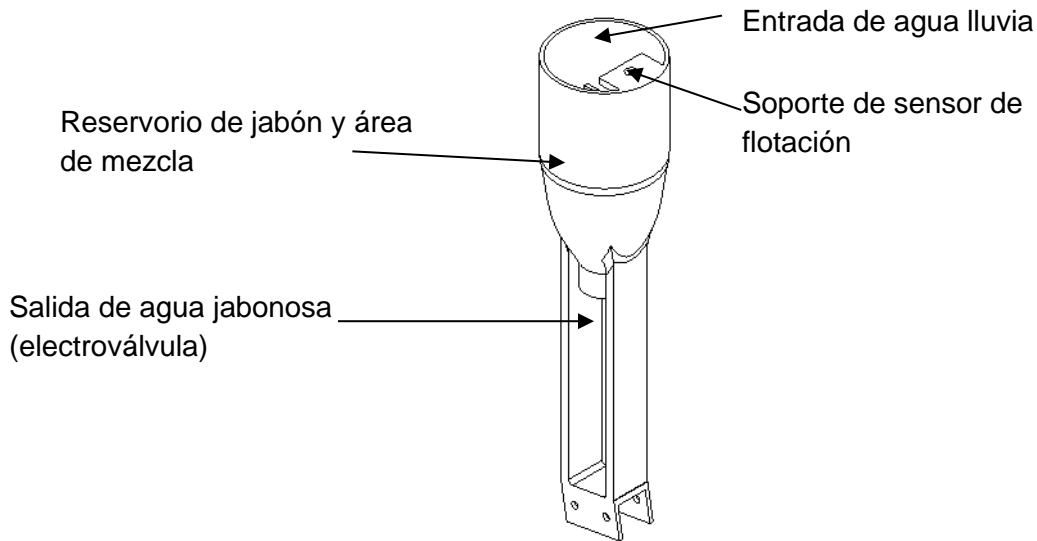


Figura 21. Vista isométrica del tanque de jabón

7.3.2.3 Sistema de tracción

Para el sistema de tracción se escogió la alternativa de motores DC acoplados a una llanta. El neumático que se escogió es un neumático comercial de 65 mm de diámetro con un acople para motor DC de eje de 4 mm.

7.3.2.4 Sistema de remoción de partículas

El sistema de remoción de partículas cuenta con un cepillo giratorio para un eje de 12 mm con un radio de cerdas mayor a 34,5 mm, que es la distancia desde el centro del eje a la superficie del panel. Se diseña un cepillo de 75 mm de diámetro para que las cerdas tengan un contacto mínimo de 6 mm con el vidrio. Para el material de las cerdas se optó por nylon, ya que este suele tener una dureza Brinell de 100 a 120 HB, comparado con la dureza del vidrio templado de 550 HB [24], por lo que se asume que no afectará la integridad de la capa protectora del panel solar.

7.3.2.5 Sistema de reposo

El sistema de reposo se diseñó a partir de una tubería que une los dos rieles, dejando una distancia en voladizo hasta el panel de 275 mm para que no genere sombra mientras el robot no esté funcionando.

7.3.3 Ensamblaje

El ensamblaje total de todos los sistemas se puede observar en la Figura 22.

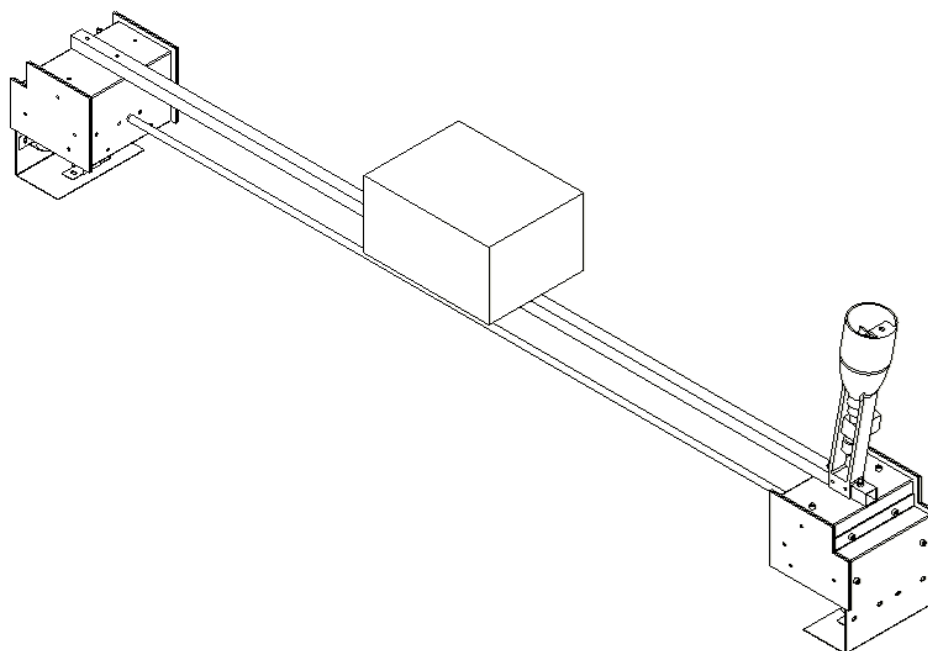


Figura 22. Vista isométrica del ensamblaje total

La masa total del robot es de aproximadamente 17,5 kg. La estructura pesa 11,9 kg basándose en las propiedades de masa del programa SolidWorks aplicada en el ensamblaje. Las componentes eléctricas del robot tienen un peso aproximado de 2 kg. El cepillo rotatorio de 1,5 metros de longitud pesa aproximadamente 3,6 kg.

7.3.4 Validación de motores

7.3.4.1 Motores de tracción

Para los motores motrices se debe realizar un análisis de resistencia a la rodadura de la llanta, ya que, al ser un cuerpo real, la deformación del neumático es la única fuerza que se opone a que ruede sin deslizamiento. El diagrama de fuerzas se puede observar en la Figura 23.

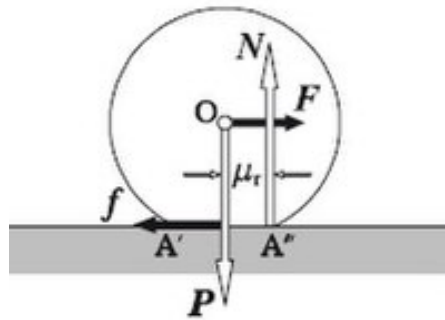


Figura 23. Diagrama de cuerpo libre de una rueda deformable con rodadura [25]

Tomando en cuenta que la velocidad en el punto de apoyo es 0, debido a que se asume un movimiento de rodadura sin deslizamiento, se hace una sumatoria de momentos desde esta referencia.

$$\Sigma F_y = N - P$$

$$\Sigma F_x = 0$$

$$\Sigma M_A = N * \mu_t - F * r$$

$$\Sigma M_A = I\alpha$$

La aceleración horizontal en el centro de la rueda se puede definir de la siguiente forma, a partir de un análisis de movimiento relativo, tomando en cuenta que la velocidad en el punto A es igual a 0.

$$a_0 = \alpha r$$

A partir de lo anterior, se puede asumir que la aceleración horizontal en el centro de la rueda es directamente proporcional a la aceleración angular del cuerpo. Por esta razón, si la sumatoria de momentos en el punto A es positiva, la aceleración angular también lo será, así como la aceleración horizontal. Para definir el torque mínimo que necesita el motor para que el robot avance, se puede asumir un valor de aceleración angular de 0, ya que cualquier valor que sea calculado con un valor de mayor a 0, logrará impulsar el robot en dirección horizontal.

$$\Sigma F_y = N - P$$

$$\Sigma M_A = N * \mu_t - F * r$$

$$N = P$$

Como el robot está apoyado en los dos extremos del panel y es simétrico, se puede asumir que el peso que ejerce el robot sobre la llanta es la mitad del peso total.

$$N = \frac{1}{2} mg$$

Al estar trabajando con un motor, se puede reemplazar el producto entre la fuerza y el radio por el torque nominal de este. Además, debido a que la aceleración angular se asume como 0, la sumatoria de momentos también debe ser igual a 0. Por lo que la ecuación resulta de la siguiente manera.

$$N * \mu_t - T = 0$$

$$N * \mu_t = T$$

A partir de esto, se deduce que el torque nominal del motor debe ser igual al producto entre la fuerza normal y el brazo generado por la deformación del neumático.

Al aplicarle un peso de 8,75 kg a cada neumático se obtiene de manera experimental, que el valor de μ_t es de 11 mm. El torque necesario para vencer la resistencia la rodadura es:

$$T = mg * \mu_t$$

$$T = (8,75 \text{ kg}) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0,011 \text{ m})$$

$$T = 0,944 \text{ Nm}$$

$$T = 9,63 \text{ kgcm}$$

En los requerimientos de diseño se definió la velocidad ideal de trabajo entre 0,05 y 0,2 m/s. Con el diámetro de 65 mm que tiene la rueda, la velocidad angular de trabajo del motor debe oscilar entre los 15 y 60 rpm.

Debido a la disponibilidad, se escogió un motorreductor DC de 12V, 10 kgcm y 210 rpm [26]. Se espera que la velocidad sea ligeramente menor, ya que el torque requerido para mover el robot es cercano al torque máximo del motor.

7.3.4.2 Motor del cepillo

El análisis del motor del cepillo se basa en un análisis de momentos en el eje de rotación, en el que solo existe el torque del motor que debe vencer la inercia para acelerar el eje. Se desprecian las restricciones de rotación por la fricción del cepillo o por el viento, debido a que su valor es mínimo y no afectan significativamente. Además, debido a que la chumacera está sosteniendo al eje a una distancia de 10 mm desde el acople, se desprecian las fuerzas aplicadas al eje del motor en dirección vertical. El diagrama de fuerzas se evidencia en la Figura 24.

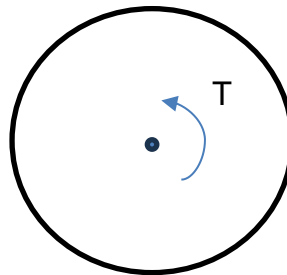


Figura 24. Diagrama de cuerpo libre cepillo rotatorio

$$\Sigma M_o = T = I\alpha$$

Se asume una sección transversal uniforme con el diámetro del cepillo.

$$I_{sistema} = \frac{1}{2}mr^2$$

El diámetro del cepillo mide 75 mm hasta las cerdas.

$$I_{total} = \frac{1}{2}((3,6 \text{ kg})(37,5 \text{ mm})^2 + (3,6 \text{ kg})(6,35 \text{ mm})^2 + (1,6 \text{ kg})(6,35 \text{ mm})^2)$$

$$I_{total} = 2,636 * 10^{-3} \text{ kg m}$$

La aceleración angular del sistema se calcula a partir del tiempo deseado en el que el motor alcance la velocidad nominal. Se escogió un tiempo de 0,1 segundos, para tomar un caso crítico. Entre más tiempo se considere en alcanzar la velocidad nominal, se asume que el torque requerido por el sistema es menor, ya que la aceleración se relaciona directamente con el torque. Como se tiene una aceleración constante, esta se puede modelar de la siguiente forma.

$$\int_0^{\omega} \omega d\omega = \int_0^t \alpha dt$$

$$\frac{1}{2}\omega^2 = \alpha t$$

La velocidad angular de trabajo esperada es de 70 rpm.

$$\alpha = \frac{\left(7,33 \frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2}{2(0,1 \text{ s})} = 268,6 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Se reemplazan la ecuación de aceleración angular y la del momento de inercia en la ecuación de movimiento inicial.

$$T = (2,636 * 10^{-3} \text{ kg m}) \left(268,6 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right)$$

$$T = 0,708 \text{ Nm}$$

$$T = 7,22 \text{ kgcm}$$

Debido a la disponibilidad, se seleccionó un motor de 12V, 70 rpm y 19 kgcm. El torque está ligeramente sobredimensionado, ya que tiene un factor de diseño de 2,6. Sin embargo, se procede a prototipar con las herramientas disponibles.

7.3.5 Análisis de elementos finitos

Con el diseño conceptual hecho, se procede a realizar el análisis de elementos finitos para validar si las componentes son adecuadas para cumplir con el objetivo del proyecto. Debido a que el robot no tiene una carga de trabajo alta, ni velocidades elevadas, solo se hará el análisis de esfuerzos de las componentes, ya que se puede asumir como un elemento estático para el estudio de falla.

Los componentes más críticos a los que se les hará el análisis de elementos finitos son los siguientes:

- El eje de rotación del cepillo. Se le hará un análisis de deflexión al eje, ya que un desplazamiento vertical significativo, aumentará considerablemente la fricción del cepillo sobre la superficie del panel.
- El tornillo M8 x 50 que atraviesa el riel. Este tornillo es uno de los componentes más críticos, ya que va a recibir un esfuerzo alto, porque 1/6 del peso total del robot está apoyado sobre la superficie de cada uno.
- La tubería del riel. Se le hará análisis de esfuerzo y deflexión, ya que este componente puede sufrir deformaciones elásticas que afectan la trayectoria del robot, o deformaciones plásticas que condicionen la integridad del proyecto.
- El marco del panel solar. La estructura del panel es una de las componentes más importantes para analizar, ya que el robot no puede condicionar la integridad del panel. Se le realizará un análisis de esfuerzos.

7.3.5.1 Eje de rotación

Para el eje de rotación se usó acero inoxidable AISI 304. Se usan apoyos de geometría fija en los costados que están sujetos por las chumaceras. La fuerza aplicada es de 35,3 N, la cual es el peso del cepillo de 1,5 metros de longitud. No se realizó un análisis de convergencia para la calidad de malla, ya que los valores de la deflexión no se ven afectados por esta.

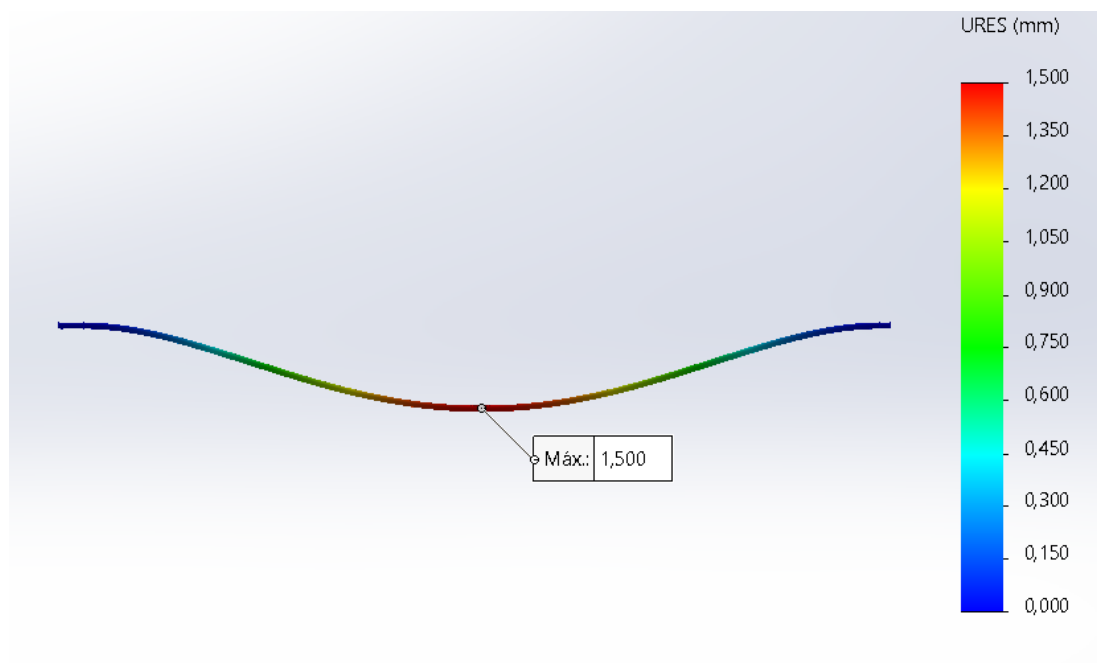


Figura 25. Análisis de deflexión del eje

El desplazamiento máximo es de 1,48 mm, como se observa en la Figura 25, que está ubicado en el centro del eje. Este valor es aceptable, tomando en cuenta que 6 mm de las cerdas están en contacto con el panel. El desplazamiento no debería aumentar considerablemente la fricción del cepillo.

7.3.5.2 Tornillo transversal

El tornillo se comparará de acero AISI 1045 bicromatado, para que resista las condiciones ambientales. Se usa un apoyo de geometría fija en la superficie que está atornillada a la prensa en "c". La distribución del peso se hace uniformemente en la superficie que entra

en los dos agujeros de la tubería. La fuerza que se le aplica es de 28,6 N de manera vertical hacia abajo, lo que corresponde a una sexta parte del peso total del robot, ya que se distribuye uniformemente en las seis prensas que sostienen los rieles. El análisis de convergencia para refinamiento de malla se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de convergencia para la malla del tornillo

Tamaño máximo del elemento (mm)	Tamaño mínimo del elemento (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Variación
1,50	1,50	112,7	
1,20	1,20	121,2	7,54%
1,00	1,00	129,7	7,01%
0,90	0,90	130,2	0,39%

El último valor de variación es de 0,39%. Debido a que es menor que 5%, se realiza el análisis a partir de los datos del estudio con una malla de 0,90 mm de tamaño por elemento.

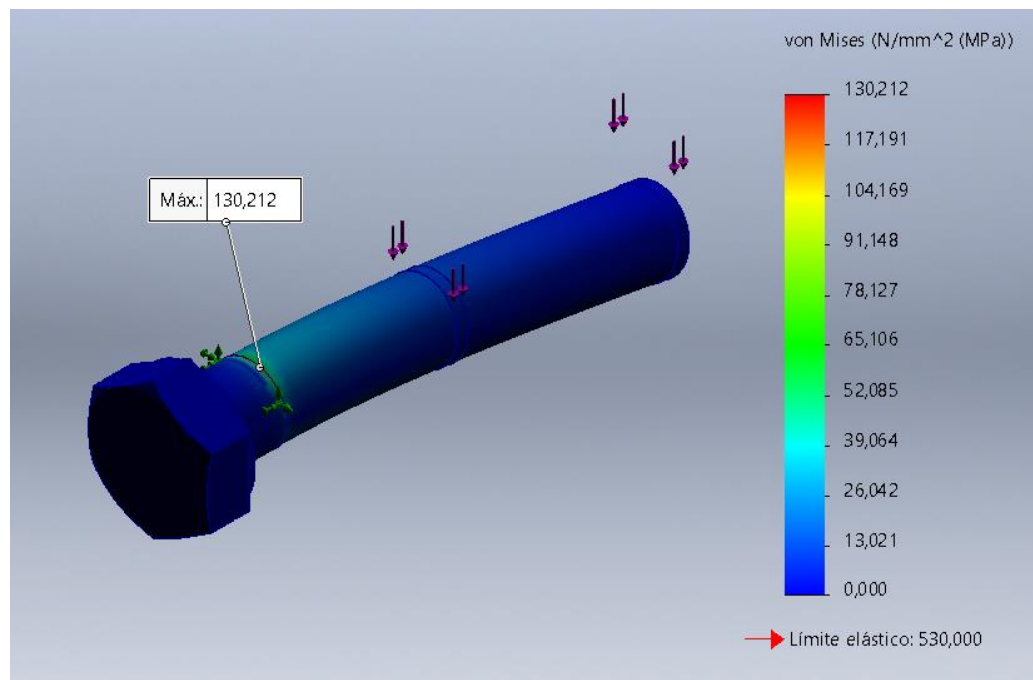


Figura 26. Análisis de esfuerzos del tornillo

Según el análisis mostrado en la Figura 26 se puede evidenciar que el punto de esfuerzo máximo es en la salida de la prensa en "c". Se evidencia un ligero concentrador de esfuerzos, que se debe a la forma de manejar la herramienta, por lo que se espera que el esfuerzo sea ligeramente menor al mostrado en el análisis. Sin embargo, el valor más alto es de 130,2 MPa, mientras que el límite elástico del material es de 530 MPa. Según la fórmula de factor de seguridad, el valor de este se puede calcular de la siguiente manera.

$$\eta = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{permisible}}$$

$$\eta = 4,07$$

El factor de seguridad del tornillo es de 4,07. Debido a las simplificaciones que se hicieron en la geometría de la rosca del tornillo, el factor de seguridad adecuado debe ser de 5. Sin embargo, el valor calculado es suficientemente apropiado como para realizar el prototipo y hacer las pruebas correspondientes.

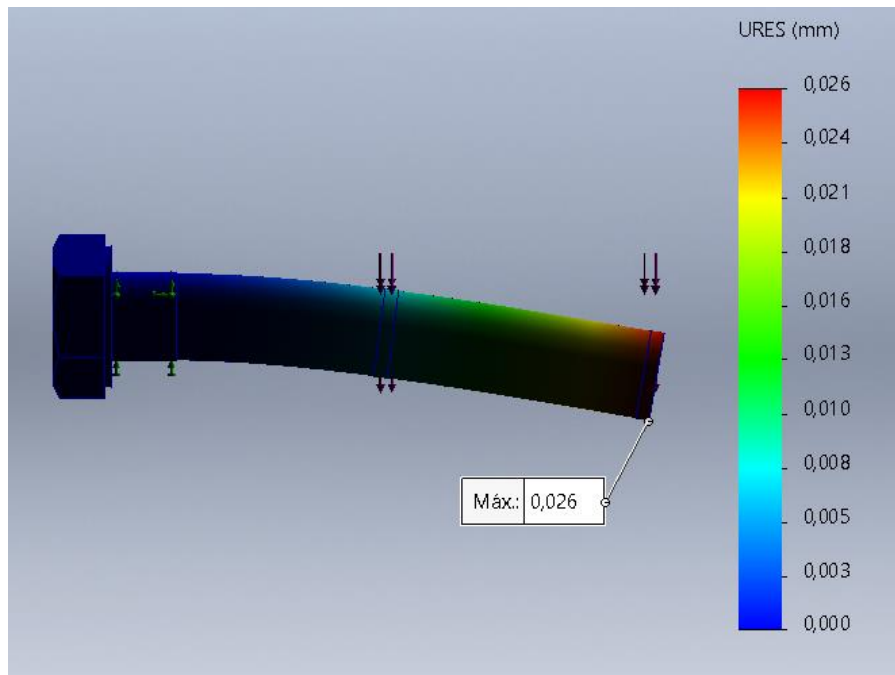


Figura 27. Análisis de deflexión del tornillo

El valor resultante de la deflexión del tornillo es de 0,026 mm, como se ve en la Figura 27. Este valor es muy bajo como para afectar la trayectoria del robot, cuando la estructura esté ensamblada en el panel.

El tornillo M8 x 50 es una correcta elección de diseño para el tornillo que sostiene los rieles del robot.

7.3.5.3 Riel de tubería cuadrada

La tubería cuadrada comercial es de acero ASTM A36, cubierta con una capa de pintura electrostática para evitar en un primer momento la corrosión. Idealmente se le aplicaría un proceso de galvanizado a los rieles para evitar el desprendimiento de la pintura con el rozamiento con los rodamientos, o se elegiría un material que no se oxide como acero inoxidable o aluminio, en caso de contarse con un presupuesto considerablemente mayor. Para el proyecto se usó este tipo de acero ya que estaba disponible en la empresa que prestó sus servicios al desarrollo del prototipo y por recomendación de los expertos, no se

consideró utilizar el acero inoxidable debido a su alto costo por unidad para la etapa del prototipado. Se usan apoyos de geometría fija en los agujeros por los que pasa el tornillo M8 x 50, ya que, al tener la tuerca soldada, el tornillo no debería poder moverse en ninguno de los ejes. La fuerza que sufre el riel es la mitad del peso total del robot, que está distribuida en los dos rieles uniformemente. Este valor es de 85,8 N verticalmente hacia abajo.

Tabla 5. Análisis de convergencia para la malla del riel

Tamaño máximo del elemento (mm)	Tamaño mínimo del elemento (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Variación
25,00	3,57	15,85	
20,00	2,86	15,98	0,82%

La calidad de la malla con un tamaño máximo de 20 mm es adecuada para realizar el análisis, ya que se aprecia la convergencia a un valor determinado.

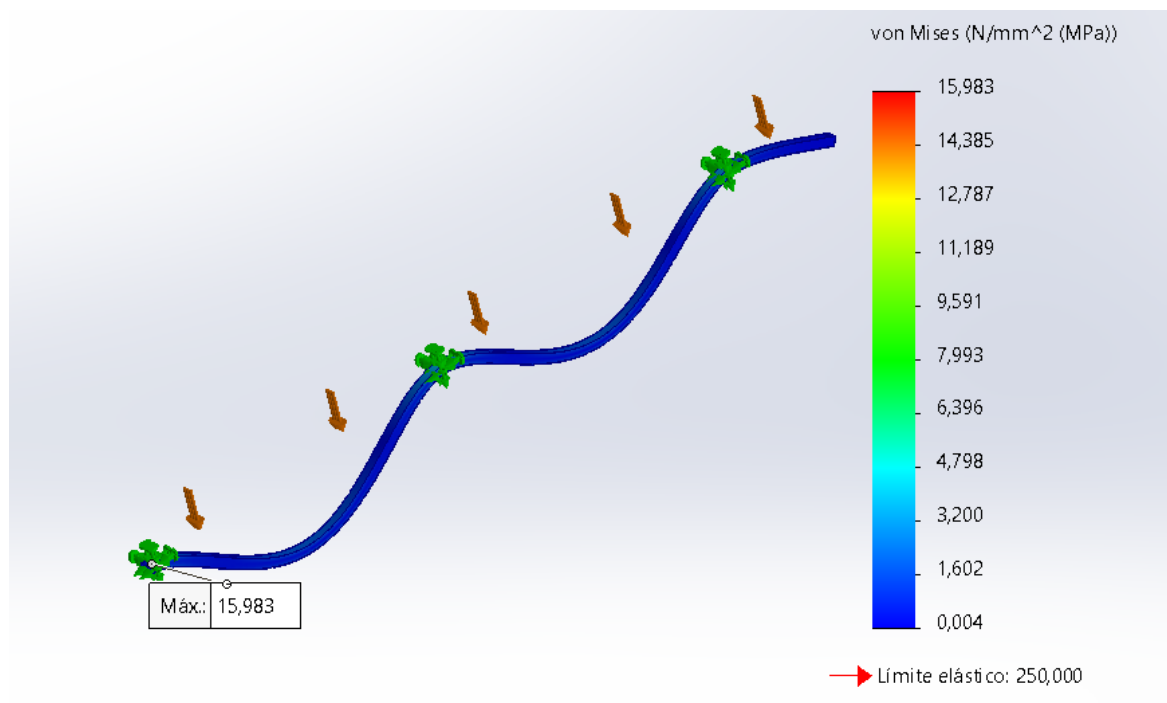


Figura 28. Análisis de esfuerzos del riel

El valor de máximo esfuerzo se ubica en la perforación por donde pasa el tornillo, debido al concentrador de esfuerzos que genera el agujero, que está visible a través de la restricción de movimiento que se muestra en la Figura 28. El valor máximo es de 15,98 MPa, mientras que el valor del límite elástico es de 250 MPa. Aplicando la fórmula de factor de seguridad, resulta un valor de 18,3. Se evidencia un número elevado, por lo que se espera que el componente no falle por esfuerzos superiores al límite elástico.

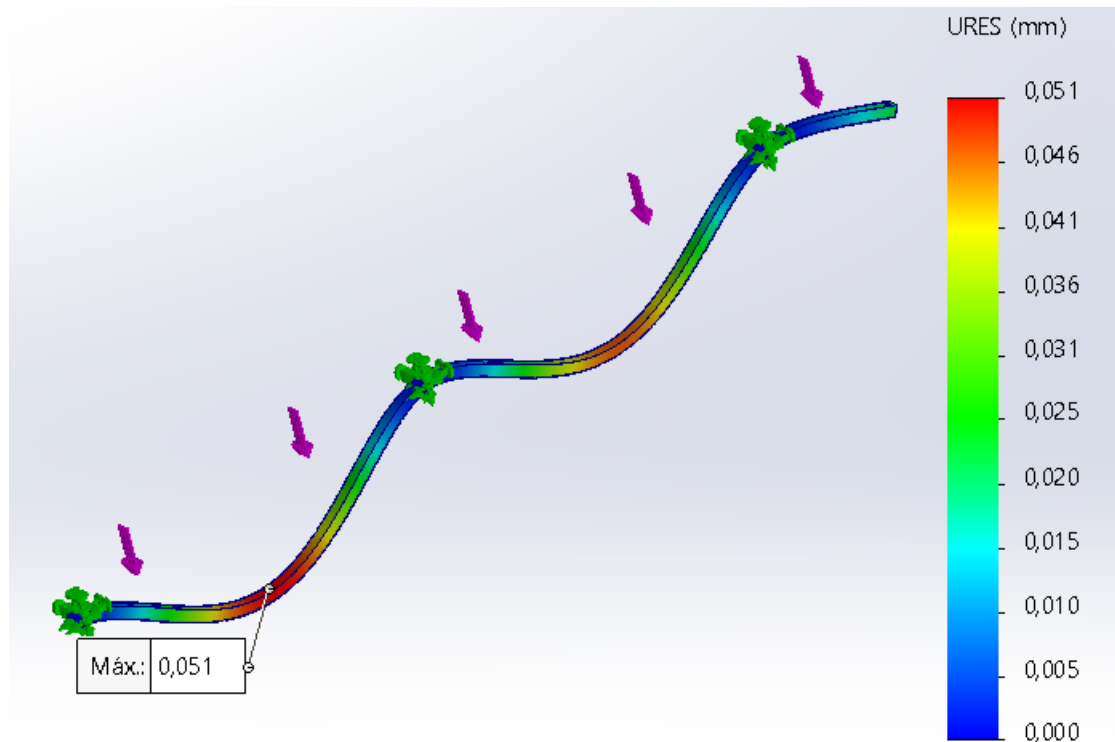


Figura 29. Análisis de deflexión del riel

En cuanto a la deflexión, se puede observar en la Figura 29 que el valor máximo es de 0,051 mm, el cual no es significativo, como para alterar la trayectoria del robot.

A partir de lo anterior, se podrían evaluar maneras de reducir el factor de seguridad. Sin embargo, no se puede reducir el área transversal, porque las dimensiones del riel están ajustadas al diseño. El material debe ser un acero, debido a la facilidad que tiene este para ser soldado.

7.3.5.4 Marco del panel solar

El marco del panel solar recibe el peso del robot en los seis apoyos que tiene de las prensas en "c". La masa total es de 17,5 kg, por lo que se le aplica una fuerza de 171,68 N, en dirección vertical hacia abajo. El material del marco es aluminio 1010. El análisis de convergencia de calidad de malla se puede observar en la

Tabla 6. Análisis de convergencia para malla del marco del panel

Tamaño máximo del elemento (mm)	Tamaño mínimo del elemento (mm)	Esfuerzo máximo (MPa)	Variación
40	38,98	18,80	
35	31,5	20,15	7,18%
30	27,5	21,40	6,20%
25	22,5	20,66	3,46%

El tamaño máximo por elemento de la malla final es de 25 mm. Los resultados del análisis de elementos finitos se pueden observar en la Figura 30.

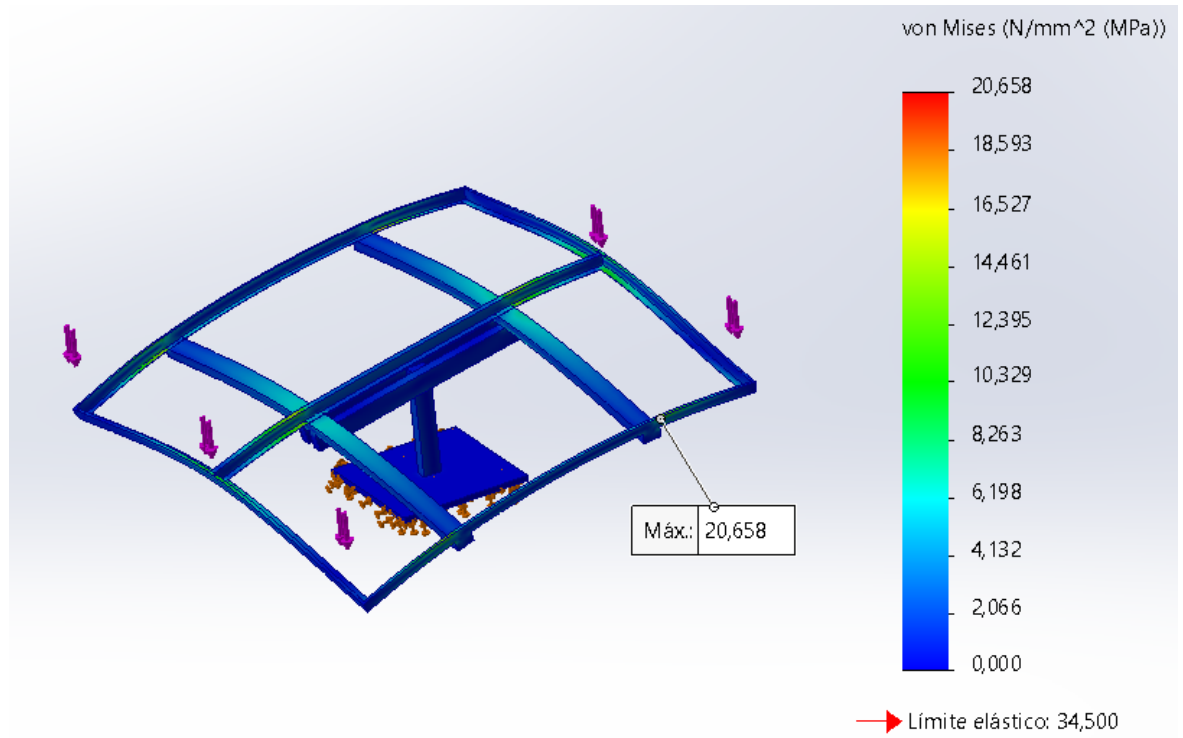


Figura 30. Análisis de esfuerzos del marco del panel solar

El esfuerzo máximo que sufre la estructura es de 20,66 MPa y su límite elástico es de 34,5 MPa, como se ve en la Figura 30. El factor de seguridad es de 1,67. Este valor es bajo y debido a la incertidumbre respecto a las sobrecargas posibles e imprevisibles, se recomienda considerar este sistema como crítico y reducir el peso del sistema lo más posible, debido a que la estructura es fabricada con especificaciones estándar de los proveedores de paneles solares. Se esperará a realizar las pruebas reales para determinar si la estructura del panel puede soportar la sobrecarga que genera el robot.

7.3.6 Selección de componentes electrónicas

Para la selección de las componentes eléctricas y electrónicas se realizó la Tabla 7 de funciones que debe cumplir el robot, con la respectiva elección del elemento que va a completar dicha función.

Tabla 7. Selección de componentes eléctricos según la necesidad

Función por cumplir	Componente electrónico
Desplazar el robot	Motor DC 12V 210 rpm
Girar el cepillo	Motor DC 12V 70 rpm
Alimentar el circuito	Batería 12V 5Ah
Controlar el circuito	Arduino
Controlar la velocidad de los motores	Puente H L298
Dispensar jabón	Electroválvula
Abrir y cerrar la electroválvula	Relé
Activar y desactivar el motor del cepillo	Relé
Cambiar la dirección de movimiento	Final de carrera
Indicar el final del recorrido	Final de carrera
Encender el circuito	Sensor de flotación
Enviar señales a larga distancia	Módulo de comunicación inalámbrica

7.4 Prototipar

Después de realizar el diseño conceptual, se avanza a la etapa de diseño de detalle, en la que se deben definir los procesos de adquisición y fabricación de las componentes del proyecto. A partir de la etapa anterior, se realizó la Tabla 8, en la que se definen todas las componentes que lleva el prototipo y cómo se llevará a cabo la obtención de estas.

Tabla 8. Selección de proveedor según el componente

No.	Componente	Cantidad	Proveedor
1	Estructura principal	2	Ditec SAS
2	L porta motores regular	1	Ditec SAS
3	L porta motores invertida	1	Ditec SAS
4	Estructura removible porta ruedas	2	Ditec SAS
5	Rodamientos en plástico	8	Comprado
6	Motorreductor con encoder 6v DC 210 rpm	2	Comprado

No.	Componente	Cantidad	Proveedor
7	Estructura de sujeción motorreductor	2	Comprado
8	Buje de acople a llanta en cobre	2	Comprado
9	Llanta motriz	2	Comprado
10	Motorreductor de cepillo rotatorio	1	Comprado
11	Estructura de sujeción de motor cepillo	1	Ditec SAS
12	Eje escalonado del cepillo	1	Micron Energy de Colombia SAS
13	Ejes de acople entre tapas	16	Manufactura personal
14	Chumacera de pared KFL001	2	Comprado
15	Cepillo rotatorio de limpieza en empack con cerdas de nylon	1	Plastilecor
16	Tubería cuadrada viga de unión entre las dos secciones	1	Manufactura personal
17	Acople del cepillo al eje	2	Micron Energy de Colombia SAS
18	Electroválvula	1	Comprado
19	Sensor de flotación	1	Comprado
20	Interior de la tapa	2	Ditec SAS
21	Borde de la tapa	2	Ditec SAS
22	Manguera para el flujo de jabón	1	Comprado
23	Caja de componentes electrónicos	1	Comprado
24	Rieles de tubería cuadrada con tuercas soldadas	2	Ditec SAS
25	Prensas en "c" con recubrimiento de caucho	6	Ditec SAS
26	Tornillo grueso M8 con arandela soldada a la punta	6	Manufactura personal
27	Batería de 12VDC 5Ah	1	Comprado
28	Tubería cuadrada transversal para estructura de reposo	1	Manufactura personal
29	Reservorio superior de jabón	1	CAP Javeriana Cali
30	Arduino	1	Comprado
31	Relevador	2	Comprado
32	Finales de carrera	2	Comprado
33	Puente H controlador de motores	1	Comprado
34	Tanque de agua para el sensor	1	CAP Javeriana Cali

A partir de las necesidades que surgieron, se definieron cuatro proveedores, que son los encargados de fabricar las piezas con las especificaciones de diseño que se les envíen. Ditec SAS, que cuenta con proceso de doblado de lámina, corte en plasma y soldadura. Plastilecor es una empresa de fabricación de cepillos industriales. El tercer proveedor es una empresa de fabricación y restauración de piezas mecánicas y eléctricas, Micron Energy de Colombia SAS, la cual cuenta con torno y fresadora. Finalmente, el cuarto proveedor es la Universidad Javeriana que cuenta con máquinas de impresión 3D. El resto de los

elementos del prototipo fueron adquiridos a través de compra, o fueron fabricados personalmente por los dos autores del trabajo.

7.4.1 Ditec SAS

En Ditec SAS se fabricaron principalmente piezas de la estructura del robot. Las piezas 1, 2, 3 y 4 (Anexo 3, páginas 1, 2, 3 y 4) se realizaron de la misma manera. En lámina de acero cold rolled AISI 1020 galvanizado calibre 18 se cortaron en un equipo de corte por Plasma Mecanizado Hypertherm Max Pro-200 las seis piezas correspondientes. Para el corte se exportaron los planos el SolidWorks de la pieza en formato DXF y se convirtieron a código G en el programa FastCam. Al finalizar el corte las piezas se llevaron a doblar con sus respectivos planos, disponibles en el anexo 3. Para las piezas 11, 20, 21 y 25 (Anexo 3, páginas 5, 8, 9, 10 y 11) se usó una lámina de acero A35 de 3 mm en la máquina cortadora de plasma. El ensamblaje de las piezas 1, 4 y la parte posterior de la pieza 20 se pueden ver en la Figura 31.



Figura 31. Piezas fabricadas en Ditec SAS ensambladas

El acople del motor se dobló y se le realizaron las perforaciones y roscas correspondientes. Dicho acople, junto con las piezas 2, 6, 7, 10 y 11 (Anexo 3, página 2 y 5) se pueden observar en la Figura 32.

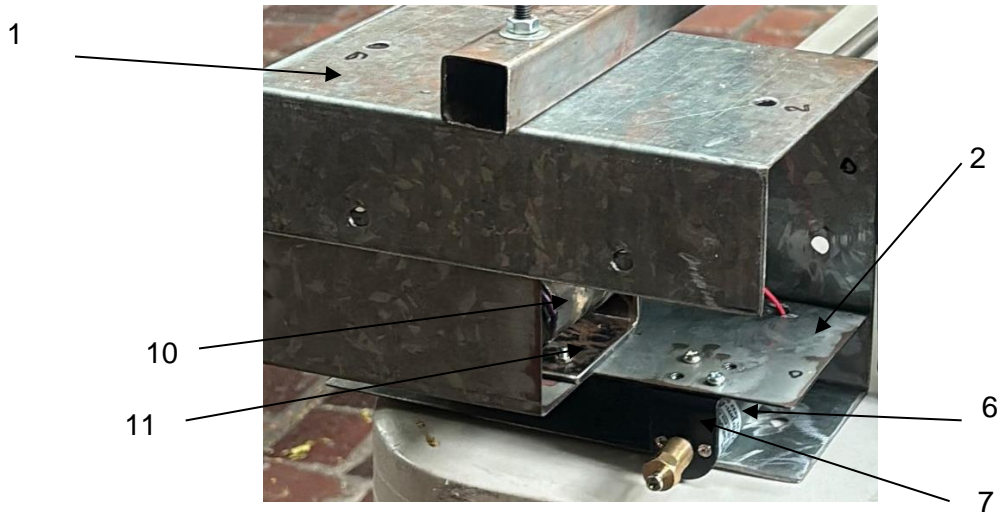


Figura 32. Piezas fabricadas en Ditec ensambladas vista interior

Las prensas en "c" de los rieles se diseñaron de tal manera que, a partir de dos piezas dobladas, se suelden y resulte una sola pieza de espesor de 6 mm, necesarios para una rosca de tornillo M8. El resultado de las prensas se observa en la Figura 33. Las tapas se diseñaron de manera similar, ya que se separó en una tapa plana, y un marco que pueda proteger el interior de la estructura. Las dos piezas se soldaron y resultó una tapa con relieve en los costados que se ajusta a la estructura original. El resultado de las tapas se observa en la Figura 31.



Figura 33. Sistema de prensado fabricado en Ditec SAS

Finalmente, para los rieles, se cortó una tubería cuadrada de una pulgada, con las respectivas perforaciones y se realizó una soldadura de tuercas M8 x 1,25, en cada una de los agujeros (Anexo 3, página 15).

7.4.2 Plastilecor

El diseño del cepillo responde a los dos requerimientos principales que tiene este, la distancia radial que tienen las cerdas del cepillo, la cual es mínimo 34,5 mm y el tamaño de la chumacera, que corresponde a una perforación de 12 mm. A partir de esto, el proveedor realizó un diseño conceptual según sus herramientas de trabajo. Por esta razón, la perforación es de ½ pulgada, en lugar de los 12 mm propuestos. En la Figura 34 se puede observar el cepillo fabricado.

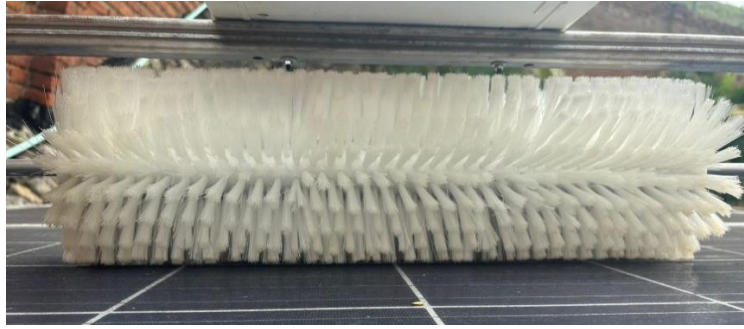


Figura 34. Cepillo fabricado en Plastilecor

7.4.3 Micron Energy de Colombia SAS

En Micron Energy de Colombia SAS se mecanizó el eje. Se entregó un eje de $\frac{1}{2}$ pulgada y 1655 mm de longitud de acero inoxidable 304, para cilindrar los extremos que entran en la chumacera KFL001. La medida nominal de la chumacera es de 12 mm de diámetro y se optó por mecanizar hasta 11,95 mm con el objetivo de tener un ajuste deslizante. Al eje también se le realizó una perforación para acoplar al motor con su respectivo prisionero (Anexo 3, página 6).

7.4.4 Centro de automatización de procesos PUJ

En el centro de automatización de procesos de la universidad Javeriana de Cali se fabricó el reservorio de jabón a partir de manufactura aditiva con PLA (Anexo 3, página 14).

7.4.5 Circuito electrónico

El circuito del robot tiene tres entradas y cuatro salidas. Las entradas son dos finales de carrera y un sensor de flotación. Las salidas son los dos motores de tracción, el motor de rotación del cepillo y la electroválvula. El Arduino, los puentes H y los relés permiten controlar el circuito. La Figura 35 muestra las conexiones reales del circuito del robot.

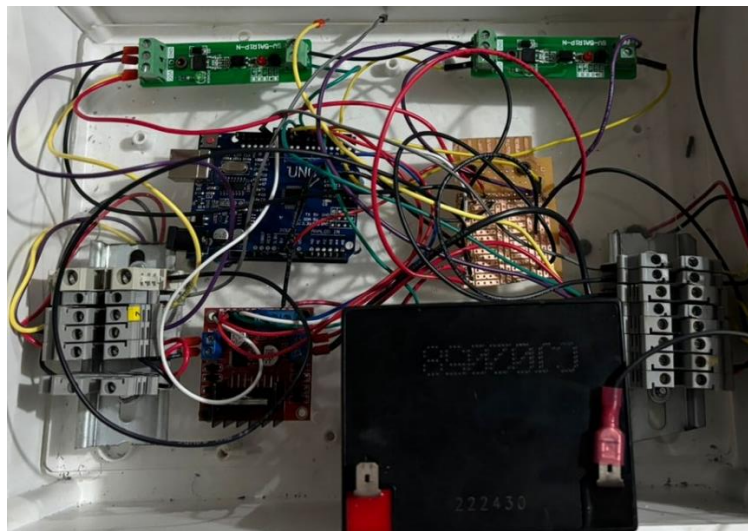


Figura 35. Circuito electrónico del robot

7.4.6 Resultado final

Al ensamblar todas las componentes, se obtuvo el siguiente resultado del robot de limpieza de paneles solares. Debido a algunas limitaciones presupuestales, se adquirió un cepillo de 50 cm de longitud. Se espera poder fabricar uno de 150 cm para el producto final, después de determinar el funcionamiento de este. Para el momento de ensamblaje y prueba de funcionamiento de los motores, el reservorio de jabón estaba en proceso de impresión, por lo que se decidió realizar pruebas de limpieza por aparte. Se puede observar la estructura del robot en su ambiente real de trabajo en la Figura 36 (Anexo 3, página 16).



Figura 36. Prototipo final del robot sobre el panel de referencia

7.4.7 Análisis de costos

Como se mencionó previamente en el trabajo, la construcción del robot no debe superar el valor de 2.000.000 de pesos colombianos. Para esto se realizó un análisis del costo total de la adquisición o fabricación de cada uno de los componentes del robot, que se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 9. Análisis de costos

Componente	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Estructura principal	2	\$6.000,00	\$12.000,00
L portamotores regular	1	\$6.000,00	\$6.000,00
L portamotores invertido	1	\$6.000,00	\$6.000,00
Estructura removible porta ruedas	2	\$6.000,00	\$12.000,00
Rodamientos roller	8	\$5.000,00	\$40.000,00
Motorreductor	2	\$100.000,00	\$200.000,00
Estructura de sujeción	2	\$5.000,00	\$10.000,00
Buje de acople llanta en cobre	2	\$5.000,00	\$10.000,00
Llanta motriz	2	\$10.000,00	\$20.000,00
Motorreductor cepillo	1	\$160.000,00	\$160.000,00
Estructura de sujeción motor cepillo	1	\$3.500,00	\$3.500,00

Eje escalonado del cepillo	1	\$50.000,00	\$50.000,00
Ejes de acople entre tapas	16	\$300,00	\$4.800,00
Chumacera KFL001	2	\$65.000,00	\$130.000,00
Cepillo giratorio	1	\$280.000,00	\$280.000,00
Acople del cepillo	1	\$20.000,00	\$20.000,00
Electroválvula	1	\$22.000,00	\$22.000,00
Sensor flotación	1	\$11.000,00	\$11.000,00
Interior tapa	1	\$3.500,00	\$3.500,00
Borde tapa	1	\$3.500,00	\$3.500,00
Manguera	1	\$1.000,00	\$1.000,00
Caja de componentes electrónicos	1	\$60.000,00	\$60.000,00
Rieles de tubería cuadrada	2	\$15.000,00	\$30.000,00
Prensas en "c"	6	\$7.000,00	\$42.000,00
Tornillo M8 con arandela	6	\$2.000,00	\$12.000,00
Batería	1	\$40.000,00	\$40.000,00
Reservorio de jabón	1	\$50.000,00	\$50.000,00
Arduino	1	\$45.000,00	\$45.000,00
Relevador	2	\$15.000,00	\$30.000,00
Final de carrera	2	\$5.000,00	\$10.000,00
Puente H	1	\$19.000,00	\$19.000,00

La tabla muestra el costo unitario de cada una de las componentes y el costo total correspondiente a la cantidad de elementos que hay en el robot. El valor total de construcción del robot es de 1.343.300 pesos colombianos, el cual es inferior al costo máximo esperado de la construcción. El costo de fabricación de las piezas manufacturadas se estimó, ya que para realizar las piezas se solicitó disponibilidad de máquinas en las empresas mencionadas. Sin embargo, el valor exacto no se puede determinar ya que para este prototipo los equipos fueron arrendados sin costo. Después de preguntarle a los respectivos dueños de las empresas se concluyó que el valor total de la manufactura de las piezas en Ditec SAS y Micron Energy fue de aproximadamente 500.000 pesos colombianos. Es decir, que de no tener la disponibilidad de estas máquinas, y siguiendo una cotización estándar de arrendamiento de equipos, el valor total de la construcción del robot sería de 1.843.300 pesos colombianos.

Aunque este es el costo de fabricación real estimado del robot, algunos de los componentes fueron suministrados por la universidad o por las empresas mencionadas. Teniendo en cuenta que el prototipo y el desarrollo en general fue presupuestado y costado enteramente por los recursos propios de los autores, y no se contó con ninguna inversión o suministro económico externo; el diseño se vio condicionado a los materiales disponibles y se apuntó al máximo aprovechamiento posible de los mismos, resultando en algunas dificultades técnicas en la manufactura y funcionamiento, pero con un prototipo funcional que muestra un primer acercamiento esquemático a una solución viable y sólida para el problema.

7.5 Validación

Con el prototipo fabricado, se proceden a realizar algunas pruebas de trabajo reales, para definir las recomendaciones necesarias. Esta etapa permite validar los distintos análisis realizados previamente y tomar en cuenta nuevas consideraciones que resulten del trabajo del robot en condiciones críticas.

7.5.1 Prueba de funcionamiento bajo los requerimientos

La prueba de funcionamiento es una validación de los requerimientos de diseño propuestos en la etapa de definición del proyecto. Para esto, se realizó la Tabla 10, en la que se muestran los requerimientos evaluados, una calificación cualitativa del cumplimiento de este, y la explicación detallada de por qué se cumple o por qué no se cumple. Se aclara que los paneles en los que se realizaron las pruebas no son los mismos de la Universidad Javeriana para los que se construyó el proyecto. Sin embargo, ambas instalaciones cuentan con paneles exactamente de las mismas dimensiones

Tabla 10. Pruebas de funcionamiento según el requerimiento

Requerimiento	Cumplimiento	Justificación
Debe mantenerse sujeto a la estructura a 10° de inclinación	Cumple	El robot se ubica en el panel solar de referencia, con una inclinación de 10 grados y cumple con las funciones de movimiento de manera eficaz.
Resistencia al impacto de mínimo 10 J	Cumple	La estructura del robot resiste una prueba de disparo de un balín de 1 g que viaja a 150 km/h, lo cual equivale a una energía de impacto de 11,25 J.
Sujeción resistente a vientos de 288 km/h	Cumple parcialmente	El robot resiste un flujo constante de aire expulsado por un soplador de hojas durante 5 minutos, cuya velocidad nominal de trabajo es de 136 km/h.
No debe superar un peso 2 kN/m ² de sobrecarga permitidos en cubierta	Cumple	El prototipo cuenta con un peso real de 16,2 kg y cubre un área superficial de 0,36 m ² , por lo que la sobrecarga de este sería de 0,45 kN/m ² .
Debe cumplir con una eficiencia de la limpieza del 95%	No aplica	La eficiencia de limpieza se determina con otra de las pruebas realizadas en el trabajo.
Debe limpiarse con agua y con una herramienta suave para no rayar la superficie	No aplica	La integridad del panel según la herramienta de limpieza se determina con otra de las pruebas realizadas en el trabajo.
Protección mínima IP 54 para las componentes eléctricas del sistema	Cumple parcialmente	No se tiene la indumentaria adecuada para realizar una prueba de protección IP. Sin embargo, la caja de componentes electrónicas tiene una protección IP65, por lo que cumple parcialmente.
El robot debe ser completamente autónomo	Cumple	El robot se activa con la señal del sensor de flotación y se detiene con la señal de los finales de carrera, por lo que sí es completamente autónomo.
Debe poder enviar señales de emergencia a largas distancias	No cumple	No se instaló ningún artefacto de envío de señales de emergencia.

Requerimiento	Cumplimiento	Justificación
Debe tener una estructura para el reposo	Cumple	El robot cuenta con una estructura para el reposo en la que no se genera sombra al panel y resiste el esfuerzo constante del peso de este.
Velocidad mínima de 0,05 m/s y máxima de 0,2 m/s	Cumple parcialmente	Aunque el robot se mueve a una velocidad de 0,05 m/s, se evidencia que la elección del motor de tracción no fue adecuada, ya que se demora considerablemente en llegar a la velocidad nominal.
Sistema de alimentación a partir de celdas solares	No cumple	El sistema no cuenta con una alimentación de celdas solares, pero la batería tiene posibilidad de adaptarse a un cargador a partir de un panel ubicado en la parte superior de la estructura.
La longitud del robot debe ajustarse a los paneles de 1m x 1,65 m de referencia	Cumple	El robot se ubica en el panel solar de referencia y cumple todas las funciones de movimiento esperadas. La alineación de las ruedas se adapta de manera precisa a las dimensiones del panel.
Las componentes eléctricas y de desgaste deben tener un mínimo tiempo de un año de vida	No aplica	No se realizaron pruebas para determinar el ciclo de vida de las componentes eléctricas y de desgaste del prototipo.
El movimiento del robot debe ser únicamente lineal	Cumple	El robot se ubica en el panel solar de referencia y se mueve de manera lineal.

La prueba de impacto se realizó con una pistola de balines SigSauer SP2022. Se usaron balines de 5mm de plomo, que se pueden apreciar en la Figura 37.



Figura 37. Balín usado para prueba de impacto

La estructura no tuvo una deformación visible, por lo que se puede concluir que resiste el impacto ocasionado por el disparo. La velocidad nominal del balín es de 150 m/s y su peso es de aproximadamente 1g. La energía de impacto es de 11,25 Joules.

Para la prueba de velocidad del viento se usó un soplador de hojas Duropro modelo D07102150. La prueba consistió en someter al robot en la estructura del panel a una constante corriente de viento a 136 km/h durante 5 minutos. El robot no tuvo indicio de desplazarse o de sufrir daños estructurales. Se espera poder realizar una prueba con un artefacto capaz de emitir vientos de 288 km/h

Las demás pruebas de funcionamiento general se realizaron con el robot encendido sobre la estructura del panel. En la Figura 38, Figura 39 y Figura 40 se puede apreciar el funcionamiento del robot.



Figura 38. Robot encendido sobre la estructura



Figura 39. Robot encendido vista del cepillo



Figura 40. Rodamientos roller sobre el riel

7.5.2 Prueba de limpieza

La prueba de limpieza consiste en iniciar el funcionamiento del robot sobre una superficie de vidrio previamente sucia, con polvo. Esta suciedad fue introducida artificialmente antes de la prueba debido a la demora que representaría dejar un vidrio expuesto al sol por un largo tiempo, por lo que no se generó una adherencia fiel a las condiciones reales de exposición de un panel solar. Se sostuvo el reservorio impreso en 3D lleno de agua jabonosa y con la válvula abierta encima del panel por unos segundos hasta que el vidrio se encontró completamente permeado de agua y jabón y posteriormente se puso en marcha el cepillo giratorio sobre toda la superficie del vidrio. El reservorio tiene una capacidad máxima de almacenamiento de 584 ml de agua jabonosa, la cual fue dispensada completamente para el experimento. Para finalizar el experimento, se le aplicó agua nebulizada durante un minuto, simulando la lluvia posterior al proceso de lavado y se dejó secar durante una hora. Se tomó registro fotográfico del estado de la muestra antes de la prueba y después de la prueba. Seguidamente, se analizaron ambas muestras en un software de procesamiento

de imágenes, para comparar el porcentaje de polvo que tiene el vidrio antes y después de ser limpiado por el robot.

La Figura 41 muestra la superficie del vidrio antes de iniciar el experimento. Como se puede apreciar, se tiene un nivel de suciedad alto.



Figura 41. Imagen del vidrio sucio

En la Figura 42 se puede ver el desarrollo de la prueba. Se está realizando en un ambiente controlado, y no expuesto a la intemperie para que se pueda evaluar solamente la relación que tiene el diseño del cepillo y el método de limpieza, con el porcentaje de superficie cubierta por polvo. Se usó un pedazo de vidrio pequeño para tener un control sobre el experimento. Los resultados se muestran en la Tabla 11.



Figura 42. Imagen del experimento

El resultado de la limpieza se puede ver en la Figura 43. Es importante que la evidencia fotográfica se haga sobre un fondo de color de contraste, como el blanco, para que el software de procesamiento de imágenes pueda diferenciar los elementos. De manera cualitativa, se puede apreciar un resultado exitoso de la limpieza. Se notan pequeñas secuelas de la limpieza, pero no se ve a simple vista ninguna partícula sólida que genera sombra significativa.



Figura 43. Imagen del vidrio limpio

En el procedimiento con el software de procesamiento de imágenes se mide el porcentaje del color predominante en el fondo, en este caso es el blanco, comparado con otros colores que corresponden a la cantidad de superficie cubierta por polvo. A partir de esto, se determina un porcentaje de limpieza y se debe comparar con el valor propuesto en los requerimientos de diseño. Para el caso del vidrio antes del proceso, se encontró que el porcentaje de área sucia o con polvo es del 73%, mientras que en el vidrio posterior al proceso de limpieza se observa que el área sucia corresponde a menos del 1%, lo anterior se puede apreciar en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de limpieza

Label	Area	%Area
vidriolimpio.jpg	115062	0.599
vidrio sucio.jpg	57240	72.594

8. Recomendaciones

- Debido a la disponibilidad de componentes electrónicos en la universidad y a los recursos disponibles en la investigación, el diseño de la arquitectura electrónica se vio limitado a control con microprocesador Arduino, y elementos básicos como los motores, sensores, relés y demás. Este tipo de sistemas son comúnmente usados para aplicaciones robóticas de tamaño reducido o medio, usualmente no se usan a escala industrial por lo que una recomendación futura está direccionada a implementar dispositivos de automatización industrial como PLC. A su vez, la conexión de los dispositivos fue concebida como una conexión directa, por lo que se podría analizar la posibilidad de implementar sistemas de protección contra sobrecarga como fusibles a sistemas críticos como los motores que proporcionan la tracción. Además, se debe incluir un dispositivo capaz de enviar señales de emergencia al operario o al servicio técnico para que el robot no pierda su función y no se deba acceder a este para revisarlo constantemente.
- Una solución plausible para dispensar una cantidad adecuada de jabón, si se eliminan las restricciones de presupuesto y disponibilidad, podría ser implementar un sistema de línea presurizada, con bombas de alta viscosidad, un área de mezclado con agua, bombas de dosificación y electroválvulas con admisión de fluido a presión. Lo anterior aumentaría la confiabilidad del sistema debido a que la dosificación trabajada no dependerá exclusivamente de la energía potencial y la cabeza de presión del fluido, sino que se puede ajustar con las bombas, resultando en una optimización del diseño estructural, eliminando el recipiente elevado y reemplazándolo por un sistema de mangueras internas estratégicamente posicionado, las cuales se pueden alimentar por un reservorio externo ubicado cerca

al área de reposo, sin estar encima de la estructura. Además, se debe realizar el cálculo del volumen necesario del reservorio de jabón, ya que a partir de esto se puede determinar la cantidad de ciclos que puede cumplir el robot antes de requerir un reabastecimiento de jabón.

- Por disponibilidad, se utilizaron placas de acero CR galvanizado calibre 18 para las componentes del robot y tubería cuadrada de acero CR sin tratamiento superficial calibre 18 para los rieles; sin embargo, la utilización de material de acero inoxidable sería deseable para evitar problemas de corrosión. Algunas de las componentes pueden fabricarse en aluminio, debido a la baja densidad y la resistencia a la corrosión que tiene este, lo cual ayudaría a reducir considerablemente el peso que tiene el robot. También se puede evaluar la posibilidad de hacerle tratamientos superficiales a las piezas en acero como un proceso de galvanizado. Esto debe hacerse con las piezas perforadas, para evitar la corrosión en las uniones atornilladas.
- Para un funcionamiento eficiente y autónomo, es ideal que los componentes del sistema sean alimentados por una fuente de voltaje que no requiera intervenciones frecuentes de operarios o un gran arreglo de cables. La mejor solución teniendo en cuenta dichos parámetros junto con las condiciones de funcionamiento del sistema en alturas y con exposición directa a la luz solar, es la implementación de una batería cargada constantemente con un arreglo de celdas fotovoltaicas. El sistema se compone de un panel solar adecuado para el consumo, un módulo cargador de batería y la batería.
- Para realizar pruebas con mayor impacto y que brinden información significativa para el diseño, se debe contar con mejores recursos para estas. La prueba de impacto se sugiere hacerse bajo la norma ASTM D3029, que es la prueba estándar que permite concluir valores más exactos de la resistencia requerida para el material de la cubierta.
- La prueba de protección IP para las componentes eléctricas debe realizarse para los motores, ya que, como se indicó previamente, la caja de conexiones tiene un grado de protección IP65, pero el robot cuenta con otros componentes que no tienen la protección suficiente y se debe validar este requerimiento, para definir si se debe modificar el diseño de la estructura. Además, se debe encontrar una forma de

refrigerar las componentes electrónicas, ya que se supone que deben recibir radiación constante, y esto puede generar un sobrecalentamiento de alguna pieza.

- También, se debe definir una prueba para medir el ciclo de vida de las componentes eléctricas y de desgaste. Una solución viable es activar el funcionamiento del robot de manera constante, hasta que alguna de las componentes sufra alguna avería y concluir a partir de los ciclos de trabajo.
- En futuros proyectos se puede implementar la mejora de instalar un módulo de comunicación inalámbrica para enviar y recibir señales desde el control hasta el Arduino que opera en el robot. Lo anterior supliría la necesidad de enviar señales de emergencia o de paro cuando sea necesario o cuando haya un mal funcionamiento.

9. Conclusiones

- Por medio de la metodología "Design Thinking", fue posible definir un esquema organizado de las fases para seguir en un proyecto de diseño a partir de los canales directos de información con los stakeholders o interesados en el proyecto. Sin embargo, para el diseño en ingeniería es determinante usar herramientas adicionales como las metodologías de Cross, que permiten identificar de manera clara los procesos que debe cumplir la maquina y así poder hallar una solución adecuada para cada uno de los sistemas. Estas metodologías sirvieron de base para la definición de requerimientos por medio del análisis de calidad, pesos ponderados para las necesidades específicas y el diagrama morfológico para dar soluciones a las funciones específicas del sistema.
- El prototipo construido cumple parcialmente la función y la justificación del proyecto. Es automatizado, en la medida en que se evita la necesidad de un operario de alturas para limpiar el panel y aumenta la eficiencia y la frecuencia de limpieza. Sin embargo, no es completamente autónomo, ya que el diseño del reservorio demostró ser insuficiente en términos de dosificación y almacenamiento. A su vez, tiene otras fallas en el diseño, como el posible aumento de viscosidad del jabón por las altas temperaturas y el posible taponamiento de la entrada de la válvula por solidificación de este. Lo anterior causaría una intervención directa de un operario de mantenimiento periódicamente. También se encontraron otras falencias con respecto a la ausencia del envío de señales de emergencia, el peso de la estructura y la corrosión. Se debe continuar con las pruebas y el prototipado para tener un producto altamente competitivo en el mercado de las energías renovables.

- Los desarrollos tecnológicos y las herramientas que se tienen actualmente permiten idear soluciones que pueden sustituir muchas profesiones. Esta solución tiene algunas implicaciones éticas que se han considerado con respecto a lo anterior. Sin embargo, la justificación inicial del proyecto es evitar trabajos que condicionen la integridad o pongan en peligro la vida humana. Por esto, el impacto de sustituir una profesión no se compara con eliminar una actividad manual que puede poner en riesgo a una persona. La capacitación de operarios permite reemplazar prácticas en lugar de personas.

Bibliografía

- [1] “¿Cómo limpiar las placas solares? Descúbrelo.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://sotysolar.es/placas-solares/mantenimiento-garantias/limpieza>
- [2] “Como limpiar placas solares SunFields.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/como-limpiar-placas-solares/>
- [3] “Cepillos técnicos para placas solares: Limpieza adecuada y segura.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.cepillotecnico.es/2021/06/cepillos-tecnicos-para-placas-solares/>
- [4] “Cepillo de limpieza de paneles solares telescópicos.” Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://es.jzbrush.com/telescopic-solar-panel-cleaning-brush-product/>
- [5] S. J. Páez Acevedo, “Manual de procedimientos para trabajar de forma segura en alturas en la construcción de edificaciones,” Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2011. Accessed: Feb. 25, 2023. [Online]. Available: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1262/digital_20425.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [6] I. Romero, *Manual de Generación Distribuida Solar Fotovoltaica*, 1st ed. 2019. Accessed: May 03, 2023. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/350142106_Manual_de_Generacion_Distribuida_Solar_Fotovoltaica
- [7] J. Cepeda and A. Sierra, “Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones,” Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2017. Accessed: May 03, 2023. [Online]. Available: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/4196>
- [8] “IEEE Xplore Full-Text PDF:” Accessed: Mar. 21, 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6502689>

- [9] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, and A. Struckas, "Ultrasonic system for solar panel cleaning," *Sens Actuators A Phys*, vol. 200, pp. 74–78, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.SNA.2013.01.009.
- [10] M. G. Antonelli, P. Beomonte Zobel, A. De Marcellis, and E. Palange, "Autonomous robot for cleaning photovoltaic panels in desert zones," *Mechatronics*, vol. 68, p. 102372, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.MECHATRONICS.2020.102372.
- [11] S. Ramesh Kumar Assistant Professor, M. Ishaakh Ahamed, K. Singhal, A. Srivastava, and P. Joseph, "Design of Cartesian type Automated Glass Cleaning System for Skyscraper's," *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, vol. 8, no. 2, pp. 107–112, 2017, Accessed: Mar. 21, 2023. [Online]. Available: <http://iaeme.com/Home/journal/IJMET107editor@iaeme.comhttp://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=8&Issue=2http://iaeme.com>
- [12] M. D. M. Molina and P. M. Austria, "Cambio climático: posibles consecuencias y algunas sugerencias para disminuir su efecto en México," *Tecnología y ciencias del agua*, pp. 14–28, 1993, Accessed: May 03, 2023. [Online]. Available: <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/706>
- [13] X. Gao, "Should you clean your solar panels now?"
- [14] R. Nahar Myyas, M. Al-Dabbasa, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, "A novel solar panel cleaning mechanism to improve performance and harvesting rainwater," *Solar Energy*, vol. 237, pp. 19–28, May 2022, doi: 10.1016/J.SOLENER.2022.03.068.
- [15] "Siniestralidad laboral en 2021 - ccs.org.co." Accessed: Feb. 25, 2023. [Online]. Available: <https://ccs.org.co/siniestralidad-laboral-en-2021/>
- [16] "Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos." Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- [17] "Sistema de gestión de bases de datos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos | Organización Meteorológica Mundial." Accessed: May 04, 2023. [Online]. Available: <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/sistema-de-gesti%C3%B3n-de-bases-de-datos-meteorol%C3%B3gicos-climatol%C3%B3gicos-e-hidrol%C3%B3gicos>
- [18] N. Cross, "Engineering Design Methods," 2021.

-
- [19] “¿Cuánto peso albergará mi cubierta con la instalación fotovoltaica?” Accessed: Apr. 20, 2023. [Online]. Available: <https://greening-e.com/cuanto-peso-albergara-mi-cubierta-con-la-instalacion-fotovoltaica-sera-lo-suficientemente-resistente-para-ello/>
- [20] “Sobrecargas de Uso | PRONTUARIOS DE INGENIERÍA CIVIL.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <http://prontuarios.info/acciones/sobrecargasuso>
- [21] “Velocidad Viento | Datos Abiertos Colombia.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.datos.gov.co/en/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Velocidad-Viento/sgfv-3yp8/data>
- [22] “¿Cómo afecta la suciedad a las placas solares? ¿Cada cuanto se limpian?” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.cambioenergetico.com/blog/suciedad-placas-solares/>
- [23] “Ingress Protection (IP) ratings.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.iec.ch/ip-ratings>
- [24] “Dureza_Brinell.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.quimica.es/enciclopedia/Dureza_Brinell.html
- [25] “Moglfm2211 Resistencia rodadura - Resistencia a la rodadura - Wikipedia, la enciclopedia libre.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_a_la_rodadura#/media/Archivo:Moglfm2211_Resistencia_rodadura.jpg
- [26] “Motor Con Encoder Motorreductor 6v 210 Rpm + Rueda Arduino | Cuotas sin interés.” Accessed: Jun. 19, 2024. [Online]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-550967529-motor-con-encoder-motorreductor-6v-210-rpm-rueda-arduino-_JM#position=13&search_layout=stack&type=item&tracking_id=75e669c0-acc4-43a6-b51f-4749c0a1d2ac

Anexo 1. Encuesta de especificaciones del cliente

Diseño de un sistema automatizado de limpieza de paneles solares

Evaluación de especificaciones del cliente para desarrollar un robot para la limpieza de paneles solares. Suponga que usted tiene una instalación de paneles y está interesado en adquirir el producto. Califique las características según la importancia que tiene para usted como comprador potencial.

¡Recomendación! Por favor califique de manera crítica cada una de las características, diferenciando las jerarquías entre un aspecto y otro.

* Obligatoria

1. Nombre *

2. Profesión *

3. Peso del equipo *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

4. Eficiencia de limpieza del equipo *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

5. Autonomía del sistema (Número de intervenciones del operario) *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

6. Estética *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

7. Frecuencia de limpieza (Número de veces que limpie en un periodo de tiempo) *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

8. Impermeabilidad del equipo (Protección de las componentes eléctricas) *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

9. Cantidad de agua suministrada *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

10. Costo del equipo *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

11. Tiempo de vida *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

12. Frecuencia del mantenimiento *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

13. Controlable remotamente *

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

14. Según su experiencia, ¿Qué otras especificaciones le parecen importantes para destacar en el producto propuesto? Mencíonelas y entrégueles una calificación como lo hizo previamente.

--

Este contenido no está creado ni respaldado por Microsoft. Los datos que envíe se enviarán al propietario del formulario.

Anexo 2. Casa de la calidad

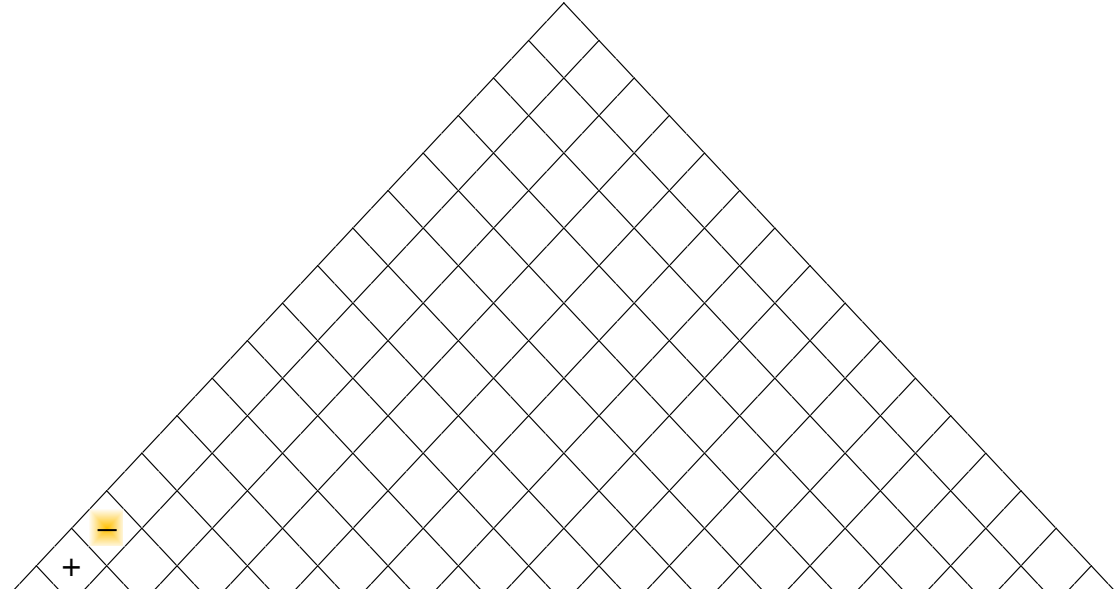
QFD: House of Quality

Project:
Revision:
Date:

Correlations	
Positive	+
Negative	-
No Correlation	

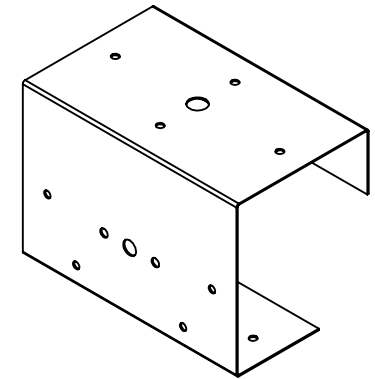
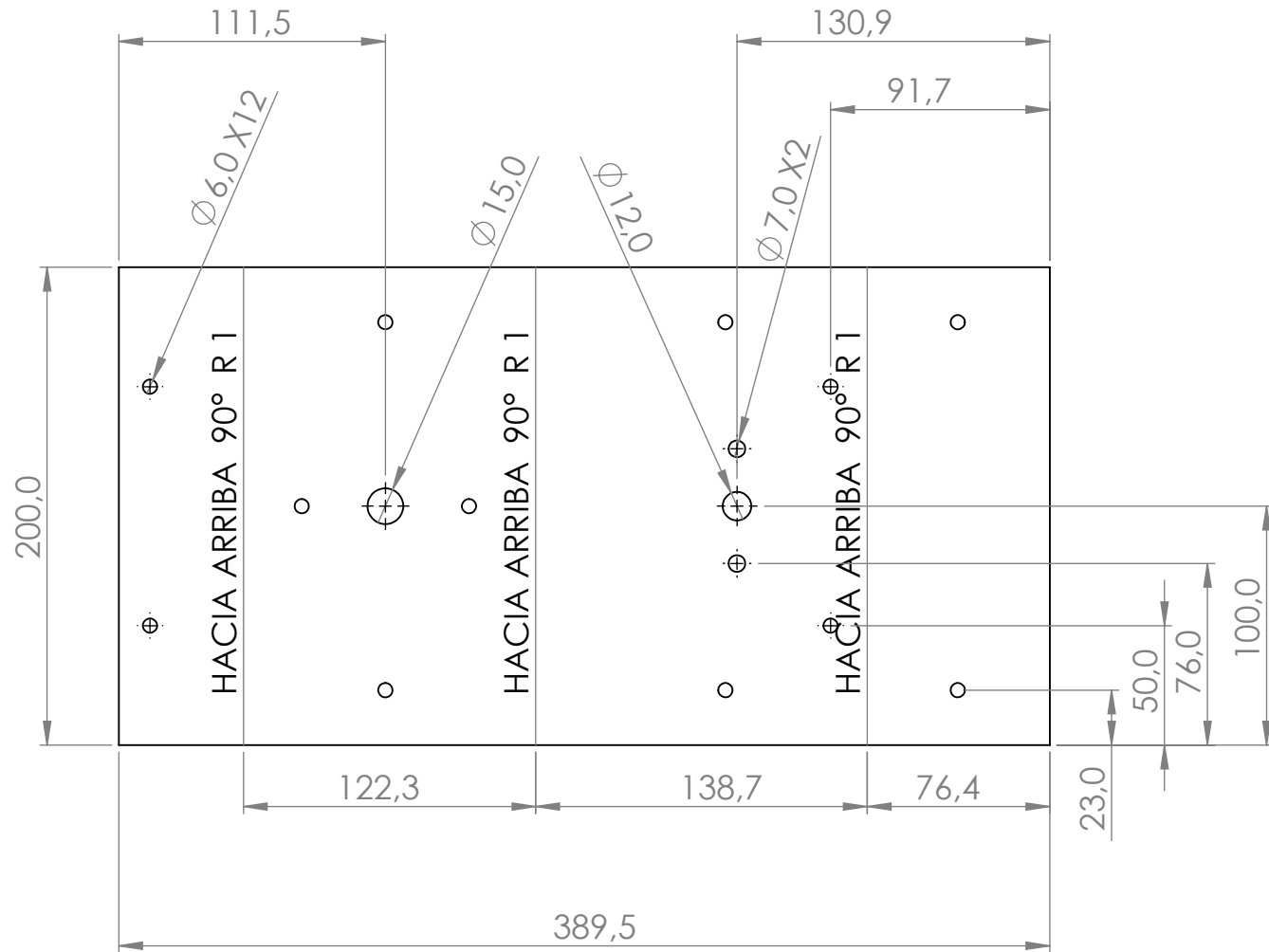
Relationships	
Strong	●
Moderate	○
Weak	▽

Direction of Improvement	
Maximize	▲
Target	◇
Minimize	▼

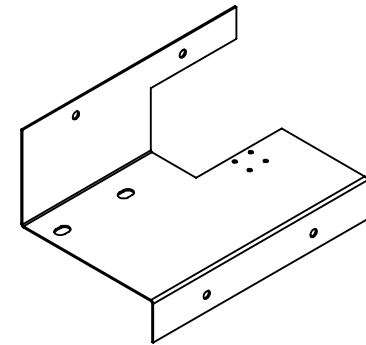
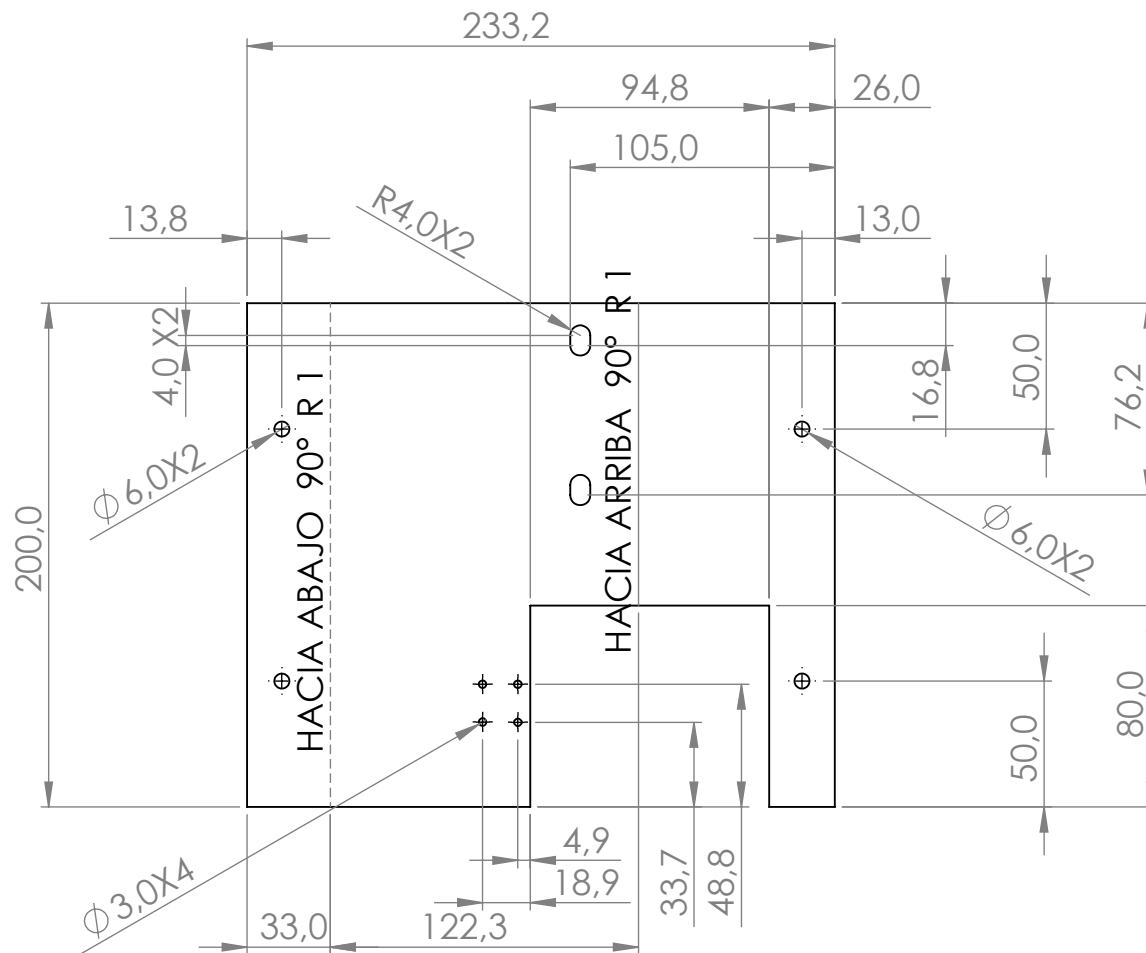


Row #	Weight Chart	Relative Weight	Customer Importance	Maximum Relationship	Customer Requirements (Explicit and Implicit)	Column #																
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
					Functional Requirements	Debe mantenerse sujeto a la estructura a 15° de inclinación	Resistencia al impacto de mínimo 10 J	Sujeción resistente a vientos de 20 km/h	No debe superar un peso 0.4 kN/m2 de sobrecarga permitidos en cubierta	Debe cumplir con una eficiencia de la limpieza del 99.5%	Debe limpiarse con agua y con una herramienta suave para no rayar la superficie	Protección mínima IP 54 para las componentes eléctricas del sistema	El robot debe ser completamente autónomo	Debe poder enviar señales de emergencia a largas distancias	Debe tener una estructura para el reposo	Velocidad mínima de 0.1 m/s y máxima de 1 m/s	Sistema de alimentación a partir de celdas solares	La longitud del robot debe ajustarse a los paneles de 1m x 1m de la universidad	Las componentes eléctricas y de desgaste deben tener un mínimo tiempo de un año de vida	El movimiento del robot debe ser únicamente lineal		
1		12%	8,8	9	Peso ligero	○		○	●		▽	▽			▽				○			
2		11%	8	9	Alta eficiencia en la limpieza					●	○					▽						
3		6%	4,8	9	Autonomía								●	○			○		○			
4		6%	4,2	3	Estética							○			○			▽		▽		
5		3%	2,2	9	Velocidad de trabajo				▽	▽							●				▽	
6		4%	3	9	Frecuencia de limpieza	▽		▽		○	○		○		○	▽				●	▽	
7		11%	8	9	Impermeabilidad				○			●						○		○		
8		9%	6,8	9	Uso de agua				▽	○	●	○										
9		12%	8,6	9	Costo		○	▽	○	○	○	●	○	○	○		○	▽	●			
10		10%	7,4	9	Tiempo de vida	▽	○	▽	▽	○		●		○	▽					●		
11		8%	6,2	9	Mantenimiento	●	○	●	▽			●	▽	○	▽		▽		●			
12		8%	6	9	Controlable remotamente								○	●		○					○	
					Target	Target for Functional Requirement #1	Target for Functional Requirement #2	Target for Functional Requirement #3														
					Max Relationship	9	3	9	9	9	9	9	9	9	3	9	3	3	9	3		
					Technical Importance Rating	125,14	90	136,76	204,86	204,86	174,05	423,78	138,11	182,43	94,324	65,946	95,135	52,973	358,38	37,027		
					Relative Weight	5,25%	3,78%	5,74%	8,59%	8,59%	7,30%	17,78%	5,79%	7,65%	3,96%	2,77%	3,99%	2,22%	15,03%	1,55%		
					Weight Chart																	
					Column #	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	

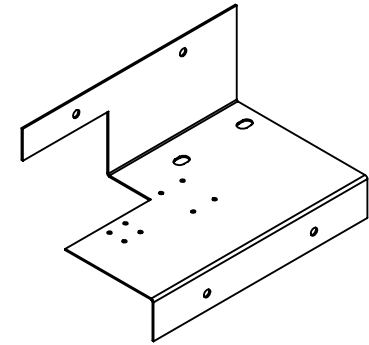
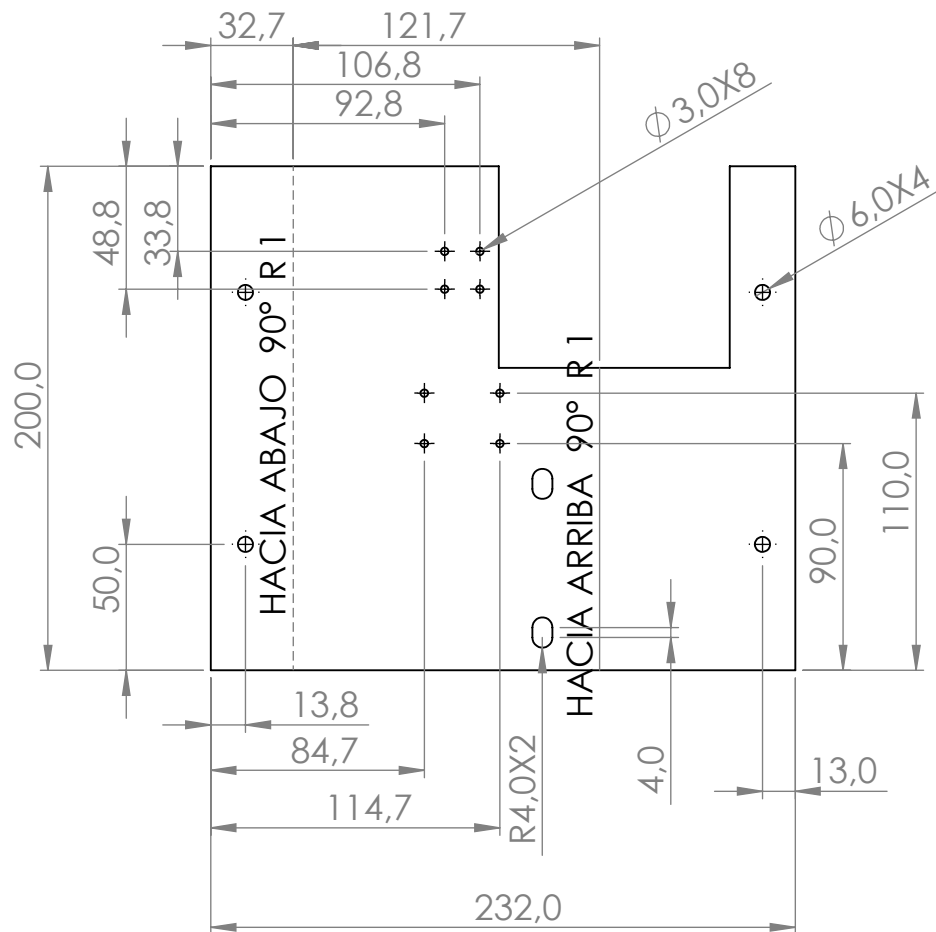
Anexo 3. Planos de fabricación de las piezas del robot



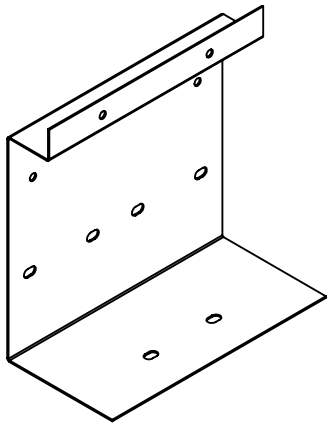
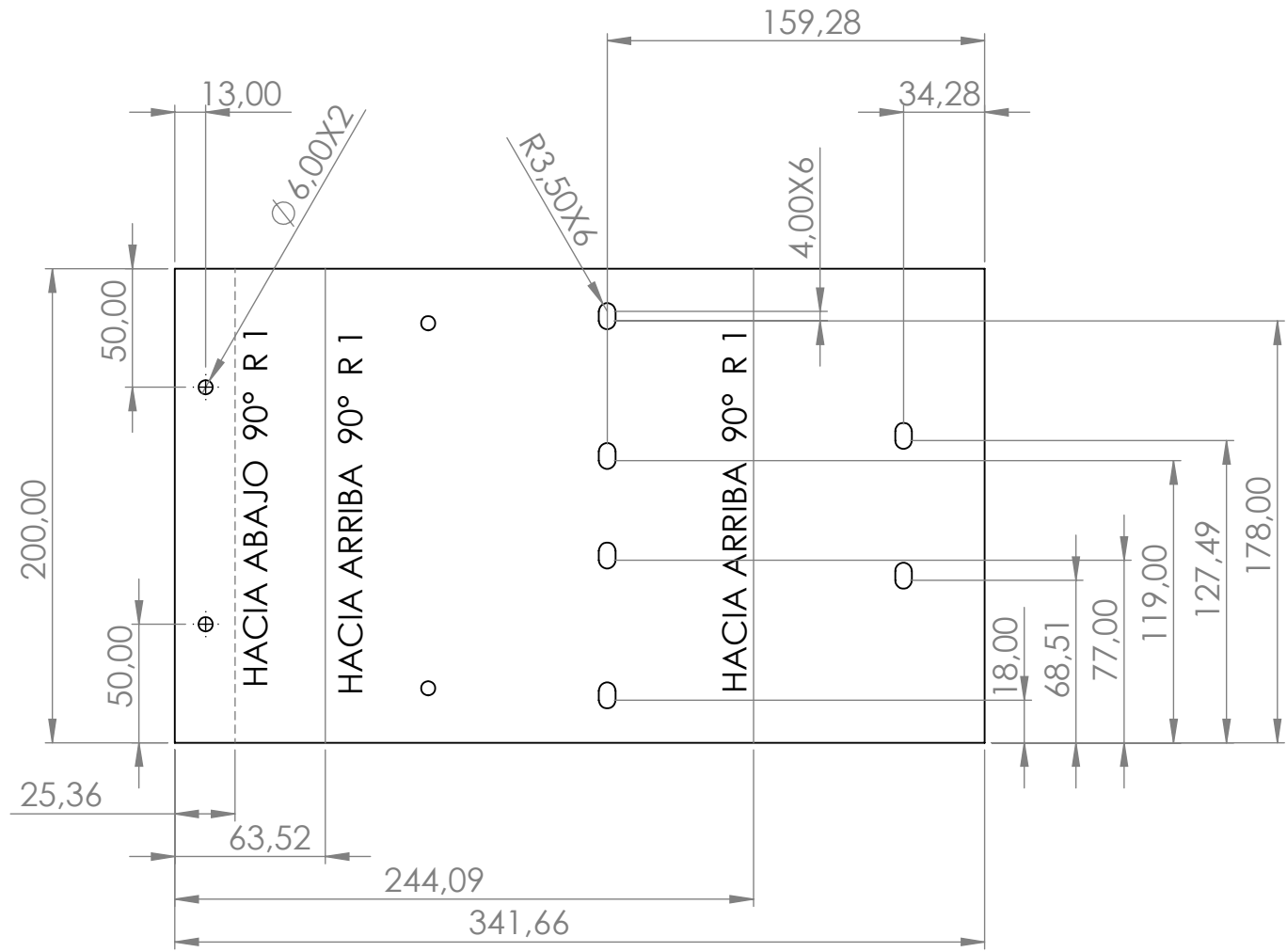
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			1. Estructura principal		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 1 de 16	Material: Acero CR Galvanizado calibre 18	Escala 1:3
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



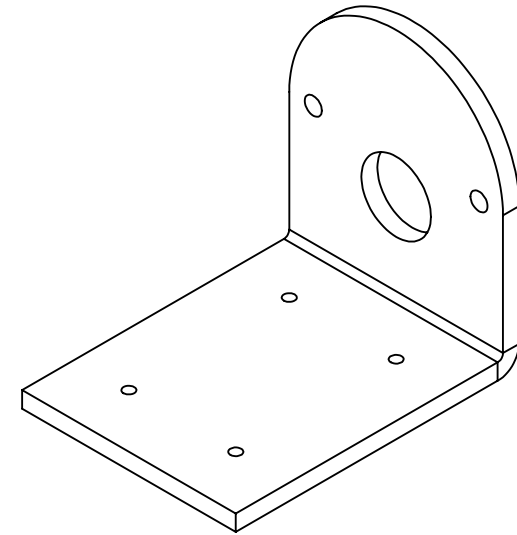
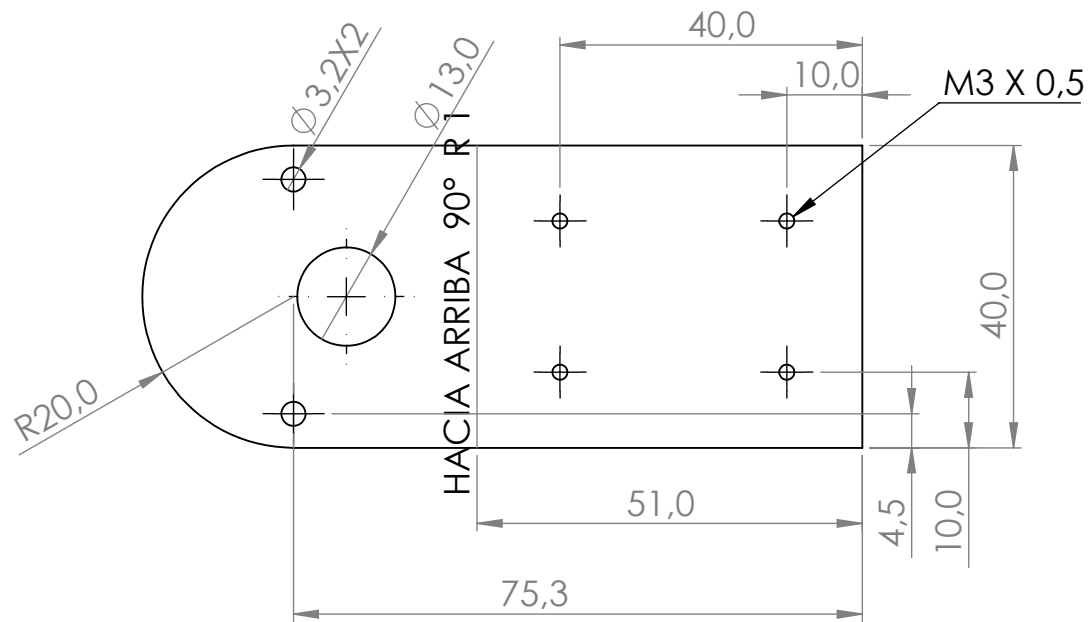
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			2. Portamotores regular		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 2 de 16	Material: Acero CR galvanizado calibre 18	Escala 1:3
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



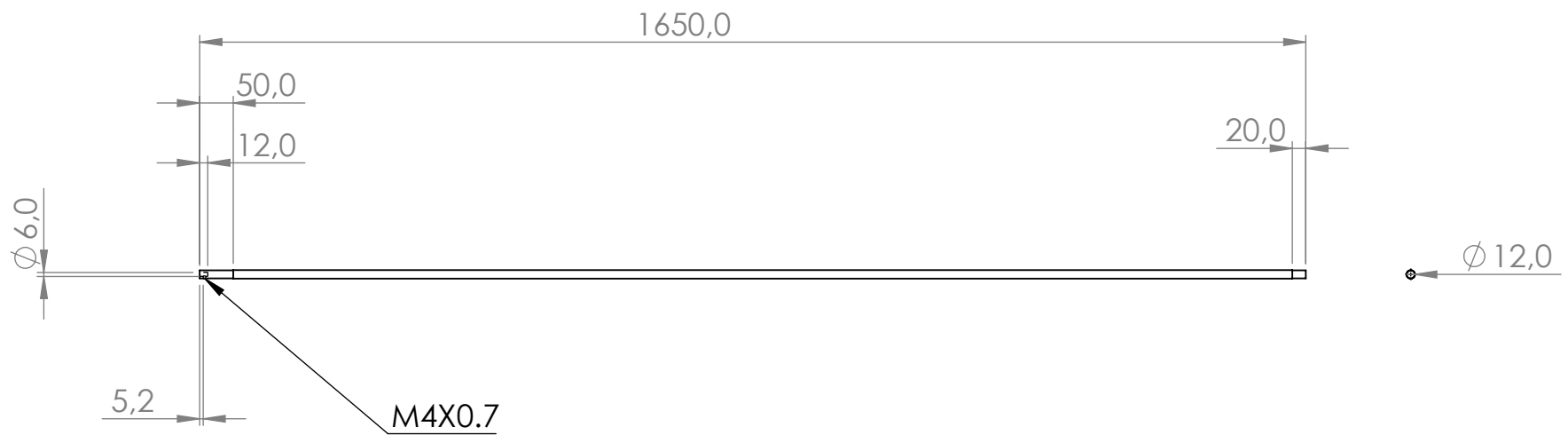
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			3. Portamotores invertido		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 3 de 16	Material: Acero CR galvanizado calibre 18	Escala 1:3
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



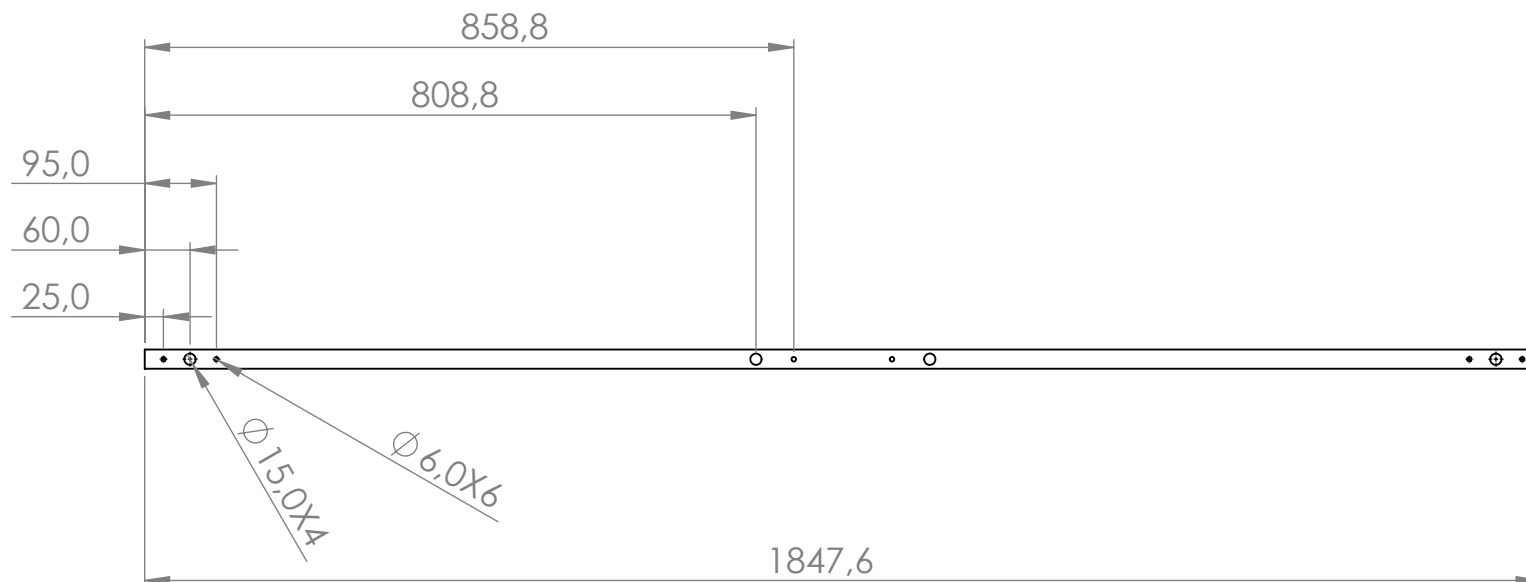
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			4. Estructura removible portaruedas		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 4 de 16	Material: Acero CR galvanizado calibre 18	Escala 1:3
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



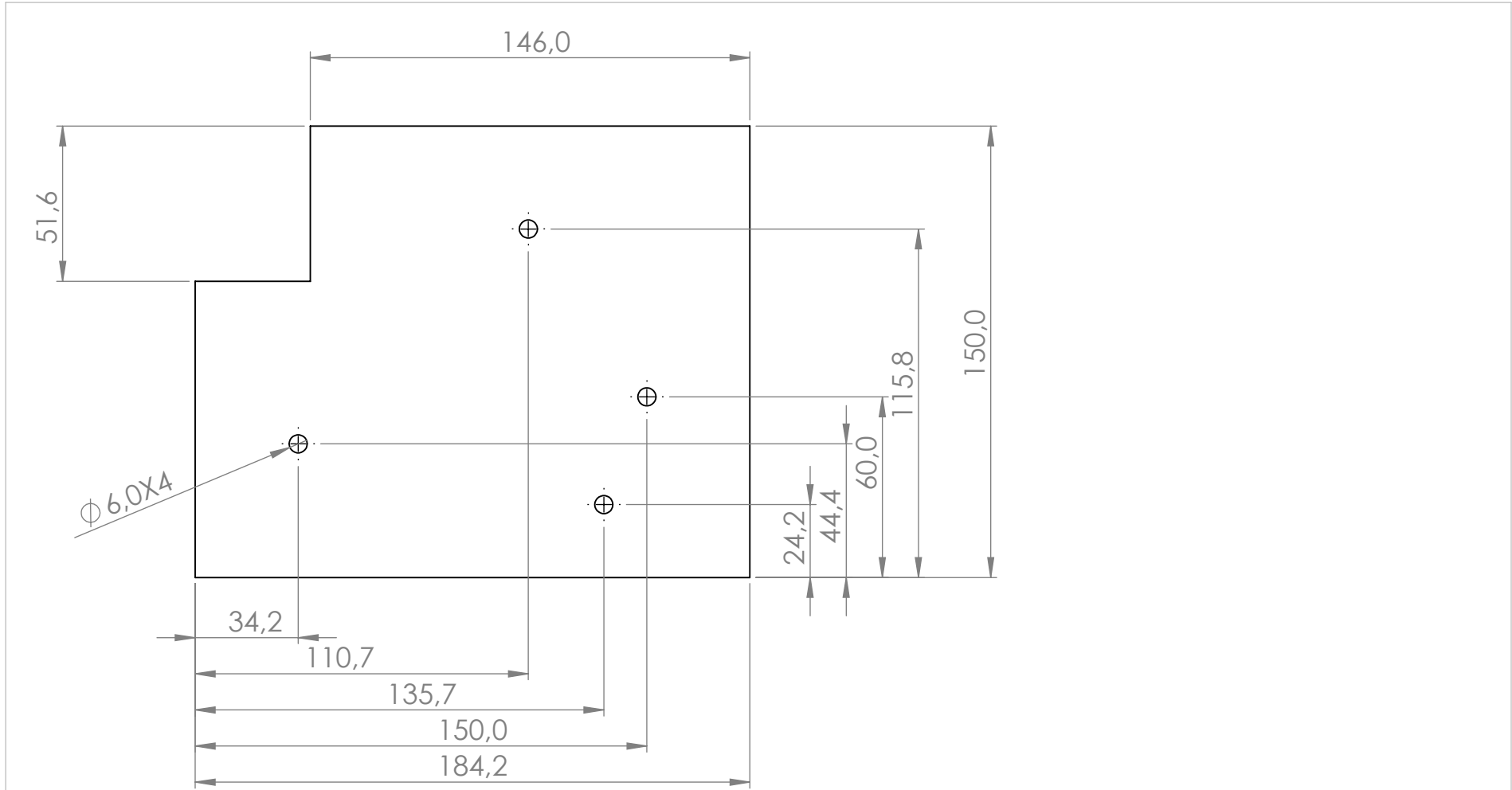
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			11. Estructura de sujeción motor cepillo		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 5 de 16	Material: Placa 3 mm ASTM A36	Escala 1:3
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



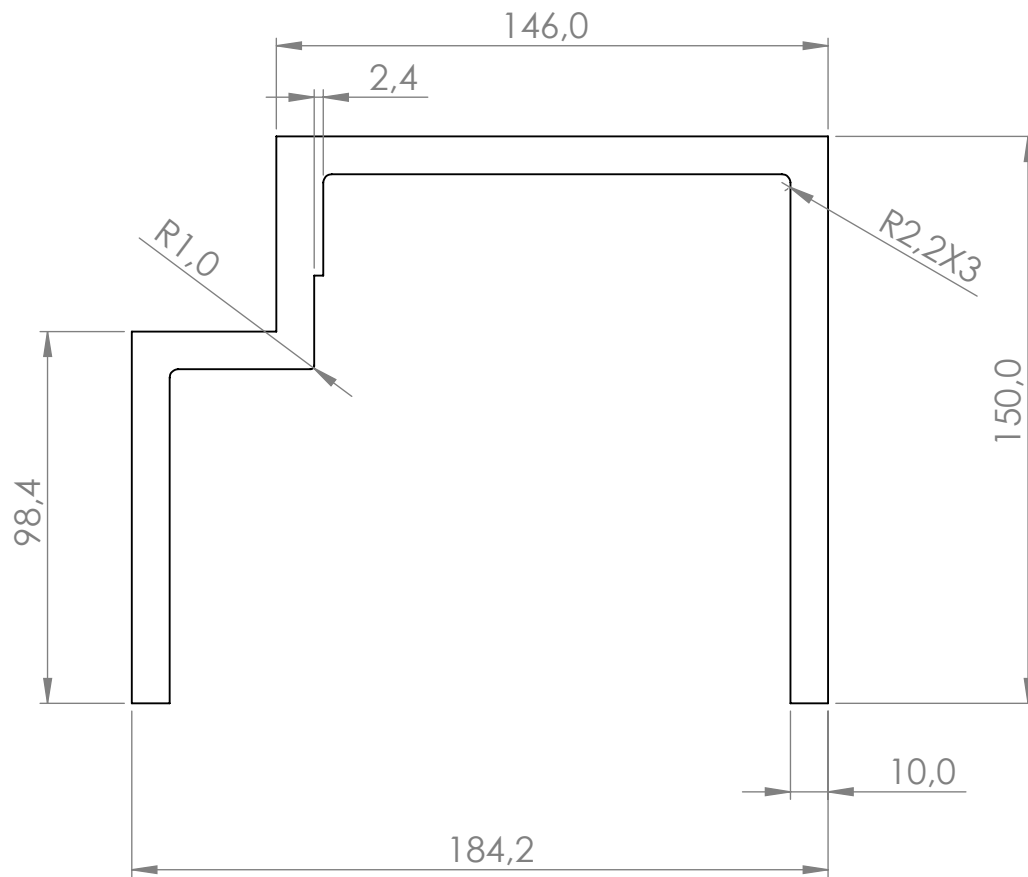
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			12. Eje escalonado del cepillo		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 6 de 16	Material: Eje de 1/2 in AISI 304	Escala 1:10
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



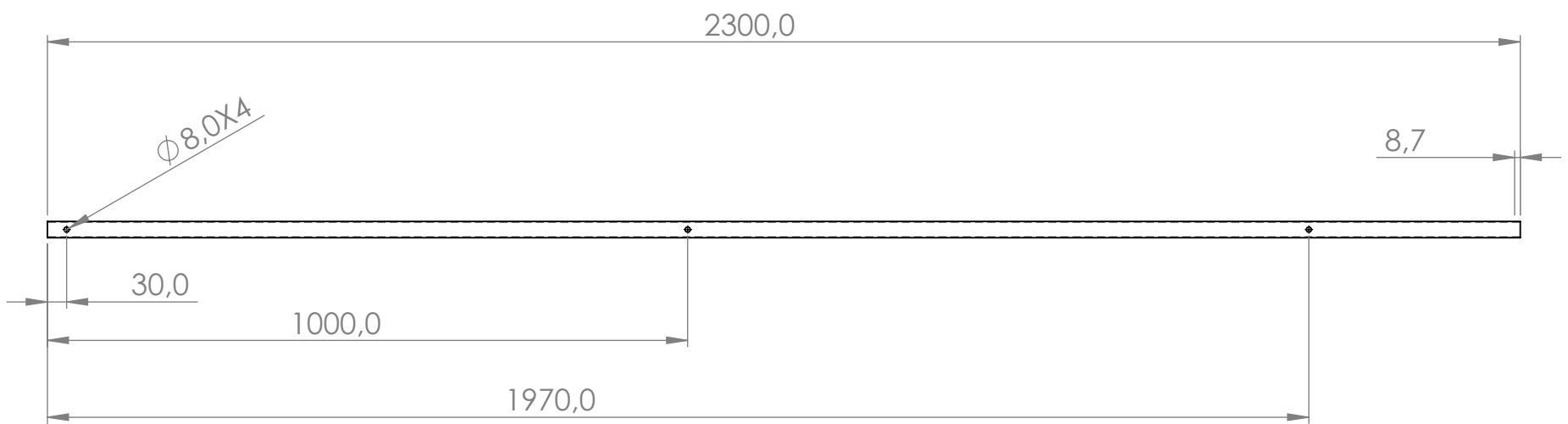
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			16. Tubería cuadrada viga de unión entre las dos secciones		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 7 de 16	Material: Tubería cuadrada 1 in calibre 18 ASTM A36	Escala 1:10
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



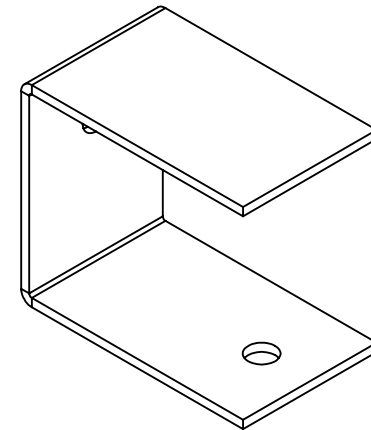
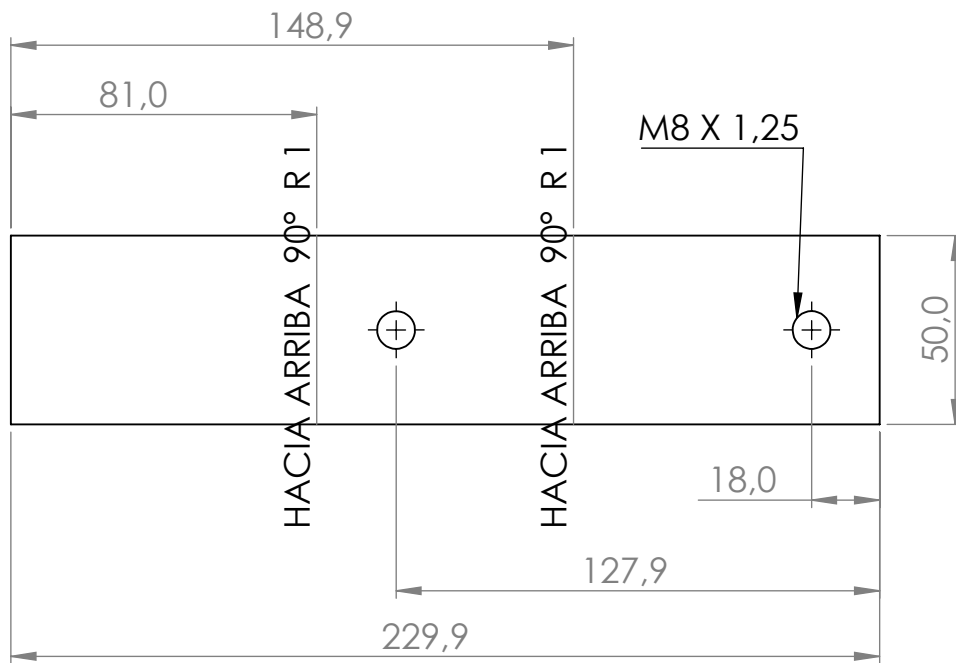
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			20. Interior de la tapa		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 8 de 16	Material: Placa de 3 mm ASTM A36	Escala 1:2
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			21. Borde de la tapa		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 9 de 16	Material: Placa 3 mm ASTM A36	Escala 1:2
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		

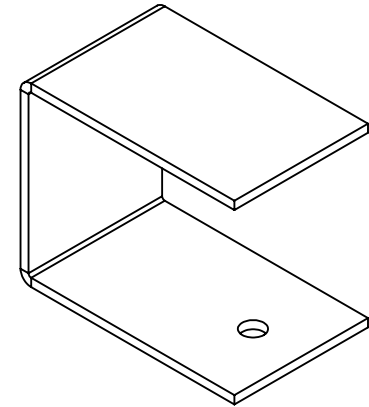
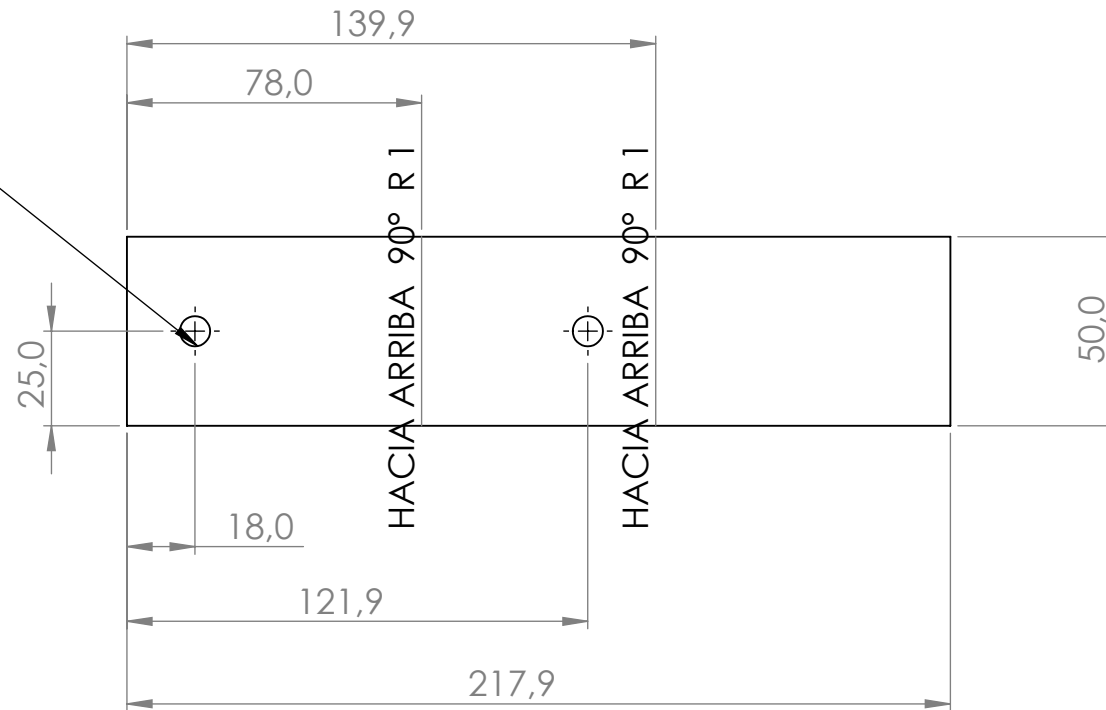


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			24. Riel de tubería cuadrada con tuerca soldada		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 10 de 16	Material: Tubería cuadrada 1 in calibre 18 ASTM A36	Escala 1:10
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		

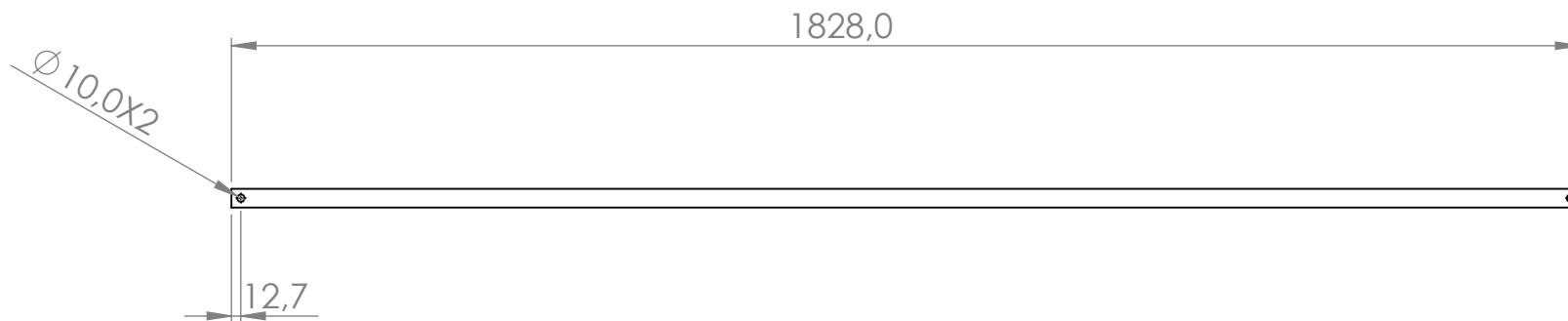


PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			25.1. Prensa en "c" exterior		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 11 de 16	Material: Placa 3 mm ASTM A36	Escala 1:2
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		

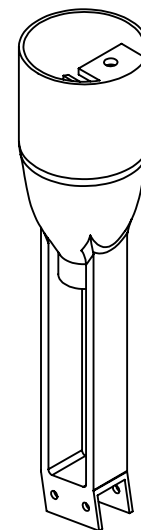
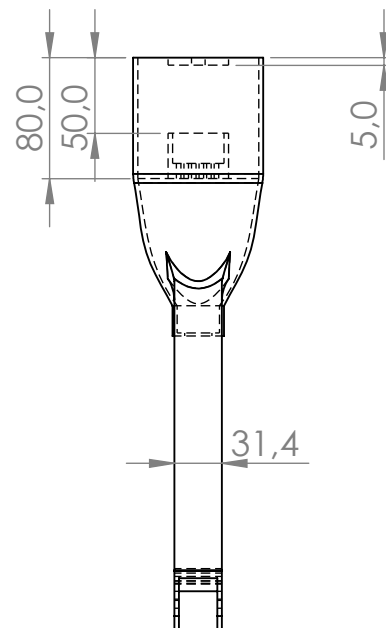
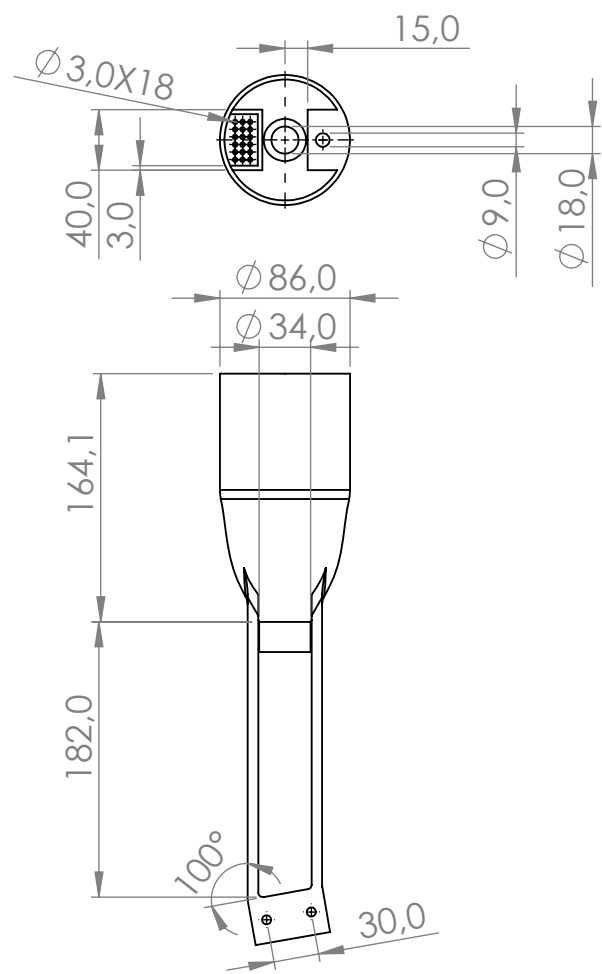
M8 X 1,25



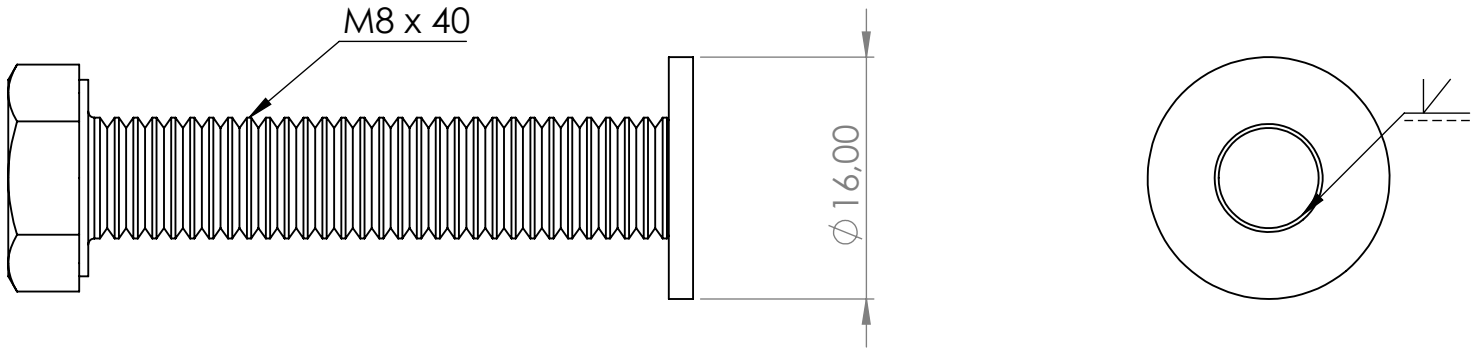
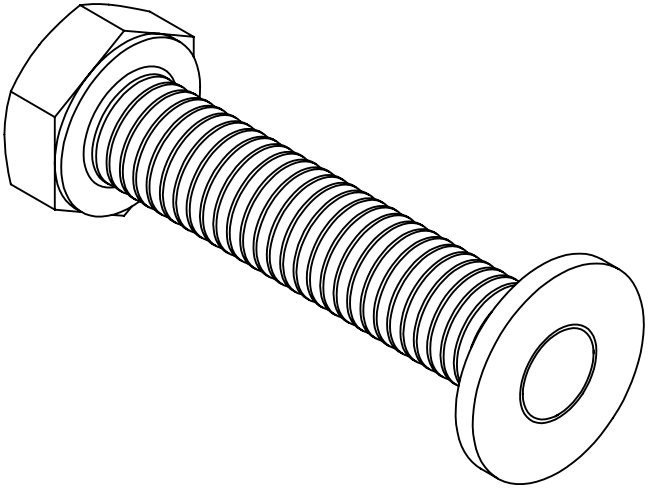
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			25.2. Prensa en "c" interior		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 12 de 16	Material: Placa 3 mm ASTM A36	Escala 1:2
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



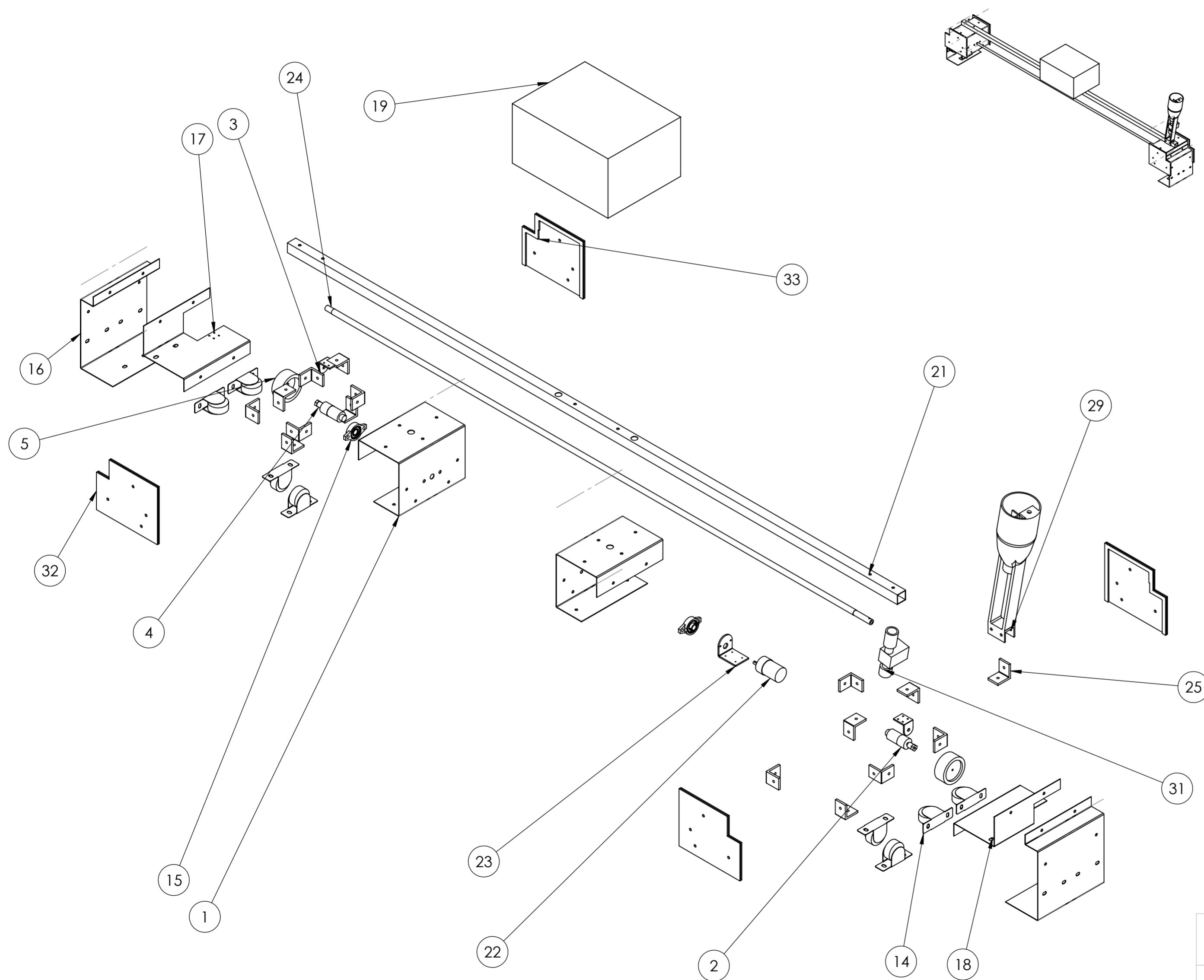
PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			28. Tubería cuadrada transversal para estructura de reposo		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 13 de 16	Material: Tubería cuadrada 1 in calibre 18 ASTM A36	Escala 1:10
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			29. Reservorio de jabón superior		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 14 de 16	Material: PLA	Escala 1:3
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			26. Tornillo M8 con arandela soldada a la punta		
Diseñó:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 15 de 16	Material: AISI 1045 bicromatado	Escala 2:1
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		



N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	REFERENCIA	CANTIDAD
1	1. Estructura principal	Plano 1	2
2	6. Motorreductor 6V DC 210 rpm	6V 10 kg*cm 210 rpm	2
3	7. Estructura de sujeción motorreductor		2
4	8. Buje de acople a llanta en cobre		2
5	9. Llanta motriz		2
6	24. Rieles de tubería cuadrada con tuercas soldadas	Tubería cuadrada 1 in ASTM A36	2
14	5. Rodamientos en plástico	Roller 1 3/4 in	8
15	14. Chumacera de pared KFL001	Eje de 12 mm	2
16	4. Estructura removible portarruedas	Plano 4	2
17	2. L portamotores regular	Plano 2	1
18	3. L portamotores invertida	Plano 3	1
19	23. Caja de componentes electrónicos	Roker PR 1010/136	1
20	28. Tubería cuadrada transversal para estructura de reposo	Tubería cuadrada 1 in ASTM A36	1
21	16. Tubería cuadrada viga de unión entre las secciones	Tubería cuadrada 1 in ASTM A36	1
22	10. Motorreductor de cepillo rotatorio	12V 17kg*cm 70 rpm	1
23	11. Estructura de sujeción de motor cepillo	Plano 5	1
24	12. Eje escalonado del cepillo	Plano 6	1
25	13. Eles de acople entre tapas		16
29	29. Reservorio de jabón superior	Plano 14	1
31	18. Electroválvula	FDP-270A 12V	1
32	20. Interior de la tapa	Plano 8	4
33	21. Borde de la tapa	Plano 9	4

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA			Vista explosionada del ensamblaje		
Diseño:	Daniel Sinisterra y Juan Solano	ISO E	P 16 de 16	Material: N/A	Escala 1:7
Revisó:		25/06/24	Uni: mm		